

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

ВК «Кузбасская ярмарка»



Посвящается 300-летию Кузбасса

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№ 7 - 2021

Главный редактор
д.т.н., проф. Фрянов В.Н.

Редакционная коллегия:
чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. Клишин В.И., д.т.н., проф. Никитенко С.М.,
д.т.н. Павлова Л.Д. (технический редактор), д.т.н., проф. Домрачев А.Н.,
д.э.н., проф. Петрова Т.В.

Н 340 Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов : науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2021. - № 7. – 400 с.

Рассмотрены аспекты развития инновационных наукоёмких технологий диверсификации угольного производства и обобщены результаты научных исследований, в том числе создание роботизированных и автоматизированных угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий, базирующиеся на использовании прорывных технологий добычи угля и метана, комплексной переработке этих продуктов в угледобывающих регионах и реализации энергетической продукции потребителям в виде тепловой и электрической энергии.

Журнал предназначен для научных и научно-технических работников, специалистов угольной промышленности, преподавателей, аспирантов и студентов вузов.

Номер подготовлен на основе материалов Международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов», проводимой в рамках специализированной выставки технологий горных разработок «Уголь России и Майнинг» (Новокузнецк, 1-4 июня 2021 г).

Основан в 2015 г.
Выходит 1 раз в год

Учредитель - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

УДК 622.2
ББК 33.1

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР	13
ГЕОМЕХАНИКА ОПОРНОГО ДАВЛЕНИЯ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ МОЩНОГО ПЛАСТА	15
Ройтер М., докт. Крах М., Кисслинг У., д.т.н. Векслер Ю.	15
Фирма Марко Системный анализ и разработки гмбх, г. Дахау, Германия.....	15
СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ	
МАССИВА ВОКРУГ ЗАБОЕВ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК	19
Ройтер М., докт. Крах М., Кисслинг У., д.т.н. Векслер Ю.	19
Фирма Марко Системный анализ и разработки гмбх, г. Дахау, Германия.....	19
МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВАЯ БАЗА КУЗБАССА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ С	
РОБОТИЗИРОВАННЫМ ВЫПУСКОМ УГЛЯ ПОДКРОВЕЛЬНОЙ ТОЛЩИ	24
чл.-корр. РАН Клишин В.И., к.т.н. Кузнецова Л.В., к.т.н. Анфёров Б.А.	24
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия	24
КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА ГИДРООБРАБОТКИ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА	
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМИ И ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ.....	31
член-корр. РАН Клишин В.И., д.т.н. Шадрин А.В., Телегуз А.С. Федеральный	
исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия	31
СХЕМА ОПЕРАТИВНОГО РАЗУПРОЧНЕНИЯ ПОРОД ОСНОВНОЙ КРОВЛИ ПЛАСТА ИЗ	
ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННОГО ГИДРОРАЗРЫВА	35
¹ член-корр. РАН Клишин В.И., ¹ к.т.н. Опрук Г.Ю., ¹ Телегуз А.С., ² Галкин А.В., ³ Буянов К.А.	
.....	35
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия ..	35
2 - АО «ТопПром», г. Новокузнецк, Россия	35
3 - ООО «Шахта «Юбилейная», г. Новокузнецк, Россия	35
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НДС МАССИВА С ГРАВИТАЦИОННО-	
ТЕКТОНИЧЕСКИМ ПОЛЕМ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ	
НАПРЯЖЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК	39
д.ф.-м.н. С.В.Лавриков, д.ф.-м.н. А.Ф.Ревуженко.....	39
Институт горного дела им. Н.А.Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия.....	39
К РАСЧЕТУ НЕУСТОЙЧИВЫХ РЕЖИМОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ	
АКТИВНОГО МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ ФРОНТА ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ	43
д.ф.-м.н. Лавриков С.В.	43
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия	43
ЛАГОВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ПРОЕКТНОЙ МОЩНОСТИ	
ЗОЛОТОРУДНОГО КАРЬЕРА «БРЕКЧИЯ»	50
^{1,2} д.т.н. А.А. Ордин, ³ И.В. Васильев.....	50
1 – Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия	50
2 - ООО «НПЦ ВостНИИ», г. Кемерово, Россия.....	50
3 - ООО «Сибгипрошахт», г. Новосибирск, Россия.....	50
ОРИЕНТАЦИЯ ТРЕЩИН НАПРАВЛЕННОГО ГИДРОРАЗРЫВА И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ	
ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД.....	55
д.т.н. Сердюков С.В., Азаров А.В.	55
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия	55
ФОРМА ТРАЕКТОРИИ ДИСКОВОЙ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА ОКОЛО ПЛАСТОВОЙ	
ВЫРАБОТКИ	61
¹ д.т.н. Черданцев Н.В., ² д.т.н. Черданцев С.Н.	61
1 - Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия.....	61
2 - АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной	
отрасли» (АО «НЦ ВостНИИ»), г. Кемерово, Россия.....	61
ЛОКАЛИЗАЦИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ДОМЕНОВ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ.....	66
¹ д.т.н. Рогова Т.Б., ² д.т.н. Шаклеин С.В. ² д.т.н. Писаренко М.В.....	66
1 - Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово,	
Россия	66
2 - Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово, Россия	66
ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ СЫРЬЕВОЙ УГОЛЬНОЙ БАЗЫ КУЗБАССА.....	70

¹ д.т.н. С.В. Шаклеин, ² д.т.н. Т.Б. Рогова, ¹ д.т.н. М.В. Писаренко.....	70
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия	70
2 – Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,.....	70
г. Кемерово, Россия	70
АНАЛИЗ ОТКРЫТО-ПОДЗЕМНОГО СПОСОБА РАЗРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ	
МЕСТОРОЖДЕНИЙ КУЗБАССА.....	73
д.т.н. Федорин В.А., к.т.н. Шахматов В.Я., к.т.н. Опрук Г.Ю., Кузнецова Е.И.	73
Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН,.....	73
г. Кемерово, Россия	73
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИТОТИПОВ УГЛЕЙ	
КУЗБАССА	76
к.х.н. Семенова С.А., д.х.н. Патраков Ю.Ф., д.т.н. Майоров А.Е.	76
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия	76
О ПЕРСПЕКТИВАХ РАЗВИТИЯ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ КЕМЕРОВСКОЙ	
ОБЛАСТИ	82
д.т.н. Прошунин Ю.Е.	82
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	82
О РАЗВИТИИ ТЕХНОЛОГИЙ ГЛУБОКОЙ И ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ	
КАМЕННЫХ И БУРЫХ УГЛЕЙ.....	88
д.т.н. Прошунин Ю.Е.	88
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	88
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА	
ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ БАЛАНСОВ	94
к.э.н. Новоселов С.В.,.....	94
г. Кемерово, Россия	94
ПЕРЕРАБОТКА ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ КУЗБАССА С ИЗВЛЕЧЕНИЕМ	
РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	96
Головачев А.А., к.х.н. Черкасова Е.В.	96
Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово,	
Россия	96
ОБОСНОВАНИЕ МИНИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА ИЗ	
МОНОЛИТНОГО АРМИРОВАННОГО БЕТОНА В ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ	
ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОНТАЖНОЙ МАШИНЫ ТИПА RETITTO MULE HAUL	99
Бубнов К.А., к.т.н. Новиньков А.Г., Заволокина Е.А.....	99
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачёва г. Кемерово, Россия	
.....	99
ВЛИЯНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД В РАЙОНЕ	
ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ НА УДАРООПАСНОСТЬ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	103
д.т.н. Лобанова Т.В., к.т.н. Линдин Г.Л., Лобанов С.А.....	103
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	103
ОЦЕНКА ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНОВ	
КУЗБАССА	110
¹ к.т.н. Исаченко А.А., ² к.т.н. Петрова Т.В.....	110
1 - филиал «Шахта «Ерунаковская-VIII» АО «ОУК «Южкузбассуголь», г. Новокузнецк, Россия	
.....	110
2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	110
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ПЛОЩАДИ ОБНАЖЕНИЯ НЕЗАКРЕПЛЕННОЙ ЧАСТИ	
КРОВЛИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ ООО «ШАХТА	
«АЛАРДИНСКАЯ»	114
Никитина А.М., Борзых Д.М., Риб С.В., Лесных А.С.....	114
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	114
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ	
ПРИКОНТУРНОГО МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ ПРОВОДИМОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ	
.....	119
Никитина А.М., Борзых Д.М., Риб С.В., Лесных А.С.....	119
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	119
ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИЙ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ	
МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ США С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ	
СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ.....	123

^{1,2} д.т.н. Зеньков И.В.	123
1 - Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия.....	123
2 - Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия	123
ПРИМЕНЕНИЕ БЕТОНА ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА В ТЕХНОЛОГИИ БЕСТРАНШЕЙНЫХ МЕТОДОВ ПРОВЕДЕНИЯ КОММУНИКАЦИЙ	128
к.т.н. Корнеев В.А., к.т.н. Корнеева Е.В., Корнеев П.А., Кулебакин И.И.	128
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	128
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОТРАБОТКИ МОЩНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ НА ШАХТАХ ЮЖНОГО КУЗБАССА	130
Варгольских А.А.	130
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачёва», г. Кемерово, Россия	130
ГОРНЫЕ МАШИНЫ И ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ.....	133
ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОМПЛЕКСОВ ГЛУБОКОЙ РАЗРАБОТКИ УГЛЯ МЕТОДАМИ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ	135
¹ Копытин Д.В., ¹ д.т.н. Тациенко В.П., ^{1,2,3} д.т.н. Герике Б.Л., ¹ к.т.н. Дрозденко Ю.В., ⁴ к.т.н. Артамонов П.В.	135
1 – Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия	135
2 – Прокопьевский филиал КузГТУ, г. Прокопьевск, Россия.....	135
3 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия	135
4 – Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия	135
ОБ ОДНОМ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕДУКТОРОВ ГОРНЫХ МАШИН.....	141
¹ к.т.н. Герике П.Б., ^{1,2} д.т.н. Герике Б.Л.....	141
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия	141
2 – Прокопьевский филиал КузГТУ, г. Прокопьевск, Россия.....	141
ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	147
к.т.н. Абрамов И.Л.	147
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия	147
ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОРПУСОВ РАБОЧИХ КОЛЕС ШАХТНЫХ ОСЕВЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ СКОРОСТЯХ ВРАЩЕНИЯ..	149
Панова Н.В., к.т.н.	149
Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия	149
НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗГРУЗКИ СМЕРЗШЕГОСЯ УГЛЯ ИЗ ОТКРЫТЫХ ПОЛУВАГОНОВ.....	152
¹ к.т.н. Куликова Е.Г., ² к.т.н. Левенсон	152
1 – Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия	152
2 – Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия	152
РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ПРИВОДА ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЫ, РАБОТАЮЩЕЙ НА СДВИГ	157
¹ д.т.н. Никитин А.Г., ¹ Шабунев М.Е., ¹ Курочкин Н.М., ² к.т.н. Баженов И.А.	157
1 - Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	157
2 - Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.....	157
ПСЕВДОХАОТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ.....	160
д.т.н. Никитин А.Г., к.т.н. Тагильцев-Галета К.В., к.ф.-м.н. Лактионов С.А.	160
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	160
РАЗРАБОТКА ПРОЦЕДУРЫ ВОЗВРАТА ИНВЕСТИЦИЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ ГОСУДАРСТВЕННО-ЧАСТНОГО ПАРТНЕРСТВА В АВТОДОРОЖНОМ КОМПЛЕКСЕ	162
¹ д.т.н. Новичихин А.В., ² Буйвис В.А.	162

1 - Петербургский государственный университет путей сообщения, г. Санкт-Петербург, Россия	162
2 - Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	162
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО РЕМОНТУ ГОРНЫХ МАШИН В УСЛОВИЯХ РЫНОЧНОЙ ЭКОНОМИКИ	167
^{1,2} д.т.н. Зеньков И.В.	167
1 - Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия.....	167
2 - Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия	167
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ И ЛОГИСТИКИ УГОЛЬНЫХ ПОТОКОВ В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ШТАТА ТЕХАС В США.....	170
^{1,2} д.т.н. Зеньков И.В.	170
1 - Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия.....	170
2 - Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия	170
ЭКСПЛУАТАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕШЕНИЯ ПРИ СЕРВИСНОМ ТЕХНИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ И РЕМОНТЕ БОЛЬШЕГРУЗНОЙ ТЕХНИКИ КОМПАНИИ ООО «МАЙНТЕК МАШИНЕРИ».....	174
д.т.н. Булакина Е.Н., Недзельская О.Н., Бикинеева А.Н., Моисеев В.В., Почуфаров Д.О., Кетов А.В.	174
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия	174
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТОРА «ИЗНОС» В ПРИВОДНЫХ ЕДИНИЦАХ ПРИ РАБОТЕ ШАХТНЫХ ПОДВЕСНЫХ МОНОРЕЛЬСОВЫХ ДИЗЕЛЕВАЗОВ.....	179
к.э.н. Новоселов С.В.	179
г. Кемерово, Россия	179
ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИТАНА НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НАПЛАВЛЕННОГО ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ СИСТЕМЫ Fe-C-SI-MN-CR-MO-NI СЛОЯ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ИЗНОСА	182
д.т.н. Козырев Н.А., к.т.н. Усольцев А.А., к.т.н. Кибко Н.В., Михно А.Р., к.т.н. Козырева О.А. ..	182
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	182
ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ И СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ	187
д.т.н. Юрьев А.Б., Шевченко Р.А., д.т.н. Козырев Н.А., Михно А.Р., к.и.н. Гутак О.Я.	187
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	187
НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПЛАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	192
к.т.н. Усольцев А.А., д.т.н. Козырев Н.А., Михно А.Р., к.т.н. Крюков Р.Е., Шевченко Р.А.	192
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	192
ВЛИЯНИЕ ВВЕДЕНИЯ ПОРОШКА ТИТАНА В СОСТАВ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ НАПЛАВКИ ПОД СЛОЕМ ФЛЮСА ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	196
д.т.н. Козырев Н.А., Михно А.Р., к.т.н. Усольцев А.А., к.т.н. Крюков Р.Е., д.т.н. Гизатулин Р.А.	196
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	196
ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГОРНОШАХТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО УДАРНО-АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА, ПУТЕМ НАПЛАВКИ	199
Гусев А.И., д.т.н. Козырев Н.А., к.т.н. Усольцев А.А., к.т.н. Крюков Р.Е., Михно А.Р.	199
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	199
ОЦЕНКА ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТА ПОЕЗДА «САПСАН» НА ТВЕРДОПОЛИМЕРНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПЛАТИНО- НИКЕЛЕВЫЙ КАТАЛИЗАТОР	205
О.В. Шугаев, Т.П. Воскресенская, М.Г. Дружинина	205
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	205

РОБОТИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	211
РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНОМ ГЕОМАССИВЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ БЕЗОПАСНОЙ ПОДЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ	213
Павлова Л.Д., Фрянов В.Н.	213
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	213
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ	216
Фрянов В.Н., Исаченко А.А., Петрова О.А.	216
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	216
ОСОБЕННОСТИ ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОКОМПЛЕКСНОГО РАСПРЕДЕЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	221
¹ Макаров Г.В., ¹ Мышляев Л.П., ¹ Саламатин А.С., ¹ Грачев В.В., ² Вдовиченко В.М.	221
¹ ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия	221
² ООО «Омрон Электроникс», г. Москва, Россия	221
ЦИФРОВИЗАЦИЯ – ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ	225
¹ д.т.н. Мышляев Л.П., ² к.т.н. Венгер К.Г., ³ к.т.н. Грачев В.В.	225
1 – ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия	225
2 – ООО «РТ-СтройИнжиниринг», г. Москва, Россия	225
3 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	225
ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК: ПОНЯТИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ	227
¹ Коровин Д.Е., ¹ к.т.н. Грачев В.В., ² д.т.н. Мышляев Л.П., ² Иванов Д.В., ² Кулюшин Г.А., ² Загидулин И.Р., ² Свинцов М.М., ² Макаров Г.В.	227
1 - Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	227
2 - Научно-исследовательский центр систем управления, г. Новокузнецк, Россия	227
МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КВАДРАТИЧНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДЕГАЗАЦИОННЫХ И ГАЗООТСАСЫВАЮЩИХ ТРУБОПРОВОДОВ	232
Колегов Г.А.	232
Томский государственный университет, г. Томск, Россия	232
МЕТОДОЛОГИЯ УЧЁТА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫРАБОТАННЫХ ПРОСТРАНСТВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ С ЦЕЛЬЮ ИХ ВКЛЮЧЕНИЯ В МОДЕЛИ ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ.....	238
Колегов Г.А.	238
Томский государственный университет	238
г. Томск, Россия.....	238
РАЗРАБОТКА ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ СМЕРЗШЕГОСЯ В ВАГОНЕ УГОЛЬНОГО СЫРЬЯ НА УСТАНОВКЕ ДЛЯ ЕГО РАЗМОРОЗКИ.....	243
д.т.н. Рыбенко И.А., к.т.н. Сеченов П.А., д.т.н. Калашников С.Н.	243
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	243
РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ	246
д.т.н. Рыбенко И.А., к.т.н. Буинцев В.Н., к.т.н. Ермакова Л.А.	246
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	246
ПРЕДОБРАБОТКА ДАННЫХ С ДАТЧИКОВ АЭРОГАЗОВОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ОТРАБОТКЕ ГАЗОНОСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ДЛЯ НЕЙРОСЕТЕВОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ	250
Дворянчиков М.В., д.т.н. Павлова Л.Д.	250
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	250
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА СЕТЕВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ	253
Ефимов Н.Ю., Завьялов Ю. А., Свинцов М.М., Тишанинов Ю.Ю., к.т.н. А.В. Зимин	253
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	253
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА СЕТЕВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ.....	258

¹ к.т.н. А.В. Зимин, ² д.т.н. И.В. Буркова, ³ А.А. Селезнев, ¹ д.т.н. В.В. Зимин, ...	258
1 - Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	258
2 - Институт проблем управления РАН, г. Москва, Россия	258
3 – ООО «ТК-СДН», г. Новосибирск, Россия.....	258
РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ В ЦЕПИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНОГО ПОДЪЕМА.....	262
Островляничик В.Ю., Поползин И.Ю., Кубарев В. А., Маршев Д.А.	262
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	262
АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ В ЦЕПИ РОТОРА.....	266
Островляничик В.Ю., Поползин И.Ю., Кубарев В. А., Маршев Д.А.	266
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	266
ПРЕДИКТИВНАЯ ДИАГНОСТИКА ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ	272
¹ Аниканов Д.С., ² к.т.н. Кипервассер М.В., ² к.т.н. Симаков В.П.	272
1 – ООО «СИБШАХТОСТРОЙ», г. Новокузнецк, Россия.....	272
2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	272
ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ	277
к.т.н., Кипервассер М.В., к.ф.-м.н. Лактионов С.А.	277
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	277
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЛИТЫХ И СВАРНЫХ ИЗДЕЛИЙ ГОРНОШАХТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	281
к.т.н. Князев С. В., к.т.н. Усольцев А.А., к.т.н. Куценко А.И., Ознобихина Н.В.	281
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	281
СОЗДАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ КАСТОМИЗИРОВАННОГО МЕЛКОСЕРИЙНОГО ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ	283
к.т.н. Князев С.В., к.т.н. Куценко А.И., к.т.н. Усольцев А.А., Соколов Б.М.	283
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	283
ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ОБОРУДОВАНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ И ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	286
к.т.н. Князев С.В., к.т.н. Усольцев А.А., к.т.н. Куценко А.И., к.т.н. Куценко А.А.	286
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	286
РАЗРАБОТКА ТЕСТОВОГО ТРЕХМЕРНОГО РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА И МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ОПЕРАТОРА ПРИ РАБОТЕ В ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЕ	288
¹ к.т.н. Никитенко М.С., ¹ Кизилев С.А., ² д.м.н. Тарасова И.В., ³ к.б.н. Игнатова А.Ю., ¹ Натура Е.С.	288
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия	288
2 – Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний, г. Кемерово, Россия	288
3 – Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева. г. Кемерово, Россия	288
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСТАВОК ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СТРАНАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ВОСТОЧНОЙ ЕВРОПЫ С ИЗБЫТОЧНОЙ УГОЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ.....	293
^{1,2} д.т.н. Зеньков И.В.	293
1 - Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия.....	293
2 - Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия	293
ПРОМЫШЛЕННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	297
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВЫБРОСООПАСНЫХ ЗОНАХ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ ПРОХОДКЕ ВЫРАБОТОК.....	299

^{1,3} Разумов Е.Е., ¹ д.т.н. Простов Сергей Михайлович, ² Рахматуллаев Р.Р., ³ Панин С.Ф.	299
1 – Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия	299
2 – АО «АрселорМиттал Темиртау», г. Караганда, Республика Казахстан	299
3 – Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Россия.....	299
ЭМИССИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В СЕКТОРЕ «ЭНЕРГЕТИКА»	302
д.т.н. Тайлаков О.В., к.т.н. Застрелов Д.Н., Лукина Е.В., Снетова Е.С.	302
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия	302
ИЗУЧЕНИЕ ПОРОД КРОВЛИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА СРЕДСТВАМИ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ.....	305
д.т.н. Тайлаков О.В., к.т.н. Застрелов Д.Н., Салтымаков Е.А., Соколов С.В.	305
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия	305
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД	311
д.т.н., Тайлаков О.В., Смыслов А.И., Таюрский М.А., Колесниченко С.Е.	311
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия	311
ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ДЕГАЗАЦИОННЫХ СКВАЖИН В ШАХТНЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ	315
д.т.н. Тайлаков О.В., к.т.н. Застрелов Д.Н., Салтымаков Е.А., Колесниченко С.Е.....	315
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия	315
АНАЛИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ПРОТЕКАНИЕМ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ С КОНЕЧНЫМИ СКОРОСТЯМИ	318
д.т.н. С.В. Черданцев, к.т.н. П.А. Шлапаков, к.т.н. С.И. Голоскоков, Д.Н. Батраков, В.В. Колыхалов, Е.А. Шлапаков, С.А. Хаймин	318
АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» (АО «НЦ ВостНИИ»), г. Кемерово, Россия.....	318
МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЯ ВЫБРОСОПАСНОСТИ СПЕКТРАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ПРОГНОЗА	324
д.т.н. Шадрин А.В., чл.-корр. РАН Клишин В.И., Дилюк Ю. А.	324
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия	324
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УЧАСТКОВ ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОД С ИЗМЕНЕННЫМИ ФИЛЬТРАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ В КРОВЛЕ ВЫЕМОЧНОГО СТОЛБА НА ОСНОВЕ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ	329
¹ д.т.н. Тайлаков О.В., ¹ к.т.н. Застрелов Д.Н., ¹ Колесниченко С.Е., ² Соколов С.В., Роут Г.Н.	329
1 - Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН.....	329
2 - Кузбасский технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия.....	329
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ.....	333
д.т.н. Тайлаков О.В., к.т.н. Макеев М.П., Соколов С.В., Колмакова А.А.	333
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия	333
ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА И МЕТАНА В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ.....	336
д.т.н. О.В. Тайлаков, к.т.н. Д.Н. Застрелов, к.т.н. Е.А. Уткаев, к.т.н. М.П. Макеев	336
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия	336
ОЦЕНКА ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ НА ПРИМЕРЕ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ	339
д.т.н. Тайлаков О.В., к.т.н. Застрелов Д.Н., Снетова Е.С.	339
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия	339
КИНЕТИКА АДСОРБЦИИ КИСЛОРОДА ГАЗОНАСЫЩЕННЫМИ УГЛЯМИ	341
д.т.н. С.П. Греков, к.т.н. В.П. Орликова.....	341
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор», г. Донецк	341
НОВЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗУ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ.....	345
¹ Караблин М.М., ² д.т.н. Простов С.М.	345

1 - ОАО «Кузбассгипрошахт», Россия, г. Кемерово	345
2 - Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия	345
ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ОТРАБОТКИ ВЕСЬМА МОЩНЫХ ПОЛОГИХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ НА ШАХТАХ КУЗБАССА	352
¹ Разумов Е.А., ¹ Венгер В.Г., ² к.т.н. Пудов Е.Ю., ¹ д.т.н. Калинин С.И.	352
1 – Филиал СФ АО «ВНИМИ», г. Прокопьевск, Россия	352
2 – Филиал КузГТУ, г. Прокопьевск, Россия	352
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКИХ КУПОЛОВ В ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТКАХ И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ КУПОЛОВ И АНКЕРНОЙ КРЕПИ ДЛЯ КРЕПЛЕНИЯ КУПОЛОВ.....	356
¹ Венгер В.Г., ¹ Разумов Е.А., ² к.т.н. Пудов Е.Ю., ¹ д.т.н. Калинин С.И.	356
1 – Филиал СФ АО «ВНИМИ», г. Прокопьевск, Россия	356
2 – Филиал КузГТУ, г. Прокопьевск, Россия	356
ПОСТРОЕНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ	360
к.т.н. Волошин В.А., Сабилов Р.М., Петров В.И., Балачев С.Н.	360
Филиал СФ АО «ВНИМИ», г. Прокопьевск, Россия	360
ВЕДЕНИЕ МОНИТОРИНГА СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРА НА ШАХТАХ ЮГА КУЗБАССА	364
¹ Мулев С.Н., ² Разумов Е.А., ¹ к.т.н. Волошин В.А.	364
1 – АО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Россия.....	364
2 – Филиал СФ АО «ВНИМИ», г. Прокопьевск, Россия	364
КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ СОРБЦИИ ГАЗА В КОНЕЧНОМ ОБЪЕМЕ УГЛЯ	368
Немцев А.Ю., д.т.н. Калашников С.Н.	368
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	368
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ РЕАКЦИИ АЛКИЛИРОВАНИЯ БЕНЗОЛА	371
д.т.н. Калашников С.Н., Бабушкина О.С., Гаун М.А.	371
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	371
АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАДИЦИОННЫХ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ДЕГАЗАЦИИ ВЫСОКОГАЗОНОСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ	374
Крестьянинов А.В., Шмаков И.К., к.т.н. Васильев П.В.	374
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	374
ИНТЕГРАЛЬНЫЙ МЕТОД ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ.....	379
к.э.н. Новоселов С.В.	379
г. Кемерово, Россия	379
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА ОБЪЕМНОГО ОКРАШИВАНИЯ ИЗ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ	382
д.т.н. Столбоушкин А.Ю., Акст Д.В., Истерин Е.В., к.т.н. Фомина О.А.	382
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....	382
РЕЗУЛЬТАТЫ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ЭКОЛОГИИ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ НА БОГОСЛОВСКОМ УГОЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ.....	386
^{1,2} д.т.н. Зеньков И.В.	386
1 - Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия.....	386
2 - Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия	386
ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ НА ЮЖНОМ УРАЛЕ НА ОТРАБОТАННЫХ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ.....	389
^{1,2} д.т.н. Зеньков И.В.	389
1 - Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия.....	389

2 - Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия	389
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ В ОЦЕНКЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ЭКОЛОГИИ НА ТЕРРИТОРИЯХ ОТРАБОТАННЫХ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА СРЕДНЕМ И ЮЖНОМ УРАЛЕ	391
^{1, 2} д.т.н. Зеньков И.В.	391
1 - Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия.....	391
2 - Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия	391
ОЦЕНКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА РЕКУЛЬТИВИРОВАННЫХ УЧАСТКАХ ОТХОДАМИ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ В КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ-КУЗБАССЕ.....	394
¹ к.б.н. Семина И.С., ² к.б.н. Соловьев С.В., ² д.б.н. Андроханов В.А., ¹ к.с-х.н. Шпилова А.М.....	394
1 - Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия	394
2 - Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия	394

ГЕОТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР

ГЕОМЕХАНИКА ОПОРНОГО ДАВЛЕНИЯ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ МОЩНОГО ПЛАСТА**Ройтер М., докт. Крах М., Кисслинг У., д.т.н. Векслер Ю.****Фирма Марко Системный анализ и разработки гмбх, г. Дахау, Германия**

Аннотация. На основе решения задачи теории ползучести с большими деформациями установлено влияние механизма удержания поверхности забоя мощного пласта на напряженное состояние и разрушение пласта в зоне опорного давления лавы. Показана возможность инициирования динамического проявления горного давления при обрушении кровли в выработанном пространстве лавы.

Ключевые слова: лава, механизм удержания поверхности забоя, отжим пласта, трещиноватая зона, плотность энергии.

При разработке угольных пластов на шахтах Китая большое внимание уделяется разработке методов прогноза состояния очистных забоев. Одним из таких методов является математическое моделирование, позволяющее установить влияние факторов, определяющих устойчивость забоев, формирование и развитие очагов разрушения в пласте и окружающем массиве горных пород, параметры устройств поддержания устойчивости забоя. Фирмой Марко проведены расчеты геомеханического состояния очистных забоев на пластах мощностью 4, 6 и 8 метров при их выемке на полную мощность в сложных условиях шахт в Китае – при большой прочности угля и вмещающих пород и максимальных длинах зависающей консоли кровли.

Полученные результаты, сопоставленные с реальной ситуацией в действующей лаве, позволят прогнозировать геомеханическое состояние последующих лав.

При решении задач о геомеханическом состоянии массива горных пород вокруг очистных выработок необходимо рассматривать процессы во времени и учитывать большие деформации пород вокруг них.

Учет фактора времени необходим, поскольку после прохода комбайна и обнажения забоя и возникновения упруго-пластических деформаций в пласте дальнейшее деформирование массива продолжается, свидетельством чего является постоянная акустическая эмиссия массива и изменение состояния призабойной зоны пласта.

Расчет больших деформаций выработок необходим, поскольку их фактические деформации значительно превышают упруго-пластические, например, деформации забоя лавы в ряде случаев более чем на 9 %. Смещения контура выработок могут превышать на 1 – 2 порядка смещения, рассчитанные по теории малых деформаций [1]. Учет веса пород [2] повышает достоверность информации о состоянии массива, но проблему расчета с малыми деформациями не решает.

Постановка задачи. Оценка геомеханического состояния призабойной части пласта производится путем решения плоской задачи теории ползучести с большими деформациями. Метод изложен в работах [3, 4]. Задача решается методом конечных элементов по программе фирмы Марко с учетом физико-механических свойств пласта и вмещающих пород по данным шахты.

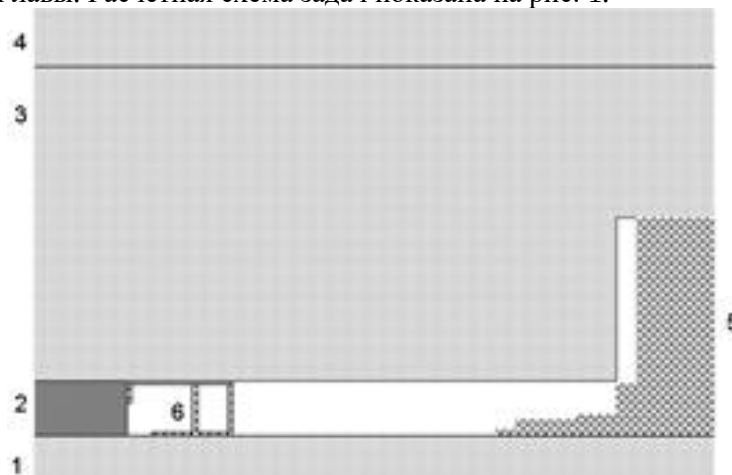
На геомеханическое состояние очистных забоев влияет плотность подбучивания кровли обрушенными породами в выработанном пространстве лавы. В статье принято, что плотность подбучивания уменьшается с увеличением мощности пласта. Высота обрушения принята равной 3-х кратной мощности пласта. Давление обрушенных пород в выработанном пространстве принято на основе данных в [5].

Длина консоли кровли за крепью 20 – 25 метров соответствует фактическому шагу ее обрушения. Граничные условия – равномерно распределенные давления γH и $\lambda \gamma H$, $H = 180$ метров – глубина разработки, $\lambda = 1$ – принятый коэффициент бокового давления, $\gamma = 2,25 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$ – средний объемный вес покрывающих пород, начальный распор крепи 25 МПа, рабочий цикл в лаве 69 минут.

В качестве физических уравнений приняты уравнения наследственной ползучести Г.И. Гуревича [6] с ядром ползучести типа Абеля (по Ж.С.Ержанову [7]). Оценка разрушения пород производится по критериям Кулона-Мора, предельного напряжения растяжения и критерию аккумуляирования дефектов с расчетом длительной прочности пород по интенсивности напряжений.

Элементы, удовлетворяющие критериям разрушения, в зависимости от их расположения в расчетной схеме или исключаются из схемы, образуя в ней новый контур, или считаются растрескавшимися с уменьшенными прочностными параметрами и модулем упругости. Расчет при этом продолжается непрерывно уже с новой конфигурацией расчетной схемы.

Для обеспечения устойчивости забоя лавы на мощных пластах применяется механизм удержания груди забоя (МУГЗ). Расчеты геомеханического состояния лавы проведены для ситуаций без МУГЗ и при давлении МУГЗ на забой от 3 до 21 МПа. Давление механизма удержания груди забоя моделируется горизонтальным напряжением сжатия в плите, прижатой к верхней части забоя лавы. Расчетная схема задач показана на рис. 1.



1- почва пласта; 2 – пласт; 3 – непосредственная кровля; 4 – основная кровля;
5 – обрушенные породы; 6 – секция крепи

Рис. 1. Расчетная схема

В табл. 1 приведены значения высоты подбучивания пород в выработанном пространстве и напряжения в обрушенных породах при принятых мощностях пласта.

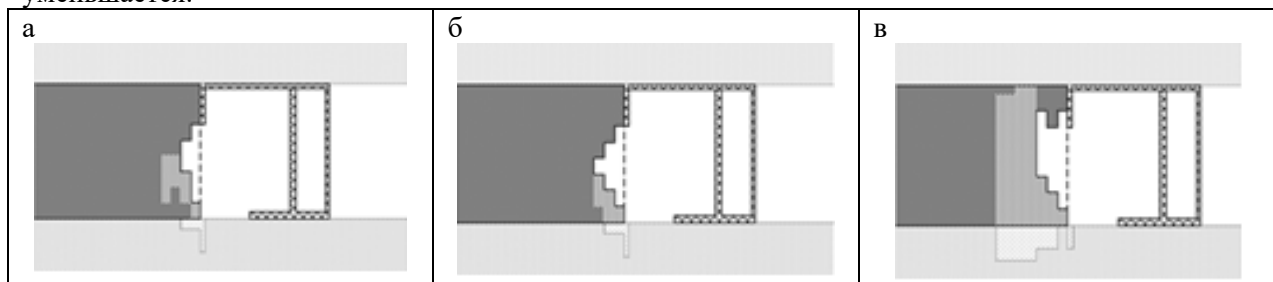
Таблица 1

Параметры выработанного пространства

Мощность пласта, м	4	6	8
Высота подбучивания кровли, м	12	18	24
Отношение давления обрушенных пород в выработанном пространстве к первоначальному напряженному состоянию массива: $\sigma_{AM}/\gamma H$	0,59	0,52	0,42

Ниже рассмотрены результаты расчета для пласта мощностью 6 метров.

Разрушения пласта. На рис. 2 показаны геомеханические состояния призабойной зоны пласта при длине консолей кровли 20 и 25 метров и некоторых давлениях МУГЗ, различно влияющих на устойчивость забоя лавы. Сразу после прохода комбайна происходит отжим пласта с образованием новой формы забоя и трещиноватых зон в пласте и породах почвы. В случае слабого сцепления кусков угля в зоне отжима забоя они выпадают из пласта, и «забой уходит». При хорошем сцеплении кусков угля в разрушенной зоне объем вывалов меньше, и уход забоя уменьшается.

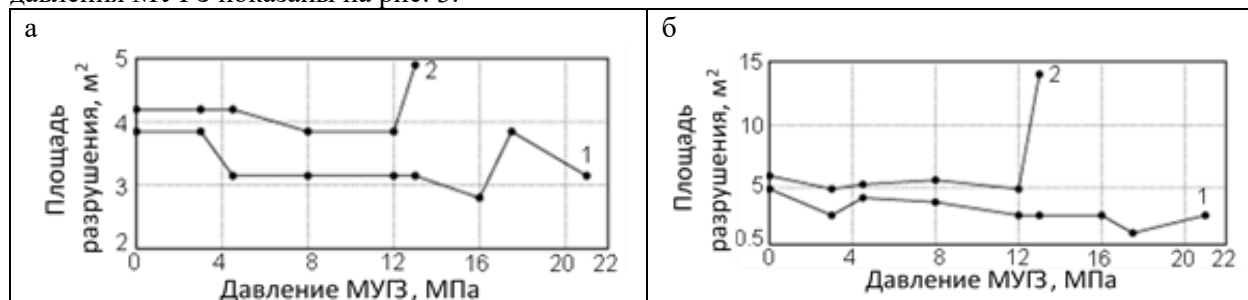


пунктир – начальное положение забоя; осветленные зоны – зоны растрескивания

Рис. 2. Влияние механизма удержания груди забоя на разрушение пласта: а, б – длина консоли кровли 20 м; в – 25 м; а – давление МУГЗ 12 МПа; б – 17,5 МПа; в – 13 МПа;

На рис. 2 показана ситуация с полным выпадением угля из разрушенной зоны отжима и свободным контуром забоя. При длине консоли кровли 20 метров забой уходит на 1 - 1,5 метра в зависимости от давления МУГЗ. При длине консоли 25 метров уход забоя составляет 1,5 метра при всех давлениях МУГЗ.

Зависимости разрушения пласта в зонах отжима забоя и трещиноватости от величины давления МУГЗ показаны на рис. 3.



1 – длина консоли кровли 20 метров; 2 – длина консоли кровли 25 метров

Рис. 3. Влияние давления МУГЗ на разрушение пласта в призабойной зоне: а – при отжиме забоя, б – в зоне трещин

Минимальные разрушения пласта при длине консоли кровли 20 и 25 метров происходят при давлениях МУГЗ 8 - 12 МПа. Разрушения в зоне трещин минимальны также при давлении МУГЗ 12 МПа.

Во всех случаях возникают незначительные зоны разрушения в почве пласта под забоем площадью до 1,5 м².

При длине консоли кровли 25 метров увеличение давления МУГЗ до 13 МПа приводит к резкому росту разрушений пласта и особенно в зоне трещин. Происходит вывал угля из-под МУГЗ. Зоны разрушения в почве пласта увеличиваются до 4 м².

В рассмотренном случае усиление горизонтального давления на забой до 13 МПа увеличивает зоны разрушения забоя и пласта. В данных условиях давление МУГЗ в 12 МПа можно считать оптимальным. На практике это давление должно корректироваться в соответствии с конкретными условиями лавы.

Негативно на проявления горного давления в лаве может влиять и не оптимальный начальный распор крепи.

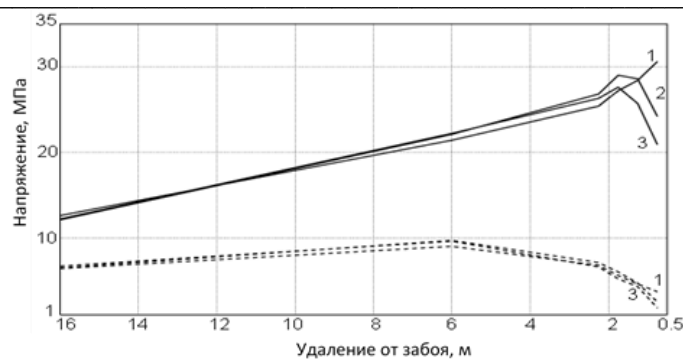
В лаве в Карагандинском угольном бассейне усиливался отжим пласта при увеличении начального распора крепи до максимума. На шахте им. Костенко в монтажной камере лавы по пласту КЗ максимальный распор очередной смонтированной секции приводил к поломке деревянных верхняков впереди места монтажа. Подобные явления были замечены и при монтаже секций на других шахтах [8]. Результаты измерений давления на крепь в лаве в Польше показали, что высокое начальное давление распора крепи приводило к ее резкому динамическому нагружению [9].

Напряженно-деформированное состояние забоя лавы. Дальнейший анализ напряженно-деформированного состояния окрестности забоя лавы проводится при оптимальном давлении МУГЗ 12 МПа.

На рис. 4 показано распределение вертикальных и горизонтальных напряжений в зоне опорного давления лавы в средней части пласта и изменение их со временем после обнажения пласта на 2-й минуте, в течение и в конце рабочего цикла на 34-й и 69-й минутах при длине консоли кровли 20 метров.

В течение рабочего цикла напряжения в пласте изменяются. Вследствие разрушения пласта максимум вертикальных напряжений (опорного давления) смещается от 0,75 метра от забоя лавы в начале рабочего цикла до 1,75 метра к его окончанию. Максимум горизонтальных напряжений возникает в 6 метрах от забоя и со временем не смещается. Вдали от забоя напряжения изменяются незначительно.

Конвергенция кровли и почвы пласта к концу рабочего цикла при удлинении консоли кровли от 20 до 25 метров достигает соответственно 117 мм и 154 мм (при вертикальной деформации забоя 2% и 2,6%).



сплошные линии – вертикальные напряжения; пунктирные линии – горизонтальные напряжения;
1 – 2-я минута рабочего цикла; 2 – 34-я минута рабочего цикла, 3 – 69-я минута рабочего цикла
Рис. 4. Напряжения в зоне опорного давления лавы

Потенциальная энергия пласта. Изменения напряжений в пласте со временем приводят к изменению со временем и потенциальной энергии пласта.

Плотность потенциальной энергии изменения формы W_f :

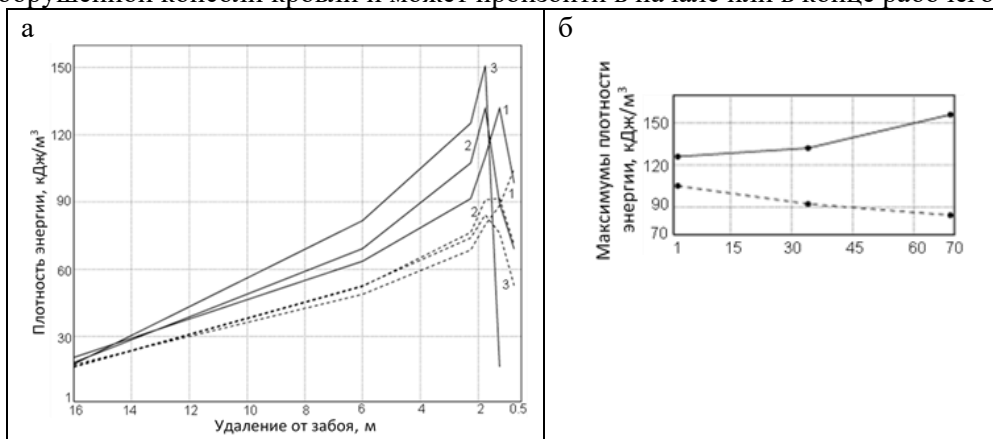
$$W_f = \frac{(\sigma_x - \sigma_0)^2 + (\sigma_y - \sigma_0)^2 + (\sigma_z - \sigma_0)^2 + 2\tau_{xy}^2}{4G}; \sigma_0 = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3,$$

где σ_x , σ_y , σ_z и τ_{xy} – нормальные и касательные напряжения; $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$ для условий плоской деформации; σ_0 – среднее напряжение; ν – коэффициент Пуассона; G – модуль сдвига.

Распределения потенциальной энергии формоизменения в среднем слое пласта в течение рабочего цикла при разных длинах консоли кровли показаны на рис. 5.

Плотность энергии максимальна либо в начале рабочего цикла, либо в его конце в зависимости от длины консоли кровли. Максимум плотности энергии смещается в течение рабочего цикла от 0,75 до 1,75 метра от забоя.

При вторичных обрушениях кровли происходит мгновенное выделение накопленной в пласте энергии и ее превращение в работу разрушения. Максимальное выделение энергии зависит от длины обрушенной консоли кровли и может произойти в начале или в конце рабочего цикла.



пунктирная линия – длина консоли 20 м; сплошные линии – 25 м;

1 – 2-я минута цикла; 2 – 34-я минута цикла; 3 – 69-я минута цикла

Рис. 5. Плотность энергии формоизменения в зоне опорного давления (а) и максимумы плотности энергии (б)

В табл. 2 приводятся данные о зависимости выделившейся энергии от обрушения консоли кровли до 1-го метра.

Таблица 2

Максимумы плотности энергии

Длина консоли, м	Время рабочего цикла, мин	Удаление от забоя, м	Плотность энергии, кДж/м³	Плотность выделившейся энергии, кДж/м³
20	2-я	0,75	105	95
25	69-я	1,75	156	146
1	2-я	0,75	10	

При достаточности освободившейся у забоя энергии может быть инициировано динамическое проявление горного давления, вероятность которого возрастает с удлинением зависающей консоли кровли.

Выводы. На основе результатов решения задачи теории ползучести с большими деформациями для очистного забоя мощного пласта показано влияние щита удержания забоя на отжим пласта и образование трещиноватых зон впереди забоя, определено оптимальное давление механизма удержания груди забоя. Для рассмотренных условий это 12 МПа.

При обрушении кровли в выработанном пространстве мгновенно выделяется значительная потенциальная энергия пласта. При ее достаточности возможно инициирование динамического проявления горного давления.

Список литературы

1. Дрибан В.А. Механизм потери устойчивости горных выработок // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли : тр. всерос. конф., посвященной 80-летию академика М.В. Курлени, 03-06 октября 2011 г. – Новосибирск, 2011. – С. 310-317.
2. Миренков В.Е. Очистные работы и расчет повреждаемости пород // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2017. – Том 4. – № 2. С. 135-139.
3. Наймарк Б.М., Векслер Ю.А. Осесимметрическая нелинейная задача теории ползучести с большими деформациями // Анализ сейсмических наблюдений на электронных машинах. Вычислительная сейсмология. – М.: Наука, 1966. – Вып. 1. – С. 123-141.
4. Ержанов Ж.С., Наймарк Б.М., Векслер Ю.А. Плоская задача теории ползучести при больших деформациях // Прикладная механика. – 1971. – Т. VII – В. 6. – С. 61 – 67.
5. Формирование давления обрушенных пород в выработанном пространстве / Н.Т. Бедарев [и др.] // Перспективы инновационного развития угольных регионов России : сб. труд. V междунар. науч.-практ. конф., 30-31 марта 2018 г. – Прокопьевск, 2018. – С. 126-127.
6. Гуревич Г.И. О соотношении упругих и остаточных деформаций в общем случае однородного напряженного состояния // Труды Геофиз. ин-та АН СССР. – 1953. – №. 21 (148). – С. 49.
7. Ержанов Ж.С. Теория ползучести горных пород и ее приложения. – Алма-Ата: «Наука» КазССР, 1964. – 176 с.
8. Брагин Е.П., Ишутин И.В., Векслер Ю.А. Геомеханический эффект, обусловленный начальным распором крепи // ЦНИЭИуголь. – 1982. – №. 6. – С. 23-24.
9. Szweda S. Einfluß der Setzlast auf die dynamischen Belastungen von Schreitausbau // Glückauf-Forschungshefte 61. – 2000. – Nr.4. – P. 128-131.

УДК 622.25

СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ВОКРУГ ЗАБОЕВ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Ройтер М., докт. Крах М., Кисслинг У., д.т.н. Векслер Ю.

Фирма Марко Системный анализ и разработки гмбх, г. Дахау, Германия

Аннотация. На основе концепции концентрационного параметра разрушения обоснован дополнительный к активности акустической эмиссии массива прогностический параметр сейсмоакустического мониторинга геодинамического состояния в окрестности забоя выработки - среднее значение частоты спектрального максимума спектров импульсов акустической эмиссии.

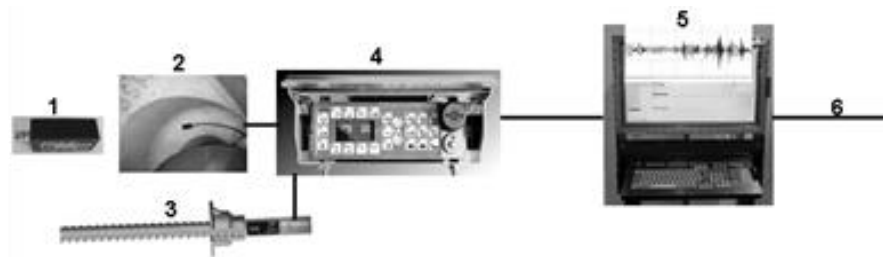
Ключевые слова: сейсмоакустический мониторинг, активность акустической эмиссии, средняя частота спектрального максимума.

Проведение подготовительной выработки или подвигание лавы сопровождаются образованием трещин в пласте и вмещающих породах впереди их забоев. Трещинообразование в массиве обусловлено комплексом влияющих факторов - уровнем горного давления, давления газа, механическими свойствами горных пород. Возникающие трещины генерируют импульсы акустической эмиссии (АЭ). Сейсмоакустическая активность массива является показателем геодинамического состояния окрестности забоя горной выработки и эффективным методом оценки трещиноватости различного масштабного уровня и опасного состояния окружающего массива.

Для осуществления постоянного контроля за геодинамическим состоянием очистного забоя в системе управления Марко Robotic Mining имеется блок сейсмоакустического мониторинга.

Аппаратуру системы управления можно использовать также при мониторинге геодинамического состояния проходческого забоя. Схема мониторинга показана на рис. 1.

В очистных забоях сейсмоакустический датчик монтируется на перекрытии секции крепи у стойки, при проведении выработок его можно устанавливать на хвостовике анкера в стенке выработки.



1 – сейсмоакустический датчик Марко; 2 – датчик на перекрытии секции крепи; 3 – датчик на хвостовике анкера; 4 – прибор управления крепью pm32/sg/b; 5 – подземный взрывозащищенный компьютер Марко; 6 – кабель к поверхностному центральному компьютеру
Рис. 1. Аппаратура сейсмоакустического мониторинга геодинамического состояния массива в очистных и подготовительных выработках

Методы сейсмоакустического прогноза. По оценке АЭ массива разработаны методы сейсмоакустического прогноза динамических явлений, различным образом учитывающие амплитудно-частотную характеристику спектров АЭ массива.

К ним относятся метод прогноза динамических явлений по шумности пласта – количеству импульсов АЭ в единицу времени [1], по комплексу прогностических параметров спектра акустического сигнала и их критическому уровню [2], по показателям выбросоопасности по отношению амплитуд высокочастотной и низкочастотной части спектра шума работающей лавы [3], по отношению текущей медианы амплитудно-частотной характеристики «шума» работающего оборудования к ее критическому значению, при котором начинают создаваться условия для начала внезапного выброса угля и газа [4]. По результатам испытаний методом сейсмоакустического контроля при проходке горных выработок на шахтах Карагандинского бассейна установлено смещение частоты спектрального максимума импульсов АЭ в низкую область перед динамическим явлением [5], на шахте «Имени Ленина» было прогнозировано несколько фактических внезапных выбросов при проведении конвейерного бремсберга [6].

Одним из основных прогностических параметров газодинамического проявления горного давления, обоснованным многими экспериментальными и теоретическими исследованиями, является активность акустической эмиссии массива (количество импульсов АЭ в единицу времени).

Этот параметр апробирован также при сейсмоакустическом мониторинге состояния очистного забоя на шахте «Полысаевская» АО «СУЭК-Кузбасс» [7].

Кинетическая концепция разрушения твердых тел и активность АЭ. Активность АЭ определяется уровнем возникающей трещиноватости массива в окрестности забоя выработки. При большой концентрации трещин уменьшаются расстояния между ними, и вследствие их возможного мгновенного слияния может быть инициирован выброс [8, 9]. Концентрация трещин в призабойной части пласта в верхней части лавы, установленная путем многоканальной регистрации источников АЭ, обнаружена перед внезапным выбросом [10].

Для оценки влияния плотности дефектов на процесс разрушения в кинетической концепции разрушения твердых тел предложен безразмерный параметр k , численно равный отношению среднему расстоянию между дефектами - концентрационный параметр разрушения [11] (далее параметр разрушения). В [12] показана возможность его применения для прогноза горных ударов.

Параметр разрушения k определяется выражением [11]

$$k = R_*/L_*, \quad (1)$$

где $R_* = (V/N)^{\frac{1}{3}}$ – среднее расстояние между дефектами, V – нагружаемый объем, N – количество дефектов в этом объеме, L_* – средний размер дефекта.

Практическое применение параметра разрушения k осложняется неточным знанием некоторых входящих в выражение (1) параметров.

Информацию о количестве возникших трещин дает значение активности АЭ массива. Но в пласте и породах кровли уже имеется исходная трещиноватость, поэтому истинное количество трещин N для условия (1) установить не удастся.

Есть проблема и с определением величины нагружаемого объема. В [12] для этого выбирается некоторое пространственное окно, включающее в себя очаг готовящегося события – «область, в которой дальнейшее зарождение дефектов оказывается стимулированным». При этом нагружаемый объем должен в точности совпадать с зоной очага. Возможный размер зоны очага разрушения до проявления ДЯ также неизвестен.

Однако для практического применения физически обоснованной концепции концентрационного параметра разрушения можно воспользоваться принципом метода.

Важным при этом является установление соотношения между длиной возникающих трещин и параметрами импульса АЭ.

В работе [13] изучались образование акустических импульсов различной частоты при одноосном нагружении крупных образцов гранита и бетона и характеристики источников излучения. В опытах по разрушению пластинок из эпоксидной смолы установлено уменьшение частоты спектрального максимума импульсов АЭ при увеличении длины растущих трещин [14]. Аналогичная зависимость установлена в опытах по разрушению пластинок из оргстекла: $L = 23,5(5,55 - \log f)$, (L , мм; f , Гц) [15]. С использованием этой зависимости рассматривалась возможность применения для прогноза динамических явлений условного концентрационного критерия разрушения [16].

В [17] длина трещины определяется теоретически по периоду первого вступления продольной волны

$$L = cT/n, \quad (2)$$

где $T = 1/f$ – видимый период спектра импульса; f – частота спектрального максимума импульса; c – скорость продольной волны, $n = 4 - 6$. Примем для минимальной длины трещины $n = 6$ и для угля $c = 1500$ м/с [18].

Заметим, что на расчетную величину параметра разрушения может повлиять иная аппроксимация взаимосвязи длины трещины с частотой спектрального максимума (2).

Средняя длина возникшей трещины в (1) определяется выражением

$$L_* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{c}{6f_i} = \frac{c}{6f_*}, \quad (3)$$

где f_* – средняя частота спектральных максимумов всех импульсов, N – количество возникших трещин. Для расчета примем N = активности АЭ.

Концентрационный параметр разрушения определится выражением

$$k = \left(\frac{V}{N}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{6f_*}{c} = \left(\frac{V}{N}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{f_*}{250} \quad (4)$$

Вероятность ДЯ возрастает с уменьшением k как при увеличении активности АЭ (N), так и при уменьшении средней частоты спектральных максимумов импульсов АЭ. Последнее отражает возникновение более крупных трещин и свидетельствует об увеличении очага разрушения, что существенно для инициирования газодинамических явлений [1].

Для определения параметра разрушения по выражению (4) необходимо знать объем массива, в котором возникают трещины. Следуя подходу в [12], отнесем все возникшие трещины к вычисленным в задачах геомеханики объемам растрескивания пород впереди забоев очистных и подготовительных выработок.

Решение пространственной задачи теории упругости для подготовительной выработки в неоднородном массиве методом конечных элементов показало возникновение впереди забоя области пласта с деформациями растяжения вдоль ее продольной оси, определяемой напряженным состоянием массива, характерным размером выработки, отношением модулей упругости вмещающих пород [19]. Трещины могут возникать в объеме этой зоны.

В очистных забоях происходит растрескивание краевой части пласта. Площадь зоны растрескивания можно определить из решения соответствующей геомеханической задачи. Расчеты для очистных забоев на шахтах Китая показали, что при мощности пласта 6 метров площадь такой зоны составляет 5 м². Незначительные зоны трещин (0,3 м²) образуются в породах почвы пласта.

Определим параметр разрушения для пласта мощностью 6 метров при расположении сейсмоакустических датчиков при мониторинге на каждой 10-й секции крепи. При расстоянии между секциями 17,5 метров объем массива, в котором образуются трещины, составит 87,5 м³.

При значительном объеме трещиноватости незначительные колебания в его величине не должны существенно изменить величину параметра разрушения. В [20] показано, что размерный эффект порога разрушения существен при разрушении в малых объемах.

Примем для примера активность АЭ 18 импульсов в единицу времени, среднюю частоту спектрального максимума всех импульсов АЭ 125 Гц. При этих данных $k = 0,84$.

Величина объема области возникающих трещин может меняться вследствие изменений горно-геологических условий в окрестности забоя лавы или выработки или возможной дезинтеграции массива вдали от забоя.

В условиях неопределенности значений нагружаемого объема V и возможных изменений скорости продольной волны в угле прогностическим параметром геодинамического состояния окрестности забоя горной выработки может быть средняя частота спектральных максимумов всех импульсов, учитываемых в активности АЭ.

Учет средней частоты спектральных максимумов необходим, поскольку при равных значениях активности АЭ фактическое состояние массива может быть различным вследствие возникновения трещин разной длины. При одинаковом количестве возникших трещин в одном и том же приблизительном объеме и их разных длинах будут различными их концентрация и расстояния между ними, а следовательно, разные условия для их слияния и создания опасной ситуации.

Рассмотрим для примера возможную ситуацию с одинаковыми значениями активности АЭ – 15 импульсов за 6 минут, но с различными частотами спектрального максимума импульсов.

На рис. 2 а показаны импульсы, поступившие в течение 42 минут записи датчиком на условной секции крепи 60, на рис. 2 б - спектральные максимумы этих импульсов.

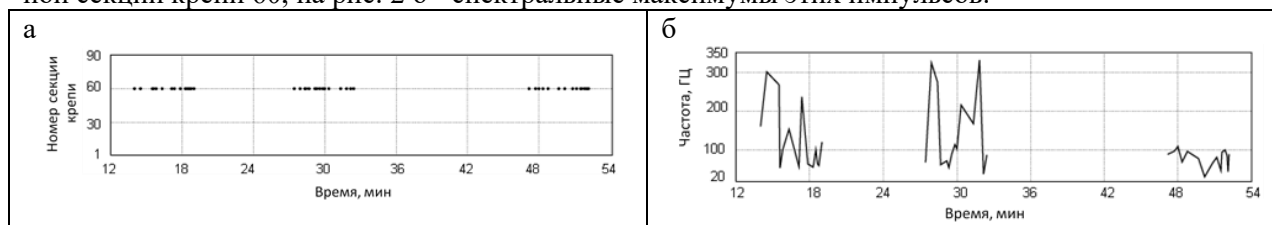


Рис. 2. Моменты вступлений (а) и спектральные максимумы (б) импульсов АЭ

Средняя частота спектральных максимумов импульсов АЭ f_* и длины трещин по выражению (2) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры акустической эмиссии

Время записи, мин	18-я	30-я	48-я
Активность АЭ, имп/6 мин	15	15	15
Средняя частота спектральных максимумов f_* , Hz	125	198	79
Средняя длина трещины L_* , m	2,0	1,3	3,2

При одинаковой активности АЭ средняя частота спектральных максимумов импульсов АЭ со временем изменяется. Меньшее значение f_* на 48-й минуте указывает на возникновение более крупных трещин и более опасное состояние массива.

В ноябре 2019 года на шахте «Полысаевская» проведены записи АЭ массива с расположением сейсмоакустических датчиков на секциях крепи 65, 71 и 77. Активность акустической эмиссии определялась в течение 6 минут. В табл. 2 приведены средние частоты спектральных максимумов всех импульсов по выражению (3) для некоторого момента времени.

Таблица 2

Параметры акустической эмиссии

Секции крепи	65	71	77
Активность АЭ, имп/6 мин	6	24	24
Средняя частота спектральных максимумов f_* , Hz	141	147	86

В данный момент времени средняя частота спектрального максимума всех импульсов АЭ у разных секций крепи различна. При равных значениях активности АЭ у секций 71 и 77 минимальное значение f_* указывает на более опасное состояние забоя у секции 77.

Приведенные примеры показывают, что при одинаковой активности АЭ у разных секций крепи уровень опасности может быть различным. Средняя частота спектрального максимума всех импульсов АЭ, являясь качественной характеристикой активности АЭ, уточняет геодинамическое состояние очистного забоя. Резкое снижение средней частоты спектральных максимумов импульсов АЭ может свидетельствовать о приближении забоя лавы или выработки к геологическому нарушению или к зоне дезинтеграции массива и возможному инициированию ДЯ.

Выводы. На основе концепции концентрационного параметра разрушения обоснован дополнительный к активности АЭ прогностический параметр сейсмоакустического мониторинга геодинамического состояния окрестности забоя выработки - средняя частота спектрального максимума спектров импульсов АЭ.

Уменьшение средней частоты спектрального максимума импульсов АЭ свидетельствует об ухудшении состояния забоя.

Список литературы

1. Анцыферов М.С., Анцыферова Н.Г., Каган Я.Я. Сейсмоакустические исследования и проблема прогноза динамических явлений. – М.: Наука, 1971. – 136 с.
2. Лунев С.Г., Колчин Г.И. Параметры акустического сигнала при контроле выбросоопасности // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах : сб. научн. трудов МакНИИ. – 2002. – С. 45-52.
3. Копылов К.Н., Смирнов О.В., Кулик А.И. Акустический контроль состояния массива и прогноз динамических явлений // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – №8. – С. 32-37.
4. Шадрин А.В., Контримас Ф.Ф. Методика определения критерия выбросоопасности по медиане амплитудно-частотной характеристики шумов работающего оборудования // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – № 6. – С. 331-337.
5. Векслер Ю.А. Иницирование газодинамических явлений и их сейсмоакустический контроль // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. – М.: Наука, 1987. – С. 106-112.
6. Кириллин В.Г. Новые технологические схемы проведения выработок на выбросоопасном пласте // Уголь. – 1983. – №. 9. – С. 17-18.
7. Сейсмоакустический мониторинг автоматизированной лавы / Ройтер М [и др.] // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т. 6. – № 1. – С. 206-210.
8. Христианович С.А., Салганик Р.Л. Выбросоопасные ситуации. Дробление. Волна выброса / Институт проблем механики АН СССР. – Препринт № 152. – М., 1980. – 43 с.
9. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. – М.: Недра, 1983. – 280 с.
10. Анцыферов М.С., Глушко В.Т., Сахаров Г.Д. Методы и средства многоканальной сейсмоакустики // Горные удары, методы оценки и контроля удароопасности массивов горных пород. – Фрунзе, 1979. – С. 393-400.
11. Журков С.Н., Куксенко В.С., Слуцкер А.И. Микромеханика разрушения полимеров // Проблемы прочности. – 1971. – № 2.
12. Концентрационный порог разрушения и прогноз горных ударов / А.Ю. Гор [и др.] // ФТПРПИ. – 1989. – № 3. – С. 54-60.
13. Лифшиц Л.Д., Гаврилов Б.Г. Источники акустической эмиссии и очаг разрушения // Доклады АН СССР. – 1987. – Т. 292. – № 3.
14. Виноградов С.Д. Упругие волны, излучаемые трещиной отрыва и сдвиговой подвижкой по готовому разлому // Исследования по физике землетрясений. – М.: Наука, 1976. – С. 67-74.
15. Veksler Ju.A., Salzer K., Schakirow A.T. Schallemissionsanalyse zur Standsicherheitsbewertung des Gebirges // Glückauf-forschungshefte 55. – 1994. – № 1. – P. 35-39.
16. Seismoakustische Prognose gasdynamischer Erscheinungen / W. Kurfürst [and ect.] // Glückauf-Forschungshefte 66. – 2005. – №2. – P. 65-70.
17. Парийский Б.С., Радченко В.П., Кейлис-Борок В.И.. Продольные волны, возникающие при разрыве // Анализ сейсмических наблюдений на электронных машинах. Вычислительная сейсмология. – М.: Наука, 1966. – Вып. 1. – С. 92-106.
18. Локация очагов аккумуляции метана в угольном пласте сейсмическим методом / М.В. Курленя [и др.] // ФТПРПИ. – 2010. – №6. – С. 37-49.
19. Критерии оценки выбросоопасности угольных пластов / Ю.А. Векслер [и др.] // Горная геофизика. – 1989. – Ч. 1. – С.42 – 44.

**МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВАЯ БАЗА КУЗБАССА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ
С РОБОТИЗИРОВАННЫМ ВЫПУСКОМ УГЛЯ ПОДКРОВЕЛЬНОЙ ТОЛЩИ****чл.-корр. РАН Клишин В.И., к.т.н. Кузнецова Л.В., к.т.н. Анфёров Б.А.****Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия**

Аннотация. Запасы угля, пригодные в перспективе для подземной добычи механизированными комплексами с роботизированной системой выпуска подкровельной толщи, сосредоточены в Бачатском, Ерунаковском, Кемеровском, Ленинском, Прокопьевско-Киселевском и Томь-Усинском геолого-экономических районах Кузбасса, в пластах мощностью более 5 м до глубины 600 м составляют около 3 млрд.т.

Ключевые слова: уголь, мощный пласт, массив подкровельной толщи, секция механизированной крепи, выпуск угля, разупрочнение, удельное распорное усилие.

Добыча угля в России в 2020 г. по данным Центрального диспетчерского управления топливно-энергетического комплекса составила 401,37 мил. т, более половины из них добывается в Кузнецком угольном бассейне (Кузбассе) [1].

Балансовые запасы угля в Кузбассе, подсчитанные до глубины 600 м от поверхности (гор. – 300 м) по сумме категорий А+В+С1, составляют 52,45 млрд. т [2]. Из них в пологих пластах мощностью более 5 м сосредоточено около 9 млрд. т, 30 % из которых могут быть отработаны подземным способом.

Наиболее эффективной разработкой таких пластов является выемка на полную мощность с выпуском угля из подкровельной толщи на забойный или завальный конвейер (Longwall top coal caving method – LTCC). В этих технологиях разрушение массива подкровельной толщи осуществляется горным давлением [3-10].

В мировой практике применяются комплексы, оборудованные дополнительным завальным конвейером (Китай, Австралия, Турция, Бангладеш). Механизированные крепи поставляются фирмами «Caterpillar» и «CODCO» (Китай) [11]. Однако, дополнительный завальный конвейер усложняет конструкцию комплекса, требует значительного увеличения размеров секции крепи и введения перегрузочного устройства на сопряжении лавы с конвейерным штреком, что создает трудности при обслуживании.

Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН разрабатывает технологию отработки мощных пологих пластов по системе «Длинными столбами с полным обрушением кровли» (ДСО) с выемкой угля в подсежном слое пласта и роботизированным выпуском угля подкровельной толщи на забойный конвейер. В ее основе лежит использование механизированных секций крепи поддерживающе-оградительного типа (КУВ), в ограждениях которых выполнено выпускное окно, связанное с перегрузочным желобом и питателем (рис. 1) [12, 13]. Выпускное окно секции крепи имеет площадь в два раза больше, чем у существующих аналогов, что позволит увеличить поток горной массы, уменьшить потери и снизить простои очистного забоя из-за негабаритов. Небольшая масса секций (17 т) позволяет отрабатывать пласты со слабой почвой. Для сравнения, масса секции ZF 8000-22/35 («CODCO») – 26 т; площадь основания секции в полтора-два раза меньше площади перекрытия, что при слабых глинистых почвах ведет к увязанию крепи в почве пласта и снижению эффективности работы. Площадь основания КУВ не меньше площади перекрытия, что позволяет вести добычу из мощных залежей со слабой, глинистой почвой без снижения нагрузки на очистной забой.



Рис. 1. Секция механизированной крепи КУВ

Данная технология по сравнению со слоевой отработкой и выпуском подкровельной пачки угля на завальный конвейер позволит:

- снизить эксплуатационные потери и зольность угля за счет управляемого выпуска;
- обеспечить нагрузку на очистной забой до 15,0 тыс.т/сут. (4,5 млн.т/год);
- уменьшить затраты на монтаж-демонтаж: комплексов, средств транспортирования, электрооборудования, трубопроводов, профилактические мероприятия и др.;
- снизить энергозатраты на добычу на 25-30%;
- сократить расходы на дорогостоящее и металлоемкое оборудование очистных забоев и средства транспортирования горной массы в пределах выемочного поля.

Анализ горно-геологических условий угольных месторождений Кузбасса показал, что запасы, пригодные в перспективе для этой технологии находятся в Бачатском, Ерунаковском, Кондомском, Ленинском, Мрасском, Прокопьевско-Киселевском и Томь-Усинском геолого-экономических районах (ГЭР) (табл. 1).

Таблица 1

Перспективные угольные пласты Кузбасса для технологии ДСО с роботизированным выпуском угля подкровельной толщи [14-16]

ГЭР	Пласты мощностью 5 и более м	Способ добычи	Перспективы для технологии
Бачатский	Мощный, Прокопьевский I и II, Горелый, Внутренний II-III	открытый	Доработка запасов угля в границах горных отводов разрезов
Ерунаковский	91, 86-84, 82, 81-82, 81-80, 78, 73-71, 69, 68, 67, 60	открытый	Доработка запасов угля в границах горных отводов разрезов
Кемеровский	Кемеровский, Волковский	открытый	Доработка запасов угля в границах горных отводов разрезов «Кедровский», «Черниговец» и переход шахты «Южная» на более глубокие горизонты
Кондомский	3-3а, 6, 9	открытый и подземный	Доработка запасов угля в границах горных отводов разрезов и на шахте «Алардинская»
Мрасский	III, IV-V	подземный	Доработка запасов угля на шахте «Сибиргинская»
Ленинский	Караканские 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, Верхний, 1, 3, 4, 5, 9	открытый	Доработка запасов угля в границах горных отводов разрезов
Прокопьевско-Киселевский	Внутренний IV, Внутренний III, Внутренний II, Горелый, Лутугинский, Мощный, Безымянный, Двойной, Садовый	открытый	Открытие шахт, при условии модернизации крепи для крутых пластов (технология защищена патентом России на изобретение №2709903)
Томь-Усинский	21, 19, III, IV-V, VIII-IX, XXX	открытый и подземный	Доработка запасов угля на шахтах «им. В.И. Ленина», «Ольжераская» и «Распадская-Коксовая»

Технология заключается в следующем. Отработка выемочных столбов ведется от фланговых наклонных стволов к центральным наклонным стволам. Подготовка выемочных участков – панельная спаренными выработками и оставлением неизвлекаемых ленточных целиков. Типовая технологическая схема представлена на рис. 2 и 3. Характеристики системы разработки и условия ее применения – в табл. 2.

В табл. 3 представлены горно-геологическая характеристика пластов, пригодных для отработки механизированным комплексом с роботизированной системой выпуска угля подкровельной толщи, на действующих шахтах Кузбасса [14-16]. Угли трещиноватые; в зонах нарушений их крепость от средней до крепких (коэффициент крепости по шкале П.П. Протодяконова $f - 1,0 \div 2,5$).

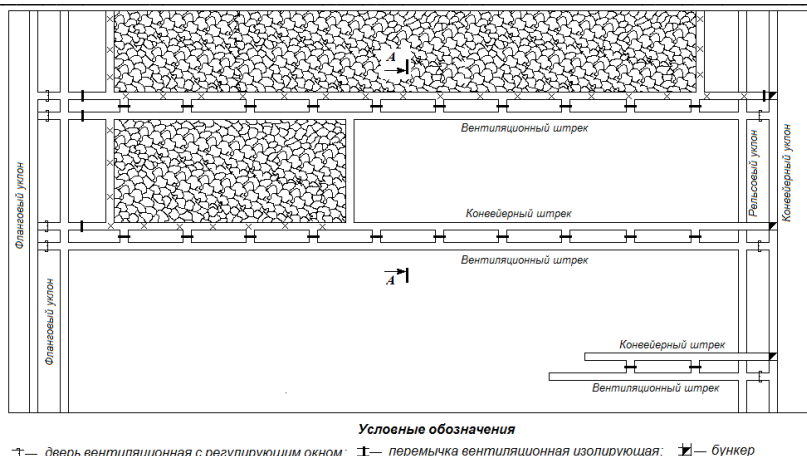


Рис. 2. Типовая схема вскрытия, подготовки и отработки пологих угольных пластов по системе разработки ДСО с выпуском подкровельной угольной пачки с панельной подготовкой выемочных участков спаренными выработками и оставлением неизвлекаемых ленточных целиков

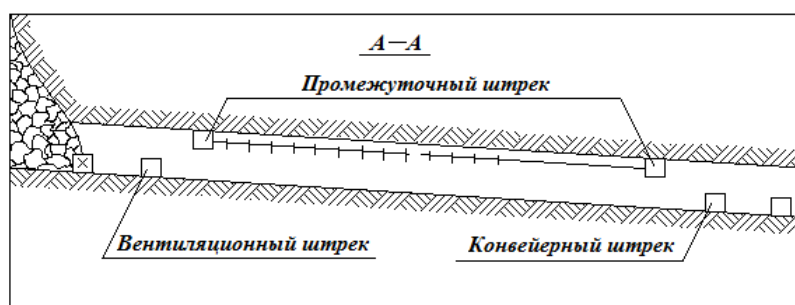


Рис. 3. Схема подготовки массива подкровельной толщи к выпуску (поперечный разрез выемочного столба)

Таблица 2

Характеристики системы разработки и условия ее применения

Параметр	Ед. изм.	Значение
Глубина разработки	м	до 600
Склонность угля пласта к самовозгоранию	-	склонный, весьма склонный
Мощность пласта	м	более 6
Угол падения пласта	град	0-18
Длина выемочного столба	м	1000-4500
Длина лавы	м	150-350
Направление подвигания очистного забоя	-	по простиранию, под углом к линии простирания
Порядок отработки выемочных столбов	-	нисходящий, последовательный
Размеры целиков:	м	
– у монтажной камеры		15-80
– у демонтажной камеры		15-80
– для охраны основных выработок		15-30
– для охраны выемочных выработок		10-30
Расстояние между сбойками	м	60-200

Строение пластов сложное с прослойками алевролита или аргиллита. Породы непосредственной кровли средней устойчивости и устойчивые, сложенные песчаниками или алевролитами мощностью, соответственно, 2,66-22 м и до 17 м. Породы почвы склонны при намокании к пучению. Угли пластов опасны по самовозгоранию.

На момент начала очистных работ выемочный участок полностью оконтуривают подготовительными выработками. Вентиляционный штрек предназначен для выдачи исходящей вентиляции-

онной струи воздуха из очистного забоя, доставки материалов и оборудования, перевозки людей, а также служит запасным выходом для людей, работающих в очистном забое.

Таблица 3

Горно-геологическая характеристика пластов, пригодных для отработки механизированных комплексов с роботизированной системой выпуска угля подкровельной толщи, на действующих шахтах Кузбасса

	Шахты				
	Алардинская	им. В.И. Ленина	Ольжерасская-Новая	Распадская Коксовая	Сибиргинская
Пласт	6	IV-V	21	III	IV-V
Марка угля	ТС	КО	ГЖО	К	ОС
Угол падения, градус	14	8-15	6-10	11-15	11-15
Средняя мощность, м	8,73	9,94	7,5	10,44	10,05
Глубина угрожаемости по горным ударам, м	150	150	220	200	150
Глубина (горизонт) угрожаемости по выбросам угля и газа, м	300	265	240	265	(+ 100)
Природная газоносность, м ³ /т	11,0-14,9	до 15	до 15	до 19	до 18

Конвейерный штрек служит для транспортировки горной массы, подачи свежей струи воздуха в очистной забой, размещения электроаппаратуры и выхода людей из лавы.

У фланговой границы столба проводят монтажную камеру от конвейерного до вентиляционного штрека. В ней монтируют очистной механизированный комплекс в составе: очистной комбайн, секции крепи КУВ, забойный скребковый конвейер. На сопряжении монтажной камеры с конвейерным штреком устанавливают перегружатель и крепи сопряжения. В конвейерном штреке монтируют ленточный конвейер.

Очистной забой подвигается от фланга выемочного участка к центру, при этом струя воздуха подается от конвейерного штрека в очистной забой, далее поступает на вентиляционный штрек.

Очистным комбайном вынимается подсечной слой у почвы пласта мощностью 3,5 м. Оставшаяся угольная пачка принудительно разрушается и выпускается на забойный конвейер. Подкровельная пачка подготавливается двумя вспомогательными штреками для проведения работ по разупрочнению подкровельной толщи (см. рис. 3). Рекомендуемая схема ориентации очистного забоя относительно трещиноватости угольного массива приведена на рис. 4.

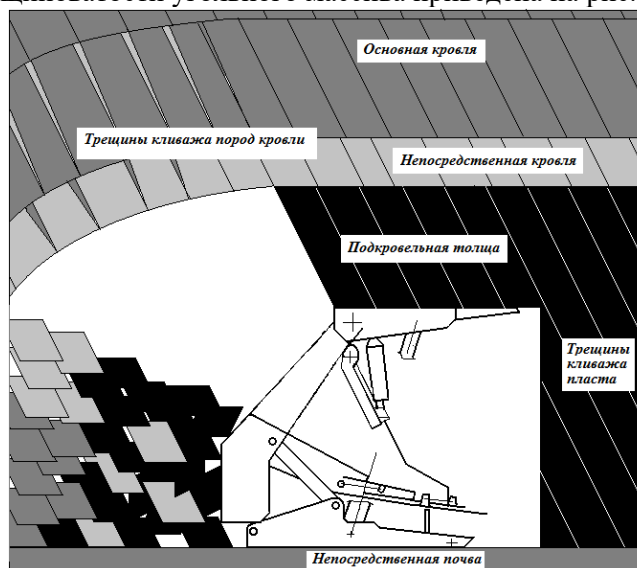


Рис. 4. Рекомендуемая схема ориентации очистного забоя относительно трещиноватости угольного массива

В секции крепи КУВ выпускное окно расположено вблизи забоя, что, с одной стороны, позволяет уменьшить площадь поддерживаемой кровли, с другой –, не обеспечивает необходимой подготовки массива угля к выпуску под действием сил горного давления.

В связи с этим, необходимо обеспечить качественную подготовку массива подкровельной толщи к выпуску, от чего зависит эффективность данной технологии.

Для дополнительного разупрочнения верхнего слоя (подкровельной толщи) предусматривается проведение вспомогательного штрека одного или двух в прикровельной части массива в пространстве между конвейерным и вентиляционным штреками. Помимо этого, предусматривается проведение мероприятий по разупрочнению тяжелой кровли, склонной к зависанию. Предлагаются несколько вариантов разупрочнения кровли:

- методом передового торпедирования;
- методом направленного гидроразрыва.

Необходимость предварительного разупрочнения кровли и подкровельной пачки угля, окончательный выбор способа разупрочнения рекомендовано определять опытным путем под наблюдением специализированных организаций (Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН, ВостНИИ).

При разработке пласта мощностью 5-6 м подготовку массива подкровельной толщи можно осуществлять по мере подвигания очистного забоя и секций крепи без введения в технологический цикл дополнительных операций (проведение компенсационных выработок, бурение шпуров и скважин и др.) и устройств (скалыватели, сейсмодатчики, насосы высокого давления и др.) с помощью существующих средств механизации в составе комплекса.

Очистной комбайн, двигаясь по раме забойного скребкового конвейера, отбивает уголь в подсечном слое мощностью 3,5 м и грузит его на забойный конвейер (рис. 5). Рабочее пространство подсечного слоя поддерживают секциями механизированной крепи КУВ.



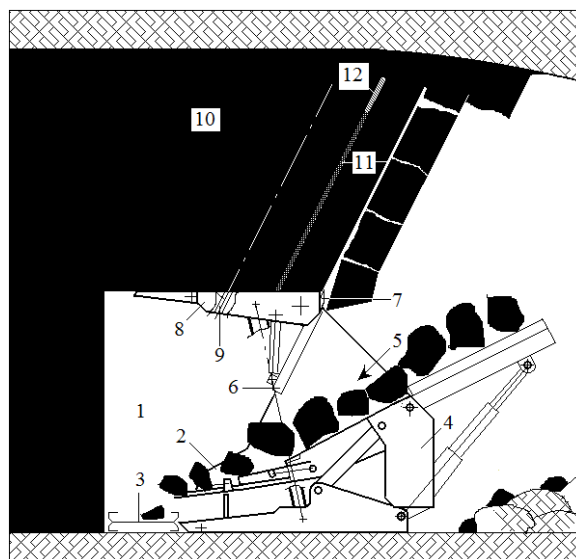
1 – очистной комбайн; 2 – забойный скребковый конвейер; 3 – секция механизированной крепи поддерживающе-оградительного типа; 4 – каналы; 5 – целики угля

Рис. 5. Поперечный разрез очистного забоя

Для увеличения полноты разрушения массива подкровельной толщи при выемке каждой второй полосы угля в подсечном слое увеличивают мощность слоя на 0,3-0,4 м подъемом верхнего шнека комбайна, деля тем самым массив подкровельной толщи на продольные порции каналами шириной, равной ширине захвата шнека (0,63 или 0,8 м). Секции крепи распирают не в сплошную кровлю подсечного слоя, а в целики между каналами.

В зависимости от физических свойств угля целики, воспринимая нагрузку со стороны перекрытия секции крепи, частично разрушаются и передают сжимающие усилия вышележащей толще. Каналы не воспринимают распорных усилий со стороны секции крепи, но испытывают давление со стороны вышележащей толщи, т.е. в противоположном направлении, которые растягивают поверхность каналов. Две-три передвижки секции крепи способствуют растрескиванию массива подкровельной толщи, чем подготавливают его к выпуску, при этом наиболее подготовленная часть или порция массива оказывается непосредственно над выпускным окном секции крепи.

При разработке пласта мощностью 6-12 м, перед началом работы комбайна по выемке угля, из рабочего пространства подсечного слоя через наклонные каналы в перекрытии секции крепи пробуривают ряд наклонных шпуров в массив подкровельной толщи до кровли пласта (рис. 6).



- 1 – рабочее пространство; 2 – секция крепи; 3 – забойный конвейер; 4 – завальное ограждение;
5 – выпускное окно; 6 – поворотный заслон; 7 – динамический скалыватель; 8 – перекрытие;
9 – наклонные каналы; 10 – массив подкровельной толщи; 11 – наклонные шпуров;
12 – иницирующий элемент

Рис. 6. Схема инициирования образования искусственной трещины в массиве подкровельной толщи и организации выпуска угля на забойный конвейер

Параллельно с бурением шпуров готовят иницирующие элементы. В качестве иницирующего элемента может быть принят эластичный сосуд, выполненный в виде цилиндра диаметром, близким, но не более, диаметра шпура. В шахтных условиях используют гидрозабойку – полиэтиленовый рукав с гидрозатвором. Полость гидрозабойки через гидрозатвор заполняют жидкой невзрывчатой расширяющейся смесью (НРС), например водным раствором НРС-1, с известным временем твердения смеси.

По окончании бурения шпура вблизи его забоя или по всей длине, в зависимости от крепости угля, размещают иницирующий элемент (один или несколько), после чего шпур герметизируют.

Очистным комбайном вынимают стружку угля в подсечном слое. По мере продвижения комбайна вдоль очистного забоя передвигают секции механизированной крепи, бурят наклонные шпуров (при этом принимают расстояние между рядами шпуров не более чем расстояние между соседними шпурами в ряду) и оснащают их иницирующими элементами. И так в течение двух или трех циклов выемки угля в подсечном слое.

За это время НРС начнет твердеть, увеличиваясь в объеме и воздействуя на стенки шпуров. В массиве подкровельной толщи в зоне заложения иницирующих элементов появятся трещины в направлении от шпуров к ближайшей обнаженной поверхности – выработанному пространству, тем самым разупрочняя массив.

Когда секция крепи своим выпускным окном дойдет до части разупрочненного массива, осуществляют воздействие на подкровельную толщу динамическим скалывателем, отделяя ее – отделенная часть массива через выпускное окно поступает на забойный конвейер.

Выводы. Анализ горно-геологических условий угольных месторождений Кузбасса показал, что запасы, пригодные в перспективе для подземной добычи угля механизированными комплексами с роботизированной системой выпуска угля подкровельной толщи, сосредоточены в Бачатском, Ерунаковском, Кемеровском, Ленинском, Прокопьевско-Киселевском и Томь-Усинском ГЭР. Балансовые запасы в пластах мощностью более 5 м до глубины 600 м для подземной отработки составляют около 3 млрд.т.

В настоящее время в Кузбассе действуют 5 шахт («Алардинская» – пласт 6, «им. В.И. Ленина» – пласт IV-V, «Ольжерасская-Новая» – пласт 21, «Распадская Коксовая» – пласт III, «Сибирь» – пласт IV-V).

гинская» – пласт IV-V) на которых возможно использование механизированных комплексов с роботизированной системой выпуска угля подкровельной толщи на базе крепи КУВ, разрабатываемой в Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН (г. Кемерово).

Технология позволит обеспечить высокую производительность выемочного участка; снизить примерно в два раза объем проходки выемочных штреков относительно слоевой системы; упростить конструкцию и уменьшить металлоемкость комплекса по сравнению с комплексом CODCO ZF 8000/22/35, который включает дополнительный завальный конвейер.

Отработка выемочных столбов рекомендуется от фланговых наклонных стволов к центральным наклонным стволам системой разработки длинные столбы с полным обрушением кровли (ДСО) с выпуском угля подкровельной толщи. Подготовка выемочных участков – панельная спаренными выработками и оставлением неизвлекаемых ленточных целиков.

При доработке запасов угля в границах горных отводов разрезов технология с выпуском угля подкровельной толщи будет востребована при переходе к подземному способу разработки.

Необходимость предварительного разупрочнения кровли и подкровельной пачки угля, окончательный выбор способа разупрочнения необходимо определять опытным путем под наблюдением специализированных организаций (Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН, ВостНИИ).

Список литературы

1. Добыча угля в России. Tadviser: Государство. Бизнес. IT. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%94%D0%BE%D0%B1%D1%8B%D1%87%D0%B0_%D1%83%D0%B3%D0%BB%D1%8F_%D0%B2_%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8.
2. Шаклеин С.В. Нетрадиционные технологии добычи угля – основа интенсивного освоения минерально-сырьевой базы Кузбасса // Горная промышленность. – 2010. – № 4. – С. 22-25.
3. Технология разработки запасов мощных пологих пластов с выпуском угля / В.И. Клишин [и др.]. – Новосибирск: Наука, 2013. – 248 с.
4. Ермаков А.Ю., Качурин Н.М. Обоснование аэрологически безопасной одностадийной технологии отработки мощных пологих пластов с управляемым выпуском угля из межслоевых и подкровельных пачек. – Кемерово: АИ «Кузбассвуиздат», 2018. – 290 с.
5. Отработка мощного угольного пласта механизированным комплексом с выпуском подкровельной пачки / С.И. Калинин [и др.]. – Кемерово, 2011. – 224 с.
6. Ning Shi, Zhizeng Huang. Application of Longwall Top Coal Caving in Challenging Geological Conditions // Proceedings of the World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering, July 20-21, 2015. – Barcelona, Spain, 2015. – No. 354. – URL: http://avestia.com/MCM2015_Proceedings/files/papers/MMME354.pdf.
7. Longwall Top Coal Caving Method for Barapukuria Coal Field / Nadia Sultana Tarakki [et al.] // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2016. – Vol. 7. – Iss. 4. P. 285. – URL: https://www.researchgate.net/publication/303525170_Longwall_Top_Coal_Caving_Method_for_Barapukuria_Coal_Field_Dinajpur_Bangladesh.
8. A Review of Roof Instabilities Associated With Longwall Top Coal Caving / T. D. Le [et al.] // 52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 17-20 June, 2018. – Seattle, Washington, 2018. – URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/ARMA-2018-481>.
9. Adrian Moodie, James Anderson. Geotechnical Considerations for Longwall Top Coal Caving at Austar Coal Mine // 11th Underground Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy. – 2011. – P. 29-39. – URL: <http://ro.uow.edu.au/cgi/>.
10. A review of cavability evaluation in longwall top coal caving / Tien Dung Le [et al.] // International Journal of Mining Science and Technology. – 2017. – Vol. 27. – Iss. 6. – P. 907-915. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095268617305177>.
11. Caterpillar to supply two complete longwall top coal caving systems to mine in Turkey. – URL: <http://www.mining.com/web/caterpillar-to-supply-two-complete-longwall-top-coal-caving-systems-to-mine-in-turkey/>.
12. Разработка мощных пластов механизированными крепями с регулируемым выпуском угля / В.И. Клишин [и др.]. – Новосибирск: Наука, 2007. – 135 с.
13. Клишин В.И., Клишин С.В. Состояние и направление развития технологии разработки мощных угольных пластов механизированными крепями с выпуском // Известия Тульского государственного университета. – 2019. – С. 162-174.
14. Геолого-промышленная карта Кузнецкого бассейна. М.-б 1:100000: объяснительная записка / Под ред. А.З. Юзвickого. – Новосибирск: СНИИГГиМС. – 2000. – 128 с.
15. Угольная база России. Угольные бассейны и месторождения Западной Сибири (Кузнецкий, Горловский, Западно-Сибирский; месторождения Алтайского края и Республики Алтай). – Т. II. – М.: ООО Геоинформцентр, 2003. – 604 с.

16. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Кузнецкий, Горловский бассейны и другие угольные месторождения Западной Сибири ; ред. Яворский В.И. – М.: Издательство «Недра», 1969. – 912 с.

УДК 622.267

КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА ГИДРООБРАБОТКИ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМИ И ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

член-корр. РАН Клишин В.И., д.т.н. Шадрин А.В., Телегуз А.С.

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены методы гидрообработки углепородного массива, сопровождаемые образованием и распространением трещин под действием давления нагнетаемой жидкости и применяемые с целью предотвращения газодинамических явлений. Рассмотрены перспективы применения акустических методов для контроля процесса трещинообразования и эффективности профилактических мероприятий.

Ключевые слова: гидрообработка массива, направленный гидроразрыв, акустическая эмиссия, спектрально-акустический метод, прогноз выбросоопасности.

Введение. С увеличением глубины ведения горных работ и переходом границ, разделяющих угольные пласты по опасности проявления динамических и газодинамических явлений, возникает необходимость применения противоударных и противовыбросных мероприятий, требующих как текущего контроля процесса изменения свойств обрабатываемого массива, так и последующего контроля эффективности с целью выбора оптимальных способов и их параметров.

Гидрообработка углепородного массива широко применяется для управления кровлей при длинностолбовой отработке, а также для разгрузки пласта и интенсификации дегазации путем создания искусственной трещины или системы трещин в породах кровли или угле. Об опыте применения НГР и гидрообработке пласта на шахтах Кузбасса можно прочесть в наших работах за 2017-2020 годы.

В настоящее время на шахтах Кузбасса широко применяется метод направленного гидроразрыва (НГР) при решении различных технологических задач: снижения первичного и последующих шагов обрушения пород основной кровли [1,2], снижение пучения почвы [3] под влиянием опорного давления от очистного забоя, повышение устойчивости ленточного целика и сохраняемой выработки [4], снижение горного давления на крепь предварительно пройденной или формируемой демонтажной камеры. Метод НГР заключается в создании в монолитных труднообрушаемых породах кровли протяженной направленной трещины под действием давления нагнетаемой жидкости.

Для предупреждения динамических и газодинамических явлений применяются локальные и региональные способы гидрообработки для создания сети трещин в угле, изменения напряженного состояния и влажности угольной толщи.

Способы гидрообработки пласта включают: низконапорную пропитку и увлажнение пласта, гидрорыхление пласта и применяются в качестве региональных и локальных мер по предотвращению горных ударов и внезапных выбросов [5].

Эффективность способов гидрообработки, не сопровождаемых процессом трещинообразования, таких как низконапорная пропитка и низконапорное увлажнение пласта, оценивается по показателю влажности пласта или инструментальными методами прогноза выбросо- и удароопасности. Эффективность гидрорыхления и гидроразрыва пласта, сопровождаемых процессом трещинообразования, определяется как инструментальными, так и геофизическими методами [5], позволяющими фиксировать факт распространения и роста трещин и изменение напряженного состояния углепородного массива.

Цель работы: обосновать повышение качества контроля гидрообработки путем одновременного применения инструментальных и геофизических методов.

Инструментальные методы контроля гидрообработки углепородного массива. Методы инструментального контроля эффективности гидрообработки пласта включают проведение прогноза по начальной скорости газовыделения и выходу буровой мелочи из контрольных шпуров [5].

К инструментальному контролю процесса создания протяженной направленной трещины в породах кровли угольного пласта методом НГР относятся методы:

- наблюдения за показаниями давления рабочей жидкости при ее нагнетании. Кратковременные скачки стрелки манометра подтверждают появление в массиве искусственных трещин: образовавшиеся трещины заполняются рабочей жидкостью, резко возрастает количество жидкости, поступающее в трещину, а давление на манометре, установленном в гидросистеме непосредственно перед устьем скважины, кратковременно падает;
- наблюдения за истечением рабочей жидкости в свободную поверхность выработки из соседних скважин НГР или шпуров, пробуренных для установки анкеров глубокого заложения или реперных станций, позволяют судить о радиусе распространения трещины НГР;
- видеоэндоскопическое обследование контрольных шпуров для определения глубины раскрытия трещин НГР.

Общий недостаток вышеизложенных инструментальных способов контроля трещинообразования в породах кровли и в угле заключается в отсутствии оценки напряженного состояния краевой части пласта и вмещающих пород. Оценить перераспределение горного давления в зоне возможного влияния трещины НГР можно по наблюдениям за показаниями манометров, установленных на стойках секции механизированной крепи при разупрочнении основной кровли вблизи очистного забоя.

На шахте «Юбилейной» метод НГР был применен с целью снижения последующих шагов обрушения кровли и исключения ее зависания в выработанном пространстве в районе сопряжения с вентиляционным штреком 16-21. Схема расположения скважин НГР представлена на рис. 1.

В породах основной кровли пласта 16 мощностью от 20 м до 27 м залегают разномеристые алевролиты крепостью до 9 по шкале проф. М.М. Протодяконова и мелкозернистые песчаники крепостью 9-12. По обрушаемости основная кровля относится к средне- и труднообрушаемой. Глубина разработки – от 475 м до 780 м. Вентиляционный штрек 16-21 закреплен анкерной крепью с использованием канатных анкеров глубокого заложения. Зависание пород основной и непосредственной кровли в выработанном пространстве над вентиляционным штреком достигает 30 м, что способствует оттоку части воздуха вентиляционной струи в выработанное пространство. Для исключения зависания применяется схема НГР с наклонными отсечными скважинами, пробуренными с разворотом на очистной забой на угол 60° (рис. 1, 2).

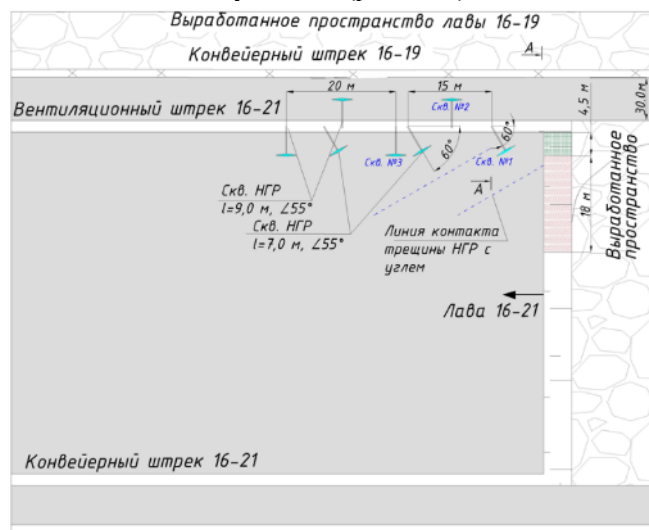


Рис. 1. Схема расположения скважин НГР в вентиляционном штреке 16-21

До и после гидроразрыва в скважинах №№1-3 на манометрах 15-ти секций механизированной крепи очистного забоя были зафиксированы показания давления. После гидроразрыва давление кровли на перекрытие трех первых секций (до 4,5 м от сопряжения с вентиляционным штреком 16-21) снизилось на 30-40%, а на 12-ти следующих секциях давление повысилось (далее измерения не проводились). Шаг установки секций крепи – 1,5 м. Во время гидрообработки и проведения измерений работы по выемке угля и передвижка секций механизированной крепи не производились.

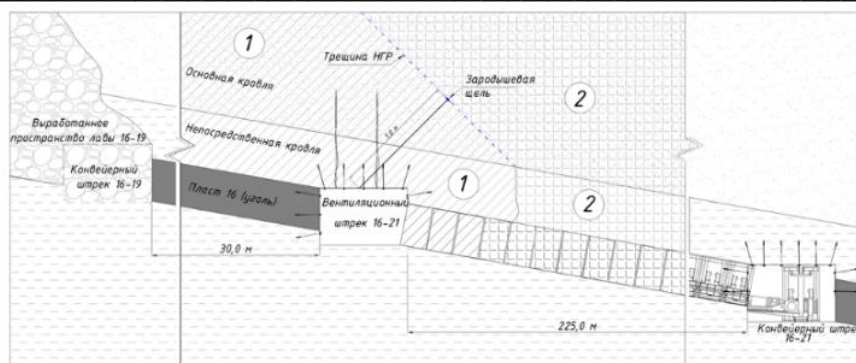


Рис. 2. Схема распределения горного давления на стойках секции механизированной крепи после НГР в скважине №1

По мере подвигания очистного забоя консоль основной кровли, зависшая на сопряжении очистного забоя с вентиляционным штреком, опиралась на краевую часть пласта и целик угля. Трещина НГР разделила зависшую консоль на две части (см. рис. 2). Левая часть (1), имеющая меньший вес, «легла» на межлавный целик, часть консоли (2), имеющая больший вес, «легла» на краевую часть очистного забоя. Этим можно объяснить увеличение давления эмульсии в стойках механизированной крепи на расстоянии от 4,5 м до 22,5 м от вентиляционного штрека. Обрушение пород кровли в выработанном пространстве над вентиляционным штреком 16-21 на исследуемом участке произошло в последующем при подвигании очистного забоя, давление в стойках механизированной крепи выравнивалось.

Факт разгрузки краевой части пласта в вентиляционном штреке и перераспределения горного давления подтверждает то обстоятельство, что трещина НГР прошла по заданной траектории. Однако, когда на выемочном участке ведутся очистные работы, показания манометров стоек секций механизированной крепи непрерывно визуальное контролировать невозможно. Это можно сделать путем автоматизации измерения давления манометров. Примером организации такого контроля является система прогноза динамических явлений фирмы Марко. В ней непрерывное измерение давления в стойках крепи и его последующий анализ осуществляется с помощью системы электрогидравлического управления Марко «Цифровая шахта» [6, 7].

Геофизические методы контроля гидрообработки угленородного массива. К геофизическим методам, позволяющим отслеживать динамику изменения напряжений и распространения трещин в угле и вмещающих породах кровли, относятся:

- метод сейсмической томографии с построением сейсмографических разрезов распределения скоростных характеристик прохождения сейсмических волн по всей ширине выемочного столба [8];
- спектрально-акустический метод, заключающийся в определении отношения амплитуд высокочастотной и низкочастотной частей спектра акустического сигнала, генерируемого в горный массив [9];
- метод акустической эмиссии, оценивающий интенсивность распространения трещин в массиве [9].

Метод сейсмической томографии позволяет определить на исследуемом участке, оконтуренном выработками, зоны с низкой и повышенной трещиноватостью, для которых характерны соответственно максимальные и минимальные скорости прохождения сейсмических волн. По результатам сейсмической томографии можно оценить зоны распространения и интенсивности трещинообразования после гидрообработки между датчиками приема искусственного акустического сигнала и его источником, т.е. данный метод охватывает большую область и может быть использован при оценке эффективности гидрообработки протяженных скважин предварительной дегазации и/или последующего увлажнения [10]. Недостаток метода – исследуемый участок массива должен быть оконтурен действующими выработками, если исследуемым участком массива является целик угля между выработанным пространством и подготовительной выработкой соседней лавы, то для оценки трещинообразования при гидрообработке лучше использовать метод акустической эмиссии (АЭ).

Под интенсивностью акустической эмиссии понимают число «скачков» растущей трещины в единицу времени [11]. Растущая трещина излучает акустические колебания, регистрируя кото-

рые можно судить о соответствии гидравлических параметров (давления и скорости нагнетания жидкости) требуемым величинам. Это позволяет не только оценить эффективность, но и контролировать процесс трещинообразования в процессе гидрообработки. При использовании насоса с жесткой рабочей характеристикой режимами нагнетания жидкости в скважину можно управлять следующими способами [12]:

- подбором опытным путем длины фильтрующей части скважины в соответствии с выбранным режимом гидрообработки при применении способов с герметизацией устья скважины;
- сбросом части жидкости с выхода насоса на всас или одновременным подключением нескольких скважин для снижения расхода и давления жидкости в каждой скважине;
- последовательным подключением двух насосов для увеличения расхода и давления жидкости.

Также, по числу импульсов АЭ, зарегистрированных при нагнетании рабочей жидкости в инициирующую щель, можно судить о протяженности трещины НГР по формуле [9]:

$$l = l_0 e^{J/k_e}, \quad (1)$$

где l – длина трещины гидроразрыва, м; l_0 – начальная длина трещины (диаметр инициирующей щели); J – число импульсов акустической эмиссии; k_e – безразмерный коэффициент, определяемый по результатам опытного нагнетания.

Более подробно задача установления связи параметров АЭ с параметрами гидрообработки углепородного массива рассмотрена в статье [12].

Для оценки напряжений во вмещающих породах используется спектрально-акустический метод, основанный на анализе спектра акустического сигнала, генерируемого в горный массив исполнительным органом комбайна или бурового инструмента. Критерием оценки предельных напряжений массива является коэффициент относительных напряжений, определяемый как отношение амплитуд высокочастотной и низкочастотной части спектра [13,14].

Физической основой спектрально-акустического метода является то, что коэффициент затухания акустических колебаний в первом приближении прямо пропорционален частоте колебаний и обратно пропорционален средним напряжениям, действующим на трассе распространения колебаний [15]. Отсюда следует, что с ростом напряжений коэффициент затухания высокочастотных гармоник уменьшается сильнее, чем низкочастотных. Поэтому отношение амплитуд высокочастотных и низкочастотных гармоник с ростом напряжений возрастает. Известны два варианта исполнения спектрально-акустического метода, отличающихся выбором низкочастотных и высокочастотных поддиапазонов используемых частот. Их особенности подробно рассмотрены в работе [15]. Существенным недостатком этих вариантов исполнения метода является обработка неполного спектра акустического сигнала. Поэтому если при подходе к угрожаемому участку пласта изменение спектра сигнала произойдет в области частот, расположенной между низкочастотным и высокочастотным поддиапазоном, опасность может быть не зарегистрирована. Для исключения такой ошибки прогноза предложена модификация спектрально-акустического метода, использующего весь непрерывный спектр АЧХ (метод контроля медиан АЧХ) [15].

Выводы. Из приведенного материала следует, что для оперативного контроля процесса гидрообработки углепородного массива и оценки эффективности его выполнения весьма перспективными оказались два акустических метода: акустической эмиссии и спектрально-акустический. Для уменьшения массы оборудования желательно, чтобы эти два метода контроля были реализованы в одном корпусе. С этой целью нами разработано техническое задание на изготовление экспериментального портативного прибора, использующего метод акустической эмиссии – для контроля процесса гидрообработки, и спектрально-акустический метод на основе измерения медианы АЧХ искусственного акустического сигнала – для оценки напряженного состояния массива вмещающих пород.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-17-01143).

Список литературы

1. Инструкция по выбору способа и параметров разупрочнения кровли на выемочных участках. – Л: Мин-во угольной промышленности СССР. Всесоюз. ордена Трудового Красного Знамени НИИ горн. геомех. и маркшейд. дела., 1991. – 102 с.
2. Опыт применения направленного гидроразрыва основной кровли при выводе механизированного комплекса из монтажной камеры / В.И. Клишин [и др.] // Уголь. – 2015. – №11. – С. 12-16.

3. Управление кровлей для повышения эффективности поддержания выработок, охраняемых податливыми целиками / В.И. Клишин [и др.] // Уголь. – 2019. – №10. – С. 35-41.
4. Телегуз А.А. Мониторинг комплекса мероприятий по разгрузке межлавого целика методом акустического зондирования // Ежегодная конф. молодых ученых ФИЦ УУХ СО РАН «Развитие – 2020» [Электронный ресурс] : сборник трудов конференции 18 – 20 мая 2020 г. ; отв. ред. А.Е. Майоров. – Электронные текстовые дан. – Кемерово: ФИЦ УУХ СО РАН, 2020. – С. 79-87.
5. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору: Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений : утв. приказом № 515 от 10 декабря 2020 г.
6. Геомеханический мониторинг методом анализа конвергенции: прогноз вероятности горных ударов и участков их проявления в лавах / М. Reuter [и др.] // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2018. – №4. – С. 17-22.
7. Мониторинг динамических проявлений горного давления в системе управления марко «Цифровая шахта» / М. Ройтер [и др.] // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. статей / Сиб. гос. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2015. – С. 33-39.
8. Тайлаков О.В., Макеев М.П., Соколов С.В. Повышение эффективности гидродинамического воздействия на углепородный массив на основе контроля его параметров методом сейсмической томографии // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – №6. – С. 38-42.
9. Шадрин А.В. Телегуз А.С. Перспективы применения акустических методов при прогнозе и предотвращении газодинамических явлений и крупноплощадных обрушений кровли в угольных шахтах // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2017. – №3. – С. 10-14.
10. Seismic monitoring of hydrodynamic impact on coal seam at interval hydraulic fracturing / V. I. Klishin [and etc.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science «International Scientific and Research Conference on Knowledge-based technologies in development and utilization of mineral resources 4–7 June 2019, SibSIU, Novokuznetsk, Russia» –2019. – P. 1-7 doi:10.1088/1755-1315/377/1/012034.
11. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
12. Шадрин А.В., Телегуз А.С. Экспресс-метод определения оптимальных параметров гидрообработки угольно-породного массива по акустической эмиссии // Вестник кузбасского государственного технического университета. – 2019, – №4. – С. 5-16.
13. Методика выполнения акустических зондирований горного массива с применением программно-аппаратного комплекса. – М.: МНТЛ РИВАС, 2016. – 36 с.
14. Мирер С.В., Хмара О.И., Шадрин А.В. Спектрально-акустический прогноз выбросоопасности угольных пластов. – М. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 1999. – 92 с.
15. Шадрин А.В., Контримас А.А., Телегуз А.С. Сравнительный анализ вариантов исполнения спектрально-акустического метода прогноза динамических явлений // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2018. – №4. – С. 371-376.

УДК 622.267

СХЕМА ОПЕРАТИВНОГО РАЗУПРОЧНЕНИЯ ПОРОД ОСНОВНОЙ КРОВЛИ ПЛАСТА ИЗ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННОГО ГИДРОРАЗРЫВА

¹член-корр. РАН Клишин В.И., ¹к.т.н. Опрук Г.Ю., ¹Телегуз А.С., ²Галкин А.В.,
³Буянов К.А.

1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
г. Кемерово, Россия

2 – АО «ТопПром», г. Новокузнецк, Россия

3 – ООО «Шахта «Юбилейная», г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье представлена технологическая схема и оценка эффективности применения метода направленного гидроразрыва, направленного на ликвидацию явлений зависания пород основной и непосредственной кровли в выработанном пространстве над вентиляционным штреком выемочного участка.

Ключевые слова: гидрообработка массива, направленный гидроразрыв, акустическая эмиссия, спектрально-акустический метод, коэффициент относительных напряжений.

Введение. Одной из сложнейших проблем, возникающих при отработке угольных пластов длинностолбовыми системами разработки, является управление труднообрушаемыми кровлями.

Многолетний опыт применения на шахтах Кузбасса направленного гидроразрыва (НГР) показал его практическую эффективность. Наиболее востребовано применение технологии НГР на угольных пластах с труднообрушаемыми кровлями, склонными к площадному зависанию [1]. Кроме этого, НГР применим в случае необходимости разгрузки от горного давления охранных целиков и локальных мест сопряжения горных выработок [2]. Существующие методы разупрочнения труднообрушающихся пород (передовое торпедирование, гидромикроторпедирование и т. д.) [3], несмотря на опытную длительную проверку, не дают в большинстве случаев положительных результатов, так как они обладают, помимо частных, общими недостатками – неравномерностью и неуправляемостью разупрочнения.

В условиях шахт Кузбасса продолжают опытно-промышленные работы по внедрению технологии направленного гидроразрыва кровли в различных технологических схемах [4, 5]. В Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН и ИГД СО РАН был предложен новый способ разупрочнения труднообрушающейся кровли методом направленного гидроразрыва, позволяющий получить более равномерное и направленное изменение механических свойств массива. На стенке скважины или шпура в породе прорезается иницирующая щель [6] необходимой формы и размеров, герметизация скважины производится неуравновешенным герметизатором типа «Таурис» таким образом, чтобы вся нагнетаемая рабочая жидкость подавалась к иницирующей щели. Повышение давления жидкости создает повышение растягивающих усилий на стенках иницирующей щели, а в ее «носике» происходит концентрация силовых напряжений, под действием которых щель страгивается и начинает развиваться в направлении нарезанной плоскости [7, 8]. Гидроразрыв характеризуется быстротечностью процесса, так как в НГР вся рабочая жидкость расходуется на образование одной трещины, а гидрорасчленение происходит в объеме массива и жидкость расходуется на заполнение большего числа естественных трещин [9]. Способ позволяет исключить площадное зависание пород и их резкие динамические воздействия на механизированные комплексы в период первичной и последующих осадок, при работе лавы на убывающий целик, а также обеспечить сохранность повторно используемых горных выработок в зоне очистных работ [10, 11].

Применение схемы оперативного разупрочнения кровли из подготовительной выработки. С целью снижения последующих шагов посадки основной кровли пласта 16 и исключения ее зависания на сопряжении вентиляционного штрека 16-21 с очистным забоем сотрудниками Института Угля ФИЦ УУХ СО РАН совместно с руководством ООО «Шахта «Юбилейная» было принято решение о проведении работ по предварительному разупрочнению основной кровли методом НГР. Проведение мероприятий по НГР позволит изменить направление действия наибольшего усилия от горного давления на крепь механизированного комплекса и на предохранительный целик, осуществляя обрыв консоли основной кровли.

Основная кровля пласта 16 подставлена разнотекстурными алевролитами крепостью до 9 по шкале Протодьяконова и мелкозернистыми песчаниками крепостью 9 - 12 мощностью от 20 до 27 м. По обрушаемости основная кровля относится к средне- и труднообрушаемой. Глубина разработки – от 475 до 780 м. Вентиляционный штрек 16-21 закреплен анкерной крепью по двухуровневой системе. Зависание пород основной и непосредственной кровли в выработанном пространстве над вентиляционным штреком достигает 30 м, что способствует оттоку части воздуха вентиляционной струи в завал.

Для предотвращения зависания пород кровли разработана схема оперативного разупрочнения кровли вентиляционного штрека 16-21 с целью посадки завальной части (рис. 1, 2). Схема включает проведение скважины глубиной заложения 7,0 м, направленной на завал под углом 60° от оси выработки на расстоянии 5,0 м от сопряжения штрека с лавой, для исключения попадания трещины НГР в балку анкерования. Далее мероприятия по оперативной посадке кровли завальной части вентиляционного штрека 16-21 выполняются через каждые 15,0 м подвигания очистного забоя. Скважины, пробуренные с наклоном на целик угля, снижают влияние отработанной лавы 16-19 и обеспечивают разгрузку целика. Интервал бурения сонаправленных скважин принимается равным 20 м, а разнонаправленных 10 м.

При НГР в скважинах №№2, 3 было отмечено истечение жидкости из скважин №№1, 2 соответственно. Результаты видеоэндоскопических съемок контура и забоя скважин №№1, 2 (рис. 3) показали, что истечение жидкости происходит из иницирующей щели. Таким образом, находит инструментальное подтверждение факт пересечения траекторий трещин НГР.

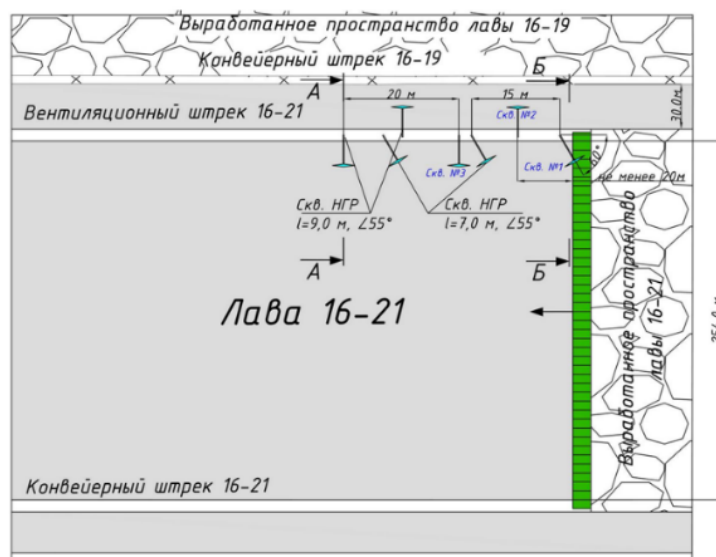


Рис. 1. Схема расположения скважин НГР в вентиляционном штреке 16-21

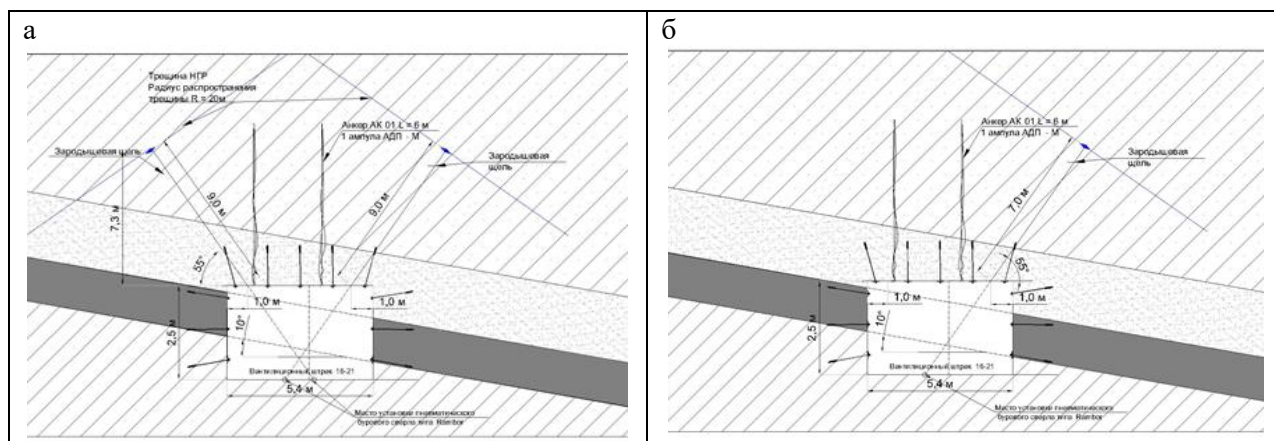


Рис. 2. Вертикальная схема заложения скважин гидроразрыва пород кровли пласта 16 из вентиляционного штрека 16-21: а – вид А-А; б – вид Б-Б

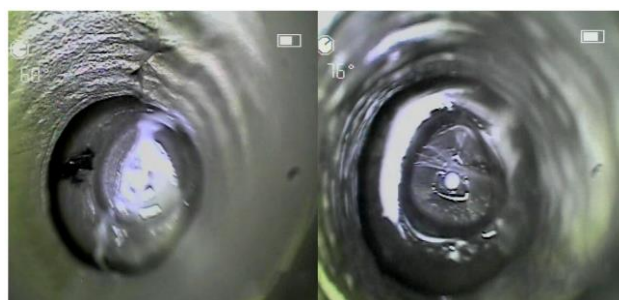


Рис 3. Истечение жидкости из инициирующих щелей скважин №№ 1, 2

Оценка напряженного состояния краевой части отрабатываемого выемочного столба и межлавого целика производилась до и после работ по НГР в скважинах №№1-3 методом акустического зондирования с помощью портативного прибора РИПАС согласно методике [12]. Результаты оценки напряженного состояния пласта 16 в межлаговом целике, определяемого безразмерным коэффициентом относительных напряжений [13], показаны на рис. 4. Пунктирными линиями отмечено положение скважин гидроразрыва относительно очистного забоя. По оси «X» показано расстояние от очистного забоя до точек установки геофона, по оси «Y» - значение коэффициента относительных напряжений, снижение которого после разупрочнения пород кровли, говорит о разгрузке вмещающих пород в зоне влияния НГР. Из рисунка видно значительное снижение пиковых значений коэффициента относительных напряжений (в 1,9 раза) в пределах зоны опорного давления лавы после направленного гидроразрыва по сравнению с первым измерением до НГР.

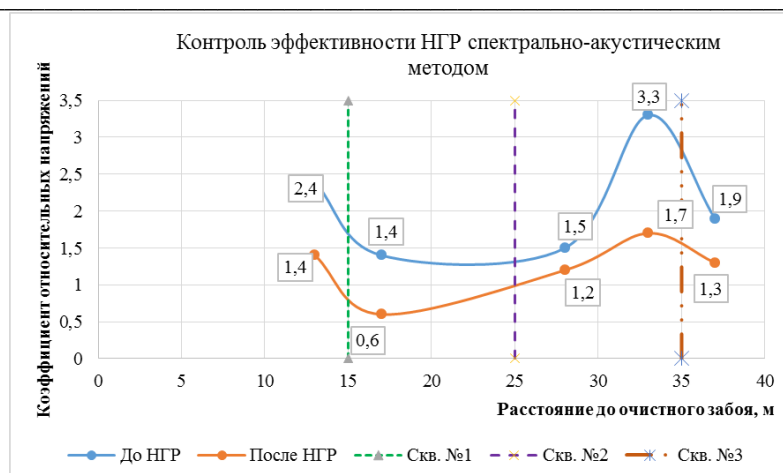


Рис. 4. Результаты акустического зондирования в краевой части выемочного столба и межлавном целике пласта 16

Обрушение вентиляционного штрека в выработанном пространстве произошло в последующем при начале работ по выемке полезного ископаемого и подвигании очистного забоя 16-21.

Выводы. Таким образом, примененная схема оперативного разупрочнения пород кровли пласта наклонными скважинами, пробуренными с разворотом на очистной забой, в совокупности с ранее используемой схемой НГР, включающую наклонные скважины, обеспечивающие разгрузку краевой части пласта и целика угля от опорного давления действующей и отработанной лавы, позволила уменьшить давление на крепь подготовительной выработки и сократить зависание ее закрепленной части в выработанном пространстве. Инструментальным и геофизическим методом установлено соответствие контрольных параметров трещины НГР (длина трещин и направление их распространения) расчетным значениям.

Список литературы

1. Инструкция по выбору способа и параметров разупрочнения кровли на выемочных участках. – Л.: ВНИМИ, 1991. – 102 с.
2. Klishin V.I., Opruk G.Yu., Teleguz A.S. Ensuring stability of maintained goaf by means of directional hydraulic fracturing (DHF) // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 84. – 012021.
3. Инструкция по безопасному ведению горных работ на шахтах, разрабатывающие угольные пласты, склонные к горным ударам (РД 05-328-99) // Предупреждение газодинамических явлений в угольных шахтах : сб. документов / Колл. Авт. – М.: ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2000. – 119 с.
4. Опыт применения направленного гидроразрыва основной кровли при выводе механизированного комплекса из монтажной камеры / В.И. Клишин [и др.] // Уголь. – 2015. – № 11. – С. 12-16.
5. Опыт применения технологии направленного гидроразрыва (НГР) пород кровли с целью обеспечения устойчивого состояния сохраняемой выработки в условиях шахты «Есаульская» / В. И. Клишин [и др.] // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2017. – № 3. – С.177-181.
6. Патент РФ. Щелеобразователь / М.В. Курленя, В.И. Клишин, Д.И. Кокоулин. – № 129148, Бюл. № 17. – 2013.
7. The effect of natural fractures on hydraulic fracturing propagation in coal seams / Tao Wang [et al.] // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – № 150. – P. 180-190.
8. Numerical simulation by hydraulic fracturing engineering based on fractal theory of fracture extending in the coal seam / Xiaodong Zhang [et al.] // Journal of Natural Gas Geoscience. – 2016. – № 1. – P. 319-325.
9. Near Wellbore Hydraulic Fracture Propagation from Perforations in Tight Rocks: The Roles of Fracturing Fluid Viscosity and Injection Rate / S.H. Fallahzadeh [et al.] // Energies. – 2017. – № 10. – 359 p.
10. Джевецки Я. Новые методы предотвращения опасных горных ударов // Глюкауф. – № 2(3). – 2002. – С. 18 – 21.
11. Методические положения по выбору способов и определению параметров управления труднообрушающимися кровлями. – М.: ИГД им. А. А. Скочинского. – 1980. – 15 с.
12. Телегуз А. С. Контроль гидроразрыва труднообрушаемой кровли спектрально-акустическим методом // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно-развитых регионах: сб. материалов XII междунар. науч.-прак. конф. / Кузбасский гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева. – Кемерово, 2017 – С. 126-133.
13. Методика выполнения акустических зондирований горного массива с применением программно-аппаратного комплекса. – Москва: МНТЛ РИВАС, 2016. – 36 с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НДС МАССИВА С ГРАВИТАЦИОННО-ТЕКТОНИЧЕСКИМ ПОЛЕМ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

д.ф.-м.н. Лавриков С.В., д.ф.-м.н. Ревуженко А.Ф.

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. Рассмотрена модель теории упругости со структурным параметром. Модель описывает процесс деформирования с учетом локальных изгибов. Сформулирована замкнутая система уравнений в виде конечно-разностного приближения. Численно решена задача о деформировании породного массива в окрестности выработки с гравитационно-тектоническим естественным полем напряжений. Дан расчет потенциально опасных зон повышенной концентрации напряжений в окрестности контура выработки.

Ключевые слова: Горный массив, упругость, структурный параметр, локальные изгибы, концентрация напряжений.

Введение. Одной из причин повышенной удароопасности рудников Западной Сибири является гравитационно-тектонический тип естественного напряженного состояния массива [1-4]. В ряде источников отмечается, что коэффициент отношения тектонических напряжений к гравитационным варьируется в диапазоне $\lambda = 0.5 \div 3$ и иногда может достигать величины $\lambda = 5$ и более. В [5] проведено моделирование неравнокомпонентного сжатия образца горной породы с круговым отверстием и показано, что на контуре отверстия формируются трещины отрыва. В целом, гравитационно-тектонический тип естественного поля напряжений массива означает, что в окрестности выработанного пространства формируются зоны высокой концентрации напряжений, которые существенно снижают безопасность ведения горных работ.

В ряде работ, например, в [6-8], анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) и устойчивости породного массива проводится в рамках модели линейно-упругого тела: строятся изолинии напряженного состояния, определяются коэффициенты концентрации напряжений, с использованием различных критериев рассчитываются зоны потенциального разрушения приконтурной зоны массива. Увеличение глубины подземных работ и связанные с этим риски динамических проявлений горного давления приводят к необходимости более точного прогноза поведения массивов и, следовательно, – к необходимости усложнения используемых для моделирования определяющих уравнений.

В современной геомеханике развивается несколько различных подходов к моделированию структурно-неоднородных геоматериалов. В работах [9-12] разрабатываются упругопластические модели с внутренними переменными, позволяющие описывать блочно-зеренное строение пластических сред и геоматериалов. В рамках этого направления в [13-15] разработаны определяющие соотношения и проведено моделирование запредельных режимов деформирования массива с учетом динамических скачков разупрочнения. В [16,17] развиваются модели с использованием методов неархимедового анализа, когда структурой наделяется само пространство, где осуществляются процессы деформирования. В [18-21] развивается подход к построению структурно-неоднородных моделей нелокального типа. В [22-24] разработаны оригинальная математическая модель и разностная схема для расчета НДС твердых тел с учетом структурных параметров. Последние вводятся для описания локальной неаффинности деформаций – локальных изгибов. Такие модели приспособлены для описания поведения геоматериалов с высоким уровнем концентрации напряжений.

Цель настоящей работы состоит в проведении численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород в условиях преимущественно тектонического поля естественных напряжений в окрестности горизонтальной выработки на основе модели со структурным параметром [22].

Математическая постановка задачи. Пусть задана горизонтальная протяженная выработка радиуса R и окружающий ее породный массив с линейными размерами L_1, L_2 . Задачу будем рассматривать в предположении плоской деформации. Расчетная область представлена регулярной решеткой из $N = m \times n$ частиц, где m – число частиц вдоль L_1 , n – число частиц вдоль L_2 (рис. 1 а). Моделирование естественного гравитационно-тектонического поля напряжений будем осу-

ществлять заданием соответствующих сжимающих усилий q, p на границах области, коэффициент бокового распора $\lambda = p/q$. Контур выработки считается свободным от напряжений.

Уравнения модели запишем в виде конечно-разностной схемы расчета. Согласно [22], они представляют собой уравнения равновесия (первые два уравнения – равенство нулю главного вектора сил, последнее – равенство нулю главного момента сил):

$$\begin{aligned} t_{11}(A_{ij}) - t_{11}(C_{ij}) + t_{21}(B_{ij}) - t_{21}(D_{ij}) &= 0; \\ t_{12}(A_{ij}) - t_{12}(C_{ij}) + t_{22}(B_{ij}) - t_{22}(D_{ij}) &= 0; \\ t_{12}(A_{ij}) + t_{12}(C_{ij}) - t_{21}(B_{ij}) - t_{21}(D_{ij}) &= 0, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (1)$$

и определяющие соотношения (первые три уравнения – закон Гука, последние два – описывают локальные изгибы):

$$\begin{aligned} \frac{u_1(A_{ij}) - u_1(C_{ij})}{2r} &= \frac{1}{E} \left(\frac{t_{11}(A_{ij}) + t_{11}(C_{ij})}{2} - \mu \frac{t_{22}(B_{ij}) + t_{22}(D_{ij})}{2} \right); \\ \frac{v_2(B_{ij}) - v_2(D_{ij})}{2r} &= \frac{1}{E} \left(\frac{t_{22}(B_{ij}) + t_{22}(D_{ij})}{2} - \mu \frac{t_{11}(A_{ij}) + t_{11}(C_{ij})}{2} \right); \\ \frac{u_2(A_{ij}) - u_2(C_{ij})}{2r} + \frac{v_1(B_{ij}) - v_1(D_{ij})}{2r} &= \frac{2(1+\mu)}{E} \cdot \frac{t_{12}(A_{ij}) + t_{12}(C_{ij}) + t_{21}(B_{ij}) + t_{21}(D_{ij})}{2}; \\ \frac{u_1(A_{ij}) + u_1(C_{ij})}{2} - \frac{v_1(B_{ij}) + v_1(D_{ij})}{2} &= \xi \left(\frac{t_{11}(A_{ij}) - t_{11}(C_{ij})}{2r} - \frac{t_{21}(B_{ij}) - t_{21}(D_{ij})}{2r} \right); \\ -\frac{u_2(A_{ij}) + u_2(C_{ij})}{2} + \frac{v_2(B_{ij}) + v_2(D_{ij})}{2} &= \xi \left(-\frac{t_{12}(A_{ij}) - t_{12}(C_{ij})}{2r} + \frac{t_{22}(B_{ij}) - t_{22}(D_{ij})}{2r} \right), i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь все компоненты смещений и напряжений определены на границах между частицами с линейным размером $2r$ (рис. 1 б), E, μ – упругие модуль Юнга и коэффициент Пуассона, ξ – структурный параметр. Последние два уравнения в классической теории упругости явно не формулируются и, фактически, содержатся в предположении о гладкости поля смещений – постулате о диффеоморфизме [25].

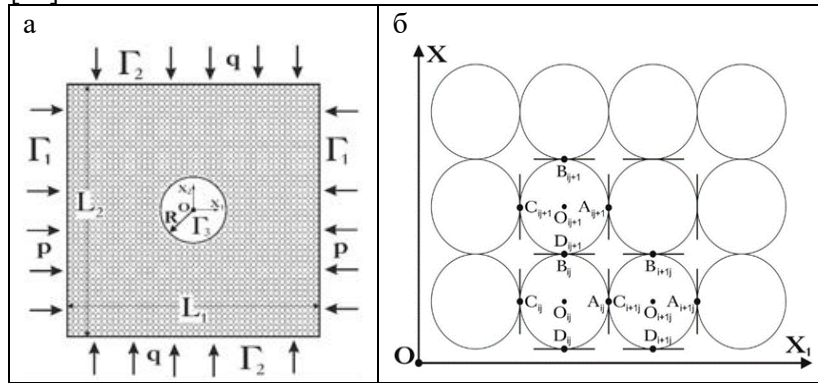


Рис. 1. Расчетная область массива в окрестности выработки (а); внутренняя структура среды: схема взаиморасположения контактов между частицами (б)

В рассматриваемой модели предположение о гладкости ослаблено – для описания кинематики введены два независимых гладких поля перемещений: одно поле $\mathbf{u} = (u_1, u_2)$ определено на контактах, показанных вертикальной чертой, т.е. в узлах A_{ij}, C_{ij} , другое поле $\mathbf{v} = (v_1, v_2)$ – на контактах, показанных горизонтальной чертой, т.е. в узлах B_{ij}, D_{ij} (см. рис. 1 б). Компоненты тензора напряжений также определяются в зависимости от выбранных площадок: компоненты t_{11}, t_{12} – на «вертикальных» контактах в узлах A_{ij}, C_{ij} , компоненты t_{21}, t_{22} – на «горизонтальных» контактах в узлах B_{ij}, D_{ij} . В итоге, разностная сетка состоит из двух вложенных с определенным смещением друг в друга сеток, на которых определены соответствующие компоненты перемещений и напряжений [26]. Очевидно, что при $\xi = 0$ последние два уравнения (2) приводят к совпадению полей смещений $\mathbf{u}$ и $\mathbf{v}$, а модель переходит в классическую теорию упругости. При $\xi \neq 0$ определяющие соотношения (2) описывают локальные изгибы частиц с линейным размером $2r$.

На контактах между частицами должны выполняться условия непрерывности напряжений

$$\begin{aligned} t_{11}(C_{i+1j}) &= t_{11}(A_{ij}), t_{12}(C_{i+1j}) = t_{12}(A_{ij}), i = \overline{1, m-1}, j = \overline{1, n}; \\ t_{22}(D_{ij+1}) &= t_{22}(B_{ij}), t_{21}(D_{ij+1}) = t_{21}(B_{ij}), i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n-1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Примем, что смещения на границах между зернами также непрерывны, т.е.

$$u_1(C_{i+1j}) = u_1(A_{ij}), u_2(C_{i+1j}) = u_2(A_{ij}), i = \overline{1, m-1}, j = \overline{1, n};$$

$$v_1(D_{ij+1}) = v_1(B_{ij}), v_2(D_{ij+1}) = v_2(B_{ij}), i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n-1}. \quad (4)$$

Если в (4) отказаться от условия непрерывности и вместо этого рассмотреть разрывы нормальной и касательной составляющих смещений, то в рамках указанного подхода можно сформулировать соответствующие уравнения для описания дилатансии, внутреннего трения или пластических сдвигов.

В целом, рассмотренная система уравнений (1) – (4) описывает поведение линейно-упругого тела с внутренней структурой. При переходе к континуальному приближению уравнения (1) – (4) показывают, что тензор осредненных деформаций среды зависит не только от напряжений (закон Гука), но и от вторых производных напряжений по координатам. Поэтому наибольшее влияние структурного параметра будет проявляться в областях массива с большими градиентами напряжений.

Перейдем к определению краевых условий. Как отмечалось, на внешних границах области заданы сжимающие усилия p, q , т.е.

$$\begin{aligned} t_{11}(C_{1j})|_{\Gamma_1} = t_{11}(A_{mj})|_{\Gamma_1} = -p, t_{12}(C_{1j})|_{\Gamma_1} = t_{12}(A_{mj})|_{\Gamma_1} = 0, j = \overline{1, n}; \\ t_{22}(D_{i1})|_{\Gamma_2} = t_{22}(B_{in})|_{\Gamma_2} = -q, t_{21}(D_{i1})|_{\Gamma_2} = t_{21}(B_{in})|_{\Gamma_2} = 0, i = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (5)$$

Контур Γ_3 является криволинейным. Он аппроксимируется ломанной линией, содержащей только горизонтальные и вертикальные контакты. Множество таких контактов обозначим соответственно через Γ_3^{horiz} и Γ_3^{vert} , т.е. $\Gamma_3 = \Gamma_3^{horiz} \cup \Gamma_3^{vert}$. Корректными для уравнений (1) – (4) будут условия, когда на множестве контактов Γ_3^{horiz} задаются либо напряжения t_{21}, t_{22} , либо смещения v_1, v_2 , а на множестве контактов Γ_3^{vert} – соответственно либо напряжения t_{11}, t_{12} , либо смещения u_1, u_2 . Возможны, конечно, и более сложные условия. Таким образом условие того, что контур выработки от напряжений свободен, принимает вид

$$\begin{aligned} t_{21}|_{\Gamma_3^{horiz}} = t_{22}|_{\Gamma_3^{horiz}} = 0; \\ t_{11}|_{\Gamma_3^{vert}} = t_{12}|_{\Gamma_3^{vert}} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнения (1) – (6) образуют замкнутую систему относительно неизвестных смещений и напряжений, определенных в узлах двух указанных выше разностных сеток. Решение этой системы будем осуществлять численно методом Гаусса с выбором главного элемента по строке матрицы.

Результаты численного моделирования. Выберем следующие значения параметров

$$p = \lambda q, q = 1, E = 2000, \mu = 0,25, L_1 = L_2 = 3,85, R = 1, r = 0,04. \quad (7)$$

Здесь все величины размерности длины отнесены к R , величины размерности напряжений отнесены к q . Будем теперь варьировать два параметра: структурный параметр ξ (его размерность равна $[m^2/Па]$, отнесен к величине R^2/q) и безразмерный коэффициент бокового распора λ .

В качестве базового исходного решения естественно взять решение в рамках теории классической упругости. Расчет проводился для $\xi = 10^{-12}$, т.е. фактически $\xi \rightarrow 0$. На рис. 2 показаны изолинии максимального касательного напряжения $T = 0.5\sqrt{(t_{11} - t_{22})^2 + 4((t_{12} + t_{21})/2)^2}$ при различных значениях параметра λ . Видно, что увеличение доли тектонических напряжений от $\lambda = 1$ до $\lambda = 3$ по сравнению с гравитационной составляющей приводит к тому, что максимальные напряжения концентрируются в точках, примыкающих к кровле и почве выработки. В теории упругости этот результат является классическим.

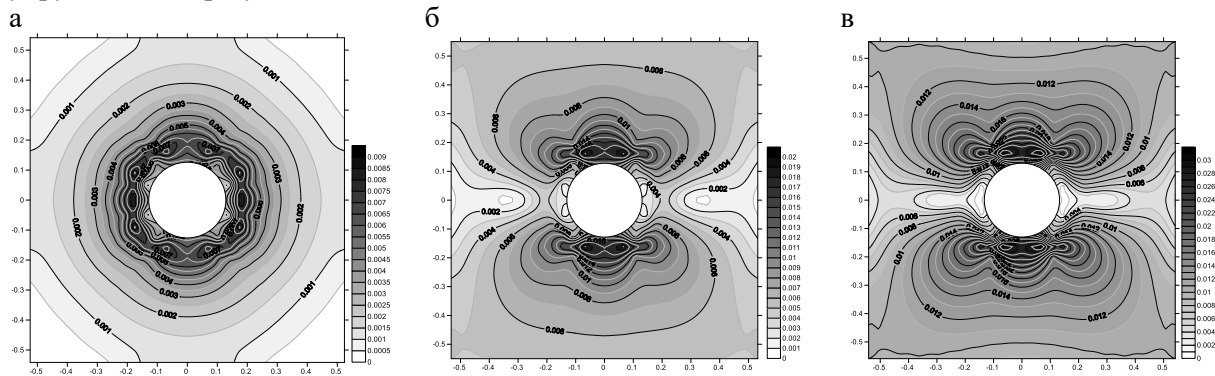


Рис. 2. Изолинии $T = 0.5\sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 4\sigma_{xy}^2}$ при значении структурного параметра $\xi = 10^{-12}$: а – $\lambda = 1$; б – $\lambda = 2$; в – $\lambda = 3$

Последовательное увеличение структурного параметра ξ приводит к тому, что зоны повышенной концентрации напряжений конфигурируются вдоль прямых, параллельных осям координат, захватывая все большую площадь массива в окрестности выработки. На рис. 3 показаны результаты расчетов для $\xi = 10^{-5}$. Видно, что структура изолиний приобретает угловатый характер, а области максимальной концентрации напряжений распространяются вглубь массива преимущественно в горизонтальном направлении на расстояние, превышающее размеры выработки. Следует отметить, что при этом величина максимальной концентрации напряжений несколько снижается по сравнению с аналогичным значением в упругом массиве. При $\lambda = 3$ такое снижение составило величину $\sim 10\%$. Численное моделирование, проведенное в работе [13], показало, что в условиях повышенной удароопасности, когда в массиве сосредоточены области внутренних самоуравновешенных напряжений, перераспределение нагрузки от контура выработки вглубь массива приводит к высвобождению энергии этих напряжений, и может спровоцировать динамические скачки разупрочнения. Таким образом, можно ожидать, что увеличение зоны влияния повышенной концентрации напряжений (см. рис. 3в), даже при частичном снижении ее абсолютной величины, способно спровоцировать динамические проявления горного давления и привести к обрушению кровли выработанного пространства.

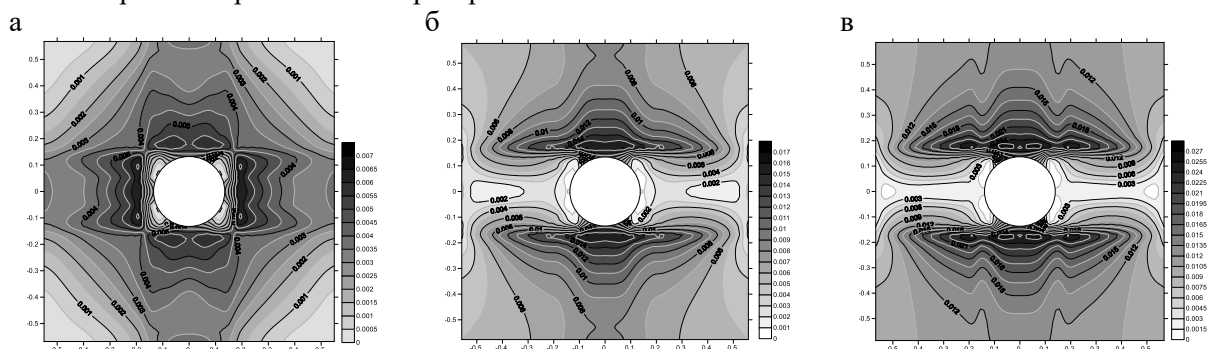


Рис. 3. Изолинии $T = 0.5 \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 4\sigma_{xy}^2}$ при значении структурного параметра $\xi = 10^{-5}$:
а – $\lambda = 1$; б – $\lambda = 2$; в – $\lambda = 3$

Выводы. Разработанная математическая модель со структурным параметром приспособлена для расчета НДС удароопасных массивов в условиях высоких градиентов напряжений. Естественное поле напряжений преимущественно тектонического типа приводит к расширению зоны повышенной концентрации напряжений и может спровоцировать динамические проявления горного давления.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 20-05-00184.

Список литературы

1. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях Горной Шории, склонных к горным ударам. – Новокузнецк: ВостНИГРИ, ВНИМИ, 1991. – 90 с.
2. Ловчиков А.В. Различие в опасности горных ударов на рудниках и угольных шахтах // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2017. – Т. 4. – № 2. – С. 105-111.
3. Еременко В.А., Гахова Л.Н., Семенякин Е.Н. Формирование зон концентрации напряжений и динамических явлений при отработке рудных тел Таштагольского месторождения на больших глубинах // ФТПРПИ. – 2012. – № 2. – С. 80-87.
4. Сидоров Д.В., Потапчук М.И., Сидляр А.В. Прогнозирование удароопасности тектонически нарушенного рудного массива на глубоких горизонтах Николаевского полиметаллического месторождения // Записки Горного института (Горное дело). – 2018. – Т. 234. – С. 604-611.
5. Сукнев С.В. Хрупкое и квазихрупкое разрушение геоматериалов с круговым отверстием при неравнокомпонентном сжатии // ФТПРПИ. – 2020. – № 2. – С. 19-30.
6. Трофимов В.А., Филиппов Ю.А. Влияние изменения напряженного состояния пород кровли угольного пласта при развитии очистных работ на газовый режим залежи // ФТПРПИ. – 2019. – № 5. – С. 33-44.
7. Геомеханическое обоснование параметров технологии отработки угольных пластов в зоне взаимовлияния очистного пространства и передовой выработки / В.М. Серяков [и др.] // ФТПРПИ. – 2018. – № 6. – С. 21-29.
8. Обоснование активных способов предразрушения подкровельной толщи при отработке мощных пологих пластов с выпуском угля / В.И. Клишин [и др.] // ФТПРПИ. – 2020. – № 3. – С. 75-84.

9. Новожилов В.В., Кадашевич Ю.И. Микронапряжения в конструкционных материалах. – Л.: Машиностроение, 1990. – 223 с.
10. Wu W., Lin J., Wang X. A basic hypoplastic constitutive model for sand // *Acta Geotechnica*. – 2017. – Vol. 12 (6) – P. 1373–1382.
11. Kolymbas D., Herle I., von. Wolffersdorff P.A. Hypoplastic constitutive equation with internal variables // *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 1995. – Vol. 19. – P. 415-436.
12. Лавриков С.В. О расчете напряженно-деформированного состояния разупрочняющегося блочного массива вблизи выработки // *Физическая мезомеханика*. – 2010. – Т. 13. – № 4. – С. 53-63.
13. Лавриков С.В., Ревуженко А.Ф. Математическое моделирование неустойчивого режима деформирования породного массива с учетом внутренних самоуравновешенных напряжений // *ФТПРПИ*. – 2020. – № 6. – С. 12-29.
14. Aksenov V.V., Lavrikov S.V., Revuzhenko A.F. Numerical modeling of deformation processes in rock pillars // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 682. – P. 202-205.
15. Lavrikov S.V., Revuzhenko A.F. Mathematical modeling of deformation of self-stress rock mass surrounding a tunnel // *Desiderata Geotechnica / W.Wu*. – Springer Conference Series, Springer Nature Switzerland AG, 2019. – P. 79-85.
16. Ревуженко А.Ф. О приложениях неархимедова анализа в механике блочно-иерархической геосреды // *ФТПРПИ*. – 2016. – № 5. – С. 14-22.
17. Lavrikov S.V., Mikenina O.A., Revuzhenko A.F. A non-Archimedean number system to characterize the structurally inhomogeneous rock behavior nearby a tunnel // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2011. – Vol. 3 (2). – P. 153-160.
18. Кунин И.А. Теория упругих сред с микроструктурой. – М.: Наука, 1975. – 416 с.
19. Эринген А.К. Теория микрополярной упругости. – М.: Мир, 1975. – Т. 2. – С. 646-752.
20. Truesdell C.A., Toupin R.A. *Handbuch der physik* /ed. by S.Flugge. – Berlin, Springer-Verlag, 1960. – P. 226-793.
21. Смолин И.Ю. Использование микрополярных моделей для описания пластического деформирования на мезоуровне // *Моделирование систем и процессов*. – 2006. – № 14. – С. 189-205.
22. Ревуженко А.Ф. Об одном варианте линейной теории упругости со структурным параметром // *ПМТФ*. – 2016. – № 5. – С. 45-52.
23. Lavrikov S.V., Revuzhenko A.F. Effect of structural parameter on stress concentration in a linearly elastic body / *AIP Conference Proceedings*. – 2017. – Vol. 1893. – P. 0330122.
24. Алтухов В.И., Лавриков С.В., Ревуженко А.Ф. Анализ концентрации напряжений в целиках горной породы в рамках нелокальной упругой модели со структурным параметром // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. – 2019. – Т. 6. – № 1. – С. 39-45.
25. Трусков П.В. Некоторые вопросы нелинейной механики деформируемого тела (в порядке обсуждения) // *Мат. моделирование систем и процессов*. – 2009. – № 17. – С. 85-95.
26. Ревуженко А.Ф., Лавриков С.В., Микенина О.А. Об одной альтернативной разностной схеме численного решения упругих задач определения НДС горного массива // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. – 2020. – Т. 7. – № 1. – С. 131-137.

УДК 539.3

К РАСЧЕТУ НЕУСТОЙЧИВЫХ РЕЖИМОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ АКТИВНОГО МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ ФРОНТА ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

д.ф.-м.н. Лавриков С.В.

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия

Аннотация. Рассмотрена математическая модель породного массива, описывающая наличие в нем отдельных зон с высоким уровнем внутренних самоуравновешенных напряжений. Показано, что внешние воздействия на массив могут спровоцировать высвобождение энергии данных напряжений и, как следствие, привести к динамическим скачкам разупрочнения. Разработан МКЭ-алгоритм построения решения в случае запредельного режима деформирования. Численно исследована задача о скачкообразном высвобождении энергии внутренних самоуравновешенных напряжений вблизи фронта очистного забоя. Показано, что при определенных параметрах возможен катастрофический сценарий деформирования, приводящий к потере устойчивости выработанного пространства.

Ключевые слова: горный массив, самоуравновешенные напряжения, высвобождение энергии, моделирование, выработка, очистной забой.

Введение. Известно, что породный массив представляет собой сложную геологическую среду с внутренней структурой. Блочное строение определяет фундаментальные свойства массива и является одним из существенных факторов, влияющих на безопасность ведения очистных работ.

Для ряда технологий добычи полезных ископаемых подземным способом актуальной является задача о перераспределении горного давления при подвигании фронта очистного забоя [1-7]. Ее решение в рамках теории упругости зачастую не отражает реальную картину процессов деформирования массива. Это связано с тем, что напряжения (как гравитационные, так и тектонические) при ведении очистных работ обуславливают переход среды в приконтурной зоне в неупругое состояние. Кроме того, перераспределение напряжений может спровоцировать динамические проявления горного давления – стреляние, микросейсмические проявления, толчки и горные удары. Отдельные области массива могут быть нагружены сжимающими или сдвиговыми напряжениями, которые уравниваются трением на границах блоков, и, таким образом, массив выступает в роли энергетически активной среды, содержащей потенциальные источники упругой энергии. Ведение очистных работ в окрестности «заряженных» зон массива может спровоцировать развязывание самоуравновешенных напряжений и привести к динамическим скачкам разупрочнения [8-14].

Одним из наиболее широко применяемых подходов к моделированию массива со структурой является использование внутренних переменных [15-19]. Такие переменные вводятся для описания горной породы на уровне элементов внутренней структуры (зерна, блоки) и позволяют транслировать эту информацию на уровень макрообъема среды.

В данной работе используется континуальная модель с внутренними переменными [20], описывающая внутренние самоуравновешенные напряжения. Ранее в работах [21-24] на ее основе был решен ряд задач деформирования породного массива вблизи выработок. Однако наибольший интерес представляют такие режимы деформирования, в которых реализуется скачкообразное высвобождение энергии внутренних самоуравновешенных напряжений в конечной области массива. Последнее может привести к катастрофическому обрушению пород кровли выработанного пространства. Численному моделированию таких предельных режимов деформирования и посвящена настоящая работа.

Математическая модель. Согласно [20] выберем элементарный объем среды, который представляет собой регулярную решетку (плоская деформация) сравнительно жестких зерен (скелет), поровое пространство между которыми заполнено цементирующим материалом (связующим). Примем, что зерна и поровый материал суть упругие среды с различными упругими свойствами. При сжатии такого объема зерна деформируются и на границах между ними возникают проскальзывания, что приводит к деформированию поровой среды. Если межзеренные сдвиги осуществляются с упрочнением, то объем аккумулирует часть энергии деформирования в виде внутренних самоуравновешенных напряжений. При учете разупрочнения энергия высвобождается, причем этот процесс в зависимости от параметров может сопровождаться динамическими скачками разупрочнения.

Для описания свойств структурных элементов вводятся дополнительные внутренние переменные: t_{ij}, τ_{ij} – напряжения и $\varepsilon_{ij}^t, \varepsilon_{ij}^r$ – соответственно, деформации зерен в различных системах координат; $p_{ij}, \varepsilon_{ij}^p$ – напряжения и деформации поровой среды, ε_{ij}^R – величины, описывающие проскальзывания на межзеренных контактах. Условия совместности и связь между микро- и макропеременными позволяют исключить внутренние переменные и записать определяющие соотношения модели, связывающие приращения компонент тензоров осредненных макродеформаций $\Delta \varepsilon_{ij}$ и макронапряжений $\Delta \sigma_{ij}$, в виде

$$\begin{pmatrix} \Delta \varepsilon_{11} \\ \Delta \varepsilon_{22} \\ \Delta \varepsilon_{12} \end{pmatrix} = W \cdot A \cdot W^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \Delta \sigma_{11} \\ \Delta \sigma_{22} \\ \Delta \sigma_{12} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\text{где } A = \left(\begin{pmatrix} \frac{1-\nu^t}{2\mu^t} & \frac{-\nu^t}{2\mu^t} & 0 \\ \frac{-\nu^t}{2\mu^t} & \frac{1-\nu^t}{2\mu^t} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2\mu^t} + \frac{1}{G^s} \end{pmatrix}^{-1} + 2 \cdot \begin{pmatrix} \frac{1-\nu^t}{2\mu^t} + \frac{1-\nu^p}{2\mu^p} & \frac{-\nu^t}{2\mu^t} + \frac{-\nu^p}{2\mu^t} & 0 \\ \frac{-\nu^t}{2\mu^t} + \frac{-\nu^p}{2\mu^t} & \frac{1-\nu^t}{2\mu^t} + \frac{1-\nu^p}{2\mu^p} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2\mu^t} + \frac{1}{2\mu^p} \end{pmatrix}^{-1} \right)^{-1};$$

ν^t, μ^t – коэффициент Пуассона и модуль сдвига для зерен, а ν^p, μ^p – соответственно для порового материала; G^s – модуль проскальзывания на контактах между зернами; матрица $W(\alpha)$ отвечает за ориентацию регулярной упаковки зерен относительно декартовой системы координат Ox_1x_2 α – имеет смысл угла напластования слоев породного массива.

Типичная диаграмма сдвига для большинства геоматериалов имеет вид, представленный на рис. 1 (жирная линия). Рассмотрим ее аппроксимацию кусочно-линейной функцией (тонкая линия), тогда условия для связи приращений микропроскальзываний $\Delta\varepsilon_{12}^R$ и приращений микронапряжений Δt_{12} будут иметь вид

$$\Delta\varepsilon_{12}^R = \Delta t_{12}/G^s, \quad G^s = \begin{cases} G^e, & 0 \leq \varepsilon_{12}^R < \gamma^*, \\ -G^p, & \gamma^* \leq \varepsilon_{12}^R < \gamma^{**}, \\ 0, & \gamma^{**} \leq \varepsilon_{12}^R. \end{cases} \quad (2)$$

где $G^e > 0, G^p > 0, \gamma^*, \gamma^{**}$ – заданные константы. В силу нелинейности поведения модули G^s могут изменяться по мере развития сдвигов. Таким образом, задача должна рассматриваться в квазистатической постановке, а ее решение будем строить по шагам нагружения.

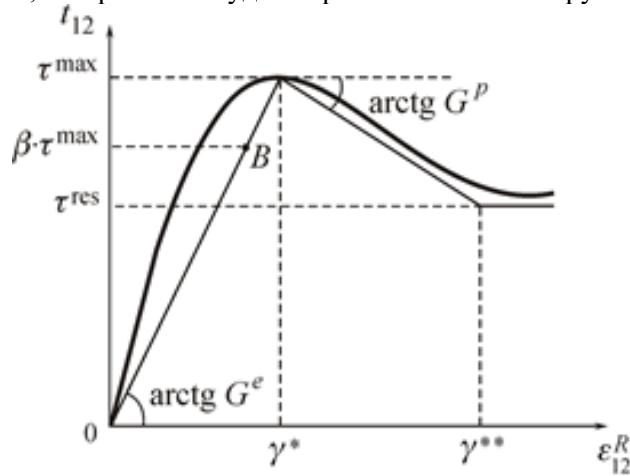


Рис. 1. Диаграмма контактного взаимодействия между зернами среды

Определяющих соотношений (1) недостаточно для описания самоуравновешенных напряжений в массиве. Необходимо определить, каким образом эти напряжения распределяются между структурными элементами (зернами и поровой средой). В общем виде условия совместности, согласно [20], имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^* &= t_{ij} + 2mp_{ij} = t_{ij} + 2(1-m)\tau_{ij}, \\ \varepsilon_{ij}^* &= \varepsilon_{ij}^t + \varepsilon_{ij}^R = (1-m)\varepsilon_{ij}^t + m\varepsilon_{ij}^p, \end{aligned} \quad (3)$$

где безразмерная величина $0 < m < 1$ характеризует просветность, индекс «*» означает проекции на оси регулярной упаковки зеренного скелета.

Если в некотором объеме зафиксировано напряженное состояние зерен и порового материала (определены тензоры t_{ij}, p_{ij}), тогда напряжения макрообъема σ_{ij}^* вычисляются однозначно. Обратная задача допускает множество решений. Возможна ситуация, когда в зернах и поровой среде действуют различные по знаку и компенсирующие друг друга ненулевые напряжения, а суммарные макронапряжения равны нулю, т. е. $t_{ij} \neq 0, p_{ij} \neq 0, \sigma_{ij}^* = 0$.

Определяющие уравнения (1) вкупе с соотношениями Коши и уравнениями равновесия, записанными для приращений, образуют замкнутую систему. Ее решение будем осуществлять численно с помощью метода конечных элементов. Общее решение получим в виде суммы заданных начальных напряжений и рассчитанных приращений напряжений на каждом шаге нагружения с учетом изменяющихся свойств массива.

Очевидно, что прямое моделирование динамических проявлений в рамках квазистатической постановки невозможно. В [25] рассмотрен алгоритмический прием, в рамках которого в момент наступления динамического скачка вводится искусственная внешняя сила, сдерживающая этот скачок и позволяющая «сравить» накопленную энергию в режиме квазистатического деформирования. В результате сдвиги на контактах получают то же самое приращение, какое они получили бы в рамках динамической задачи без учета сил инерции. Указанный прием позволяет получить

Результаты расчетов. На рис. 3 представлено последовательное изменение параметра d в процессе нагружения. Как отмечалось, этот параметр характеризует долю уменьшения давления на контуре выработанного пространства от исходного давления в ненарушенном массиве ($d = 1$ соответствует полной разгрузке контура). Видно, что в первой задаче контур выработки разгружается полностью (в точке А: $d = 1$). Расчеты показывают, что увеличение межзеренных сдвигов происходит последовательно по мере нагружения массива. При переходе диаграммы сдвига на межзеренных контактах через пиковую нагрузку и выходе на ниспадающий участок в данной точке массива происходит локальный скачок разупрочнения. Однако окружающий массив имеет достаточный запас прочности и, как показывает расчет, полностью компенсирует снижение сдвиговой прочности массива в областях разупрочнения. В целом, процесс разгрузки контура осуществляется сравнительно устойчиво. На рис. 4 показаны зоны разупрочнения в момент разгрузки контура.

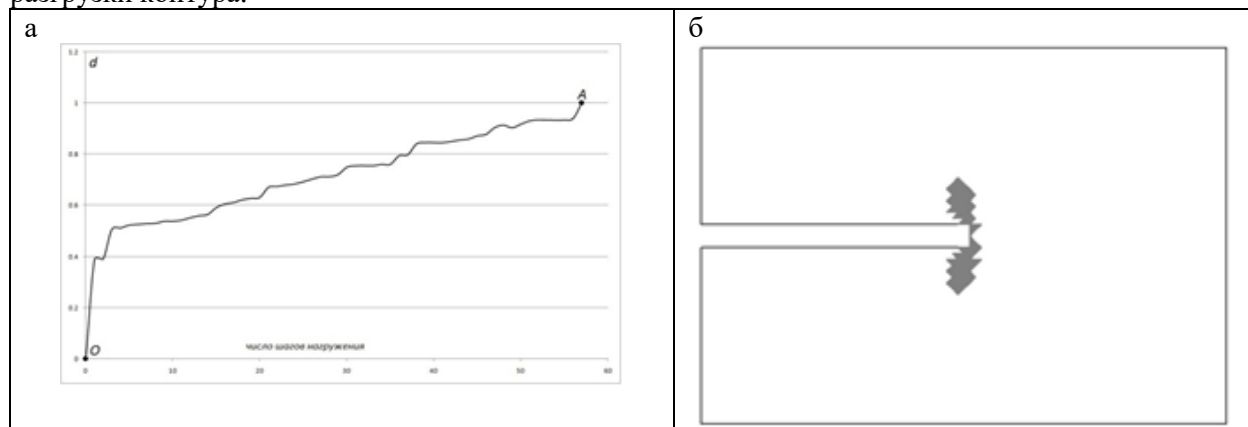


Рис. 3. Изменение параметра d (доля уменьшения давления на контуре выработанного пространства от исходного) (а); развитие зоны разупрочнения в окрестности фронта очистного забоя (б)

На рис. 4 приведены изолинии величин $T = 0.5\sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4\sigma_{12}^2}$ (рис. 4 а) и $\Gamma = \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + 4\varepsilon_{12}^2}$ (рис. 4 б) в момент разгрузки контура.

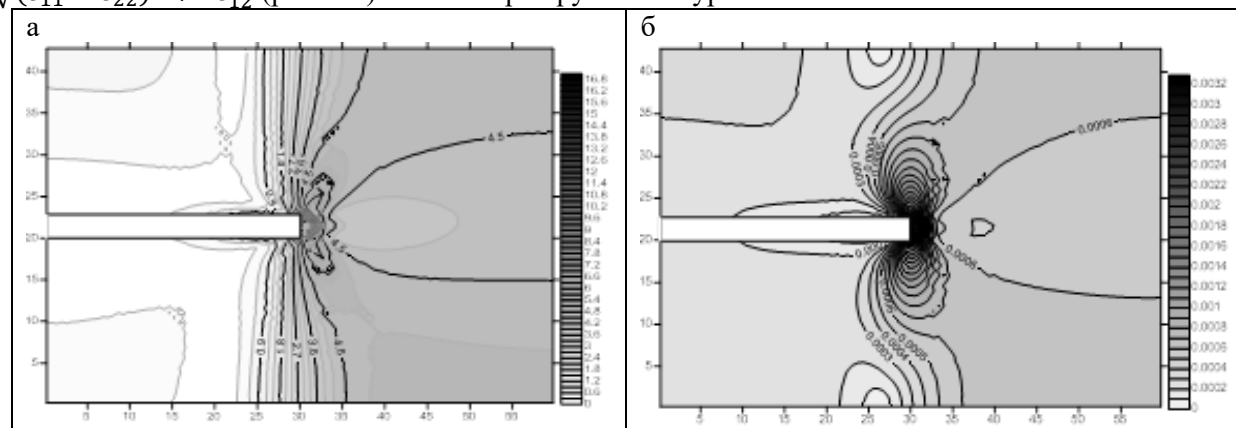


Рис. 4. Изолинии НДС массива в момент $d=1$: а – интенсивность касательных усилий; б – интенсивность сдвигов

Принципиально иначе развивается процесс деформирования при наличии аномальной зоны, где $\beta = 0,8$. На рис. 5 а показано изменение параметра d . Видно, что максимальное значение этого параметра составляет $d \approx 0,86$, т.е. полностью разгрузить контур выработанного пространства (в условиях устойчивого равновесного состояния) здесь не удастся. Вначале на участке OA деформирование протекает устойчиво. Здесь влияние аномальной зоны сказывается незначительно. Далее на участках AB и CD наблюдается серия динамических скачков разупрочнения. Снижение сдвиговой прочности в массиве происходит скачком в конечной области среды (одновременно на нескольких конечных элементах), а на контуре выработанного пространства наблюдается скачкообразный рост давления на величину $\sim 10\%$ от первоначальной (участок AB) и на величину $\sim 39\%$ (участок CD). Это приводит к существенному перераспределению нагрузки в массиве, однако

снижение прочности в областях разупрочнения пока еще компенсируется несущей способностью окружающего массива. Последующая попытка разгрузки контура приводит к высвобождению накопленной энергии, которое уже не компенсируется несущей способностью окружающего массива. На участках EF и FH наблюдается серия скачков, проводящих к катастрофическим последствиям. Параметр нагружения переходит через ноль (в точке G) и принимает отрицательное значение $d \approx -0,03$ (в точке H). Последнее означает, что теперь равновесное состояние массива возможно только при обеспечении отпора крепи на контуре выработанного пространства, величина которого превышает горное давление в исходном состоянии массива. Очевидно, что без обеспечения дополнительных мер по сдерживанию высвобождаемой энергии внутренних напряжений массива, выработанное пространство теряет устойчивость, что может привести к обрушению кровли.

Развитие областей разупрочнения показано на рис. 5 б. Из расчетов следует, что эти области появляются скачкообразно и могут охватывать конечную область массива за один шаг нагружения. При этом наблюдается формирование двух независимых областей разупрочнения – одна развивается вглубь массива от естественных концентраторов напряжений на контуре выработанного пространства (большая ее часть формируется на начальных этапах деформирования – участок OA на рис. 5 а), другая формируется внутри аномальной зоны (ее формирование связано со скачками разупрочнения – участки CD и EH).

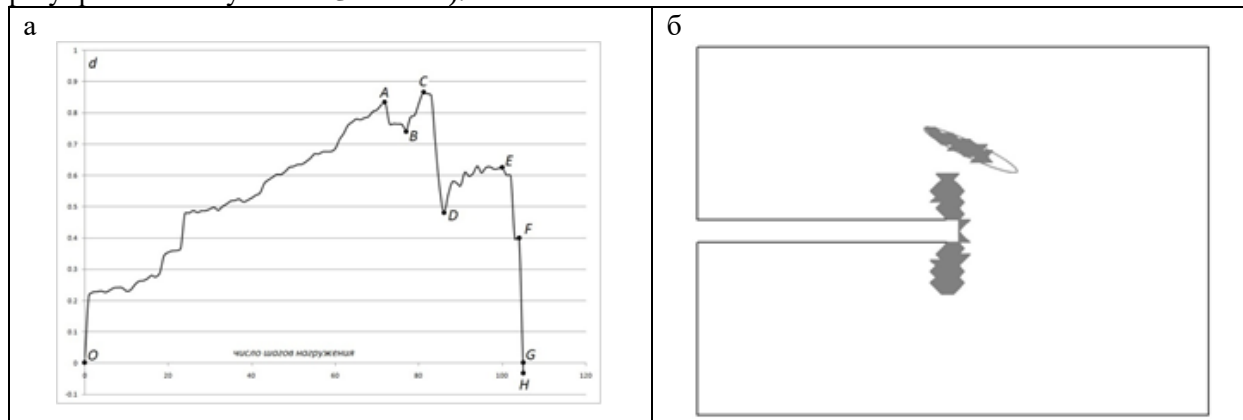


Рис. 5. Изменение параметра d (доля уменьшения давления на контуре выработанного пространства от исходного) (а); развитие зоны разупрочнения в окрестности фронта очистного забоя (б)

Катастрофическое проявление высвобождения энергии наблюдается в момент наибольшего сближения этих областей. На рис. 6 показаны изолинии величин T (рис. 6 а) и G (рис. 6 б) в момент $d \approx 0,4$ (точка F). Видно, что внутри аномальной зоны наблюдаются интенсивные сдвиги. Абсолютные значения интенсивности напряжений T здесь существенно ниже ($\max T \approx 9$), чем в предыдущем расчете без учета аномальной зоны ($\max T \approx 17$). Это означает, что развязывание энергии самоуравновешенных напряжений приводит к существенной деградации сдвиговой прочности массива в окрестности фронта очистного забоя, и, как следствие, к значительному снижению его несущей способности.

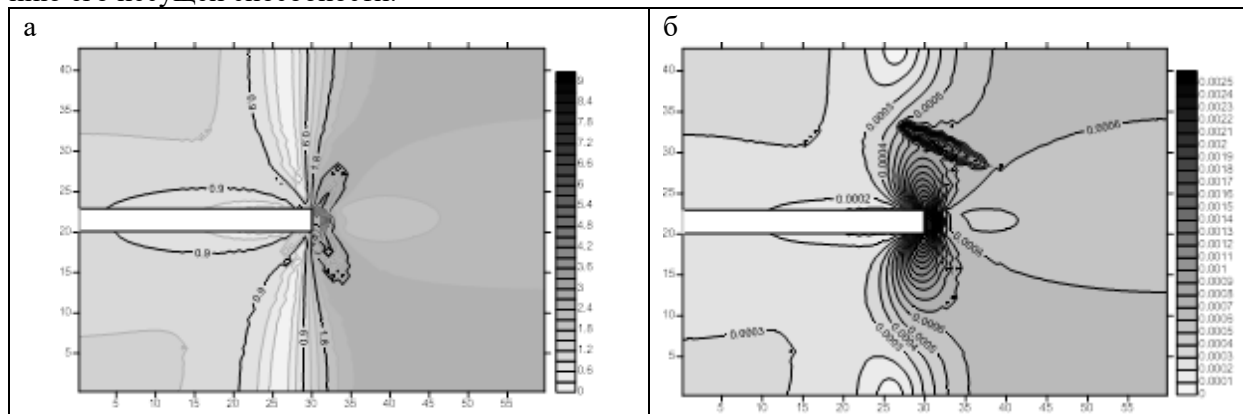


Рис. 6. Изолинии НДС массива в момент $d \approx 0,4$: а) – интенсивность касательных усилий; б) – интенсивность сдвигов

Выводы. Предложенные математическая модель и численный МКЭ-алгоритм позволяют проводить расчет НДС массива в условиях запредельных режимов с учетом динамических скачков разупрочнения.

Наличие в массиве областей с высоким уровнем внутренних напряжений вблизи фронта очистных работ может спровоцировать динамические проявления горного давления.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта НИР FWNZ-2021-0001.

Список литературы

1. Трофимов В.А., Филиппов Ю.А. Влияние изменения напряженного состояния пород кровли угольного пласта при развитии очистных работ на газовый режим залежи // ФТПРПИ. – 2019. – № 5. – С. 33-44.
2. Геомеханическое обоснование параметров технологии отработки угольных пластов в зоне взаимовлияния очистного пространства и передовой выработки / В.М. [и др.] // ФТПРПИ. – 2018. – № 6. – С. 21-29.
3. Abutment pressure distribution for longwall face mining through abandoned roadways / Y. Lia [and etc.] // Int. J. Mining Science and Technology. – 2019. – Vol. 29. – Iss. 1. – P. 59-64.
4. Front abutment pressure concentration forecast by monitoring cable-forces in the roof / Y.L. Tan [and etc.] // Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2015. – Vol. 77. – P. 202-207.
5. Relevance between abutment pressure and fractal dimension of crack network induced by mining / M. Gao [and etc.] // Int. J. of Mining Science and Technology. – 2013. – Vol. 23. – Iss. 6. – P. 925-930.
6. Alehossein H., Poulsen B.A. Stress analysis of longwall top coal caving // Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2010. – Vol. 47. – P. 30-41.
7. Klishin S.V., Lavrikov S.V., Revuzhenko A.F. Numerical simulation of abutment pressure redistribution during face advance / AIP Conference Proceedings. – 2017. – 1909. – P. 020086.
8. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. – М: Наука, 2003. – 270с.
9. Пономарев В.С. Проблемы изучения энергетически активной геологической среды // Геотектоника. – 2011. – № 2. – С. 66-75.
10. Характеристики слабой сейсмичности, индуцированной горными работами на Коробковском месторождении Курской магнитной аномалии / А.Н. Беседина [и др.] // ФТПРПИ. – 2020. – № 3. – С. 12-25.
11. Кочарян Г.Г., Морозова К.Г., Остапчук А.А. Исследование акустической эмиссии слоя геоматериала при сдвиговом деформировании // ФТПРПИ. – 2019. – № 3. – С. 15-21.
12. Бобряков А.П., Косых В.П., Ревуженко А.Ф. Триггерное инициирование разрядки упругой энергии в напряженной геосреде // ФТПРПИ. – 2015. – № 1. – С. 14-22.
13. Kosykh V.P. Effect of Multiple Weak Impacts on Evolution of Stresses and Strains in Geomaterials // Trigger Effects in Geosystems / G.Kocharyan, A. Lyakhov. – Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, Springer Nature Switzerland AG. – 2019. – P. 95-103.
14. Conti R., Tamagnini C., DeSimone A. Critical softening in Cam-Clay plasticity: Adaptive viscous regularization, dilated time and numerical integration across stress-strain jump discontinuities // Comp. Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2013. – Vol. 258. – P. 118-133.
15. Новожилов В.В., Кадашевич Ю.И. Микронапряжения в конструкционных материалах. – Л.: Машиностроение, 1990. – 223 с.
16. Eggert G.M., Dawson P.R. On the use of internal variable constitutive equations in transient forming processes // Int. J. of Mechanical Sciences. – 1987. – Vol. 29. – Iss. 2. – P. 95-113.
17. Kolymbas D., Herle I., von. Wolffersdorff P.A. Hypoplastic constitutive equation with internal variables // International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 1995. – Vol. 19. – P. 415-436.
18. Wu W., Lin J., Wang X. A basic hypoplastic constitutive model for sand // Acta Geotechnica. – 2017. – Vol. 12 (6). – P. 1373-1382.
19. Lavrikov S.V., Mikenina O.A., Revuzhenko A.F. A non-Archimedean number system to characterize the structure inhomogeneous rock behavior nearby a tunnel // J. Rock Mechanics and geotechnical Engineering. – 2011. – Vol.3 (2). – P. 153-160.
20. Ревуженко А.Ф. Механика упругопластических сред и нестандартный анализ. – Новосибирск: изд-во Новосибирского ун-та, 2000. – 428 с.

21. Lavrikov S.V., Revuzhenko A.F. Deformation of geo-medium with considering for internal self-balancing stresses / AIP Conference Proceedings. – 2016. – 1783. – P. 020130.
22. Lavrikov S.V., Revuzhenko A.F. Mathematical modeling of deformation of self-stress rock mass surrounding a tunnel // Desiderata Geotechnica / W.Wu . – Springer Conference Series, Springer Nature Switzerland AG. – 2019– P. 79-85.
23. Лавриков С.В. О расчете напряженно-деформированного состояния разупрочняющегося блочного массива вблизи выработки // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13. – № 4. – С. 53-63.
24. Колимбас Д., Лавриков С.В., Ревуженко А.Ф. О деформировании анизотропного горного массива в окрестности горизонтальной протяженной выработки // ФТПРПИ. – 2012. – № 6. – С. 21-36.
25. Лавриков С.В., Ревуженко А.Ф. Математическое моделирование неустойчивого режима деформирования породного массива с учетом внутренних самоуравновешенных напряжений // ФТПРПИ. – 2020. – № 6. – С. 12-29.

УДК 622. 33.013.3

ЛАГОВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ПРОЕКТНОЙ МОЩНОСТИ ЗОЛОТОРУДНОГО КАРЬЕРА «БРЕКЧИЯ»

^{1,2}Д.Т.Н. А.А. Ордин, ³И.В. Васильев

1 – Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия

2 – ООО «НПЦ ВостНИИ», г. Кемерово, Россия

3 – ООО «Сибгипрошахт», г. Новосибирск, Россия

Аннотация. Разработана лаговая модель и приведены результаты решения задачи оптимизации проектной мощности золоторудного карьера «Брекчия» по условию максимума интегральных экономических показателей. Выполнен анализ влияния рыночных цен на рудное золото на оптимальную проектную мощность карьера «Брекчия».

Ключевые слова: карьер, руда, балансовые запасы, золото, лаговая модель, оптимизация, проектная мощность.

Вопросам оптимизации производственной мощности и границ карьеров, календарного плана отработки месторождений полезных ископаемых, глубины перехода от открытых горных работ к подземным посвящено большое количество публикаций в России и за рубежом. Для решения этих достаточно сложных задач предлагаются различные методы и алгоритмы – Лерча–Гроссмана с применением теории графов, линейного, целочисленного и динамического программирования, ветвей и границ и др. Применяются также разнообразные критерии оптимальности задач: предельный коэффициент вскрыши, минимальные дисконтированные эксплуатационные и капитальные затраты, максимальная прибыль, чистый дисконтированный доход и др. В России и за рубежом для решения различных задач проектирования шахт и карьеров широко используются программные комплексы, разработанные, главным образом, в Австралии и Канаде: Datamine, Gemcom, Micromine, Mincom. Mintec, Mine2-4D, Minemax, Runge, Surpac Vision. Vulcan. Whittle.

Тем не менее, применяемые в настоящее время отечественные методики для решения перечисленных проектных задач часто используют устаревшие методические подходы, неадекватные математические модели и зависимости, отраслевые инструкции, которые требуют переработки и обновления.

В ИГД СО РАН разработана методика оптимизации проектной мощности горнодобывающего предприятия на основе лагового моделирования по условию максимума интегральных экономических показателей – валовой дисконтированной выручки $P(A)$, валовой дисконтированной прибыли $V(A)$, чистого дисконтированного дохода $NPV(A)$ [1–4]:

$$P(A) = \sum_{t=T^c(A)+1}^{T^c(A)+\frac{Q}{A}} \frac{sA}{(1+E)^t} = \frac{sA}{E} \left((1+E)^{-T^c(A)} - (1+E)^{-\left(T^c(A)+\frac{Q}{A}\right)} \right) \rightarrow \max; \quad (1)$$

$$V(A) = \sum_{t=T^c(A)+1}^{T^c(A)+\frac{Q}{A}} \frac{\left(s - \left(c_0 + \frac{c_1}{A}\right)\right)A}{(1+E)^t} = \frac{(s-c_0)A - c_1}{E} \left((1+E)^{-T^c(A)} - (1+E)^{-\left(T^c(A)+\frac{Q}{A}\right)} \right) \rightarrow \max; \quad (2)$$

$$NPV(A) = \sum_{t=T^c(A)+1}^{T^c(A)+\frac{Q}{A}} \frac{\left(s - \left(c_0 + \frac{c_1}{A}\right)\right)A}{(1+E)^t} - \sum_{t=1}^{T^c(A)} \frac{(K+k_0A)}{T^c(A)} (1+E)^t = \frac{(s-c_0)A-c_1}{E} \left((1+E)^{-T^c(A)} - (1+E)^{-\left(T^c(A)+\frac{Q}{A}\right)} \right) - \frac{(K+k_0A)}{ET^c(A)} \left((1+E)^{T^c(A)} - 1 \right) \rightarrow \max, \quad (3)$$

где $T^c(A) = T_0 + \tau A$ – строительный лаг, учитывающий линейную зависимость от проектной мощности срока строительства горнодобывающего предприятия, лет; T_0 – период строительства не зависящий от мощности предприятия, лет, τ – период строительства предприятия единичной мощности, лет²/млн т; Q – промышленные запасы полезного ископаемого, т; c_0 , c_1 – условно-постоянная и условно-переменная части гиперболической функции себестоимости добычи полезного ископаемого; K , k_0 – условно-постоянная и условно-переменная части линейной функции капиталовложений на строительство предприятия; E – норма дисконта.

Отличие критериев (1–3) от принятых и используемых в отрасли экономических показателей эффективности инвестиций [1] заключается в том, что в (1–3) учитывается экономический ущерб от замораживания капиталовложений в период строительства предприятия. С этой целью в (1–3) введен строительный лаг в виде линейной функции от проектной мощности предприятия. Как показано в [2–4] приведенные интегральные лаговые функции (1–3) имеют точки максимума в зависимости от проектной мощности предприятия, которые определяются численными методами.

Поставим эту задачу применительно к оптимизации проектной мощности золоторудного карьера «Брекчия».

Месторождение «Брекчия» расположено на абсолютных высотах 700-800м на относительно пологом склоне в центральной части Чуринской золоторудной площади Алтайского края в левобережье реки Чура и охватывает площадь тела explosивных брекчий. В плане тело брекчий имеет эллипсовидную форму, с длинной осью вытянутой в широтном направлении. Размер тела брекчий составляет 200×300м, брекчии не имеют четких контактов. Минеральный состав руд относительно прост: в составе рудных брекчий преобладают порообразующие минералы (94,4%), главными из которых являются кварц (29%) и ортоклаз (23%). Количество плагиоклаза 10%, остальная часть породы (32,4%) состоит из глинисто-гидрослюдистых минералов: каолинит, гидрослюда, хлорит. На месторождении выделено 21 рудное тело.

Каждое рудное тело соответствует подсчетному блоку. Из 21 блока 14 относятся к категории С1, остальные – к категории С2. Четырнадцать подсчетных блоков относятся к балансовым запасам, семь рудных тел разделены границами открытых горных работ на балансовые и забалансовые. Остальные, более мелкие блоки располагаются, в основном, за пределами проектного контура карьера и относятся к забалансовым запасам (рис. 1). Из всех оконтуренных рудных залежей можно отметить семь основных рудных тел относительно крупных, в которых заключено 68% всех запасов руды и 75% запасов золота.

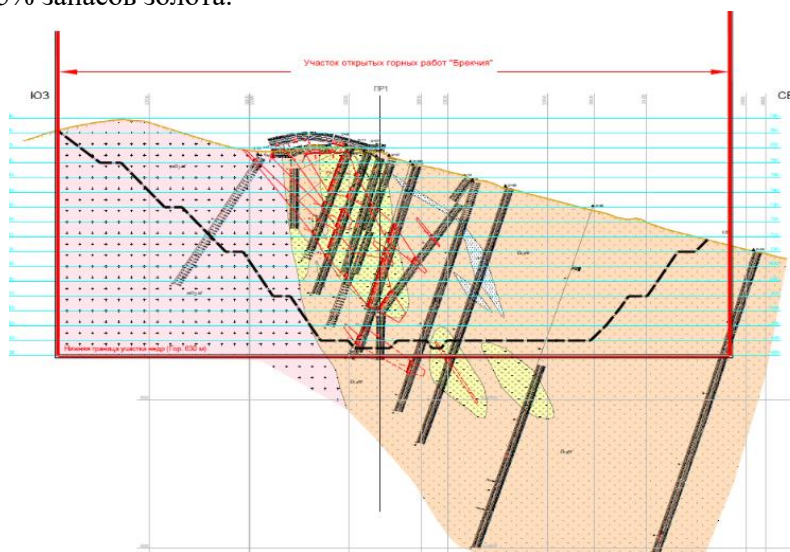


Рис. 1. Золоторудное месторождение «Брекчия» и проектные границы карьера

Внутреннее строение рудных тел обусловлено чередованием оруденелых золотоносных и слабозолотоносных участков различной мощности и достаточно сложной морфологии. Оруденение из-за сложного внутреннего строения прерывистое, рудные зоны не имеют четких геологиче-

ских границ. Любая скважина или канава может иметь несколько рудных интервалов, разобщенных безрудными прослоями. Приведенная характеристика рудных тел месторождения «Брекчия» показывает, что они отличаются разнообразием морфологических форм, масштабами и глубиной залегания при различном качестве руд, что обуславливает отнесение этих рудных тел соответственно к 3 группе по сложности геологического строения.

Золоторудные тела участка открытых горных работ локализованы в зоне шириной 100 м и протяженностью более 200 м субширотного простирания и крутого (60-90°) падения. Протяженность рудных тел изменяется от 70 до 218м, мощность горизонтальная составляет 0,91-13,3м. Основные исходные данные для решения поставленной задачи приведены в табл. 1

Таблица 1

Исходные проектные данные по карьере «Брекчия»

Наименование	Ед. изм.	Значение показателя
Балансовые запасы руды категории C1	тыс. т	649,9
Балансовые запасы руды категории C2	тыс. т	409,6
Балансовые запасы руды категорий C1 и C2	тыс. т	1059,5
Проектная мощность карьера	тыс. т/год	280
Срок строительства карьера	лет	5
Удельный срок строительства карьера	лет/млн. т/год	1,79
Срок отработки запасов руды	лет	4,5
Цена золота в 2020 г.	руб./г	2650
Цена золота в 2021 г.	руб./г	4500
Норма дисконта	-	0,1
Себестоимость добычи руды	руб./т	3137
условно-постоянная часть себестоимости (c_0)		1500
условно-переменная часть себестоимости (c_1)		458,36
Инвестиции на строительство карьера и обогатительной фабрики	млн руб.	1396
условно-постоянная часть инвестиций (K)		700
условно-переменная часть инвестиций (k_0)		2485,7

Решение задачи оптимизации проектной мощности карьера осуществлялось численным методом по трем критериям оптимальности (1-3) с учетом изменения цены золота в 2021 г.

В табл. 2 приведены результаты решения поставленной задачи по условию максимума интегральной дисконтированной выручки с учетом указанных категорий балансовых запасов руды и различных цен на золото.

Таблица 2

Результаты оптимизации проектной мощности карьера «Брекчия» по условию максимума интегральной дисконтированной выручки, млн. руб.

Проектная мощность карьера, тыс. т /год	Балансовые запасы руды по категориям, тыс.т			
	649.9 (C1)	1059.9 (C1 и C2)	649.9 (C1)	1059.9 (C1 и C2)
Цена золота 2650 руб./г			Цена золота 4500 руб./г	
0	0	0	0	0
100	2579	3840	3861	5317
200	2654	4050	4379	6520
280	2685	4177	4507	6877
400	2680	4208	4560	7094
500	2662	4205	4551	7145
600	2636	4183	4520	7140
700	2606	4148	4476	7103
800	2573	4107	4425	7045
900	2538	4060	4369	6973
1000	2579	3840	4310	6894

Как видно из табл. 2 и рис. 2 оптимальная проектная мощность карьера при цене на золото 2650 руб./г составляет: 280÷400 тыс. т/год для балансовых запасов руды категории С1 и 400÷500 тыс. т/год для балансовых запасов руды категорий С1 и С2. При увеличении цены на золото с 2650 до 4500 руб./г оптимальная проектная мощность карьера возрастает и составляет: 400÷500 тыс. т/год для балансовых запасов руды категории С1 и 500÷600 тыс. т/год для балансовых запасов руды категорий С1 и С2.

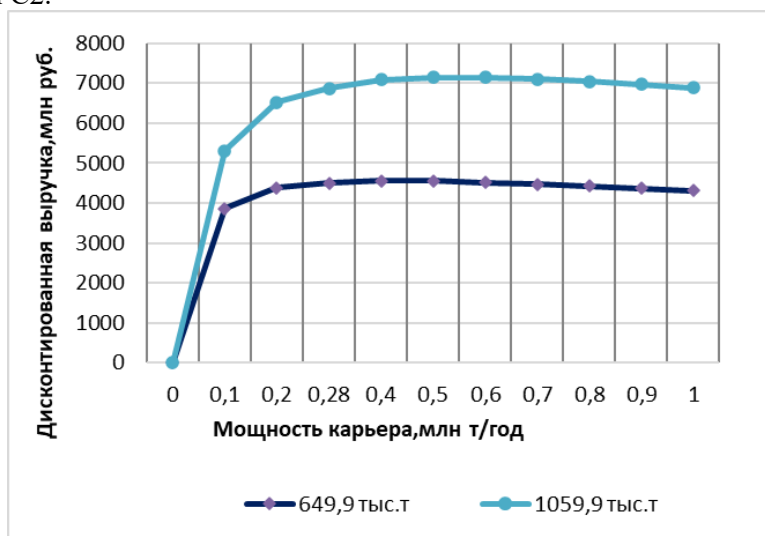


Рис. 2. Зависимость интегральной дисконтированной выручки карьера «Брекчия» от балансовых запасов руды при цене золота 4500 руб./т

Расчет оптимальной проектной мощности карьера «Брекчия» по критерию максимальной интегральной дисконтированной прибыли (2) выполнен с учетом гравитационно-флотационной схемы обогащения руды, различных категорий запасов и цен на золото (табл. 3, рис. 3).

Таблица 3

Результаты оптимизации проектной мощности карьера «Брекчия» по условию максимума интегральной дисконтированной прибыли, млн. руб.

Проектная мощность карьера, тыс. т /год	Балансовые запасы руды по категориям, тыс.т			
	649.9 (C1)	1059.9 (C1 и C2)	649.9 (C1)	1059.9 (C1 и C2)
Цена золота 2650 руб./г			Цена золота 4500 руб./г	
0	0	0	0	0
100	-488	-649	1099	1463
200	626	892	2427	3454
280	992	1441	2844	4135
400	1267	1872	3141	4642
500	1387	2066	3258	4852
600	1458	2184	3316	4966
700	1502	2257	3342	5023
800	1527	2302	3346	5044
900	1540	2327	3336	5040
1000	1545	2339	3317	5020
1100	1544	2341		
1200	1539	2335		

Как видно из табл. 3 оптимальная проектная мощность карьера при цене на золото 2650 руб./г составляет: 1000÷1100 тыс. т/год и, практически, не зависит от балансовых запасов руды. При увеличении цены на золото с 2650 до 4500 руб./г оптимальная проектная мощность карьера незначительно снижается и составляет: 700÷800 тыс. т/год для балансовых запасов руды категории С1 и 800÷900 тыс. т/год для балансовых запасов руды категорий С1 и С2.

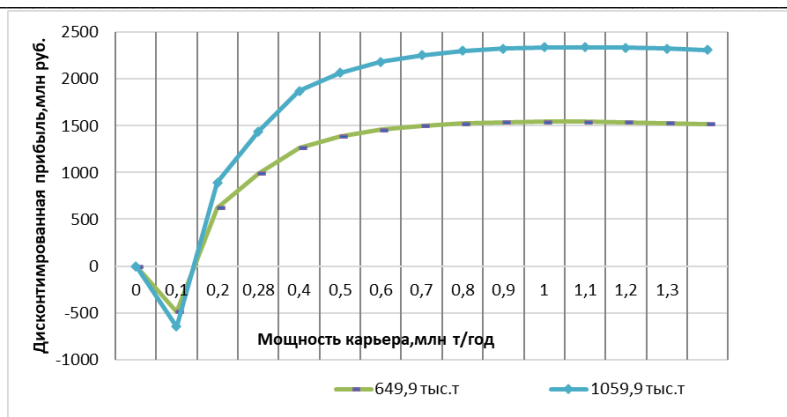


Рис. 3. Зависимость интегральной дисконтированной прибыли карьера «Брекчия» от балансовых запасов руды при цене золота 2600 руб./т

Расчет оптимальной проектной мощности карьера «Брекчия» по наиболее общему критерию максимума чистого дисконтированного дохода (3) выполнен с учетом строительства карьера и обогатительной фабрики с гравитационно-флотационной схемой обогащения руды, различных категорий запасов и цен на золото (табл. 4, рис. 4).

Таблица 4

Результаты оптимизации проектной мощности карьера «Брекчия» по условию максимума чистого дисконтированного дохода, млн. руб.

Проектная мощность карьера, тыс. т /год	Балансовые запасы руды по категориям, тыс.т			
	649,9 (C1)	1059,9 (C1 и C2)	649,9 (C1)	1059,9 (C1 и C2)
Цена золота 2650 руб./г			Цена золота 4500 руб./г	
0	-700,0	-700	-700,0	-700,0
100	-1399,9	-1561	-1561,3	550,9
200	-534,2	-269	-269,1	2293,1
280	-371,2	79	78,7	2771,9
400	-404,5	201	200,7	2970,8
500	-546,0	133	132,8	2919,4
600	-740,6	-15	-15,2	2767,0
700	-968,1	-213	-212,5	2553,1
800	-1218,1	-443	-443,2	2298,5

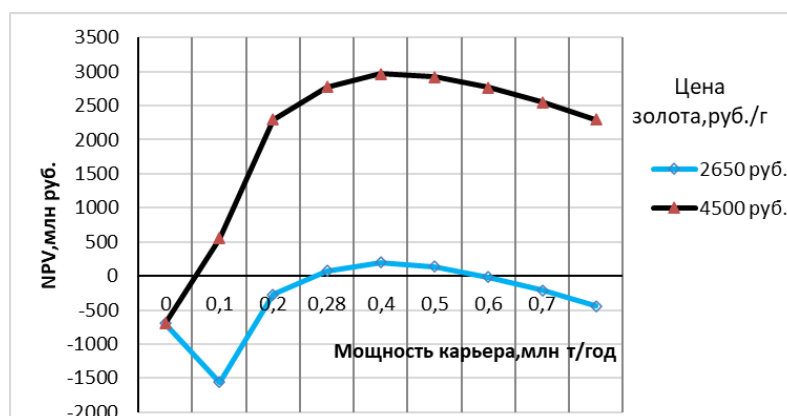


Рис.4. Зависимость чистого дисконтированного дохода от цены золота при отработке балансовых запасов руды категорий C1 и C2 карьера «№Брекчия»

Результаты расчета заключаются в следующем. При цене золота 2650 руб./г при отработке балансовых запасов руды только категории C1 чистый дисконтированный доход NPV отрицателен и минимальные дисконтированные убытки за период эксплуатации карьера при мощности 280

тыс.т/год составляют -371,2 млн руб. При отработке балансовых запасов категорий С1 и С2 и цене золота 2650 руб./год максимум чистого дисконтированного дохода составляет 201 млн руб. при оптимальной проектной мощности карьера 400 тыс. т/год.

При увеличении цены золота до 4500 руб./год оптимальная проектная мощность карьера не изменяется и составляет 400 тыс. т/год, чистый дисконтированный доход при этом увеличивается до 2940,8 млн руб. при отработке балансовых запасов категорий С1 и С2 (рис. 4). При увеличении цены золота область безубыточности расширяется. При цене золота 2650 руб./год область безубыточности составляет от 280 до 600 тыс. т/год, а при цене золота 4500 руб./год эта область расширяется от 100 до 1500 тыс. т/год.

Выводы. В ИГД СО РАН разработана и апробирована методика оптимизации проектной мощности горнодобывающего предприятия на основе лагового моделирования по условию максимума интегральных экономических показателей – валовой дисконтированной выручки, валовой дисконтированной прибыли и чистого дисконтированного дохода. Использование методики ИГД СО РАН для оптимизации проектной мощности золоторудного карьера «Брекчия» при отработке балансовых запасов руды 1059,9 тыс. т категорий С1 и С2 и цене золота 4500 руб./г приводит к следующим выводам и рекомендациям:

- по условию максимума интегральной дисконтированной выручки оптимальная проектная мощность карьера составляет $500 \div 600$ тыс. т/год,
- по условию максимума интегральной дисконтированной прибыли оптимальная проектная мощность карьера составляет $800 \div 900$ тыс. т/год,
- по условию максимума наиболее общего критерия – чистого дисконтированного дохода – оптимальная проектная мощность карьера составляет 400 тыс. т/год,
- рекомендуется увеличить проектную мощность карьера «Брекчия» с 280 до 400 тыс. т/год, это позволит получить расчетный экономический эффект в виде разности значений чистого дисконтированного дохода: $2970,8 - 2771,9 = 198,9$ млн руб. за срок службы карьера или 50 млн руб./год.

Список литературы

1. Косов В.В., Лившиц В.Н., Шахназаров А.Г. и др. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов – М.: Экономика, 2000. – 417 с.
2. Ордин А.А. Динамические модели оптимизации проектной мощности шахты. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 1991. – 160 с.
3. Опарин В.Н., Ордин А.А. О теории Хабберта и предельных объемах добычи угля в Кузнецком угольном бассейне // ФТПРПИ. – 2011. – № 2. – С. 121-135.
4. Ордин А.А., Клишин В.И. Оптимизация технологических параметров горнодобывающих предприятий на основе лаговых моделей. – Новосибирск: Наука, 2009. – 165 с.

УДК 622.234.573

ОРИЕНТАЦИЯ ТРЕЩИН НАПРАВЛЕННОГО ГИДРОРАЗРЫВА И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД

д.т.н. Сердюков С.В., Азаров А.В.

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. Приведены результаты моделирования развития трещин направленного гидроразрыва в неоднородном поле напряжений. Показано, что в неоднородном поле напряжений трещина разворачивается перпендикулярно направлению минимального сжатия. Предложен способ оценки напряженного состояния породного массива по результатам измерений давления записания трещин, сформированных методом направленного гидроразрыва в окрестности горной выработки.

Ключевые слова: массив горных пород, напряженное состояние, мониторинг, гидроразрыв, ориентация трещин, математическое моделирование, расширенный метод конечных элементов.

Метод направленного гидроразрыва горных пород (НГР) был предложен в Институте горного дела СО РАН для дезинтеграции труднообрушаемой кровли и дегазации угольных пластов. Его сущность состоит в создании в породе на стенках скважины кольцеобразного щелевого концентратора напряжений для снижения давления разрыва и его ориентирования поперек оси скважины [1-3].

Интерес к применению НГР к оценке напряженного состояния породного массива обусловлен известными трудностями классического гидроразрыва, когда трещина формируется вдоль образующей поверхности одиночной скважины. Показано, что классическим способом удастся определить только минимальное сжимающее напряжение, да и то при определенных допущениях и контроле положения разрыва на стенках скважины [4].

Для преодоления указанных проблем некоторыми исследователями предлагалось оценивать напряженное состояние пород по результатам разрывов в скважинах, пробуренных в разных плоскостях. Считалось, что такой подход позволит создавать трещины различной ориентации и по их давлениям записания можно будет судить о напряжениях, действующих в породном массиве. Примером такого подхода является идея оценки компонент природного поля напряжения на основе данных о давлении записания трещин серии направленных гидроразрывов, проведенных в трех различно ориентированных скважинах, пробуренных из горной выработки [5]. Ее авторы полагают, что трещины направленного гидроразрыва распространяются перпендикулярно оси скважины, не приводя убедительных численных или физических экспериментов, обосновывающих это допущение [5].

В настоящей статье представлены результаты численных исследований трещин НГР в неоднородном поле напряжений, а также предложен способ контроля напряженного состояния породного массива по результатам разрывов, выполняемых вблизи горной выработки.

Методика исследований. Численные исследования направленного гидравлического разрыва пороупругой неоднородно нагруженной среды выполнены с использованием программного обеспечения, разработанного на основе расширенного метода конечных элементов в среде программирования SIMULIA ABAQUS [6, 7].

Компоненты деформации слоисто-неоднородной модели пороупругой среды в модели рассчитываются в квазистатическом приближении из решения уравнений

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\varepsilon_0\delta_{ij} - \alpha p\delta_{ij}, \quad (1)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; $\varepsilon_{ij} = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)/2$ – компоненты тензора деформаций; $i, j = 1, 2, 3$; u_1, u_2, u_3 – компоненты вектора смещений соответственно по осям x_1, x_2, x_3 прямоугольной системы координат; λ, μ – параметры Ламе; ε_0 – объемная деформация твердого скелета; α – коэффициент Био; p – поровое давление флюида; δ_{ij} – символ Кронекера.

Изменение объема флюида определяется соотношением

$$\frac{1}{M} \frac{\partial p}{\partial t} + \alpha \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial t} + v_{k,k} = 0, \quad (2)$$

где $M = \frac{2G(v_u - v)}{\alpha^2(1 - 2v_u)(1 - 2v)}$ – модуль Био; v, v_u – коэффициенты Пуассона для дренируемого и недренируемого пороупругого материала, насыщенного флюидом, G – модуль сдвига дренируемого материала; v_k – скорость фильтрации флюида в среде.

Для описания фильтрации флюида в среде используются уравнения (3), которые при нулевом значении параметра β соответствуют закону Дарси, а при ненулевом – нелинейному закону Форхгеймера:

$$\begin{aligned} v_1 &= -\frac{1}{\eta(1 + \beta|v|)} \left(k_{11} \frac{\partial p}{\partial x_1} + k_{12} \frac{\partial p}{\partial x_2} + k_{13} \frac{\partial p}{\partial x_3} \right), \\ v_2 &= -\frac{1}{\eta(1 + \beta|v|)} \left(k_{12} \frac{\partial p}{\partial x_1} + k_{22} \frac{\partial p}{\partial x_2} + k_{23} \frac{\partial p}{\partial x_3} \right), \\ v_3 &= -\frac{1}{\eta(1 + \beta|v|)} \left(k_{13} \frac{\partial p}{\partial x_1} + k_{23} \frac{\partial p}{\partial x_2} + k_{33} \frac{\partial p}{\partial x_3} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где v_1, v_2, v_3 – компоненты вектора скорости потока флюида; $|v|$ – его модуль; η – динамическая вязкость флюида; k_{ij} – компоненты симметричной матрицы коэффициентов проницаемости среды, значения которых зависят от ее сжатия; β – параметр, определяющий влияние скорости потока флюида на проницаемость среды. Зависимость проницаемости от горного давления и скорости потока задается по результатам лабораторных исследований кернов.

Рабочая жидкость гидроразрыва считается ньютоновской, а ее течение в трещине – соответствующим законом Пуазейля. Для моделирования потока жидкости в трещине и среде используется уравнение неразрывности

$$\frac{\partial d}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} + v_t + v_b = 0, \quad (4)$$

где d – раскрытие трещины; $\vec{q} = q_1, q_2, q_3$; $q_i = d\tilde{k}(\frac{\partial p}{\partial x_i})$; v_t, v_b – скорости нормального потока через верхнюю и нижнюю поверхности трещины, $\tilde{k}$ – эффективная проницаемость трещины:

$$\tilde{k} = -\frac{d^2}{12\eta}. \quad (5)$$

Скорость утечек рабочей жидкости через поверхности трещины задаются уравнениями:

$$v_t = -\frac{k}{\eta(1+\beta|v|)}(p_f - p_t), \quad v_b = -\frac{k}{\eta(1+\beta|v|)}(p_f - p_b), \quad (6)$$

где p_f – давление жидкости в трещине; p_t, p_b – поровое давление жидкости на верхней и нижней поверхностях трещины соответственно.

Общее решение задачи (1)-(6) с разрывом смещений $u(x)$ имеет вид:

$$u(x) = \sum_{i=1}^N [N_i(x)u_i + H(x)a_i], \quad (7)$$

где $N_i(x)$ – интерполяционные функции; N – число узлов в элементе; u_i – смещения узлов; a_i – добавочные смещения узлов; $H(x)$ – функция Хевисайда. Первый член суммы в (7) описывает непрерывную часть решения, второй – связанную с разрывом.

Считаем, что разрушение среды начинается при достижении критического напряжения на разрыв σ_c и описывается законом, связывающим степень разрушения D с деформацией за пределом линейной упругости среды. Помимо σ_c задается критическая энергия G_{Ic} , высвобождаемая при разрушении материала, которая вычисляется по формуле

$$G_{Ic} = \int_0^{u_f} \sigma du,$$

где u_f – скачок смещений при образовании трещины.

Значение D монотонно возрастает от 0 (сплошная среда) до 1 (разрыв). В программе используются дискретные значения $D(u)$, полученные опытным путем, либо их аппроксимации экспоненциальной зависимостью, что соответствует наблюдаемым в экспериментах закономерностям возникновения и накопления трещин в горных породах. После превышения σ_c возникает новое состояние среды, характеризующееся другими значениями критического напряжения $\bar{\sigma}_c = (1 - D)\sigma_c$ и модуля упругости $\bar{E} = (1 - D)E$. И так пошагово до тех пор, пока среда не переходит в полностью разрушенное состояние, при котором $\bar{\sigma}_c = 0, \bar{E} = 0$.

Результаты численных исследований. Рассмотрим результаты трехмерного моделирования направленного гидравлического разрыва изотропного однородного массива, с расположенной в нем необсаженной скважиной, на стенках которой имеется щелевой инициатор кольцевой формы (рис. 1а). Приняты следующие значения параметров модельной среды: модуль упругости 3×10^9 Н/м², коэффициент Пуассона 0,3, критическое напряжение на разрыв 1 МПа, критическая энергии разрушения 2×10^4 Н/м, динамическая вязкость жидкости разрыва 0.001 Па·с. Диаметр скважины составляет 76 мм, внешний радиус щелевого инициатора – 100 мм. На рис. 1б приведена схема разбиения расчетной области среды на конечные элементы.

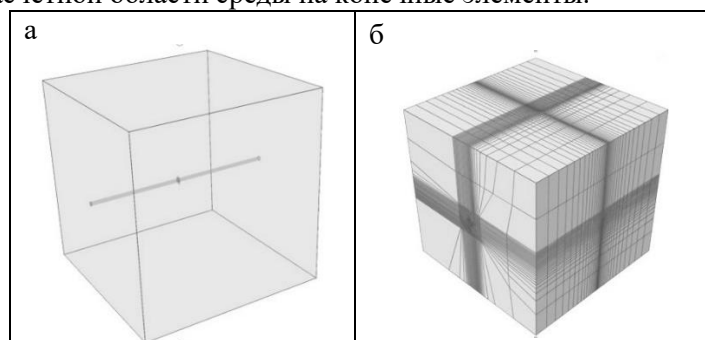


Рис. 1. Модель массива, содержащего скважину с щелевым инициатором направленного гидроразрыва (а) и схема разбиения расчетной области среды на конечные элементы (б)

Главные напряжения, действующие в среде, заданы в виде: $\sigma_{11} = \sigma_{33} = s$; $\sigma_{22} = 2s$, где значение s в расчетах менялось от минус 1 до минус 20 МПа. Напряжение σ_{11} направлено в горизонтальной плоскости ХZ вдоль оси Х, ось скважины – вдоль оси Z (см. рис. 1б). Напряжения σ_{22} и σ_{33} в ходе расчетов вращали в плоскости YZ (ось Y – вертикальная) так, что угол α между направлением

действия минимального напряжения σ_{33} и осью скважины составлял 0, 15, 30, 45 и 85°. Ось скважины при $\alpha=0^\circ$ сонаправлена минимальному напряжению $\sigma_{33}=s$, а при $\alpha=90^\circ$ - максимальному напряжению $\sigma_{22}=2s$. Полученные расчетные формы трещин НГР при разных значениях α приведены на рис. 2.

Результаты численного моделирования показывают, что щелевой концентратор напряжений задает только кольцеобразную форму пересечения разрыва со скважиной, но не его ориентацию в среде. Трещина в своем развитии разворачивается ортогонально направлению минимального сжатия, причем разворот имеет место с самого начала ее роста (рис. 2). Таким образом, проведенное моделирование показывает невозможность управления плоскостью развития трещин методом НГР в породном массиве, находящимся в неоднородном напряженном состоянии. Как и в классическом способе гидроразрыва этим методом удастся определить только минимальное сжатие пород.

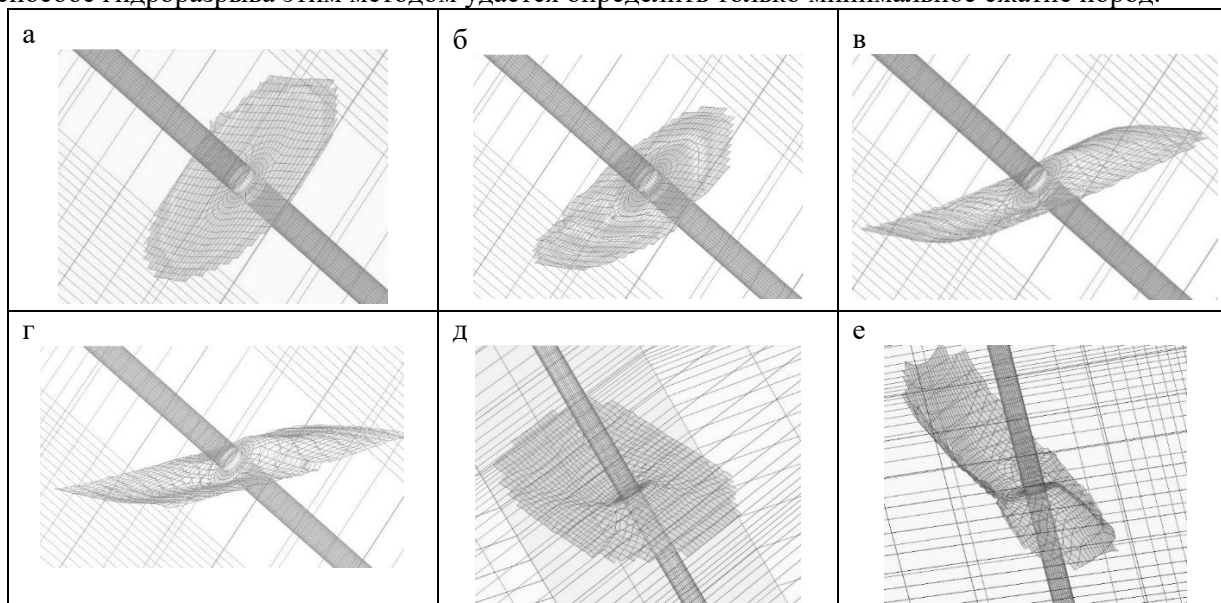


Рис. 2. Форма трещин направленного гидроразрыва изотропной среды в неоднородном поле напряжений при значениях угла между направлением минимального сжатия среды σ_{33} и осью скважины: а - 0°, б - 15°, в - 30°, г - 45°, д - 60°, е - 85°

Оценка напряженного состояния породного массива по результатам НГР вблизи горной выработки. Горная выработка оказывает влияние на напряженное состояние породного массива в своей окрестности. В простейшем случае это изменение можно оценить по известному решению задачи о влиянии круглого отверстия на распределение напряжений в пластине [8]. В качестве примера рассмотрим горизонтальную прямолинейную выработку кругового сечения, направленную вдоль максимального сжатия, действующего в однородной линейно упругой среде. Будем считать, что одно из главных напряжений σ_V ориентировано вертикально. Тогда напряжения вблизи выработки в плоскости ее сечения определяются по известным формулам [8]

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{\sigma_H + \sigma_V}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_H - \sigma_V}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta; \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_H + \sigma_V}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_H - \sigma_V}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta; \\ \tau_{r\theta} &= \frac{\sigma_V - \sigma_H}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta,\end{aligned}\quad (8)$$

где a – радиус сечения выработки, r – расстояние до ее оси, σ_H – горизонтальное напряжение, ортогональное оси выработки, θ – угол между горизонталью и радиус-вектором точки среды.

На рис. 3а показана расчетная траектория разрыва НГР с использованием щелевого концентратора напряжений, расположенного в горизонтальной скважине параллельно боку выработки на удалении $d=a/8$. Рассматривается идеально упругая среда, модуль Юнга которой $3 \cdot 10^9$ МПа, коэффициент Пуассона 0,2, $a=2,5$ м, критическое напряжение $\sigma_c=0,75$ МПа, $\sigma_V = \sigma_H = -0,75$ МПа. Моделирование выполнялось в двумерной постановке по методике, приведенной в настоящей статье. На рис. 3б показана динамика изменения давления жидкости в интервале разрыва при заданном постоянном темпе ее нагнетания.

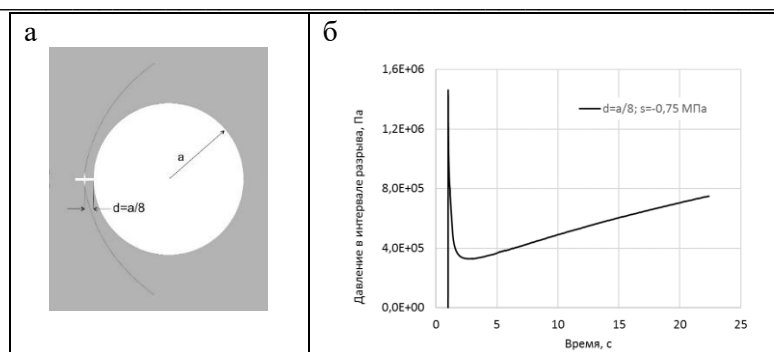


Рис. 3. Траектория гидроразрыва (а) и динамика давления рабочей жидкости (б) при инициации трещины на удалении $a/8$ от бока выработки при $\sigma_v = \sigma_H = s = -0,75$ МПа

Видно, что на значительном участке своего развития образующаяся трещина огибает выработку, а график давления рабочей жидкости имеет характерный минимум, обусловленный особенностями распределения напряжений в окрестности выработки и влиянием длины трещины на сопротивление среды разрыву. На рис. 4 и 5 показаны графики, демонстрирующие зависимости значения этого минимума от расстояния между инициатором разрыва и боком выработки (рис. 4), от величины гидростатического сжатия среды (рис. 5).

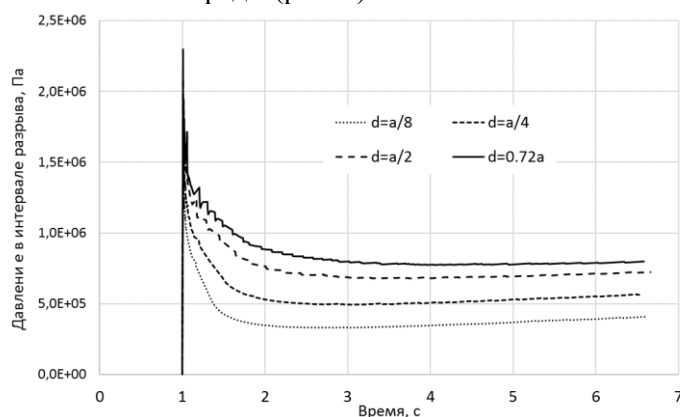


Рис. 4. Зависимость давления рабочей жидкости в интервале разрыва от расстояния между инициатором разрыва и бортом выработки при $\sigma_v = \sigma_H = s = -0,75$ МПа

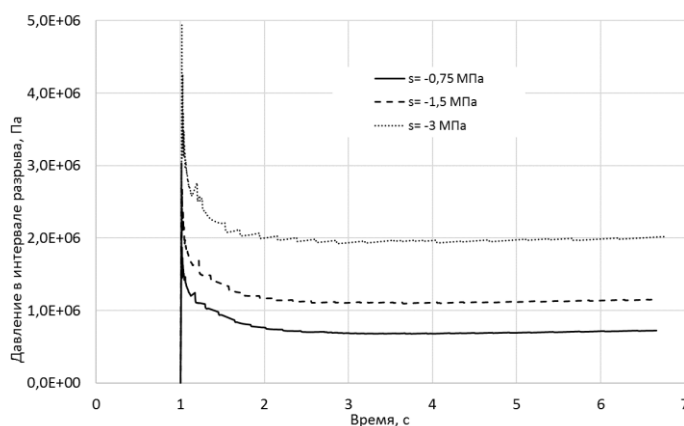


Рис. 5. Зависимость давления рабочей жидкости в интервале разрыва при $d=a/2$ от величины гидростатического сжатия среды (s)

Представленные на рис. 4, 5 графики показывают высокую чувствительность локального минимума давления рабочей жидкости в интервале разрыва вблизи горной выработки от изменения напряженного состояния среды. Определяющими факторами помимо напряжений являются расстояние до горной выработки, сопротивление среды разрыву, зависящее от длины трещины. В результате имеет место нелинейная связь давления с напряжениями, которую предполагается исследовать, в частности, для определения возможностей контроля не только напряженного состояния среды, но и вязкости ее разрушения [4].

На основе полученных результатов нами предложен способ оценки напряженного состояния породного массива, идея которого состоит в измерении давления заклинивания трещин, полученных методом НГР вне и в зоне существенного влияния горной выработки. Один из возможных вариантов его реализации включает бурение нескольких скважин, одна из которых глубиной более двух средних диаметров горной выработки, используется для определения минимального сжимающего напряжения вне зоны влияния горной выработки.

Дополнительно на глубину равную среднему радиусу горной выработки ($d=a$) ортогонально ее оси бурят горизонтальную и/или вертикальную скважины, на забое которых проводят гидроразрывы методом НГР и замеряют давления закрытия P_S полученных трещин. Для глубокозалегающих пластов и относительно длинных трещин напряжения, действующие в массиве, существенно выше сопротивления пород разрыву, которым при измерении напряжений методом гидроразрыва обычно пренебрегают [4]. Тогда для выработки круглого сечения и $d=a$ значения P_S связаны с напряжениями, действующими в породном массиве, следующими выражениями, полученными из (8)

$$\begin{aligned} P_S^{(h)} &= \frac{15}{32} \sigma_H + \frac{9}{32} \sigma_V; \\ P_S^{(v)} &= \frac{9}{32} \sigma_H + \frac{15}{32} \sigma_V, \end{aligned} \quad (9)$$

где $P_S^{(h)}, P_S^{(v)}$ – соответственно, давления заклинивания трещин в горизонтальной и вертикальной скважинах. Из (9) находим искомые напряжения σ_H и σ_V . Сравнивая их между собой и с минимальным сжатием, действующим в породном массиве, делаем вывод о характере его напряженного состояния.

В случае горных выработок с произвольной формой сечения вместо (9) можно использовать результаты численного моделирования распределения напряжений в ее окрестности. Многократные повторные измерения давлений заклинивания уже созданных трещин, выполняющих роль чувствительных элементов системы наблюдений, могут быть рекомендованы для контроля за изменениями состояния породного массива.

Выводы. Результаты численного моделирования показывают, что щелевой концентратор напряжений задает только пересечение разрыва со скважиной, но не его ориентацию в среде. Трещина в своем развитии разворачивается перпендикулярно направлению минимального сжатия, причем разворот происходит с начала ее роста. Проведенное моделирование показывает невозможность управления направлением развития трещин методом НГР в породном массиве, находящимся в неоднородном напряженном состоянии. Как и в классическом способе гидроразрыва с помощью НГР удастся определить только минимальное сжатие пород.

Предложен способ оценки напряженного состояния породного массива по результатам измерений давления заклинивания трещин, сформированных методом направленного гидроразрыва вне и в зоне существенного влияния горной выработки на напряженное состояние породного массива.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №20-17-00087).

Список литературы

1. Чернов О.И., Кю Н.Г. О флюидоразрыве породных массивов // ФТПРПИ. – 1988. – № 6. – С. 81-92.
2. Леконцев Ю.М., Сажин П.В. Технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями в очистных забоях и дегазации угольных пластов // ФТПРПИ. – 2014. – №5. – С.137-142.
3. Экспериментальная проверка способа направленного гидроразрыва горных пород / С.В. Сердюков [и др.] // ФТПРПИ. – 2016. – № 4. – С. 3-11.
4. Сердюков С.В., Курленя М.В., Патутин А.В. К вопросу об измерении напряжений в породном массиве методом гидроразрыва // ФТПРПИ. – 2016. – № 6. – С. 6-14.
5. Определение компонент природного поля напряжения по данным измерительного гидроразрыва / А.В. Панов [и др.] // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 2. – № 3. – С. 186-190.
6. Азаров А.В., Курленя М.В., Сердюков С.В. Программный комплекс для моделирования гидравлического разрыва пласта при добыче твердых полезных ископаемых // ФТПРПИ. – 2020. – №5. – С. 206-216.
7. Методика моделирования фильтрации флюидов при разработке твердых полезных ископаемых с применением гидроразрыва / А.В. Азаров [и др.] // ФТПРПИ. – 2020. – №6. – С. 3-12.
8. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1979. – 560с.

ФОРМА ТРАЕКТОРИИ ДИСКОВОЙ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА ОКОЛО ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ

¹д.т.н. Черданцев Н.В., ²д.т.н. Черданцев С.Н.

1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

2 – АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», г. Кемерово, Россия

Аннотация. В рамках модели геомеханического состояния углепородного массива, вмещающего пластовую выработку и дисковую трещину гидроразрыва, основанную на методах механики деформируемого твёрдого тела и механики разрушения, проведены расчёты траектории трещины гидроразрыва для различных положений зародышевой трещины относительно выработки. Установлены закономерности в траектории трещины.

Ключевые слова: углепородный массив, пластовая выработка, коэффициенты интенсивности напряжений, трещина гидроразрыва.

Введение. Способ направленного гидроразрыва используют для регулируемого обрушения вмещающих пород и повышения проницаемости угольного пласта с целью обеспечения безопасности ведения горных работ [1, 2].

Наиболее существенным фактором, влияющим на траекторию трещины гидроразрыва, является поле напряжений во вмещающем углепородном массиве, обусловленном горно-геологическими (глубина ведения горных работ, мощность и характеристики прочности пласта) и горнотехническими (размеры выработки) условиями. Это поле оказывает значительное влияние на траекторию трещины, существенно искажая её проектное, как правило, прямолинейное направление.

В настоящее время опубликован ряд работ, посвящённых применению направленного гидроразрыва пласта и вмещающих пород [3 – 7]. В них приведены теоретические решения задач гидроразрыва, основанные на фундаментальных методах механики твёрдого деформируемого тела. Однако в работах [3 – 5] приведены результаты исследований о распространении трещин гидроразрыва, развивающихся от поверхности скважины, которая находится в однородном гравитационном поле напряжений.

К теоретическим работам о распространении трещин гидроразрыва в массиве горных пород вблизи горных выработок можно отнести работы [6, 7]. Причём, в работе [6] приведены результаты расчёта параметров плоской трещины гидроразрыва в окрестности пластовой выработки, в которой инициирующая (зародышевая) трещина представляет собой продольные пропилы на поверхности скважины. В работе [7] представлены результаты расчёта дисковой трещины гидроразрыва, также распространяющейся в кровле пласта около пластовой выработки. В этом случае зародышевая трещина создаётся специальным щелеобразователем.

Ниже приведены некоторые результаты исследований формы и размеров траектории дисковой трещины гидроразрыва, развивающейся около выработки при различных положениях инициирующей трещины. Для анализа полученных результатов и выбора рационального её размещения исследования проводились для различных положений зародышевой трещины относительно выработки.

Постановка задачи и её решение. Задача формулируется в постановке предыдущих работ [6, 7] (рис. 1). В массиве горных пород, моделируемом невесомой плоскостью, имеется выработка 1 прямоугольного сечения размерами $b_v \times h_v$, пройденная на глубине H по угольному пласту 2 на всю его мощность. В кровле и почве выработки приложена реакция крепи f . Характеристики прочности угольного пласта меньше, чем характеристики прочности пород вмещающего массива, но больше, чем по контактам пласта с остальным массивом, который нагружен гравитационным давлением сверху и снизу γH (γ – средневзвешенный объёмный вес налегающих пород), а с боков – $\lambda \gamma H$ (λ – коэффициент бокового давления). В краевых частях пласта образуются зоны неупругого деформирования 3 шириной L . Из середины кровли выработки под углом к горизонту θ_s пробурена скважина 4 длиной l_s . Из неё щелеобразователем образована дисковая щель 5 (зародышевая трещина) радиусом b . Щель нагружена давлением p и наклонена к горизонту на угол θ_i . Её коор-

динаты в системе yOz , совпадающей с центральными осями выработки, y_t , z_t . Очевидно, что геометрические параметры щели связаны с параметрами скважины следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} y_t &= l_s \cos \theta_s; \\ z_t &= \frac{h_v}{2} + l_s \sin \theta_s; \\ \theta_t &= \theta_s - 90^\circ \quad \theta_t = \theta_s - 90^\circ. \end{aligned}$$

Как и ранее в процессе решения задачи полагается:

- размеры выработки вдоль абсциссы x значительно превосходят размеры в плоскости Oyz , в силу чего, можно считать, что породы в окрестности выработки находятся в условиях плоской деформации;
- прочность пласта значительно ниже прочности вмещающих его пород;
- сжимающие нормальные напряжения положительны;
- трещина гидроразрыва не изменяет поля напряжений в окрестности выработки;
- процессы фильтрации жидкости в массиве и другие её утечки не учитываются.

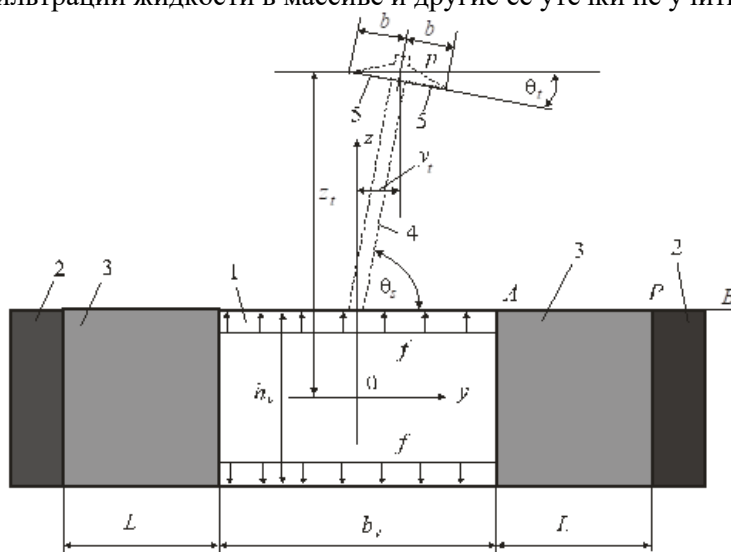


Рис. 1. Расчётная схема пластовой выработки и дисковой трещины

Основу математической модели развития трещины гидроразрыва составляет модель геомеханического состояния анизотропного массива горных пород, вмещающего угольный пласт и пройденную по нему выработку. Смысл её состоит в сведении упругопластической задачи ко второй внешней краевой задаче теории упругости и её решению методом граничных интегральных уравнений.

Наличие предельно напряжённых зон, в которых угольный пласт испытывает неупругие деформации, делает задачу о напряжённом состоянии массива около пластовой выработки упругопластической задачей.

Механизм формирования предельно напряжённых зон с образованием линий скольжения изложен в работе [6]. В предельно напряжённой зоне пласта напряжения определяются путём совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и двух критериев перехода пласта в предельное состояние, называемых общим и специальным критериями Кулона – Мора [8]. Общий критерий формулируется для всех точек пласта за исключением точек, принадлежащих контакту пласта с боковыми породами, а специальный критерий только для точек на контакте пласта с массивом [9]. Полученная таким образом система дифференциальных уравнений относится к классу уравнений гиперболического типа и решается методом характеристик, которые совпадают с линиями скольжения пласта в его предельной зоне. В замкнутом виде она интегрируется лишь для нескольких участков пласта, примыкающих к его обнажению. На остальных участках его предельно напряжённой зоны решение можно получить только путём вычислительной процедуры, последовательно решая три краевые задачи механики предельного равновесия сыпучих сред для характерных участков этой зоны [8].

Путём замены предельно напряжённой зоны пласта нормальными и касательными напряжениями, действующими на контакте пласта с окружающим массивом, задача о напряжённом состо-

янии около пластовой выработки с предельно напряжёнными зонами сводится к упругой задаче с неоднородными граничными условиями по контуру.

Неизвестный размер предельно напряжённой зоны, входящий в размеры области интегрирования, определяется методом последовательных приближений. Сначала этот размер задаётся, затем решается интегральное уравнение и после этого вычисляются напряжения вдоль контакта пласта с массивом (вдоль линии APB на рис. 1). Далее, на границе упругой области и предельно напряжённой зоны сравниваются полные напряжения p_y, p_z . Эти напряжения на горизонтальных участках пласта равны соответственно напряжениям σ_z и τ_{yz} . Если результаты отличаются друг от друга, то решение интегрального уравнения производится при другом значении L . Процедура счёта продолжается до тех пор, пока значения полных напряжений не совпадут или будут достаточно близки друг к другу.

После того как произведена стыковка напряжений в предельно напряжённой зоне пласта и в его упругой части, считается, что поле напряжений во вмещающем массиве построено, т.е. тензор напряжений может быть определён в любой точке массива [6].

Следующим этапом решения поставленной задачи является расчёт параметров трещины гидроразрыва и графическое представление результатов расчёта траектории трещины.

Известно, что рост трещины в твёрдых деформируемых телах происходит при следующем условии [10, 11]

$$k_I^2 + k_{II}^2 = \frac{E \cdot \gamma_t}{1 - \mu^2} = K_{1C}^2,$$

где k_I – коэффициент интенсивности напряжений, обусловленный действием нормальной нагрузки p_I на берегах трещины, k_{II} – коэффициент интенсивности напряжений от действия касательной нагрузки p_{II} также на берегах трещины. E – модуль упругости первого рода, а μ – коэффициент Пуассона пород массива. γ_t – плотность энергии на разрыв, необходимой для образования единицы поверхности, K_{1C} – коэффициент трещиностойкости материала (справочные данные для некоторых типов горных пород приведены в [12]).

Поскольку трещина гидроразрыва даже достаточно больших размеров мала по сравнению с размерами вмещающего её массива, то нагрузки p_I, p_{II} равны нормальным и касательным напряжениям на берегах трещины. Следовательно, нагрузки p_I, p_{II} соответствуют нормальным и касательным напряжениям, действующим вдоль берегов трещины. После построения поля напряжений определить их не представляет принципиальных сложностей.

Коэффициенты интенсивности напряжений для дисковой трещины радиуса a , нагруженной внутренним давлением на участке радиуса b ($b < a$), расположенной в гравитационном поле напряжений вблизи выработки, выражаются зависимостями, приведёнными в [13, 14].

Направленный гидроразрыв горных пород реализуется посредством насосных установок с жёсткими рабочими характеристиками: напор p_0 и расход жидкости в единицу времени Q . В таких установках $Q = \text{const}$, p_0 – величина переменная.

В процессе гидроразрыва давление жидкости при прохождении по трещине за счёт вязкости η и параметров самой трещины (раскрытие перед очередным циклом j прорастания w и её длиной $2a$) изменяется согласно закону Пуазейля [15]

$$p_j = p_{j-1} - \frac{3Q\eta}{w_j^3} \Delta l_j. \quad (1)$$

В выражении (1) η – динамическая вязкость жидкости, раскрытие трещины w определяется по формуле Снеддона [16], приращение Δl_j определится как разность между конечной величиной a_j итерационного процесса и предыдущим значением b_j , p_j находится из численного решения трансцендентного уравнения [17]

$$p_j - \frac{1}{\left(1 - \sqrt{1 - \frac{b_j^2}{a_j^2}}\right)} \left(J_I + \sqrt{\frac{\pi E \gamma_t}{4a_j(1 - \mu^2)}} - J_{II}^2 \right) = 0, \quad (2)$$

в котором параметры J_I, J_{II} учитывают нагрузки p_I, p_{II} в неоднородном поле напряжений и размеры растущей трещины на каждом её цикле развития. Они выражаются по формулам [17].

Решение уравнения (2) производится последовательными приближениями, увеличивая на каждом шаге итерации размер a на малую величину. Затем по формуле (1) вычисляется новое значение p , к нему добавляется очередное приращение давления Δp и начинается новый цикл прорастания трещины.

Результаты решения задачи и их анализ. Приняты следующие исходные данные: $\gamma=25$ кН/м³, $H=450$ м, $\lambda=1$, $f=2,5$ кН/м², $b_v=5$ м, $h_v=3$ м, $E=20000$ МПа, $\mu=0,25$, предел прочности пласта на одноосное сжатие $\sigma_0=10$ МПа, $K_{IC}=1,66$ МПа·м^{1/2} ($\gamma_t=12,92 \cdot 10^{-5}$ МПа·м), $b=0,066$ м, $\eta=13,04 \cdot 10^{-10}$ МПа·с, $Q=0,0035$ м³/с. Остальные данные в ходе эксперимента менялись.

На рис. 2 графики 1, 2 представляют собой эпюру напряжений σ_z , построенную вдоль кровли пласта (вдоль линии APB на рис. 1) в предельно напряжённой зоне (график 1) и в упругой области (график 2). Из анализа эпюры следует, что максимальная величина опорного давления равна $1,687\gamma H$, а длина предельно напряжённой зоны $L=2,4$ м.

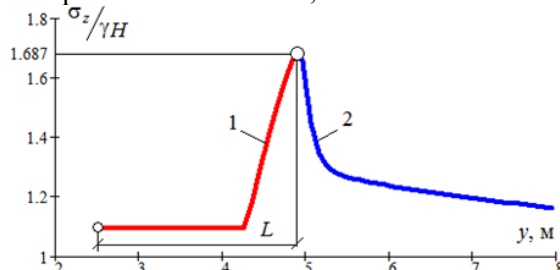
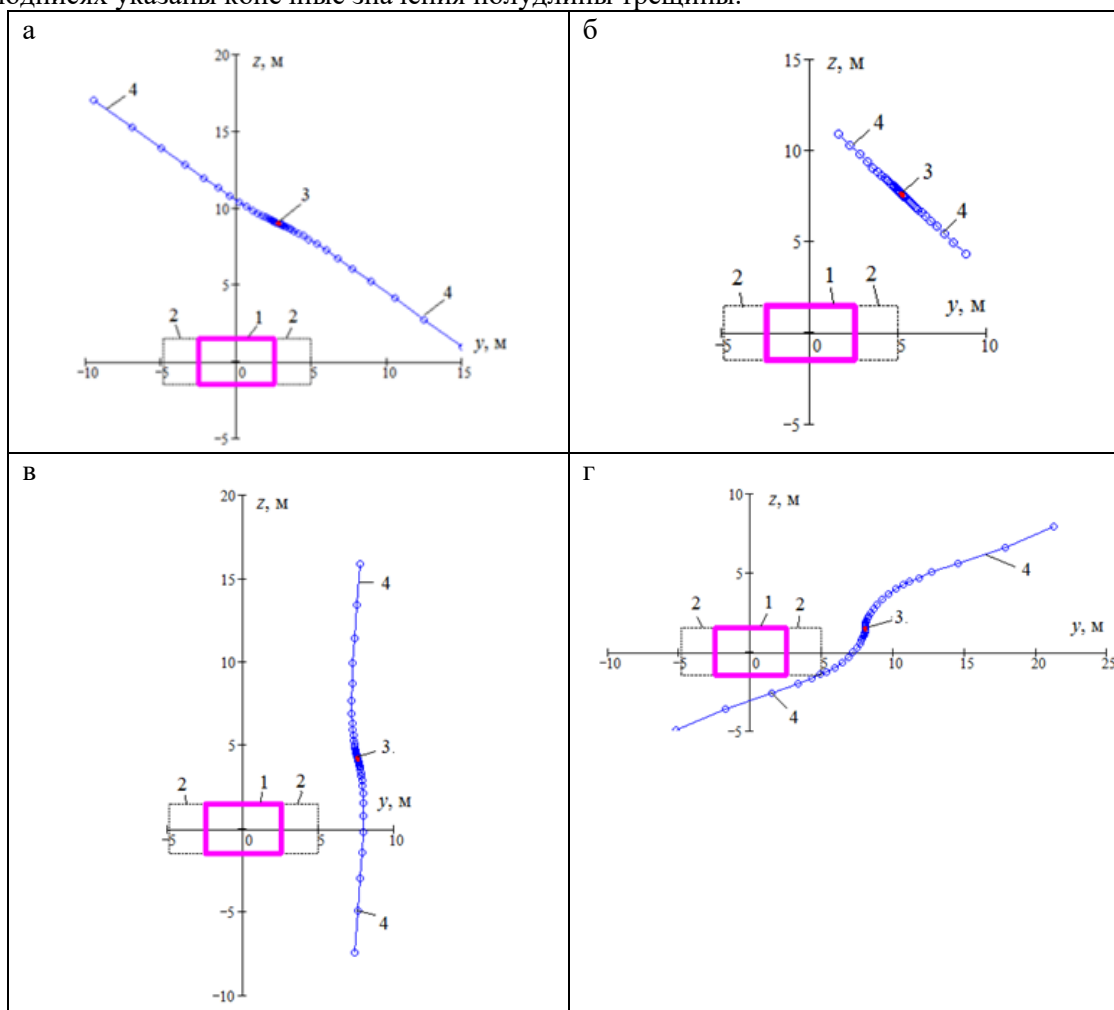


Рис. 2. Эпюры распределения напряжений вдоль кровли пласта

На рис. 3 представлены графические результаты расчёта траекторий трещины для ряда значений угла θ_t , длине скважины $l_s=8$ м, давлении $p_0=30$ МПа и числе циклов нагружения $N=25$. На рисунках кружками обозначены номера циклов, соответствующих росту трещины. В подрисуночных подписях указаны конечные значения полудлины трещины.



1 — выработка; 2 — предельно напряжённые зоны; 3 — зародышевая трещина;

4 — ветви траектории трещины

Рис. 3. Траектория трещины при: а — $\theta_t = -20^\circ$. $a=14,66$ м; б — $\theta_t = -40^\circ$. $a=4,87$ м;

в — $\theta_t = -70^\circ$. $a=11,73$ м; г — $\theta_t = -90^\circ$. $a=15,2$ м

Из рисунков следует: во-первых, длина трещины для каждого из вариантов заложения зародышевой трещины различна. Во-вторых, траектория представляет собой плавную пологую линию, на большей части длины близкую к прямой линии. В-третьих, в процессе её роста она в большей или меньшей степени изменяет направление, отклоняясь от направления зародышевой трещины. Наиболее существенно отклонение происходит при вертикальной ориентации зародышевой трещины, а наименьшее, когда она повернута к горизонту на минус 40 градусов.

Следует отметить, что при одинаковом числе циклов нагружения внутренним давлением прямолинейной траектории соответствует меньшая длина.

На рис. 4 построен график зависимости конечной полудлины трещины гидроразрыва при 25 циклах её развития. График 1 построен при длине скважины $l_s=8$ м, а график 2 соответствует одиночной трещине в отсутствии выработки.

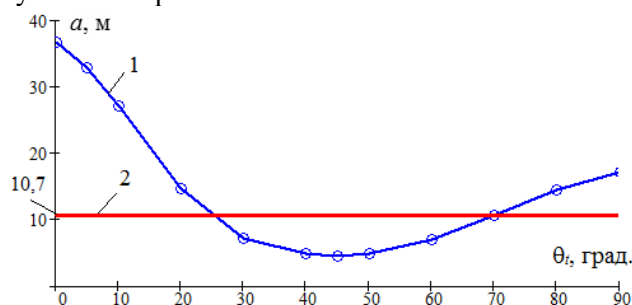


Рис. 4. Графики зависимости полудлины трещины a от угла наклона θ_i

Из рисунка следует, что при разных значениях угла наклона θ_i зародышевой трещины, расположенной вблизи выработки, трещина гидроразрыва растёт по-разному. Так, на интервале изменения угла наклона $\theta_i=26^\circ - 70^\circ$ длина трещины меньше, чем длина одиночной трещины в массиве в отсутствии выработки. На остальных интервалах изменения θ_i её длина около выработки может существенно превышать длину одиночной.

Выводы. Ориентация зародышевой трещины относительно выработки значительно влияет на конечную длину трещины, на её форму и направление траектории роста. Выделено три участка интервала изменения угла наклона зародышевой трещины, в пределах которых растущая трещина принимает большие или меньшие значения по сравнению с одиночной трещиной гидроразрыва, распространяющейся вдали от выработки.

Наличие выработки оказывает весьма существенное влияние на размеры и траекторию трещины гидроразрыва. Так, при некоторых углах наклона длина трещины около выработки более чем в два с половиной раза превышает длину одиночной трещины.

Благодарности. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №17-17-01143).

Список литературы

1. Клишин В.И., Зворыгин Л.В., Лебедев А.В., Савченко А.В. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. – Новосибирск: Новосибирский писатель, 2011. – 524 с.
2. Козырева Е.Н. Возможности повышения эффективности управления газовыделением на выемочном участке // Вестник Научного центра ВостНИИ по безопасности работ в угольной промышленности. – 2017. – № 3. – С. 30–35.
3. Зубков В.В., Кошелев В.Ф., Линьков А.М. Численное моделирование инициирования и роста трещин гидроразрыва // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2007. – № 1. – С. 45–63.
4. A variational hydraulic fracturing model coupled to a reservoir simulator / K. Yoshioka, B. Bourdin // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2016 – Vol. 88 – P. 137 – 150.
5. Черный С.Г., Лапин В.Н., Есипов Д.В., Куранак Д.С. Методы моделирования зарождения и распространения трещин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. – 312 с.
6. Черданцев Н.В. Один из подходов к построению траектории трещины гидроразрыва в массиве горных пород вблизи горной выработки // Прикладная математика и механика. – 2020. – № 2. – С. 208–233.
7. Черданцев Н.В. К расчёту траектории дисковой трещины гидроразрыва в прочных породах вблизи пластовой выработки // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 10. – С. 59–64.
8. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. – М.: Наука, 1990. – 272 с.

9. Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. – М.: Недра, 1976. – 272 с.
10. Седов Л.И. Механика сплошной среды. – М.: Наука, 1984. – 560 с.
11. Хеллан К. Введение в механику разрушения. – М.: Мир, 1988. – 364 с.
12. Баклашов И.В. Основы геомеханики. Т. 1. – М.: Моск. гос. геол. ун-т, 2004 – 208 с.
13. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
14. Мураками Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений в 2-х томах, т. 1, М.: Мир, 1990. – 448 с.
15. Теодорович Э.В., Трофимов А.А., Шумилин И.Д. Форма плоской трещины гидроразрыва в упругой непроницаемой среде при различных скоростях закачки // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2011 – № 4. – С. 109 – 118.
16. Снеддон И.Н., Берри Д.С. Классическая теория упругости. – М.: Физматгиз, 1961. – 220 с.
17. Черданцев Н.В. Расчёт параметров дисковой трещины гидроразрыва, расположенной в прочных породах кровли пласта около пластовой выработки // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – № 6. – С. 84 – 89.

УДК: 622.1.1.142.5:550.8.042

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ДОМЕНОВ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

¹д.т.н. Рогова Т.Б., ²д.т.н. Шаклеин С.В. ²д.т.н. Писаренко М.В.

1 – Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
г. Кемерово, Россия

2 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово, Россия

Аннотация. Приложен формализованный подход к выделению геологических доменов, используемых в процессе цифрового моделирования угольных месторождений, основанный на анализе геологических данных с помощью метода уравнивания геологоразведочной сети. Получаемые в результате уравнивания поправки к результатам измерений характеризуют уровень погрешностей измерений и неопределенности геометризации изучаемого показателя в окрестностях пластопересечений. Локализация доменов осуществляется по критерию близости значений поправок.

Ключевые слова: угольные месторождения, горно-геометрические модели, неопределённость геологической информации, геологический домен, уравнивание сетей.

Введение. Основой принятия любых решений при разработке месторождений полезных ископаемых является геологическая информация и обобщающие ее горно-геологические модели, качество которых определяет эффективность технологических и управленческих решений.

Программой развития угольной промышленности России на период до 2035 года [1] определено, что приоритетным направлением развития технологий добычи является создание комплексов «Интеллектуальный карьер» и «Интеллектуальная шахта». Успешная реализация этих комплексов предполагает широкое внедрение цифровизации, автоматизации и роботизации горной промышленности и предъявляет повышенные требования к качеству горно-геологических моделей.

Для создания геологических моделей различных показателей угольных месторождений (гипсометрия и мощность пласта, зольность и др.) используются методы геостатистики [2, 3]. Исходя из особенностей математического аппарата геостатистики, изучаемые показатели в пределах границ модели должны удовлетворять требованию стационарности, т. е. должны быть однородными по пространственному распределению изучаемых показателей [4].

Обеспечение однородности достигается путем разделения месторождения на домены – участки, однородные по геологическим условиям, пространственному размещению показателей месторождения и по уровню достоверности геологической информации. Выделение доменов осуществляется неформализованным экспертным методом. Однородность доменов заверяется статистическим анализом, включающим построение гистограмм, оценку статистических параметров, построение вариограмм по ортогональным направлениям, оценку анизотропии и т. д. [5]. Ввиду малого количества прямых измерений и определений и присущей угольным месторождениям высокой анизотропией показателей, получение достоверных оценок статистических распределений показателей невозможно, а единичное использование вариограммы рискованно [5].

В связи с этим, для повышения качества горно-геологических моделей угольных месторождений актуальным является совершенствование методов локализации в границах месторождения геологических и статистических доменов.

Обоснование подхода. Предлагаемый подход основывается на идее уравнивания сетей геологоразведочных скважин. Математический аппарат уравнивания, давно применяемый в геодезии, использует специально создаваемые в геодезических сетях избыточные измерения и реально существующие геометрические условия (например, известное теоретическое значение суммы углов в треугольнике). Из-за наличия погрешностей измерений возникающие условия на практике не выполняются, в силу чего возникают угловые, линейные и иные расхождения фактических и теоретических параметров сети (называемые невязками). Для устранения несогласованности результатов геодезических измерений выполняется их математическая обработка – *уравнивание* [6].

В геологоразведочной практике избыточные определения отсутствуют, но их можно создать искусственно. Для этого разведочная сеть делится на систему выпуклых четырехугольников, вершинами которых являются разведочные скважины (рис. 1), нумеруемые цифрами от 1 до 4, начиная с произвольной вершины и увеличивая их по направлению движения часовой стрелки. В каждом четырехугольнике проводится две диагонали 1-3 и 2-4 (рис. 1).

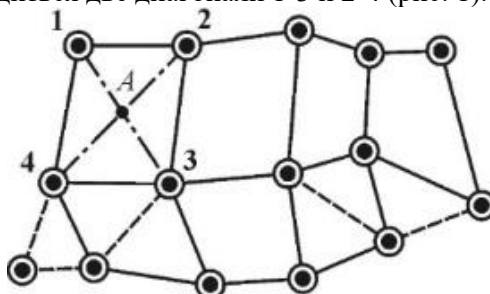


Рис. 1. Четырехугольные ячейки разведочной сети

Значение показателя P в точке пересечения диагоналей A определяется интерполированием вдоль каждой из них. В результате этого возникает два возможных варианта значения показателя в точке A – P_{1-3} и P_{2-4} , которые теоретически должны быть равны между собой. Однако, в силу наличия погрешностей измерений и интерполяции, эти значения совпадать друг с другом не будут.

Разность D между значениями P_{1-3} и P_{2-4} , являющаяся разностью двух независимых косвенных определений характеризует неоднозначность геологических построений и может рассматриваться в качестве аналога «невязки».

Уравнивание геологоразведочной сети осуществляется коррелятным способом по «невязкам» D , определенным по всем четырехугольникам сети скважин. В результате уравнивания значение измеренного в каждой скважине сети показателя получит поправку, введение которой изменит его значение таким образом, что невязки по всем четырехугольникам разведочной сети одновременно станут равны нулю [7].

В предлагаемом подходе изменение изучаемого показателя на величину поправки не предполагается, т. к. поправки рассматриваются только в качестве меры оценки погрешности геометризации в окрестности точки выполнения измерений.

Детально рассмотрим порядок уравнивание таких показателей как мощность пласта или показатели качества угля, геометризация которых осуществляется линейной интерполяцией. Пусть имеются t четырехугольников, образованных n разведочными скважинами, по каждому из которых невязка D определяется по формуле [8]:

$$D = (P_3 - P_1)x + P_1 - (P_4 - P_2)x' - P_2, \quad (1)$$

где x , x' – отношение расстояния от вершины 1 до точки A к длине диагонали 1-3 и от вершины 2 до точки A к длине диагонали 2-4 соответственно; P_m – величина показателя (мощность пласта, зольность и т.п.) измеренного в скважине-вершине m ($m = 1, 2, 3, 4$) – рис. 1.

После расчета невязок D формируется табл. 1, строки которой соответствуют четырехугольникам, а столбцы – скважинам. В каждую ячейку таблицы заносятся вычисленные по формуле 2 значения коэффициентов a_{ij} (i – порядковый номер скважины, j – порядковый номер четырехугольника). При этом для скважин i не входящих в четырехугольник j принимается $a_{ij} = 0$.

$$\begin{aligned} & \text{– для скважины № 1: } a_{ij} = 1 - x; \\ & \text{– для скважины № 2: } a_{ij} = x' - 1; \end{aligned} \quad (2)$$

- для скважины № 3: $a_{ij} = x$;
- для скважины № 4: $a_{ij} = -x'$.

Таким образом, в каждой строке табл. 1 будет находиться четыре отличающихся от нуля коэффициента.

Таблица 1

Таблица коэффициентов a_{ij}

Порядковый номер четырехугольника (j)	Порядковый номер скважины (i)				
	1	2	3		n
1	a_{11}	a_{21}	a_{31}	...	a_{n1}
2	a_{12}	a_{22}	a_{32}	...	a_{n2}
.....		...			
t	a_{1t}	a_{2t}	a_{3t}	...	a_{nt}

В следующую табл. 2 заносятся суммы произведений строк табл. 1. Так S_{11} является результатом перемножения строки 1 саму на себя: $S_{11} = \sum_{i=1}^t a_{i1}^2$; $S_{12} = \sum_{i=1}^t (a_{i1}a_{i2})$, и так далее.

Таблица 2

Таблица произведений строк таблицы 1

Номера строктаблицы 1 (k)	1	2	3	...	t
1	S_{11}	S_{21}	S_{31}	...	S_{t1}
2	S_{12}	S_{22}	S_{32}	...	S_{t2}
...	...	...	...	...	...
t	S_{1t}	S_{2t}	S_{3t}	...	S_{tt}

На основе данных таблицы 2 формируется система уравнений:

$$\begin{aligned} S_{11}K_1 + S_{21}K_2 + \dots + S_{t1}K_t &= -D_1; \\ S_{12}K_1 + S_{22}K_2 + \dots + S_{t2}K_t &= -D_2; \\ &\vdots \\ S_{1t}K_1 + S_{2t}K_2 + \dots + S_{tt}K_t &= -D_t. \end{aligned} \quad (3)$$

Решая систему уравнений (3), находят корреляты K_k . Затем каждая k -я строка табл. 1 умножается на корреляту K_k , а полученные произведения суммируются по столбцам:

$$\varepsilon_i = \sum_{k=1}^t a_{ik} \cdot K_k. \quad (4)$$

Значения ϵ_i являются искомыми поправками. Для контроля качества решения системы уравнений вычислений проверяется алгебраическая сумма всех поправок на равенство нулю, а для полного контроля уравнивания – на равенство нулю невязок D , повторно определенных уже по исправленным (на величины поправок) значениям показателя.

При уравнивании высотных отметок пласта по плаstopодсечениям последовательность описанных выше действий сохраняется, но для интерполирования высотных отметок используется кубическая сплайн-интерполяция, учитывающая элементы залегания пласта [8]. В качестве невязки по четырёхугольникам сети разведочных скважин используется лямбда-критерий λ_v [8] и определение коэффициентов a_{ij} производится по формулам (5).

$$\begin{aligned} \text{для скважины № 1: } a_{ij} &= 1 - (3 - 2x)x^2; \\ \text{для скважины № 2: } a_{ij} &= (3 - 2x)x^2 - 1; \\ \text{для скважины № 3: } a_{ij} &= (3 - 2x)x^2; \\ \text{для скважины № 4: } a_{ij} &= -(3 - 2x)x^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Плохая обусловленность системы уравнений (3), которая на практике может включать в себя до 300 уравнений, делает невозможным ее решение с помощью традиционно применяемого в геодезическом уравнивании метода Гаусса. Однако ее решение всегда достигается при применении итерационного алгоритма В. Н. Трушникова [9].

Обсуждение результатов. Полученные в результате уравнивания поправки зависят от погрешностей измерений и геометризации, которые в свою очередь – от конфигурации и плотности разведочной сети и от сложности геологического строения изучаемого месторождения. Отсюда следует, что в пределах одного домена поправки должны иметь близкие значения. Следует отме-

тять, что при локализации доменов по гипсометрии (по высотным отметкам пласта) значимым является и знак поправок. Чередование на изучаемом месторождении зон распространения поправок с отрицательными и с положительными значениями, свидетельствует о его геологической неоднородности и наличии нескольких доменов, в качестве границы которых принимается изолиния нулевых значений поправок (рис. 2, а). Как правило, такие участки располагаются между тектоническими нарушениями (в том числе и еще не выявленными). В случае, когда поправки с отрицательными и положительными значениями размещаются хаотично на незначительных площадях (рис. 2, б), домены не выделяются.

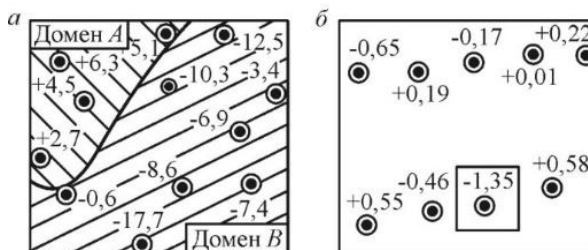


Рис. 2. Фрагменты планов с результатами уравнивания высотных отметок пласта Полысаевский II (а) и мощности пласта 74 (б)

При локализации доменов по мощности пласта и по показателям качества угля необходимо ориентироваться не только на знак, но и на значения поправок. Домен по этим показателям – это участок с близкими значениями поправок, а его границей является изолиния поправок, сечение которой соответствует заданному интервалу Δ в домене.

В случае отсутствия каких-либо геологических соображений по выбору сечения изолиний Δ , оно может быть установлено путем предварительного перебора возможных значений. Каждому варианту Δ будет соответствовать определенное количество доменов N . По графику зависимости количества доменов N от Δ находится оптимальное Δ , соответствующее максимальному количеству доменов (рис. 3).

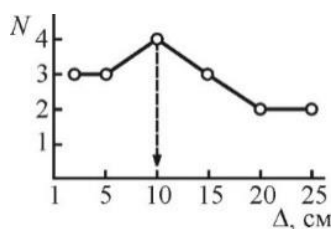


Рис. 3. Зависимость числа доменов N мощности породных прослоев от принятого уровня изменения поправок Δ в домене

Построение изолиний (границ доменов) может осуществляться методами кригинга. Их применение всегда корректно, т. к. поправки всегда удовлетворяют требованию стационарности, а их распределение подчиняется нормальному закону с математическим ожиданием, равным нулю.

Метод уравнивания может быть использован и для формализованного выделения потенциально аномальных замеров. Если значение поправки резко выделяется по своей величине (например, выделенная на рис. 2, б поправка к мощности пласта «–1,35 м»), то показатель определен в скважине либо с существенной ошибкой, либо в окрестности скважины имеет место резкое изменение характера поведения изучаемого показателя. Такой подход позволяет выделить аномальный замер, одновременно учитывая его значение и пространственное расположение.

Выводы. Реализованный с помощью метода уравнивания геологоразведочной сети подход к анализу геологоразведочной информации позволяет формализовать процедуру локализации геологических доменов, а также корректно опознавать аномальные замеры показателей. Заложенные в нем возможности позволяют повысить достоверность построения горно-геометрических моделей показателей. Работоспособность и эффективность предлагаемого подхода оценена в условиях угольных месторождений Кузбасса.

Список литературы

1. Программа развития угольной промышленности России до 2035 года : утв. 13.06.2020, № 1582-р. – М. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/00012020006180009>.

2. Haldar S.K. Mineral exploration: principles and applications. – Oxford: Elsevier, 2018.
3. Капутин Ю.Е. Горные компьютерные технологии и геостатистика. – Санкт-Петербург: Недра, 2002. – 424 с.
4. Ma Y.Z. Quantitative Geosciences: Data Analytics, Geostatistics, Reservoir Characterization and Modeling. – Cham: Springer, 2019.
5. Australian Guidelines for the Estimation and Classification of Coal Resources: Guidelines Review Committee, 2014.
6. Машимов М.М. Уравнивание геодезических сетей. – М.: Недра, 1979, – 367 с.
7. Рогова Т.Б., Шаклеин С.В. Достоверность запасов угольных месторождений. Количественная оценка и мониторинг. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co, 2011. – 508 с.
8. Рогова Т.Б., Шаклеин С.В., Ярков В.О. Подсчет запасов угольных месторождений: учеб. пособие. – Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2010. – 136 с.
9. Trushnikov V.N. Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 1982. – Vol. 22. – № 1. – P. 239-244.

УДК 553.94:351.823.3

ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ СЫРЬЕВОЙ УГОЛЬНОЙ БАЗЫ КУЗБАССА

¹ д.т.н. С.В. Шаклеин, ² д.т.н. Т.Б. Рогова, ¹ д.т.н. М.В. Писаренко

1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

2 – Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,
г. Кемерово, Россия

Аннотация. Результаты анализа марочного состава минерально-сырьевой базы распределенного и нераспределенного фондов недр указывают на снижение количества запасов каменного угля, предназначенных для открытой добычи. В перспективе добыча ряда технологических марок угля (ГЖ, Ж, К, КЖ, КС, ОС, КСН, СС) возможна в Кузбассе только подземным способом на участках со сложными горно-геологическими условиями, а их эффективная и безопасная отработка предполагает необходимость использования нетрадиционных технологий добычи.

Ключевые слова: сырьевая база угольной промышленности, технологические марки угля, горно-геологические условия разработки, технологии добычи угля, трудноизвлекаемые запасы.

Кузнецкий угольный бассейн является флагманом угольной промышленности России, обеспечивая 70 % общероссийской добычи каменных и 76 % коксующихся углей. Прогнозные ресурсы бассейна оцениваются в 305 млрд т (категории P_1+P_2) [1]. Суммарные запасы каменных углей категорий $A+B+C_1+C_2$, числящиеся на государственном балансе, составляют 57 % общероссийских каменных (68,2 млрд.т) и 65 % (32,6 млрд т) коксующихся углей [2-3]. В общих разведанных запасах антрацитов, каменных и бурых углей России доля Кузбасса составляет 25 % [4].

В уже распределенном фонде недр Кузбасса находится около 30 % всех балансовых запасов каменных углей и антрацитов бассейна (категорий $A+B+C_1+C_2$), из которых на полях действующих и строящихся предприятий – более 64% [5].

Марочный состав балансовых запасов каменного угля. В Кузнецком угольном бассейне добываются все технологические марки каменных углей и антрациты. Добыча таких технологических марок углей как: коксовый слабоспекающийся низкометаморфизованный (КСН), коксовый слабоспекающийся (КС), тощий спекающийся (ТС) и основная часть отощенного спекающегося (ОС) и коксового отощенного (КО), осуществляется только в Кузбассе; а их доля в добыче по бассейну составляет около 14 % [6].

Анализ марочного состава балансовых запасов распределенного фонда недр показал, что более 36 % его запасов приходится на низкометаморфизованные марки длиннопламенного-газового ряда (Д, ДГ и Г), из которых доминируют относительно низкозрелые длиннопламенные угли (Д). На особо ценные коксующиеся (ГЖ, Ж, К, КО, КСН, КС, ОС) приходится около 39 % балансовых запасов этого фонда (рис. 1), где доминируют жирные (Ж) и газowo-жирные угли (ГЖ).

Запасы нераспределенного фонда недр (46,8 млрд. т) более чем в 2 раза превышает запасы распределенного фонда (20,7 млрд. т) и являются сырьевым резервом развития угледобычи. Доля запасов угля различных технологических марок в общем объеме существенно различна: от 25 %

марки Д до 1,4 % марок КСН и А. При этом около 43 % запасов приходится на угли длиннопламенного-газового ряда (Д, ДГ и Г) (при доминировании длиннопламенных углей Д); доля особо ценных коксующихся углей составляет около 35 %, т.е. соотношение различных групп технологических марок нераспределенного фонда недр почти то же, как и распределенного фонда недр (рис. 2).

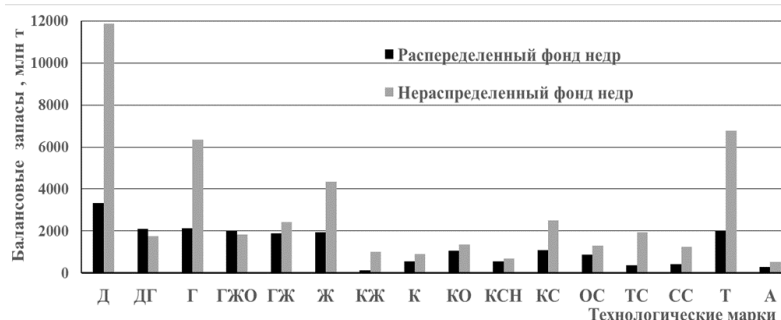


Рис. 1. Марочная структура балансовых запасов каменных углей (категорий А+В+С₁+С₂) Кузнецкого угольного бассейна

Следует отметить, что основная часть запасов нераспределенного фонда недр сосредоточена на участках недр со сложными горно-геологическими условиями залегания и предназначена для добычи угля подземным способом (рис. 2, 3) [7]. Лишь около 22 % запасов нераспределенного фонда могут быть отработанными открытым способом. При этом добыча ряда таких технологических марок угля как ГЖ, Ж, К, КЖ, КС, ОС, СС, будет возможна только подземным способом (рис. 2).



Рис. 2. Марочный состав балансовых запасов нераспределенного фонда недр, в том числе для открытого способа добычи

Важным фактором устойчивого развития отрасли в средне- и долгосрочной перспективе является сбалансированность объемов добычи и запасов отдельных технологических марок угля. Дисбаланс этих показателей предполагает необходимость корректировки Программы лицензирования угольных месторождений и принятия превентивных решений по управлению угольной сырьевой базой [2, 8].

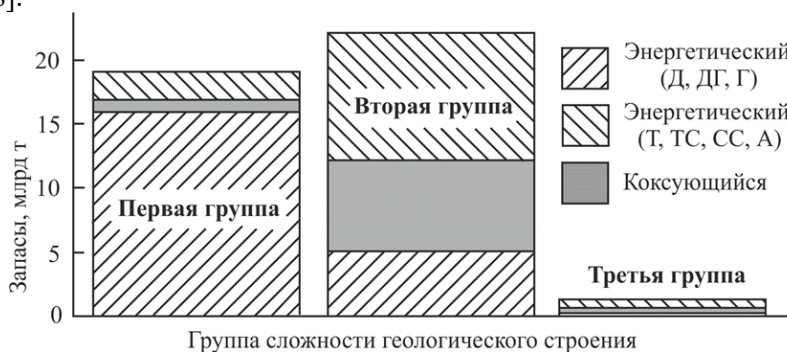


Рис. 3. Нераспределенный фонд недр Кузбасса по группам сложности геологического строения

Анализ марочного состава промышленных запасов и добычи по действующим предприятиям по состоянию на 01.01.2019 г. (рис. 4) свидетельствует о том, что наибольший дисбаланс между добычей и запасами наблюдается по технологическим маркам: ГЖО, СС, КС и ОС. При этом по

газовым жирным отощенным углям (ГЖО), менее ценными для коксовой промышленности, отмечается трехкратное превышение доли промышленных запасов над добычей, что позволяет нарастить объемы ее добычи.

По высоковольтным на угольном рынке слабоспекающимся (СС), коксующимся слабоспекающимся (КС) и отощенным спекающимся (ОС) угля наблюдается обратное – ускоренная отработка промышленных запасов углей. Доля этих марок в промышленных запасах составляет 3,3; 2,7 и 1,2 %, а в общесейсеновой добыче они почти в три раза выше – 8,8; 6,4 и 3,2 % соответственно. Ситуацию может изменить только ввод в действие новых предприятий. Анализ марочной структуры балансовых запасов с учетом ныне строящихся предприятий показал незначительное снижение отмеченного дисбаланса по коксующимся углям марок КС и ОС (их доля составит около 5%), по марке СС – наоборот несколько увеличивается: ее доля не превышает 2%, что вызывает особую озабоченность.

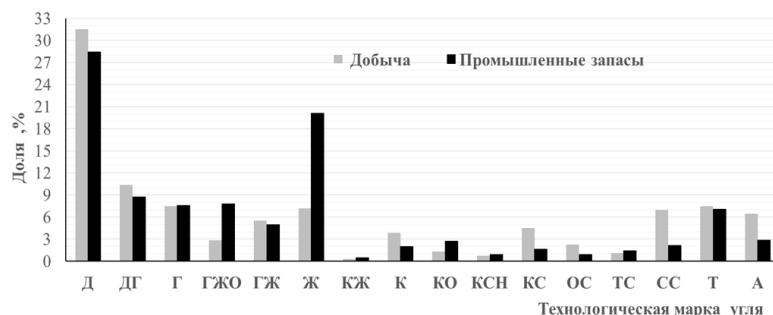


Рис. 4. Доля различных марок углей в суммарных промышленных запасах и объемах добычи углей Кузнецкого угольного бассейна

Следует отметить низкую обеспеченность действующего фонда балансовыми и промышленными запасами высокодефицитных коксующихся углей – коксового (К) и коксового жирного (КЖ), наличие которых в угольной шихте (в объеме около 9 %) позволяет получать на коксохимических предприятиях кокс высокого качества. При этом добыча угля марки КЖ в бассейне уже прекратилась, а марки К явно недостаточна – ее дефицит оценивается до 20 % от достигнутого объема производства [5]. Недостаточный объем добычи этих технологических марок угля объясняется тем, что участки с запасами угля этих марок располагаются на месторождениях 2 и 3 групп сложности геологического строения и характеризуются очень сложными горно-геологическими условиями, а их отработка промышленными технологиями добычи является неэффективной и промышленно небезопасной.

Выводы. Анализ сырьевой базы угольной промышленности свидетельствует о том, что в качестве приоритетного направления ее расширения следует рассматривать геологоразведочные работы по приросту запасов технологических марок углей К, КЖ, КС, ОС и СС.

В ближайшей перспективе поддержание объемов добычи углей марок ГЖ, Ж, КЖ, К, КС, ОС, КСН, СС возможно только на основе развития подземной добычи с использованием нетрадиционных технологий [9-12].

Для стимулирования добычи высоко дефицитных энергетической СС и коксующихся марок углей (КЖ, К, КС, ОС, КО) и внедрения нетрадиционных технологий добычи следует признать запасы углей этих марок трудноизвлекаемыми полезными ископаемыми.

Список литературы

1. Программа развития угольной промышленности России до 2035 года : утв. 13.06.2020, № 1582-р. – М. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202006180009>.
2. Программа лицензирования угольных месторождений на период до 2020 года : утв. приказом Минприроды России от 06.12.2016, № 639: – М, 2016. – 64 с.
3. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2018 года. Уголь. Том III. Сибирский Федеральный округ. Ч.1. Кемеровская область. – ФГБУ «Росгеолфонд»: М, 2018. – 440 с.
4. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году. – М.: Минприроды России, 2020. – 494 с.
5. Шаклеин С.В., Писаренко М.В. Состояние сырьевой базы угольной промышленности Кузбасса // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 2. – С. 191-201.

6. Клишин В.И., Рогова Т.Б., Шаклеин С.В., Писаренко М.В. Развитие сырьевой базы угольной промышленности России // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 4. – С. 512-521.
7. Шаклеин С.В., Писаренко М.В. Подходы к обоснованию концепции развития минерально-сырьевой базы Кузнецкого угольного бассейна // Рациональное освоение недр. – 2013. – № 2. – С. 38-40.
8. Рожков А.А., Шаклеин С.В., Писаренко М.В. Анализ марочного состава промышленных запасов каменных углей и антрацита на действующих предприятиях России // Уголь. – 2019. – № 11. – С. 4-11.
9. Мазикин В.П., Катриченко В.Н., Фролов В.А., Уланов Н.Н., Шаклеин С.В. Промышленные запасы каменных углей действующих предприятий Кузбасса // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2001. – № 2. – С. 49-54.
10. Писаренко М.В., Рогова Т.Б., Шаклеин С.В. Анализ результатов аукционов и конкурсов на право пользования недрами, проведенных в Кузбассе в 2008-2019 гг. // Недропользование XXI век. – 2020. – № 2. – С. 70-79.
11. Klishin V.I. Innovative technologies for thick coal seams mining on the of powered roof support with controlled coal discharges // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – 012027.
12. Клишин В.И., Звoryгин Л.В., Лебедев А.В., Савченко А.В. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. – Новосибирск, 2011. – 427 с.

УДК 622.27

АНАЛИЗ ОТКРЫТО-ПОДЗЕМНОГО СПОСОБА РАЗРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КУЗБАССА

д.т.н. Федорин В.А., к.т.н. Шахматов В.Я., к.т.н. Опрук Г.Ю., Кузнецова Е.И.
Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН,
г. Кемерово, Россия

Аннотация. Современное развитие угольной промышленности Кузбасса осуществляется на основе перспективных способов разработки. Анализ ее геотехнологического состояния осуществляется в контексте развития высоких технологий в смежных способах добычи угля с формированием комбинированных (открыто-подземных) геотехнологий комплексного освоения угольных месторождений.

Ключевые слова: способ разработки, геотехнологический кластер, открыто-подземный способ, добыча угля.

В соответствии с программой развития угольной промышленности России до 2035 года как в новых районах угледобычи, так и в действующих бассейнах будут развиваться угольно-технологические, углехимические и энергоугольные кластеры, позволяющие комплексно использовать возможности угольных месторождений [1].

Геотехнологический кластер комбинированной физико-технической технологии – это совокупность знаний о совмещении в пространстве и во времени открытого и подземного способов разработки угольных месторождений, закономерностях поведения системы «угольный разрез – подземные выработки» в массиве горных пород, технических, экономических, экологических и организационных взаимосвязях технологических процессов при добыче угля [2].

В развитие работ по совершенствованию технологий открытой разработки добычи угля на пологопадающих и наклонных пластовых месторождениях с максимальным использованием техногенного ресурса выработанных пространств угольного разреза создан метод выбора рационального порядка разработки пологопадающих и наклонных пластовых месторождений двумя очередями с внутренним отвалообразованием для циклично-поточного комплекса. В основу метода положены новые принципы формирования и развития технологического пространства, обеспечивающие наиболее выгодные условия эксплуатации месторождений по сравнению с известными принципами, используемыми в технологиях с традиционным продольно-поперечным порядком развития рабочей зоны угольного разреза [3].

Это позволяет адаптировать технологические решения по автономным шахтоучасткам модульной структуры (в проектах «шахта-лава») для действующих разрезов с комбинированной (открыто-подземной) разработкой пологих пластов по концепции «Интеллектуальная шахта угольного разреза» [4]. Выделяется необходимая и достаточная горнотехнологическая структура вскрытия и подготовки шахтоучастка, адаптированная к технологической схеме отработки угольного разре-

за, для одного высокопроизводительного очистного забоя и простого воспроизводства горных работ по комбинированной геотехнологии на угольных пластах мощностью 3-5 и более метров.

В Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН разработаны модульные горно-технологические структуры шахтоучастков, адаптированные к комбинированным технологиям добычи угля, защищенные 15 патентами на изобретения Российской Федерации. Эти нематериальные активы – интеллектуальная собственность в виде патентов на изобретения – представляют особую ценность для бизнеса, ориентированного на проведение научных исследований и коммерциализацию результатов интеллектуальной деятельности.

В соответствии с программой развития угольной промышленности России до 2035 года в табл. 1 представлена структура добычи угля в Сибири. Программой развития угледобычи в Сибири до 2035 года предусматривается 2 варианта – консервативный и оптимальный.

Таблица 1

Добыча угля по Сибирскому федеральному округу, млн. т

№	Район	2018 (факт)	2035 (два варианта)	
			Консервативный	Оптимальный
1	Кузбасс	255,7	235	297
2	Новосибирская область	14,5	27	28
3	Республика Хакасия	24,5	40	53
4	Республика Тыва	0,7	4	26
5	Красноярский край	41,3	38	79
6	Иркутская область	13	9	13
	Всего:	349,7	353	496

Одной из главных задач программы является обеспечение технологического развития угольной промышленности.

В настоящее время угольная промышленность России представлена 58 шахтами и 133 разрезами, почти половина из которых введена после 2000 года. Новые предприятия оснащены высокопроизводительной техникой, и на них используются самые современные технологии угледобычи. По прогрессивной технологии «шахта-лава» работает 42 шахты, или 76 процентов общего числа действующих шахт [1]. Эта технология была разработана в Институте угля СО РАН как модульная геотехнологическая структура шахтоучастков и защищена патентами РФ.

Освоение угольных месторождений Сибири базируется на новых научных концепциях и принципах строительства объектов структурно-сетевой теории вскрытия пологих угольных пластов, использующих модульную геотехнологическую структуру.

Область применения схем вскрытия и подготовки полей угольных разрезов по модульной горнотехнологической структуре комбинированного способа охватывает, практически, весь диапазон условий действующих, проектируемых и перспективных разрезов на пологих пластах Кузбасса. Особенно целесообразна она для разработки первоочередных подземных участков при предельном коэффициенте вскрыши разреза, так как предусматривает увеличение срока существования угледобывающего предприятия без значительных капитальных затрат в условиях рационального использования недр. Целесообразно применение комбинированной разработки при дренаже поля разреза для угольных месторождений со сложными гидрогеологическими условиями, где требуется взаимная увязка горной и дренажной частей проекта угольного разреза.

В отличие от традиционного статистического анализа (шахты, разрезы, общая добыча угля) нами была выделена добыча угля по годам шахтами и разрезами, использующими единую производственную инфраструктуру на основе комбинированного (открыто-подземного) способа разработки угольных месторождений Кузбасса (рис. 1). Установлено, что с 2010 по 2020 годы добыча угля комбинированным способом увеличилась более чем в 2 раза (с 31,1 млн.т до 63,7 млн.т).

Проведен также анализ добычи угля в Кузбассе комбинированным способом разработки с выделением, как открытого способа добычи, так и подземного по модульной геотехнологической структуре шахтоучастков на угольных разрезах с использованием единой производственной инфраструктуры угледобывающего комплекса (рис. 2). Установлено, что добыча на модульных шахтоучастках угольных разрезов за 10 лет была увеличена в 2 с лишним раза (с 12,9 до 29,9 млн.т). Открытым способом при комбинированной технологии добыча угля была увеличена в 1,8 раза (с

18,2 до 33,8 млн.т). Обоснована высокая эффективность комбинированного способа разработки угольных пластов с прибылью выше среднего по Кузбассу в 1,5 раза.

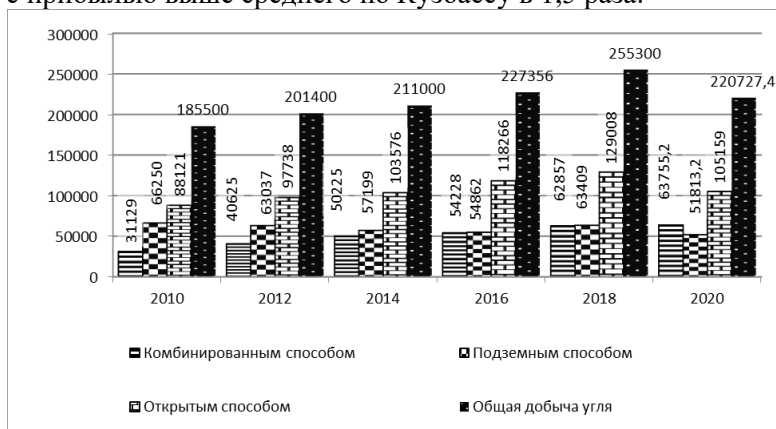


Рис. 1. Годовая добыча угля в Кузбассе по способам разработки (открытый, подземный, комбинированный)

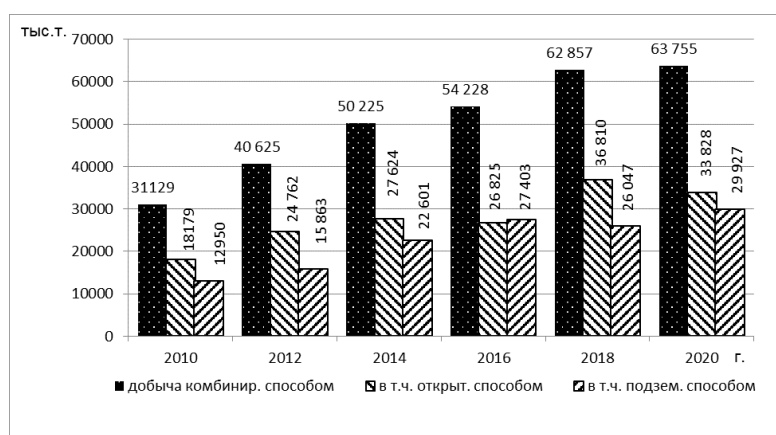


Рис. 2 Структура добычи угля в Кузбассе комбинированным (открыто-подземным) способом, тыс.т/год

Практическое применение комбинированного способа разработки в Кузбассе началось с 2000-х годов благодаря научно-методическому обоснованию комбинированной физико-технической геотехнологии в Институте угля СО РАН (д.т.н. Ялевский В.Д., д.т.н. Федорин В.А.) [5] и технико-экономическому обоснованию инвестиций для шахты «Сибиргинская» угольного разреза «Сибиргинский» (Гипроуголь, г. Новосибирск) и угольного разреза «Моховский» (шахта «Байкаимская») [6]. В настоящее время в Кузбассе работают 11 угледобывающих предприятий открыто-подземным способом. В 2019 году добыча угля комбинированным способом составила 66502 тыс. т или более 26 % от общей добычи 250070 тыс.т. в Кузбассе (рис. 1). Подземным способом добыто 58837 тыс.т, открытым способом — 124731 тыс.т.

Для расширения области применения шахтных участков следует использовать открытый способ вскрытия запасов с продольной разрезной траншеей по простираению пластов, которая позволяет рассматривать ее частью горно-технологической структуры с подземными горными работами, как единое предприятие. Продольная разрезная траншея угольного разреза представляет собой распределение шахтных участков, разделенных в пространстве для отработки запасов комбинированным способом (рис. 3).

В 2020 году в Института угля ФИЦ УУХ СО РАН разработаны научно-методические основы стратегии функционирования кластерных горно-технологических систем, основанных на высокоэффективных технологиях комплексного освоения угольных месторождений Сибири [6].

Технологическая адаптация модульных шахтоучастков для комбинированных (открыто-подземных) способов разработки угольных месторождений определяет новый тип высокопроизводительной горно-технологической структуры совместной работы разреза и подземных шахтоучастков по безвзрывной технологии, использующих производственную инфраструктуру угольно-

го разреза с эффектом внутреннего отвалообразования и рационального использования недр (рис. 3).

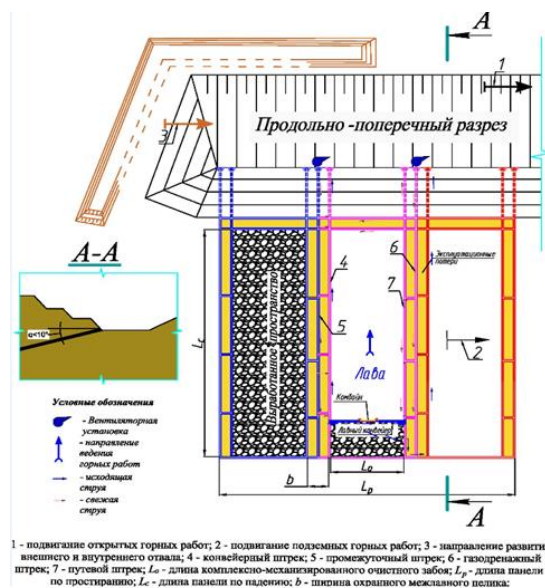


Рис. 3. Технологическая структура адаптации угледобычи угольного разреза с внутренним отвалообразованием в комбинации использования модульных шахтоучастков при вскрытии приконтурных запасов угля

Вывод. Анализ геологической информации по участкам новых угленосных площадей Кузбасса устанавливает необходимые запасы угля и область применения модульных горнотехнологических структур для высокопроизводительной отработки угольных пластов открыто-подземным способом

Список литературы

1. Программа развития угольной промышленности России до 2035 года: распоряжение Правительства РФ от 13 июня 2020 г., № 1582-р.
2. Федорин В.А., Шахматов В.Я., Шишков Р.И. Геотехнологический кластер открыто-подземного способа освоения угольных месторождений Кузбасса // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – № 6. – С. 47-52.
3. Пути повышения эффективности и экологической безопасности открытой добычи твердых полезных ископаемых / [Ческидов и др.]; отв. ред. В.Н. Опарин. Рос. акад. наук Сиб. отд-ние, ин-т горного дела и [др.]. – Новосибирск: изд-во СО РАН, 2010. – 254 с.
4. Федорин В.А., Шахматов В.Я., Михайлов А.Ю. Инновационная шахта угольного разреза // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2018. – № 4. – С. 306-313.
5. Ялевский В.Д., Федорин В.А. Модульные горнотехнологические структуры вскрытия и подготовки шахтных полей Кузбасса. (Теория, Опыт, Проекты). – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2000. – 224 с.
6. Шишков Р.И., Федорин В.А. Обоснование параметров горно-технологической структуры «угольный разрез-шахтные участки» в части подвигания фронта открыто-подземных горных работ // Рациональное освоение недр. – 2020. – № 3. – С. 72-77.

УДК 61.53.03

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИТОТИПОВ УГЛЕЙ КУЗБАССА

к.х.н. Семенова С.А., д.х.н. Патраков Ю.Ф., д.т.н. Майоров А.Е.

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

Аннотация. На основе сопоставления химических (химический состав, склонность к окислению) и физических (пористость, смачиваемость, механическая прочность) свойств установлены принципиальные отличия литотипов углей кольчугинской и балахонской серий Кузнецкого бассейна. Показано, что свойства литотипов определяются характером распределения фюзенизированных компонентов в основной гелефицированной массе.

Ключевые слова: каменный уголь, петрографический состав, литотипы, химический состав, физико-химические свойства, окисление.

Различия физико-химических и химико-технологических свойств ископаемых топлив определяются стадией метаморфизма и петрографической неоднородностью углей. Особенности петрографического состава углей Кузнецкого бассейна, сформированных в балахонскую и более позднюю кольчугинскую серию, обусловлены различиями климатических условий и исходного материала растений-углеобразователей. По стадии метаморфизма угли балахонской и кольчугинской серий представлены метаморфическим рядом от длиннопламенных до антрацитов с $R_o = 0,9-3,5$ % для балахонской и $0,5-1,2$ % для кольчугинской серий. По литотипному составу среди углей балахонской серии преобладают полуматовые полосчатые кларено-дюрены и матовые дюрены; для кольчугинской серии характерны блестящие однородные кларены и полублестящие полосчатые дюрено-кларены с содержанием микрокомпонентов группы витринита 20-70 % и 60-90 % соответственно [1, 2].

Наибольшей опасностью и непредсказуемостью при ведении подземных горных работ являются процессы эндогенного самовозгорания угля в краевой зоне пластов, охранных целиках и зонах погашения выработок, взрывы метана и угольной пыли в выработанном пространстве шахт. Однако, современное использование высокопроизводительных проходческих и очистных комплексов, ускоренные темпы добычи угля с неполным его извлечением, применение способов с обрушением выработанного пространства зеркально способствуют интенсификации пылеобразования в шахтной атмосфере, прогрессирующему развитию площади обнажаемой активной поверхности угля и зон низкотемпературного окисления. При подготовке мероприятий по организации пыле-, взрыво- и пожарозащитных работ необходимо учитывать особенности функционального состава структурных фрагментов и физические свойства углей, определяющие взаимодействие углей с кислородом, атмосферной влагой и реагентами [3, 4]. Поэтому выявление влияния соотношения и распределения петрографических компонентов в составе угольной массы на возникновение аварийноопасных факторов, приводящих к потерям угольных ресурсов, оборудования и человеческим жертвам, представляет особый научный интерес.

Цель данной работы – выявить принципиальные отличия литотипов, выделенных из углей Кузбасса разных стадий метаморфизма, по физическим (пористость, механическая прочность, смачиваемость поверхности) и химическим (элементный состав, склонность к окислению) свойствам.

В экспериментах использовали блестящие и матовые разновидности углей Кузбасса с показателем отражения витринита R_o от 0,7 до 2,2 %, выделенные по визуальным петрографическим признакам при отборе пластовых проб. Выделение литотипов из основной угольной массы производилось вручную и было основано на их внешних отличительных признаках, характерных для отдельных петрографических компонентов (цвет, блеск, излом, текстура, сопротивление механическому воздействию и т.д.) [5].

В петрографическом составе блестящих литотипов преобладают микрокомпоненты группы витринита (65-94 %) с большим их содержанием в углях низких стадий метаморфизма кольчугинской серии (табл. 1). Для более метаморфизованных углей балахонской серии выбор блестящих литотипов по их характеристическим признакам без дополнительных методов концентрирования витринизированного вещества (расслаивание в тяжелых жидкостях по градиенту плотности) менее эффективен. Наиболее трудному разделению по визуальным признакам поддаются высокометаморфизованные угли с $R_o > 1,9$ % с однородной массивной текстурой.

Матовый ингредиент фюзен в низко- и среднеметаморфизованных углях концентрируется в прослойках высотой 1-3 мм и линзах между блестящими и полублестящими слоями, по которым происходит расслаивание угля. В более метаморфизованных углях фюзенизированные компоненты тонко распределяются среди основной массы угля. В составе матовых и полуматовых литотипов преобладают микрокомпоненты группы инертинита (49-69 %). В составе фюзенизированных литотипов наряду с инертинитом увеличивается доля семивитринита (до 20 %), образование которого может быть связано как с незначительным окислением органического материала на стадии диагенеза, так и с метаморфическими преобразованиями гелефицированных компонентов на более поздних стадиях [5-7] (табл. 1).

В зависимости от преобладания в вещественном составе углей гелефицированных либо фюзенизированных компонентов, химический состав органической массы углей (ОМУ) существенно различается (табл. 2). Перераспределение количества углерода, водорода и кислорода в ОМУ по

мере увеличения степени химической зрелости более выражено для витринитовых компонентов углей (табл. 2), что, по-видимому, связано с большей лабильностью их органического вещества в условиях естественных геологических преобразований [5, 6].

Таблица 1

Петрографический состав исследуемых образцов углей

Месторождение	Марка угля	Стадия метаморфизма	Литотип	R_o , %	V_t	S_v	I	ΣOK
Ленинское	Г	I-II	блестящий (витрен)	0,68	94	3	3	5
			матовый (фюзен)	0,71	29	6	65	69
Ерунаковское	ГЖО	II-III	блестящий (витрен)	0,85	93	1	6	6
			матовый (фюзен)	0,86	33	7	60	64
Краснобродское	КО	III	блестящий (кларен)	1,06	83	4	13	16
			матовый (фюзен)	1,07	28	8	64	69
Бирюлинское	ОС	IV	блестящий (кларен)	1,30	65	14	21	30
			полуматовый (кларено-дюрен)	1,31	31	20	49	62
Краснобродское	Т	V	полублестящий (дюрено-кларен)	1,91	65	6	29	33
			полуматовый (кларено-дюрен)	1,92	30	8	62	67
Бунгурское	Т	VI	полублестящий (дюрено-кларен)	2,24	69	5	26	30
			полуматовый (кларено-дюрен)	2,26	24	7	69	74

Таблица 2

Химический состав литотипов*

Марка угля, литотип	Содержание элементов, % на daf					Технический анализ, %		
	C	H	N	S	O	Влага, W^a	Зольность A^d	Выход летучих веществ, V^{daf}
Г	81,1	5,9	2,7	0,4	9,9	2,4	2,9	42,6
	86,8	3,5	2,1	0,4	7,2	1,2	4,4	28,7
ГЖО	83,5	5,3	1,7	0,3	9,4	2,2	2,9	35,4
	85,1	4,5	1,6	0,2	8,6	1,7	17,2	30,3
КО	86,7	5,0	2,1	0,3	6,2	0,5	3,1	29,9
	87,4	4,3	1,9	0,4	6,0	0,1	3,4	22,8
ОС	88,8	4,6	1,9	0,2	4,5	0,4	4,4	24,5
	89,3	4,2	1,7	0,3	4,5	0,3	6,0	19,1
Т	88,8	4,1	2,1	0,5	4,5	0,6	4,2	12,8
	86,6	3,6	1,6	0,3	7,9	0,7	13,8	20,6
Т	89,9	3,3	1,7	0,4	4,7	1,2	2,5	8,1
	88,9	3,2	1,5	0,4	6,0	1,4	6,5	8,9

*Верхнее значение ячейки соответствует блестящим литотипам, нижнее - матовым.

Блестящие литотипы имеют повышенное содержание атомов водорода, в то время как матовые угли более обуглерожены. Влияние петрографического состава на содержание кислорода проявляется преимущественно на крайних стадиях метаморфизма. Так, у углей с $R_o < 1,0$ % доля кислорода в ОМУ выше у блестящих ингредиентов, а в углях с $R_o > 1,3$ % - у матовых.

Симбатно с изменением содержания кислорода в составе литотипов в ряду метаморфизма углей изменяется содержание гигроскопической влаги и антибатно – выход летучих веществ (табл. 2). К примеру, за способность «притягивать» влагу отвечают как наличие на угольной поверхности гидрофильных карбоксильных и гидроксильных групп, участвующих в образовании межмолекулярных водородных связей (специфическая адсорбция), так и особенности пористой структуры углей (физическая адсорбция) [11, 12]. Для всех исследуемых образцов большая удельная поверхность ($S_{\text{ВЕТ}}$) соответствует фюзенизированным литотипам (рис.1 а). Формирование в процессе генезиса фюзенов развитой системы пор может способствовать сорбции солей металлов из минерализованных болотных и фильтрационных вод с образованием органо-минеральных комплексов, что приводит к повышенной зольности матовых углей (табл. 2) [2, 5, 6].

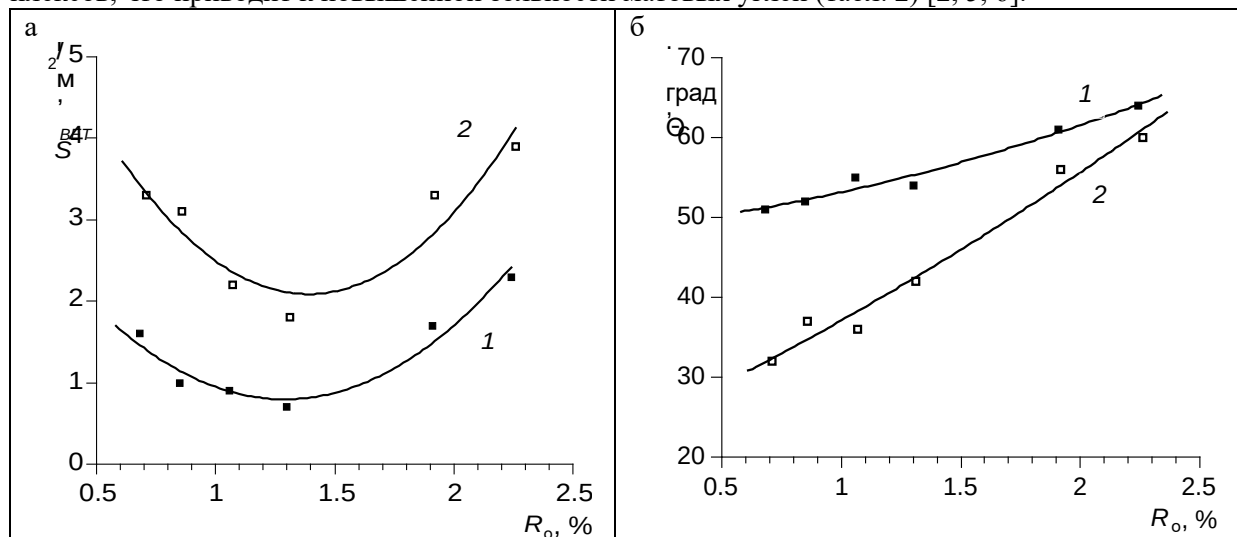


Рис. 1. Зависимость удельной поверхности $S_{\text{ВЕТ}}$ (а) и краевого угла смачивания Θ (б) от степени метаморфизма углей для блестящих (1) и матовых (2) литотипов

Объяснением расхождений в химическом составе и свойствах гелефицированных и фюзенизированных литотипов могут служить отличия процессов, сопровождающих формирование их органического вещества. Образование углей витренового и кларенового типов связано с анаэробными восстановительными процессами разложения в спокойных условиях застойных болот. Образование фюзенизированных компонентов связано с повышенным окислительным потенциалом среды при активном участии аэробных бактерий в обстановке тлеющих слабоувлажненных торфяников, или, наоборот, проточных болот, а также при смене анаэробных условий на аэробные. Поэтому, наряду с естественной обуглероженностью и развитой пористостью фюзенов, доля гидрофильных карбоксилатных (в т.ч. металлкарбоксилатных) форм кислорода у них выше, чем у витринитовых углей [2, 5, 6].

Существенные различия состава и физико-химических свойств ОМУ блестящих и матовых литотипов оказывают влияние на их поведение при вскрытии, разработке угольного массива и дальнейшей переработке. Одной из важных характеристик углей является смачиваемость угольной поверхности, которая определяет взаимодействие угля с водой и реагентами. Известно [8, 9], что на величину угла смачивания оказывает влияние множество факторов – количество и качество функциональных групп на реакционной поверхности угля, минеральный и мацеральный составы, шероховатость и угловатость частиц и др. Прочность закрепления пузырька воздуха или капли воды при определении угла смачивания зависит от гидрофобности контактирующих участков угольной поверхности. Для всех исследуемых образцов углей большую гидрофобность (большой угол смачивания) проявляют литотипы с повышенным содержанием витринитовых компонентов (рис. 1б). Слабая гидрофобность фюзенизированных углей может быть связана как с наличием гидрофильных карбоксильных и карбоксилатных форм кислорода на фоне их естественного удаления у блестящих углей, так и более развитой пористой структурой фюзенов (рис. 1 а). С ростом стадии метаморфизма различия гидрофильных свойств поверхности у литотипов нивелируются. В совокупности полученные данные свидетельствуют о лучшей смачиваемости углей с повышенным содержанием матовых компонентов по сравнению с блестящими.

Соотношение и характер распределения в основной массе углей петрографических и минеральных составляющих также оказывает влияние на механическую прочность, размоловоспособность и пылеобразование. При ударном воздействии в ходе измельчения низкометаморфизованных клареновых углей деструкция монолитных фрагментов чаще происходит по трещинам выветривания витрена и волокнистым прослоям хрупкого фюзена. При этом в мелких классах в большей степени сосредотачиваются частички фюзена [1]. Для метаморфизованных углей балахонской серии картина меняется. В данном случае механическая прочность матовых и полуматовых углей с равномерным распределением фюзенизированных веществ выше, чем у блестящих и полублестящих. Об этом свидетельствуют фотографии аналитических проб литотипов (рис. 2), а также результаты лазерного дифракционного анализа размеров частиц (рис. 3). Данные по распределению частиц по крупности наглядно показывают, что в составе угольной мелочи ($< 0,2$ мм) витрена низкометаморфизованного угля Г максимальное количество присутствующих частиц (мода) соответствует диаметру 117 мкм, а для у фюзена того же угля – 79 мкм. Для литотипов высокометаморфизованного угля Т разница в дисперсности частиц уже не столь заметная, а максимумы распределения сосредотачивается в области 100-120 мкм.

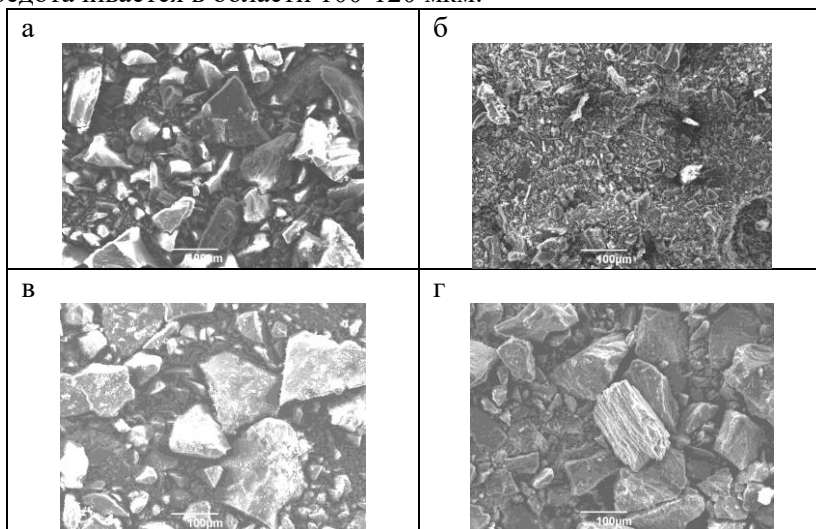
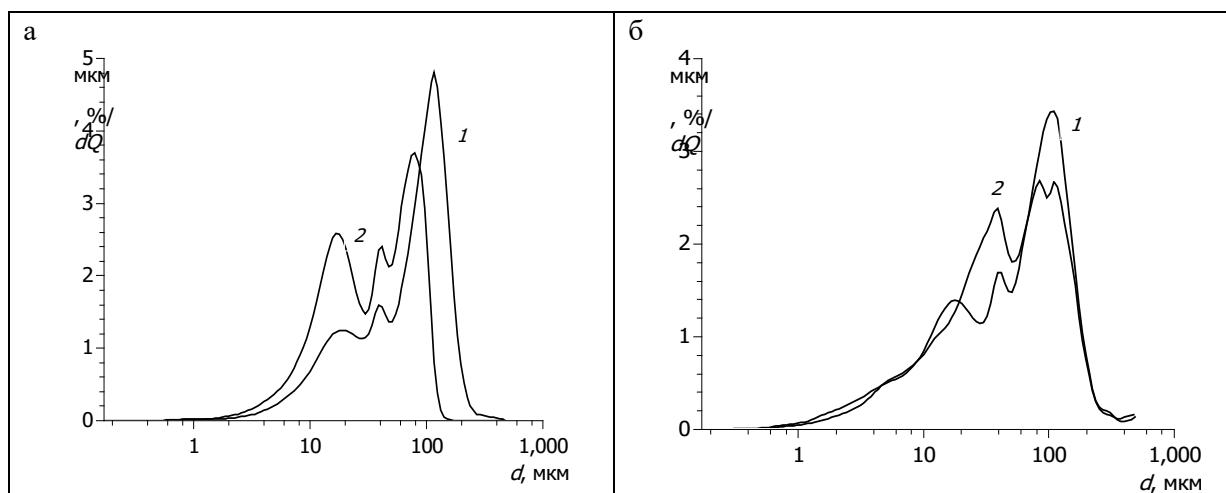


Рис. 2. Микрофотографии блестящего (а, в), матового (б) и полуматового (г) литотипов угля Г (а, б) и Т (в, г) (фракция $< 0,2$ мм; увеличение 200 раз)



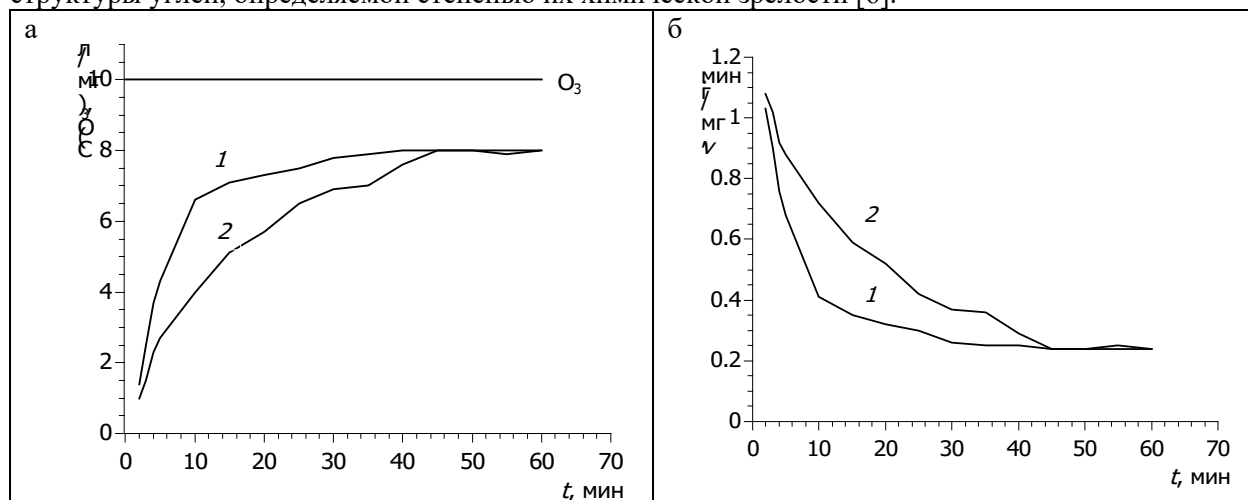
1 - блестящий литотип угля; 2 – матовый литотип угля

Рис. 3. Распределение частиц по размерам в аналитической пробе блестящего и матового литотипов углей марки Г (а) и Т (б)

Немаловажное значение на механическую прочность литотипов оказывает содержание и распределение минеральных веществ. Поскольку зольность фюзенизированных компонентов выше, можно полагать, что сингенетические минералы, заполняющие внутрипоровые полости инертинита и семивитринита зрелых углей, также способствуют их упрочнению и снижению размо-

способности [2, 5, 6]. Иными словами, из физически хрупкого фюзена при равномерном его распределении среди гелефицированной массы формируется прочный, по аналогии с композитным, материал. Таким образом, можно полагать, что при добыче и транспортировке клареновых углей кольчугинской серии основным источником образования угольной пыли будут служить пропластки и включения концентрированного фюзена. Полуматовые угли балахонской серии, по-видимому, в условиях ударного воздействия будут более устойчивыми к разрушению и образованию больших количеств пожаро- и взрывоопасной пыли.

Для определения склонности литотипов углей к окислению и самопроизвольному возгоранию были проведены эксперименты с использованием низких концентраций озона (~10 мг/л) для стимулирования окислительных реакций при естественных условиях. Кинетические зависимости изменения концентрации озона в газовой фазе и скорость его взаимодействия с ОМУ литотипов приведены на рис. 4. Кривые поглощения озона для витрена и фюзена однопипны по форме и выходят на стационарные значения спустя 50 мин окисления. Начальная стадия процесса (до 30 мин) характеризуется наибольшим снижением скорости поглощения озона, что свидетельствует о постепенном исчерпании реакционноактивных структурных групп и связей на поверхности угольных частиц. Более высокая скорость поглощения озона соответствует начальному этапу окисления фюзенизированного угля. По мере увеличения продолжительности процесса (> 50 мин) интенсивность поглощения озона у блестящего и матового литотипа выравнивается. Повышенная активность поглощения озона матовым литотипом может быть обусловлена большей величиной доступной реакционной поверхности за счет наличия развитой системы пор (рис. 1 а). У блестящих литотипов, по-видимому, действие озона преимущественно локализовано в приповерхностном слое частиц и ограничено доступным объемом пор и скоростью проникновения в них озонированного воздуха. Можно полагать, что в естественных условиях при обнажении свежей поверхности доступ кислорода в массив угля обеспечивается благодаря диффузии в рыхлую структуру фюзена и трещины расклинивания более хрупких слоев витрена. Результаты дальнейшего окисления, вероятно, будут зависеть от реакционной способности структурных фрагментов молекулярной структуры углей, определяемой степенью их химической зрелости [6].



1 - блестящий литотип угля; 2 - матовый литотип угля

Рис. 4. Кинетические кривые изменения концентрации озона на входе (O_3) и выходе из реактора (а) и скорости поглощения озона (б) для блестящего и матового литотипов угля марки ГЖО

Выводы. В рамках сравнительного исследования литотипов показано, что количество и характер диспергирования микрокомпонентов группы инертинита в основной массе определяет особенности химического состава и физико-химических свойств углей.

Установлено, что химические свойства фюзенизированных компонентов сохраняются независимо от типа их распределения – в самостоятельных конкрециях в виде фюзена или в диспергированном состоянии в дюренах и полуматовых углях. К ним относятся повышенная обуглероженность и содержание карбоксилатных форм кислорода у фюзенов всех стадий зрелости. Окислительная способность фюзенов выше, чем у витренов на начальной стадии окисления за счет более свободной диффузии окислителя в пористую структуру угля.

Фюзенизированные угли обладают повышенной пористостью, минерализованностью и лучшей смачиваемостью поверхности.

Механическая прочность углей зависит от характера распределения фюзенизированных компонентов, понижаясь у индивидуальных отложений и возрастая при диспергировании инертнита среди гелефицированной массы.

Таким образом, указанные принципиальные отличия литотипов углей кольчугинской и балахонской серий Кузнецкого бассейна однозначно должны учитываться при разработке и внедрении современных технологий их добычи, первичной переработки, транспортировки и хранения.

Благодарности. Авторы выражают благодарность за содействие в проведении эксперимента вед. инж. ИУ ФИЦ УУХ СО РАН Харлампенковой Ю.А. и сотрудникам ЦКП ФИЦ УУХ СО РАН к.ф.-м.н. Созинову С.А., к.х.н. Ефимовой О.С., к.х.н. Лыршикову С.Ю., Грабовой Н.А.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области – Кузбасса в рамках научного проекта № 20-45-420011.

Список литературы

1. Арцер А.С., Протасов С.И. Угли Кузбасса: происхождение, качество, использование. Т. 1. Кемерово: изд-во КузГТУ, 1999. – 177 с.
2. Атлас верхнепалеозойских углей Кузнецкого бассейна / Под ред. И.Н. Звонарева. – Новосибирск: Наука, 1966. – 367 с.
3. Физические основы самовозгорания угля и руд / В.С. Веселовский [и др.]. – М.: Наука, 1972. – 148 с.
4. Лебецкий К.А., Романченко С.Б. Пылевая взрывоопасность горного производства. – М.: «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2012. – 464 с.
5. Артемьев В.Б., Еремин И.В., Гагарин С.Г. Петрография углей и их эффективное использование. – М.: «Недра коммюникейшенс ЛТД», 2000. – 334 с.
6. Krevelen D.W. Coal: typology, physics, chemistry, constitution. – Amsterdam et al.: Elsevier, 1993. – 979 p.
7. Бычев М.И., Петрова Г.И., Бычев Р.М. некоторые особенности изменения петрографического состава и спекаемости углей при метаморфизме // Кокс и химия. – 2005. – № 10. – С. 6-8.
8. Классен В.И. Флотация углей. – М.: Гос. Науч.-тех. изд-во по горному делу, 1963. – 380 с.
9. Laskowski J.S. Coal flotation and fine coal utilization. – Amsterdam: Elsevier Science, 2001. – 368 p.

УДК 662.7

О ПЕРСПЕКТИВАХ РАЗВИТИЯ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ

д.т.н. Прошунин Ю.Е.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Проанализирована динамика добычи углей в мире, России и Кемеровской области. Рассмотрены тенденции развития энергетики и металлургии, являющихся основными потребителями каменных и бурых углей, и показан значительный потенциал увеличения доли используемых углей. Рассмотрено влияние основных положений Парижского соглашения по климату на развитие мировой и российской энергетики.

Ключевые слова: каменные и бурые угли, добыча, энергетика, металлургия, Парижское соглашение по климату, парниковые газы, выбросы двуокиси углерода, потепление климата.

Несмотря на многочисленные декларации о наступающем господстве в энергетике и промышленности возобновляемых источников энергии (ВИЭ), снижения добычи угля в мире не наблюдается. Напротив, присутствует пусть небольшой, но стабильный рост. Так, в 2017г. добыто 7727,8 млн. тонн каменных и бурых углей (на 3,1% больше, чем в 2016г.), в 2018г. – 8012,8 млн. тонн, в 2019г. – 8129,4 млн. тонн, а в 2020г. – 8170,2 млн. тонн [1, 2]. Более того, аналитики Международного энергетического агентства (International Energy Agency, IEA) прогнозируют рост спроса на уголь на мировом рынке в 2021 г. на 2,6%.

Для прогноза изменения спроса на рынке угля рассмотрим, в каком положении находятся крупнейшие потребители угля. По данным British Petroleum, опубликованным в ежегодном Статистическом обзоре мировой энергетики 2020 (Statistical Review of World Energy 2020) выработка электроэнергии в мире стабильно растет. Так, в 2016г. произведено 24816 млрд. кВт*ч, в 2018 г. –

26614 млрд. кВт*ч, в 2019 г. – 27645 млрд. кВт*ч, а в 2021 г. – 27921 млрд. кВт*ч. При этом весьма значительная величина электроэнергии (41,5%) получена из угля [1-3]. Следует отметить, что, хотя доля угля в мировом энергобалансе может снижаться, но физические объемы его потребления продолжают расти из-за динамичного роста мирового энергопотребления.

Наметившиеся тенденции увеличения доли ВИЭ в энергетике ряда ведущих стран мира могут существенно изменить свой вектор в связи с суровой зимой 2020-21 годов. Следует также отметить, что по прогнозам Международного энергетического агентства с 2022г. ожидается закономерное снижение доли ВИЭ в энергетике из-за истечения срока действия государственных стимулирующих мер.

Указанные обстоятельства и известные достоинства угля, такие, как объем запасов, дешевизна, доступность, насыщенность инфраструктуры позволяют предположить, что в обозримом будущем значительного снижения доли угля в энергетике ожидать не приходится [4-6].

Согласно данным Всемирной ассоциации стали (World Steel Association, WSA) мировое производство стали 2019г. выросло на 3,4% по сравнению с 2018 годом, составив 1,869 млрд. тонн. И хотя в 2020г. производство стали в мире снизилось на 40 миллионов тонн, составив 1,829 млрд. тонн, это снижение находится в рамках стохастического дрейфа: в 2015г. производство стали уменьшалось по сравнению с предыдущим годом на 3,1 % или на 50.3 миллиона тонн. Всего же, с 2015 по 2020 год рост производства стали составил весомые 12,8%. Кстати, Япония, которую никто не может упрекнуть в недостатке высоких технологий, не имея собственных месторождений угля и железной руды, по выплавке стали занимает третье место в мире, лишь на 4,8% уступая Индии.

Несмотря на постоянный в последнее время рост мощности установок прямого восстановления железа, более 90% стали в мире получают посредством промежуточной выплавки чугуна в доменных печах, то есть двухступенчатым способом [7].

Получение чугуна невозможно без наличия качественного, отвечающего жестким современным требованиям кокса, выполняющего тройную функцию в доменной печи: источника тепла, восстановителя и разрыхлителя. Причем снижение расхода кокса от нормальных 500 кг/т чугуна за счет вдувания пылеугольного топлива выдвигает еще более жесткие требования к качеству каменноугольного кокса. А это означает, что в обозримом будущем без угля просто не обойтись [7].

Несколько иная ситуация с добычей углей в РФ, установившей в 2018 и 2019 годах абсолютный рекорд – 439,3 и 439,2 млн. тонн соответственно, превзойдя лучшее достижение РСФСР далекого 1988 г. (425 млн. тонн). В 2020г. добыто на 9,2% меньше углей, чем в 2019г. (401,4 млн. тонн).

Кемеровская область установила в 2018г. очередной рекорд: добыча твердого топлива составила 255,3 млн. тонн - на 5,7% больше, чем в 2017-м (почти 60% общероссийской добычи), причем наиболее ценных низкосернистых высококалорийных углей. Однако, в 2019г. произошло снижение добычи углей на 2,0% (250,1 млн. тонн), а в 2020г. – еще на 11,8% (220,7 млн. тонн).

Снижение добычи объясняется значительной зависимостью угледобывающей отрасли от экспорта углей и конъюнктуры внешнего рынка. В отличие от РСФСР с ее развитой промышленностью, полностью направлявшей добытый уголь на внутренний рынок, в балансе России экспорт углей в 2018 и 2019 годах имеет определяющее значение: 45 и 47%. Еще значительно величина экспорта для Кемеровской области: 57 и 59% соответственно.

Для возможности дальнейшего увеличения добычи углей в регионе чрезвычайно важны проблемы перехода от реализации слегка облагороженного - сортированного и обогащенного угольного сырья – к производству и сбыту продуктов его глубокой переработки с высокой добавленной стоимостью, а также расширения рынка сбыта углей и продуктов их переработки внутри России. Эти проблемы особенно актуальны с учетом большой удаленности нашего региона от зарубежных рынков сбыта (в стоимости реализации угля за рубеж около 50% составляет ж/д тариф).

Есть ли объективные предпосылки для решения этих проблем? Россия - единственная промышленно развитая страна, полностью обеспечивающая свои потребности за счет собственных природных ресурсов и поставляющая их на экспорт. Она располагает 18% мировых доказанных запасов угля (2 место), 18% природного газа (1-2 место) и 5-6% нефти (8 место). Обеспеченность РФ запасами топлива по последним международным оценкам составляет: нефти – 22 года (среднемировая – 53 лет), газа – 76 лет (среднемировая – 56 лет); угля 500 лет (среднемировая – 110-200 лет) [4, 5, 8].

Доля угля в энергетическом балансе мира (2019 г.) составила 26%, уступая лишь нефти (31%). Доля угля в генерации электроэнергии в мире в 2015г. составляла 39,2%, в том числе в Австралии – 62,9%, Китае – 70,1%, США – 34,2 %, Чехии – 53,1%, Польше – 85,9%, Германии – 44,3%, ЮАР – 92,7%, Индии – 75,3 %, Индонезии – 55,8%, Сербии – 72,4%, Марокко – 55,5%. В 2017г. эта величина в мире существенно не изменилась – 38,5% [1, 2].

Заметное снижение доли угля в выработке электроэнергии произошло только среди стран - членов ОЭСР: она составила 22,1 %, уступив ведущие позиции природному газу [1, 4, 5, 8]. Снижение добычи угля в ряде ведущих европейских стран, таких, как Германия и Великобритания, объясняется весьма прозаически: истощение месторождений каменных углей сделало нерентабельной добычу подземным методом. Поэтому, закрыв свои шахты, Германия продолжает открытую добычу бурых углей (135 миллионов тонн в год), используя их для выработки тепло- и электроэнергии, ввозя коксующиеся угли для получения металлургического кокса из-за рубежа.

При этом Германия, занимает 3,54% мирового рынка импорта угля (2019г.), опережая такие страны как Турция, Вьетнам, Малайзия и Бразилия и уступая только странам Азии, на долю которых приходится 75% мирового потребления угля. В 2019 году главным импортером угля в мире является высокотехнологичная Япония - 17,9% мирового импорта, опережая Индию - 17,4%, Китай - 14,6%, Южную Корею - 10,8% и прочие страны Азии - 5,39%.

Китай строит шесть современных угольных электростанций, для производства электроэнергии, широко использует сжигание и газификацию водоугольного топлива (ВУТ) (130 млн. тонн в год), а Великобритания приступила к сооружению уникальной тепло- и электростанции, где переработка углей полностью изолирована от окружающей среды.

В России же доля угля, как в общем энергетическом балансе, так и генерации электроэнергии составляет всего лишь около 15% [2].

Приведенные данные показывают значительный потенциал увеличения использования углей в энергетике в нашей стране. Конечно, увеличение доли тепло- и электроэнергии необходимо осуществлять исключительно на основе использования современных экологически и экономически эффективных технологий. Так, при реконструкции действующих и вводе в эксплуатацию новых энергогенерирующих установок, целесообразно использовать внутрицикловую газификацию или еще более перспективное внутрицикловое полукоксование. Следует также шире вовлекать в энергетику высококачественные экологичные бурые угли месторождений Канско-Ачинского бассейна, расположенные в Кемеровской области и Красноярском крае [5, 6, 9, 10].

Причем приступить к внедрению перспективных процессов следует незамедлительно, даже при относительно невысоких ценах на нефть. Анализ существующего положения в конкурентной газо- и нефтедобывающей отечественной отрасли промышленности позволяет выявить следующие негативные факторы: крайне низкий уровень извлечения нефти и природного газа из земных недр (для нефти - около 30%). Для сравнения в Норвегии этот показатель составляет около 65%, а в СССР даже в 1960г. – не опускался ниже 51%. Следует отметить также катастрофическое снижение объемов выпускаемых отечественных буровых установок и геолого-разведочных работ (объемы бурения снизились в 4,5 раза по сравнению с 1990г., а объем выпускаемого бурового оборудования нужно увеличивать, более, чем на порядок), и, как следствие, резкое падение запасов, непрерывно происходящее с 1994г., а также изношенность нефтеперерабатывающих предприятий, нефте- и газопроводов, отставание в развитии производства сжиженного газа [5, 6, 8, 11].

Не совсем нелогично осуществляется правительством России так называемый налоговый маневр. Его суть заключается в сочетании низких таможенных пошлин на вывоз сырой нефти и высокого налога на добычу этого энергоносителя, что стимулирует не развитие нефтепереработки, а вывоз сырой нефти и существенно повышает стоимость бензина, дизельного топлива и другой подобной продукции внутри страны, делая неконкурентоспособными практически все отрасли экономики [5, 6].

Российские предприятия продают за рубеж переработанный природный газ, да еще и вынуждены вкладывать огромные деньги в строительство газопроводов, постоянно существенно уступая различным странам для получения соответствующих разрешений. Между тем существует и другой путь, к сожалению, в наших условиях нереализованный. В 2020 г. производственные мощности в США по выработке этилена (ценного материала для производства различных полимеров) составляют 40 млн. тонн в год, в странах Ближнего востока - 35 млн. тонн, ЕС - 25 млн. тонн, в Китае - 33 млн. тонн (внутренний спрос при этом достигает 56 млн. тонн). Указанные страны активно захватывают ниши мирового рынка глубокой переработки природного газа. Россия же в

настоящее время располагает производственными мощностями 4,6 млн. тонн этилена в год при внутреннем спросе всего 2,6 млн. тонн [5, 8].

Таким образом, для угледобывающей и углеперерабатывающей отраслей промышленности складывается благоприятная ситуация для того, чтобы потеснить конкурентные газо- и нефтедобывающие отечественной отрасли промышленности на внутреннем рынке. **Для развития реального сектора экономики страны и получения конкурентной продукции необходимы недорогие энергоносители и здесь значение Кемеровской области трудно преувеличить.** Уникальные месторождения ценных углей – это огромное конкурентное преимущество нашего региона.

При увеличении количества добываемых углей в Кемеровской области возникают, как минимум, две сложности.

Во-первых, это противоречие интересов владельцев лицензий на добычу каменных углей, которые стремятся расположить свое предприятие поближе к муниципальным образованиям, уже имеющейся инфраструктуре (автодорогам, железнодорожным путям, линиям электропередачи и т.д.) и местных жителей, желающих иметь комфортные условия для жизни и досуга. Так, в деревне Костенково, вблизи Новокузнецка, приходит в запустение ранее элитный коттеджный поселок, рядом с которым введены в эксплуатацию угольные разрезы. Положение достаточно серьезно, именно поэтому вопрос согласования выдачи лицензий на добычу полезных ископаемых был взят под контроль предыдущим Губернатором Кемеровской области А.Г. Тулеевым.

Во-вторых, на перспективы развития отечественной энергетики, в первую очередь, угольной, может существенно повлиять состоявшаяся ратификация Россией Парижского соглашения по климату от 12.12.2015г. Предыдущее, Киотское соглашение, практически никак не влияло на экономику РФ, так как исходный уровень выбросов двуокиси углерода был зафиксирован ими на уровне 1990г. РСФСР с ее высокоразвитым уровнем обрабатывающих отраслей промышленности, и с обязанностью РФ не превышать количество выбросов в дальнейшем (вплоть до настоящего времени Россия не подошла к обозначенному уровню и до сих пор выбрасывает двуокиси углерода на 25-30% меньше).

Парижское же соглашение предусматривает фиксацию величины выбросов двуокиси углерода на существующем, очень невысоком уровне и регулярное дальнейшее ее снижение, что будет существенно препятствовать развитию реального сектора экономики нашей страны. Ведь даже сейчас, до снижения выбросов двуокиси углерода, в России количество вырабатываемой электроэнергии на душу населения примерно в 2 раза ниже, чем в США (северная граница которых имеет климат, как у нас в Краснодарском крае) [5, 12].

Фактически, ратификация Россией Парижского соглашения по климату приводит к сокращению, в первую очередь, доли угля в энергетике, так как CO_2 из угля выделяется на 50-60% на единицу вырабатываемого тепла больше, чем при использовании природного газа. И это даже учитывая, что в России доля угля в энергетике и так относительно невелика - составляет всего около 15%.

Для повышения конкурентоспособности угольной энергетики целесообразно использовать современные процессы: при энерготехнологической переработке бурых углей величина выбросов CO_2 уже всего на 20-25% на единицу вырабатываемого тепла больше, чем при использовании природного газа, и составляет значение чуть меньшее, чем при использовании топлива из нефти – мазута.

Следует обратить внимание, что себестоимость тепло- и электроэнергии при применении твердого топлива существенно ниже и значительно менее подвержена резким ценовым колебаниям, чем при использовании нефтяного и газообразного топлив. Таким образом, при использовании современных технологий, применение каменных и бурых углей в энергетике становится вполне конкурентоспособным.

Даже не касаясь реального влияния двуокиси углерода на температурный режим планеты, напрашивается предложение выйти из Парижского соглашения по климату, либо, в крайнем случае, исполнять только в той части, которая не противоречит интересам России, как это и делают ведущие страны, например, Китай. Эта страна имеет свой интерес в участии в Парижском соглашении по климату, обусловленный как целью сохранить доминирование в группе G77 (коалиции 134 развивающихся стран), так и намерением перехватить у Запада рычаги контроля над мировым процессом глобализации. При этом Китай добился права считать выбросы парниковых газов не в абсолютных цифрах, а в показателях на душу населения, выводя свою промышленность из-под

возможных рисков и страхуясь от любых претензий при реализации Парижского соглашения [12, 13].

США в 2018г. вышли из Парижских соглашений, сочтя, что их условия противоречат интересам отечественной промышленности, а в 2021 году вновь туда вернулись. Несколько ранее США так и не ратифицировали уже подписанные ими предыдущие Киотские соглашения по климату. Германия не включает в баланс парниковых газов выбросы, образующиеся при использовании привозных коксующихся углей в черной металлургии.

Какие доводы могут быть приведены против состоявшейся ратификации Россией Парижских соглашений по климату.

1. Неопределенность статуса документа. Для оперативного подписания его как можно большим количеством стран все спорные вопросы из самого документа выведены в непонятный, предваряющий его, «Проект решения 21-й Конференции Сторон РКИК» (Рамочной конвенции ООН об изменении климата, Рио-де-Жанейро, 1992). Получается, что документ, известный как Парижское соглашение по климату, на самом деле состоит из двух частей. При этом в указанном выше «Проекте решения...» имеется 140 статей, а само Парижское соглашение по климату, является просто его приложением и содержит только 29 статей. И именно «Проект решения 21-й Конференции Сторон РКИК» содержит все основные риски, которые преднамеренно выведены в него из текста Парижского соглашения по климату, превращающегося просто в протокол о намерениях. Неопределенность статуса документа позволяет ведущим игрокам диктовать условия развивающимся странам, с одной стороны вынуждая их поддерживать документ, который как минимум не вполне соответствует их национальным интересам, а с другой стороны, с помощью частичного покрытия издержек от его реализации через систему международных грантов, заинтересовать часть элит третьего мира [12, 13].

2. В принципе, России, расположенной в достаточно холодном климате, выгодно объясняемое возрастанием концентрации парниковых газов предполагаемое потепление на 1-3°C, которое существенно повысит урожайность сельскохозяйственных культур, улучшит условия животноводства и снизит себестоимость промышленной продукции.

3. Парижским соглашением по климату существующий уровень выбросов двуокиси углерода в России зафиксирован на невысоком уровне (на 25% ниже, чем в 1990г. в РСФСР) и крайне необходимое для нашей страны развитие несырьевого сектора экономики и сельскохозяйственной отрасли, связанное со значительным ростом энергетики и прогнозируемым повышением выбросов углекислого газа, значительно усложняется, а в случае требуемого поэтапного снижения выбросов и вовсе становится весьма проблематичным.

4. Россия является крупнейшим экологическим донором планеты, годовые объемы поглощения парниковых газов и ее растительностью в несколько раз превышают объем выбросов, достигая, по разным оценкам, от 6 до 12 млрд. тонн эквивалента CO₂ при выбросах в 2,3-2,4 млрд. тонн. В то же время выбросы остальных ведущих промышленных субъектов – США, стран Европейского союза, КНР, Индии в два и больше раз превышают их поглощение. Россия, в отличие от стран-загрязнителей, не должна принуждаться к сокращению парниковых выбросов, но ратифицированное нами Парижское соглашение эту логику игнорирует [12, 13]. Робкие попытки России получить преференции, предусмотренные, кстати, Рамочной конвенцией ООН об изменении климата (Рио-де-Жанейро, 1992), ни к чему конкретному не привели.

5. Достаточно обоснована гипотеза, утверждающая, что увеличение концентрации углекислого и других парниковых является не причиной, а следствием повышения температуры планеты. Первопричина - повышение температуры океанов приводит к ухудшению растворимости газов (в том числе углекислого) в воде и повышению их концентрации в атмосфере. И количество поступающего в атмосферу углекислого газа на два (!) порядка превосходит величину выбросов его от человеческой деятельности.

6. Повышенная концентрация парниковых газов в атмосфере приводит не к повышению температуры на поверхности планеты, а, напротив, к ее понижению. Объясняется это тем, что парниковые газы в верхних слоях атмосферы поглощают поступающую солнечную энергию, а затем переизлучают ее во все стороны. Таким образом, до поверхности земли доходит тем меньшее количество солнечной энергии, чем больше концентрация парниковых газов в атмосфере. Поверхность же земли теряет тепло, в основном, не излучением, а конвекцией и на этот процесс концентрация парниковых газов не влияет. Впервые указанные закономерности были обнаружены и экспериментально подтверждены в первой половине XX века выдающимся американским физиком

Робертом Вильямсом Вудом. В дальнейшем это положение было подтверждено исследованиями СССР в Антарктиде и данными, полученными при извержении вулкана Пинатуба (Филиппины, 1991г.).

В соответствии с приведенными положениями, изменение климата (повышение и понижение температуры) носит периодический характер, обусловленный естественными причинами, связанными, по-видимому, с взаимодействием планеты с другими космическими телами. Повышение температуры поверхности планеты приводит к накоплению в атмосфере концентрации парниковых газов, постепенному снижению температуры и последующему уменьшению концентрации парниковых газов. Далее все периодически повторяется. В рамках данной теории борьба с антропогенными выбросами углекислого газа лишена всякого смысла. Кстати, существует достаточно обоснованное мнение экспертов в области физики, энергетики и климатологии, что Парижское (да и Киотское) соглашения по климату появились в результате лоббирования интересов газодобывающих стран с целью ослабления угле- и нефтедобывающих конкурентов.

Указанные выше положения подтверждаются установленными фактами существенного изменения климата в то время, когда об антропогенном влиянии на изменение температуры планеты говорить не приходится: большие и малые ледниковые периоды различной продолжительности. Таких примеров много, а одним из наиболее известных является основание Эйриком Торвальдссоном (Рыжиком) в 986 году (температурный оптимум X-XI века) колонии на самом большом острове Земли, названном им Гренландией – Зеленой землей. Колония процветала до наступления очередного малого ледникового периода (XIII-XIV), да и до настоящего времени она еще мало пригодна для полноценного освоения.

Таким образом, целесообразность и возможные последствия участия России в Парижском соглашении по климату должны быть детально изучены с привлечением ведущих специалистов в области климатологии, сельского хозяйства, представителей реального сектора экономики, энергетики и т. д. И только после этого может быть принято обоснованное и взвешенное решение.

Вывод. Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о значительном потенциале увеличения использования углей в энергетике, черной и цветной металлургии, химической отрасли. Конечно, расширение участия углей в промышленности России и увеличение их доли в выработке тепло- и электроэнергии необходимо осуществлять исключительно на основе использования современных экологически и экономически эффективных технологий.

Список литературы

1. Statistical Review of World Energy // British petroleum edition. – 2020. – №69 – 66 p.
2. Энергетический бюллетень. – Аналитический центр при правительстве РФ, 2021. – № 92 – 19 с.
3. Энергетический бюллетень. – Аналитический центр при правительстве РФ, 2021. – № 94 – 22 с.
4. Школлер М.Б., Прошунин Ю.Е. О развитии углеперерабатывающей промышленности в Кузбассе // ТЭК и ресурсы Кузбасса. – 2001. – № 2. – С. 142-155.
5. Прошунин Ю.Е., Школлер М.Б., Лобанов В.В. Технологические проблемы и направления процессов глубокой переработки каменных и бурых углей (обзор) // Химия в интересах устойчивого развития. – 2016. – № 24. – С. 1-14.
6. Прошунин Ю.Е., Школлер М.Б. О перспективных направлениях глубокой переработки каменных и бурых углей Кемеровской области // Кокс и химия. – 2016. – №2. – С. 10 – 16.
7. Сырьевая база производства пылеугольного топлива для вдувания в горн доменных печей. / М.Б. Школлер [и др.] // Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна : тр. междунар. науч.-технич. конф. 18-21 декабря 2006. – Донецк, 2006. – С. 144 – 151.
8. Рыжков Н.И. Мир и энергетические ресурсы // Свободная мысль. – 2015. – №5.
11. Школлер М.Б. Современные энерготехнологические процессы глубокой переработки твердых топлив. – Новокузнецк: НОУ РЦПП ЕВРАЗ-Сибирь, 2013. – 287 с.
12. Proshunin Y.E. Shkoller M.B. The creation of energy technological complex for processing of brown coal in the kemerovo region // Workshop on BLACK CARBON : сб. докладов Российско-американского семинара, 05-07 апреля 2016. – Кемерово, 2016. – Р. 78-91.
13. Богоявленский В.И. Достижения и проблемы геологоразведки и ТЭК России // Бурение и нефть. – 2013. - № 3. – С. 12-21.
14. Павленко В.Б. Парижские соглашения, как угроза национальной безопасности Российской Федерации // Астраханский вестник экологического образования. – 2017. – № 4(42). – С. 25-40.
15. Парижское соглашение. Рамочная конвенция об изменении климата. – ООН FCCC/CP/2015/OL.9/Rev.1. – 42с.

О РАЗВИТИИ ТЕХНОЛОГИЙ ГЛУБОКОЙ И ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ КАМЕННЫХ И БУРЫХ УГЛЕЙ

д.т.н. Прошунин Ю.Е.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Разработана перспективная технология энерготехнологической переработки бурых углей Кемеровской области. Предложены новые направления получения синтез-газа на основе действующих коксохимических и металлургических предприятий. Показаны преимущества технологии подготовки и сжигания водоугольного топлива. Создан способ получения заменителей пека для производства элитных сортов игольчатого кокса.

Ключевые слова: каменные и бурые угли, энерготехнологическая переработка, газификация, водоугольное топливо, каталитическое коксование, игольчатый кокс, синтез-газ, химическая продукция.

Для Кемеровской области, обладающей крупными запасами каменных и бурых углей, чрезвычайно важна проблема перехода от реализации в лучшем случае слегка облагороженного с помощью сортировки и обогащения угольного сырья к производству и сбыту продуктов его глубокой переработки с высокой добавленной стоимостью. Эта проблема особенно актуальна в связи с учетом большой удаленности рынков сбыта. К наиболее перспективным направлениям для Кемеровской области можно отнести следующие.

1. Энерготехнологическая переработка бурых углей Кемеровской области. Известно, что наиболее экологичными и эффективными топливами являются бурые угли и буроугольный полукокс (БПК), полученный при их переработке. На территории Кемеровской области расположены два крупных месторождения бурых углей: Итатское и Барандатское, относящиеся к Канско-Ачинскому бассейну (общие запасы - 66 млрд. тонн). В качестве сырья для реализации предлагаемого проекта может быть использован высококачественный бурый уголь Барандатского месторождения (табл. 1), расположенного в Тисульском районе Кемеровской области. Запасы углей здесь составляют около 36 млрд. тонн при средней мощности угольного пласта - 44-58 м и максимальной - до 100 м [1-2].

Таблица 1

Качество углей Барандатского месторождения

Месторождение	Марка угля	W _t , %	A ^d , %	V ^{daf} , %	S ^d , %
Барандатское	Б2-Б3	32-36	Средняя -7; мин. - 4	44-48	0,3

Требуемые инвестиции в развитие добычи в Канско-Ачинском бассейне в 1,5 раза ниже, чем при строительстве разрезов на Ерунаковском месторождении и в 3,5 раза ниже, чем при строительстве шахт, а себестоимость добычи бурых углей здесь была в 5 раз ниже средней себестоимости по Министерству угольной промышленности СССР и составляла примерно 50 коп. за тонну.

В данной публикации предлагается создать комплекс по энерготехнологической переработке бурых углей Кузбасса на основе перспективной отечественной технологии полукоксования с применением твердого теплоносителя (УТТ-3000).

Предложение [2-4] базируется на результатах многолетних исследований, выполненных Энергетическим институтом им. Кржижановского (Москва) и Восточным углехимическим научно-исследовательским институтом (ВУХИН) (г.г. Екатеринбург, Новокузнецк), по полукоксованию сотен тысяч тонн бурых углей Канско-Ачинского бассейна с использованием установок с твердым теплоносителем:

- пилотная установка на ТЭЦ-4 (г. Тверь) – 4 тонны в час;
- установка Красноярского металлургического завода «Сибэлектросталь» - 6 тонн в час;
- опытно-промышленная установка термоконтактной переработки углей в кипящем слое (ТЭЦ им. В.В. Куйбышева, г. Екатеринбург) – 4 тонны в час;
- промышленная установка ЭТХ-175 – 175 тонн в час;
- установка УТТ-3000, успешно эксплуатируемая на заводе Масел в г. Нарва с 1980 г.

Предложенная технология позволяет получить не только тепло- и (или) электроэнергию (при сжигании углеводородной парогазовой смеси), но и БПК, на основе которого может быть организовано производство полупродукта пылеугольного топлива для доменных печей или энерго-

генерирующих установок, а также пластические формовки на основе БПК в качестве составной части шихты для коксования, высокорекреационного бездымного топлива для коммунально-бытовых и технологических нужд, углеродистого восстановителя для ферросплавной промышленности [2, 4].

Эффект от применения инновационного продукта потребителем: получение высококачественного продукта, сбыт которого составит как минимум 5-7 миллионов тонн, практически нулевая себестоимость БПК вследствие низкой стоимости сырья и большого количества выделяющихся попутно тепло- и (или) электроэнергии, снижение удельного расхода топлива и уменьшение выбросов вредных веществ на выработку единицы тепло- и (или) электроэнергии на 20-30% [2-5].

При тиражировании технологии имеется возможность наряду с выработкой тепло- и электроэнергии получать не только БПК, но и горючий газ и жидкое топливо, как сырье для получения химической продукции. Лицензии на разработку месторождений бурых углей Барандатского месторождения могут быть получены практически на внеконкурсной основе, так как для экспорта за рубеж (наиболее простой и желательный вариант для многих предпринимателей) такие угли не пригодны.

Следует отметить также, что бурые угли Канско-Ачинского бассейна успешно поставляются в европейскую часть России для использования на ГРЭС, а РАО «ЕЭС России» в свое время была разработана детальная инструкция по работе с такими углями. Данное предложение - новый перспективный пласт энергетики не только Кемеровской области, но и всей России [2, 4, 5].

2. Включение в энергетический баланс Кемеровской области и России угольных шламов и отходов углеобогащения. Только в Новокузнецке ежегодно более 400 тысяч тонн угольных шламов и отходов углеобогащения вывозится в отвалы, а всего в регионе в отвалах находится более 40 миллионов тонн вполне пригодного для использования топлива с зольностью от 20 до 40%. По некоторым данным количество таких отходов в РФ достигло 120 млн. тонн [3, 4, 10]. Сложность утилизации отходов флотации и шламов различного происхождения крупностью менее 500 мкм связана с чрезвычайной сложностью и трудоемкостью их глубокого обезвоживания, без которого, как правило, невозможно использование материалов [2, 6].

На юге Кузбасса предложены две технологии, позволяющие в значительной мере обойти указанные сложности и успешно вовлечь в энергобаланс региона и России значительные количества дополнительного твердого топлива.

Во-первых, это технология подготовки и сжигания экологически чистого водоугольного топлива (ВУТ), приготовленного на основе угольных шламов и отходов углеобогащения (ООО «Сибэкотехника», г. Новокузнецк). Преимущества технологии: дешевизна ВУТ; доступность сырья вследствие наличия в регионе нескольких десятков углеобогащительных фабрик; относительная экологическая чистота процесса сжигания ВУТ по сравнению со сжиганием пылеугольного топлива или сортированного топлива на подвижной колосниковой решетке, позволяют рекомендовать широкое внедрение проекта не только в Кемеровской области, но и смежных регионах [1, 6].

Технически проблема передачи ВУТ по трубопроводам на расстояние 200-600 км была решена еще в 1980-х годах. Технология успешно реализована в промышленных условиях: переработано около 600 000 тонн ВУТ. На ТЭЦ №5 (Новосибирск) за 1,5 года переработано около 400 000 тонн ВУТ, переданного по трубопроводам на расстояние 280 км [6]. В СССР Государственным комитетом по науке и технике при Совете министров рассматривался вопрос о сооружении из Кемеровской области системы пульпопроводов для передачи ВУТ на Урал и далее в европейскую часть страны [6].

Конструкция топочного устройства совместно разработана ООО «Сибэкотехника» и ООО «Теплорон-НК» (г. Новокузнецк) и защищена патентом Российской Федерации [6]. Проведенные опытно-промышленные испытания показали перспективность нового направления генерации тепловой энергии с использованием водоугольного топлива.

Технология сжигания ВУТ может быть также достаточно просто и относительно недорого реализована на действующих энергогенерирующих предприятиях. Ее реализация позволит существенно улучшить экологическую обстановку в городе и регионе, а также в примерно два раза снизить себестоимость тепло- и электроэнергии, что позволит значительно повысить конкурентоспособность производства продукции с высокой добавленной стоимостью и сделает Кемеровскую область более привлекательной с точки зрения потенциальных инвесторов.

Во-вторых, это заслуживающая внимания технология утилизации угольных шламов методом кондиционирования угольных отходов с высоким содержанием влаги и золы путем использования в качестве адсорбента буроугольного полукокса (БПК) (предложена профессором СибГИУ, доктором технических наук М.Б. Школлером). Участие БПК в смеси позволило получить более низкозольный по сравнению с исходным шламом материал, обладающий, к тому же, отличными показателями сыпучести, что очень важно при организации подачи топлива для сжигания.

3. Разработка российской программы стратегического управления угольными сырьевыми ресурсами. Актуальность направления обусловлена тем, что состояние сырьевой базы российской коксохимии не позволяет производить кокс, качество которого соответствовало бы международному уровню и требованиям доменщиков в условиях применения пылеугольного топлива для доменных печей из-за дефицита отдельных марок коксующихся углей и, самое главное, значительного произвола в формировании сырьевых баз фабрик, обогащающих коксующиеся угли [2, 5].

В программе должны быть отражены [2]:

- восстановление научно-обоснованной и планомерной геологической разведки угольных месторождений России с определением запасов полезных ископаемых применительно к развитию современных технологий их добычи;
- сбалансированное развитие добычи коксующихся и энергетических углей для коксования;
- развитие технологий отработки маломощных пластов с запасами углей ценных марок, технологий, направленных на комплексную разработку угольных пластов с запасами углей менее ценных марок с последующей их глубокой переработкой и получением концентратов с заданными технологическими свойствами для коксования;
- создание независимого сертификационного центра для сертификации и аттестации новых угольных топлив и жесткая координация распределения высокодефицитных коксующихся углей между углеперерабатывающими предприятиями.

4. Развитие научных основ процессов спекания витринита каменных, коксующихся и некоксующихся, углей в связи с перспективными методами подготовки угольных шихт и новыми процессами коксования. В течение 85 лет ведущие ученые ВУХИНа закладывали основополагающие принципы теории коксования. Эти принципы положены в основу функционирующих в России коксохимических производств. Однако, в связи с вводом в эксплуатацию новых угольных месторождений, расширением наших представлений о свойствах и поведении угольных смесей в процессе их переработки, переосмыслением информации об эффективности различных методов подготовки угольных шихт для коксования, пришло время углубить фундаментальные знания о процессе коксообразования для повышения эффективности углехимии и металлургии [5, 7-12].

С целью расширения сырьевой базы коксохимии и совершенствования технологии получения металлургического кокса перспективным представляется не имеющий аналогов в мире метод каталитического коксования. Предварительными исследованиями показано, что некоторые катализаторы, введенные в шихту в незначительном количестве, могут влиять на состав пластической массы. При этом катализатор ускоряет деструкцию кислородсодержащих молекул, обогащая пластическую массу структурами, из которых образуется прочный кокс на последующей высокотемпературной стадии коксования [5].

Реализация данного проекта позволит развить научные подходы к составлению угольных смесей для коксования при использовании углей перспективных месторождений центральной Сибири, а также предложить эффективные методы их подготовки и коксования.

5. Организация производства термостойких изделий повышенной прочности (игольчатого кокса) из кузнечных углей. Игольчатый кокс, использующийся для получения специальных сталей и сверхчистого алюминия, основным потребителем которых является оборонная промышленность, не производится в России даже в масштабе опытно-промышленных партий. Эту ситуацию нельзя назвать нормальной, так как за рубежом приобретает не только игольчатый кокс на сумму свыше 150 млн. долларов ежегодно, но и значительное количество изготавливаемых на его основе электродов для производства электросталей и другой продукции [13].

Главными условиями получения кокса, обладающего игольчатой структурой, являются целенаправленный выбор сырья и технологии его подготовки. Для изготовления электроугольных изделий и огнеупорных масс, работающих при высоких температурах и в режиме «нагрев-охлаждение» требуется особого вида жидкое связующее нефтяного или угольного происхождения,

обладающее мезогенными свойствами, то есть способностью при нагреве до 600⁰С образовывать сферулы с правильной ориентацией. Каменноугольное сырье в данном случае является более предпочтительным по сравнению с нефтяным из-за низкой сернистости. Электроды из игольчатого кокса на основе анизотропного малосернистого каменноугольного пека, обладающего низким коэффициентом термического расширения и высокой электрической проводимостью, характеризуются более низким показателем растрескивания и пониженным расходом графита.

В нашем регионе разработан принципиально новый процесс получения исходного материала для производства игольчатого кокса путем использования мягкого термического растворения (в интервале температур 290-320⁰С, при давлении 0,2-0,3 МПа) в водорододонорном растворителе, в качестве которого использованы фракции каменноугольной смолы, обладающие *n*-донорными свойствами. Это позволяет получить мезофазный, высокоарматичный и низкосернистый продукт, в котором естественно отсутствуют вещества, нерастворимые в хинолине, подобные вынесенным из камеры коксования, что способствует формированию анизотропной структуры электродного кокса при карбонизации и графитизации пекоподобного продукта в процессе прокаливания. При коксовании угля выход пека, являющегося побочным продуктом, составляет около 2% от его массы. В разработанном способе переход в растворенное состояние органической массы некоторых марок угля может достигать 85 – 90% [13].

В настоящее время проведены научно-исследовательские работы, комплекс лабораторных и полупромышленных испытаний, выполнена предварительная проработка технологических схем процессов мягкого термического растворения угля с целью получения специального связующего и дальнейшего коксования его для производства термостойких изделий повышенной прочности (игольчатого кокса), подготовлено технико-экономическое обоснование эффективности реализации проекта [13].

По-видимому, можно считать целесообразным организацию в Кузбассе производства 250 тыс. тонн в год пекоподобного продукта и примерно 70-80 тыс. тонн в год игольчатого кокса на его основе. Для этого потребуется около 150 тыс. т концентратов углей марок Ж и К, а также около 150 тыс. т год фракций каменноугольной смолы, получаемых на КХП Кузбасса и ОАО «Алтай-кокс». Внедрение данного проекта позволит организовать в Кемеровской области производство высококачественного игольчатого кокса в количестве, достаточном для обеспечения потребностей РФ, а также другой ликвидной продукции с высокой добавленной стоимостью: бензин, дизельное топливо, мазут, энергетический газ, по калорийности весьма близкий к природному [13].

6. Парокислородная газификация энергетических углей. Перспективным направлением является развитие классического процесса наземной парокислородной газификации энергетических углей (пример - комбинат «Сасол» в ЮАР, перерабатывающий более 40 млн. т угля в год) с дальнейшей организацией производства синтез-газа и получением на его основе химических продуктов и моторных топлив. Не следует списывать со счетов богатейший отечественный опыт: в 50-е годы в Советском Союзе на угле успешно функционировало около 350 газогенераторных станций и более 2500 газогенераторов [2].

7. Подземная газификация (ПГУ) каменных и бурых углей. Использование процесса можно считать перспективным в различных угольных бассейнах в тех случаях, когда добыча угля с использованием традиционных методов является нецелесообразной или нерентабельной, а также при возникновении потребности в оперативном увеличении количества вырабатываемой тепло- и (или) электроэнергии. В СССР на шести промышленных станциях «Подземгаз» из каменных и бурых углей начиная с 1930-х годов переработано более 15 миллионов тонн угля и получено более 50 миллиардов кубических метров газа. Южно-Абинская станция функционировала с мая 1955г. по 1996г., а Ангренская работает с 1963г. по настоящее время [2, 14-16].

Одним из наиболее узких мест внедрения ПГУ является отсутствие четкой концепции подготовки и использования энергетического газа. Важность этой проблемы обусловлена, во-первых, тем обстоятельством, что стоимость наземного комплекса составляет около 75% общей стоимости установки ПГУ, и снижение капитальных и эксплуатационных затрат позволит существенно улучшить экономические показатели процесса. Во-вторых, все виды работ, связанные с транспортировкой и очисткой агрессивного, высокотемпературного, содержащего большое количество влаги и смолы газа, переработкой полученных химических продуктов, дорогостоящей операцией обеззараживания сточных вод, сопряжены с повышенной экологической опасностью. В-третьих, наличие жестких требований к качеству энергетического газа для газовых турбин формирует по-

вышенные требования к режиму работы дутьевого оборудования и оборудования для очистки газов [16].

Разработанный в нашем регионе способ подготовки энергетического газа ПГУ базируется на том, что разделение энергетического газа подземной газификации углей на два разных продукта: газ и конденсирующиеся при условиях подготовки энергетического газа к процессу сжигания углеводороды – смола каменных или бурых углей, весьма условно. При создании определенных условий конденсация углеводородов в аппаратах, механизмах и газопроводах не происходит. Обеспечение этого требования при подготовке энергетического газа позволяет производить очистку его от пыли сухим способом, исключив сложные и дорогостоящие процессы очистки и сброса значительного количества сточных вод, а также переработку взрывоопасных и высокотоксичных материалов, существенно улучшив экологические и экономические параметры процесса [16-17].

Тепловой потенциал энергетического газа подземной газификации каменных и бурых углей при использовании предлагаемого способа увеличивается вследствие наличия в его составе высокомолекулярных углеводородов (от 3 до 10%) и подачи на сжигание с температурой более 400°C на 13-43% соответственно [16-17].

При проектной мощности подземного газогенератора 400 миллионов кубических метров в год уменьшаются: капитальные затраты на строительство установки ПГУ почти в 2 раза, себестоимость получаемого энергетического газа - в 1,7 раза, дисконтированный срок окупаемости инвестиций - на 41%, а также увеличивается выработка тепловой энергии на 10,5% и дополнительно производится электроэнергии 151 296 МВт*ч в течение года [16-17].

Направления, связанные с использованием водоугольного топлива и подземной газификации угля, хотя и не относятся в чистом виде к процессам глубокой переработки угля, тем не менее, достаточно тесно с ней связаны. Так, водоугольная суспензия может подвергаться процессам газификации (по аналогии с процессом «Тексако»), а при подземной газификации теоретически возможно, хотя и проблематично, получение синтез-газа.

8. Универсальный способ утилизации химических продуктов пиролиза твердых топлив с получением синтез-газа и химической продукции с высокой добавленной стоимостью. В регионе функционируют два мощных коксохимических производства (КХП): в ОАО «ЕВРАЗ Объединенный ЗСМК» и ОАО «Кокс», продуцирующих из угля, наряду с металлургическим коксом, жидкие ароматические и полиароматические углеводороды, а также коксовый газ, содержащий до 60% молекулярного водорода [9, 13, 14].

Предлагается универсальный способ утилизации химических продуктов пиролиза твердых топлив, задачей которого является снижение загрязнения окружающей среды и замена существующего ассортимента маловостребованных в настоящее время химических продуктов пиролиза твердых топлив ассортиментом химических продуктов, пользующихся широким спросом, в частности, моторных топлив, спиртов и водорода.

В соответствии с предложенным способом, выделенные при охлаждении газов пиролиза смола, вода пиролиза и органические отходы используются для приготовления водосмоляной эмульсии, которая подвергается каталитической аллотермической газификации для получения синтез-газа. Водяной газ - продукт взаимодействия углерода органических соединений с водяным паром по реакции: $C_T + H_2O_T \rightarrow CO_T + H_2$ ($\Delta H^0=131$ кДж/моль, термодинамическая равновесная температура – 879 °К теоретически должен иметь следующий состав: CO - 50,0 % (об.); H₂ - 50,0 % (об.). Выход водяного газа из 1 кг углерода составит 3,73 м³, низшая теплотворная способность - 11,8 МДж/м³ (везде при нормальных условиях) [2].

Для синтеза высокооктановых моторных топлив необходимо иметь в синтез-газе соотношение (объемное) H₂:CO=1,8-2,4. Обогащение водяного газа можно осуществить за счет части водорода, который предлагается выделять из коксового газа. В составе химического блока остается технологический цикл улавливания и переработки сырого бензола, для улавливания которого могут быть использованы нефтяной или синтетический абсорбенты. Полученный обезводороженный «богатый» газ при этом может быть применен для обогрева коксовых батарей и аллотермического газификатора.

Использование предлагаемой технологической схемы комплекса позволит получить ежегодно на предприятии мощностью 3 млн. т кокса/год вместо 80 тыс. т дешевых технических масел и 80 тыс. т пека следующую продукцию [2]:

автобензин с ОЧ 90 – 100-110 тыс. т;
дизельное топливо – 10-11 тыс. т;

водород – 700-720 млн. м³;
бензол высокой чистоты – 25-30 тыс. т;
электроэнергия – 25-30 МВт.

При этом, более чем в 2,5 раза снижается нагрузка на водоочистные сооружения, из технологического цикла устраняются канцерогенные продукты, снимается проблема утилизации фусов и других жидких отходов. Доля продукции химического блока в общей выручке составит около 32 %, то есть увеличится практически в два раза по сравнению с существующим положением.

Безусловно, реализация такой технологической структуры химического блока КХП потребует выполнение значительного комплекса НИОКР в области получения стабильных водосмолых эмульсий, уточнения технологических параметров процесса их газификации, глубокой очистки коксового газа, выделения из него водорода и так далее.

Серьезного внимания заслуживает и еще один способ получения синтез-газа на интегрированных металлургических предприятиях полного цикла. Здесь обратный коксовый газ с содержанием 60 % (об.) Н₂ поступает в газовые сети и применяется, обычно, как топливо в различных технологиях цикла чугуна-стали-проката. В то же время, конвертерный газ из-за значительных колебаний по выходу (в среднем 70-90 м³/т стали), содержащий до 85-90 % (об.) СО, чаще всего дожигают «на свече». Выделенный из коксового газа водород в сочетании с монооксидом углерода конвертерного газа представляет собой значительный ресурс синтез-газа [2].

Так, например, при существующем в ОАО «ЕВРАЗ Объединенный ЗСМК» объеме производства кокса и стали может быть получено более 1,3 млрд. м³/год синтез-газа, что соответствует возможности и высокой рентабельности синтеза высокооктановых синтетических углеводородов [2].

Вывод. В целом, разработка и внедрение предложенных направлений глубокой и энерготехнологической переработки каменных и бурых углей Кемеровской области, базирующиеся на результатах многолетних исследований ВУХИНа и его Кузнецкого центра, позволят максимально использовать огромный потенциал региона, заключающийся в сочетании уникальных месторождений твердых горючих ископаемых, коксохимических производств, крупных потребителей продуктов переработки угля: доменного и конвертерного производств, ферросплавного и алюминиевого заводов с высоким профессиональным и научным уровнем специалистов, тиражировать в дальнейшем технологии для реализации в других угольных бассейнах страны, сделать первые шаги по пути ухода от роли сырьевого придатка региона и всей страны, придать новый импульс развитию ведущим научно-исследовательским и проектным организациям России в области глубокой переработки углей.

Список литературы

1. Энергетическое топливо СССР : справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 184 с.
2. Прошунин Ю.Е., Школлер М.Б., Лобанов В.В. Технологические проблемы и направления процессов глубокой переработки каменных и бурых углей (обзор) // Химия в интересах устойчивого развития. – 2016. – № 24. – С. 1-14.
3. Использование буроугольного полукокса в качестве пылеугольного топлива в доменной плавке / С.Р. Исламов [и др.]. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 68 с.
4. Школлер М.Б. Современные энерготехнологические процессы глубокой переработки твердых топлив. – Новокузнецк: НОУ РЦПП ЕВРАЗ-Сибирь, 2013. – 287 с.
5. Школлер М.Б. Полукоксование каменных и бурых углей. – Новокузнецк: Инженерная академия России, Кузбасский филиал, 2001. – 235 с.
6. Мурко В.И., Федяев В.И., Хмяляйнен В.А. Физико-технические основы водоугольного топлива. – Кемерово: КузбассВУЗиздат, 2009. – 196 с.
7. Харлампович Г.Д., Кауфман А.А. Технология коксохимического производства. – М.: Металлургия, 1995. – 384 с.
8. Русьянова Н.Д. Углекислота. – М.: Наука, 2003. – 316 с.
9. Грязнов Н.С. Пиролиз углей в процессе коксования. – М.: Металлургия, 1983. – 184 с.
10. Прошунин Ю.Е., Школлер М.Б. Об эффективности использования термopодготовленной угольной шихты для производства доменного кокса // Металлургия: технологии, инновации, качество : сб. науч. докл. Всерос. науч.-практ. конф., 15-16 ноября 2017. – Новокузнецк, 2017. – Часть 1. – С. 369-373.
11. Браун Н.В., Глушенко И.М. Перспективные направления коксохимического производства. – М.: Металлургия, 1989. – 272 с.
12. Химия и переработка угля / В.Г. Липович [и др.]. – М.: Химия, 1988. – 336 с.
13. Школлер М.Б., Прошунин Ю.Е. О производстве специальных каменноугольных связующих // Кокс и химия. – 2008. – № 1. – С. 12-15.

14. Крейнин Е.В. Нетрадиционные термические технологии добычи трудноизвлекаемых топлив: уголь, углеводородное сырье. – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2004. – 299 с.

15. Раимжанов Б.Р., Якубов С.И. Использование подземных газогенераторов в качестве теплогенераторов // Горный вестник Узбекистана. – 2005. – №3. – С. 33 – 34.

16. Прошунин Ю.Е., Потурилов А.М. О перспективах и направлениях развития технологии подземной газификации каменных и бурых углей // Кокс и химия. – 2016. – № 10. – С. 11-22.

17. Патент. РФ. Способ подготовки энергетического газа подземной газификации каменных и бурых углей. на изобретение / Ю.Е. Прошунин, А.А. Почечуев, А.М. Потурилов. – № 2439313.

УДК 338.1:658.012

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ БАЛАНСОВ

к.э.н. Новоселов С.В.,
г. Кемерово, Россия

Аннотация. В статье теоретические и практические аспекты формирования структуры топливно-энергетических балансов стран и регионов. Показаны объемы запасов и извлечения углеводородов, рассчитаны ориентировочно сроки обеспеченности запасами. Приведены данные по доказанным запасам топливно-энергетических ресурсов и распределение стран-лидеров по производству углеводородов.

Ключные слова: топливно-энергетический баланс, углеводородная энергетика, энергетические ресурсы, энергосбережение, оптимальность, стратегический и системный анализ.

Вопросы, связанные со структурой топливно-энергетических балансов (ТЭБ) стран, географией экспорта ресурсов, ценообразованием, экологическими проблемами и рядом рисков на рынке топливно-энергетических ресурсов не теряют актуальности с момента образования Мирового Энергетического Совета (1923г.), ОПЕК (1960г.), Киотского протокола (1997г.) и современного мирового энергетического форума (МЭФ). Ограниченность ТЭР с одной стороны, и спроса на них с другой стороны, постоянно вступают в единство и противоречие на каждом уровне топливно-энергетического рынка, и эти два фундаментальных экономических понятия – спрос и предложение, реально диктуют энергетическую политику государств.

Как определить, у какой страны правильный ТЭБ, а у какой нет, каким должен быть ТЭБ страны или региона? Постараемся обосновать этот аспект. Согласно [1], по доказанным запасам топливно-энергетических ресурсов Россия входит в десятку лидеров по нефти – седьмое место, первое место по газу и второе место по угляю, что отражено в табл. 1.

Таблица 1

Распределение стран по доказанным запасам топливно-энергетических ресурсов

Страна	Нефть		Страна	Газ		Страна	Уголь,	
	млн. барр.	%		млрд.м ³	%		млн.т	%
Венесуэла	303806	19,6	Россия	38000	19,1	США	250219	23,8
Саудовская Аравия	258600	16,7	Иран	32000	16,1	Россия	160364	15,2
Иран	208000	13,45	Катар	24700	12,4	Австралия	147435	14
Ирак	145019	9,35	Туркмения	19500	9,8	Китай	138819	13,1
Кувейт	101500	6,55	США	12900	6,5	Индия	101363	9,6
ОАЭ	97800	6,31	Китай	8400	4,2	Индонезия	37000	3,5
Россия	80000	5,16	Венесуэла	6300	3,2	Германия	36103	3,4
США	52637	3,39	Саудовская Аравия	6000	3,0	Украина	34375	3,2
Ливия	48363	3,12	ОАЭ	5900	3,0	Польша	26479	2,5
Нигерия	36890	2,38	Нигерия	5400	2,7	Казахстан	25605	2,4

Анализ табл. 1, показывает при распределении по Парето десятку стран-лидеров, которые имеют порядка 80-86% от мировых запасов углеводородов, и можно утверждать, что при суще-

ствующих уровнях мирового потребления по различным оценкам, нефти хватит на 37-40 лет, газа на 40-50 лет, угля на 200-270 лет. Следовательно, нефтегазовые технологии, в обозримом будущем, будут иметь тенденцию спада. Угольные же технологии, наоборот, можно развивать и совершенствовать, которые обеспечат временной резерв на реальный научный поиск по созданию инновационных технологий получения энергии из альтернативных, возобновляемых природных и искусственных ресурсов, где определяющим критериями должны быть: избыточность и доступность его производства в промышленных масштабах, экологичность и низкая себестоимость энергии.

Существующий мировой ТЭБ по производству имеет структуру: нефти около 40%, газа около 23%, угля 27% и 10% прочих видов энергии. Рассмотрим фактические топливно-энергетические балансы стран-лидеров в мировой экономике по данным МЭА на период 2020 года по данным [2] (табл. 2).

Таблица 2

Структура стран лидеров по производству углеводородов

Страна	Производство энергии всего, Mtoe	Нефть		Газ			Уголь			Прочие ТЭР
		Производство Mt	Доля, %	Производство, bcm	Производство, Mtoe	Доля, %	Производство, Mt	Производство, Mtoe	Доля, %	Доля %
Китай	2684	195	7,2	175	142,1	5,29	3692	1938,3	72,2	18,31
США	2303	560	24,3	951	772,212	33,5	640	336	14,58	27,62
Россия	1506	545	36,18	740	600,88	39,89	425	223,125	14,81	9,12
Саудовская Аравия	637	268	42,07	98	79,576	12,49	0	0	0	45,44
Индия	577	38	6,58	31	25,172	4,3	745	391,125	67,78	21,34
Канада	530	195	36,79	183	148,596	28	52	27,3	5,15	30,06
Индонезия	501	183	36,5	139	112	22,5	585	307	60	0
Австралия	443	16	3,6	139	112,868	25,47	500	262,5	59,25	11,65
Иран	348	144	41,37	240	194,88	56	1	0,525	0,15	24,7
Бразилия	310	137	44,19	90	73,08	23,57	6	3,15	1,01	31,2

Анализ табл. 2, показывает, что максимум нефти в ТЭБ у Саудовской Аравии - 42,7% , газа в России - 39,89%, угля в Китае - 72,2%, сюда же можно отнести Индию 67,78%, Индонезию - 60% и Австралию - 59,25%. Но в любом случае, пока у всех стран лидеров углеводородная энергетика, Россия будет увеличивать объемы угля, как минимум до 485 млн.т до 2035 г. [3].

Для обеспечения энергетической безопасности России необходимо иметь значимую долю мирового рынка ТЭР, хотя с другой стороны, увеличивая мировое потребление ТЭР, сейчас оно порядка 14000 Mtoe, общество порождает экологические проблемы, и в условиях противоречий техносферы и экологии, определяются основные пути их решения: энергосбережение, оптимизация производства и потребления, активизация поиска эффективных технологий на возобновляемых или искусственных ТЭР, вследствие чего высказывание Д.И. Менделеева: «Нефть – не топливо, топить можно ассигнациями» не теряет своей актуальности. Поэтому оптимальный ТЭБ представляется гармоничным сочетанием требований экологии и общества, а далее экономической целесообразностью.

Региональная структура ТЭБ имеет широкий диапазон вариантов процентного соотношения ресурсов в балансе страны и, в зависимости от региональной специфики, имеет следующую классификацию [4] (табл. 3).

Проблемы экономического анализа ТЭК определяются динамизмом и многофакторностью рассматриваемых процессов и объектов во времени и пространстве и сложностью получения оперативной и достоверной информации исследователю:

Классификация региональных ТЭК

Тип регионального ТЭК	Мощность регионального ТЭК	Обеспеченность ТЭК энергоресурсами	Перспектива развития ТЭК
Энергодефицитный	Малая	Низкая	Затухание / Поддержание
Энергоизбыточный	Высокая	Высокая	Развитие / Диверсификация
Стратегический (существующий)	Необходимая	Регулируемая	Развитие / Регулирование
Стратегический (перспективный)	Необходимая	Избыточная	Развитие / Трансформация

во-первых, используемые критерии (показатели) оценок разрозненны, они не отражают действительного вектора развития анализируемой (оцениваемой) сложной экономической системы;

во-вторых, некоторые существующие методики не дают достоверного прогноза экономической системы, не только на стратегическую перспективу, но и на краткосрочный период;

в-третьих, все методики анализа хозяйственной деятельности основаны на исследовании бухгалтерского баланса предприятий (компаний), которому свойственны ограничения:

- баланс историчен по своей природе;
- баланс есть свод моментных данных на конец отчетного периода и в силу этого не отражает адекватно состояние средств организации в течении отчетного периода;
- баланс недостаточно полно отражает прибыль;
- баланс не отражает ряд других важных факторов, влияющих на финансовое положение предприятия (экономической системы), а именно: политические, общеэкономические изменения, организационные трансформации;
- баланс не отражает реальную рыночную стоимость компании.

Вывод. Используя стратегический и системный анализ, что важно для госменеджмента и топменеджмента, возможно обеспечить получение более достоверной, *системной* информации для составления отчетов, прогнозов и стратегических программ. В этом случае, поиск инновационных методов системной оценки экономических систем – ТЭК стран, регионов, с учетом входов и выходов, процесса функционирования и стратегического развития, а также с учетом их внутреннего качества, а главное – достоверной оценки результата деятельности как сложной экономической системы в оперативном, тактическом, так и стратегическом плане, становится необходимым.

Список литературы

1. Сайт <http://www.нефть-газ-ископаемые.рф>. – [Дата обращения 16.03.2021,14-40].
2. Сайт [https://yearbook.enerdata.ru/Статистический ежегодник мировой энергетики](https://yearbook.enerdata.ru/Статистический_ежегодник_мировой_энергетики) [Дата обращения 16.03.2021,14-21].
3. Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 13 июня 2020 г. № 1582-р.
4. Новоселов С.В. Системная оценка стратегического развития топливно-энергетических комплекса региона: вопросы теории методологии и практики (на примере ТЭК Кемеровской области на период 2020-2035гг.): монография. – Кемерово, 2017. –194 с.

УДК 62-666.2.3

ПЕРЕРАБОТКА ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ КУЗБАССА С ИЗВЛЕЧЕНИЕМ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Головачев А.А., к.х.н. Черкасова Е.В.

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия

Аннотация. Проблема переработки золошлаковых отходов в России очень актуальна. Данный вид отходов обладает потенциалом самостоятельных месторождений редких и редкоземельных металлов, кото-

рые необходимы для производства современных высокотехнологичных устройств. В статье дана оценка эффективности флотационных и химических методов обогащения материалов с целью извлечения ценных компонентов.

Ключевые слова: золошлаковые отходы, редкоземельные элементы, ионная флотация, химическое выщелачивание.

Каменный уголь, наряду с нефтью и природным газом, является важнейшим сырьем в энергетической промышленности. После его сжигания образуется огромное количество золошлаковых отходов, которые скапливаются на территориях предприятий и электростанций, а после вывозятся в отвалы, занимая большие площади и вызывая загрязнение почвы.

Химический состав угля напрямую зависит от геохимического состава почвы, а потому, в зависимости от месторождения, может отличаться. Содержащиеся в нем элементы остаются в отходах сгорания. Многие из этих элементов представляют собой ценность в металлургической промышленности и электронике. Наиболее ценными являются редкие и редкоземельные элементы (РЗЭ). Самыми распространенными из них являются иттрий, лантан и церий [1].

Редкоземельные элементы используются в черной и цветной металлургии для получения сплавов, обладающих повышенной прочностью, ковкостью, пластичностью и коррозионной устойчивостью, а также магнитных и пиррофорных сплавов-«мишметаллов»; в ядерной промышленности для защиты от излучения, в регулирующих стержнях и для переработки ядерных отходов; оксиды РЗЭ применяются в производстве огнеупорных и абразивных материалов, люминофоров и красок и разного рода керамик. В химической промышленности соединения РЗЭ применяются в качестве катализаторов [2].

Разработка технологии извлечения редких и редкоземельных элементов из золошлаковых отходов поможет решить проблему переработки и утилизации этих отходов, что повлечет за собой улучшение экологической обстановки. Также переработка золы в концентрат обеспечит металлургические предприятия относительно дешевым сырьем.

Для получения концентрата, богатого редкими и редкоземельными элементами было использовано два метода, применяемых в промышленности для обогащения различных отходов химической, горной и угольной промышленности, содержащих данные элементы.

Первый метод основан на последовательном осаждении посторонних компонентов из полученной в ходе растворения золы вытяжки и выделения смеси осажденных оксалатов редких и редкоземельных металлов [3]. Второй метод основан на обогащении золы методом ионной флотации [4].

В табл. 1 представлены результаты анализа золы уноса Кемеровской ГРЭС на предмет содержания редких и редкоземельных элементов.

Таблица 1

Образец угольной золы Кемеровской ГРЭС

Прямой анализ – лазерный пробоотбор		Анализ экстракта	
Название	Содержание, %	Название	Содержание, %
SiO ₂	63,5±0,1	Sr	1,1·10 ⁻¹
TiO ₂	0,64±0,03	Zr	2,3·10 ⁻⁴
Al ₂ O ₃	23,5±0,1	Nb	7,0·10 ⁻⁴
Fe ₂ O ₃	3,3±0,6	Ga	9,0·10 ⁻⁴
MnO	0,018±0,001	Y	1,4·10 ⁻³
CaO	5,3±0,3	Mo	8,7·10 ⁻⁴
MgO	0,86±0,08	Au	1,2·10 ⁻⁴
Na ₂ O	0,97±0,06	Eu	6,8·10 ⁻⁵
K ₂ O	1,1±0,1	La	1,9·10 ⁻³
P ₂ O ₅	0,29±0,06	Pr	7,0·10 ⁻⁴
BaO	0,28±0,06	Nd	1,5·10 ⁻⁴
		V	5,3·10 ⁻³

Обогащение методом последовательного осаждения. Для получения вытяжки 1000 грамм золы уноса Кемеровской ГРЭС (зола уноса углей марки «Г» и «Д») растворили в 1500 мл 2,5 М азотной кислоты. После одного дня отстаивания образовался раствор темно-оранжевого цвета и

взвесь геля кремниевой кислоты H_2SiO_3 , а также силикатов щелочных металлов. После фильтрации раствора был получен прозрачный оранжевый раствор вытяжки объемом 1730 мл. Кислотность раствора (рН) составила 0-1. Для осаждения гидроксидов железа и алюминия при рН 5,0 потребовалось 112 см³ 20,5%-го раствора аммиака. Образовавшийся осадок, состоящий из гидроксидов железа (III) и алюминия, был отделен декантированием и фильтрованием. При дальнейшем осаждении раствором аммиака до рН 7,5 выпал желто-белый осадок. Масса осадка составила 14,47 г. После отделения и просушивания осадок был растворен в 350 см³ 0,5 н. раствора азотной кислоты. рН раствора составил 0-1. После к раствору был добавлен раствор, содержащий 16 г щавелевой кислоты. Образование белого мелкодисперсного осадка стало наблюдаться после добавления концентрированного раствора аммиака (20,5%) до рН раствора, равного 8,0. Масса отделенного осадка составила 5,494 г.

В табл. 2 представлены результаты анализа полученного осадка на предмет содержания редких и редкоземельных элементов.

Таблица 2

Химический состав концентрата, полученного методом химического выщелачивания

Элементарный компонент образца	Массовая доля, %
Ca	33,125
Al	14,133
Ce	0,431
Sr	0,430
Si	0,408
Fe	0,396
La	0,202
Zn	0,187
Mn	0,156
S	0,128
X (баланс)	50,404

Обогащение золы методом ионной флотации. К 500,142 г золы уноса было добавлено 2000 мл воды, 52 мл 2-этилгексанола (соотношение органической и водной фазы составляет $\approx 1:40$) и 2,014 г додецилсульфата натрия в качестве реагента-вспенивателя и собирателя. Суспензия выдерживалась в течение 1 часа, после чего был проведен процесс флототоксикации при рН 8,0 на лабораторной флотомашине ФЛ-240. В результате образовалась устойчивая пена серого цвета. После высушивания масса собранных частиц составила 0,690 г.

В табл. 3 представлены результаты анализа полученной пены на предмет содержания редких и редкоземельных элементов.

Таблица 3

Химический состав продукта ионной флотации

Прямой анализ – лазерный пробоотбор		Анализ экстракта	
Название	Содержание, %	Название	Содержание, %
SiO_2	$58,8 \pm 0,4$	Sr	$8,0 \cdot 10^{-2}$
TiO_2	$0,67 \pm 0,02$	Zr	$2,5 \cdot 10^{-3}$
Al_2O_3	$24,2 \pm 0,7$	Nb	$3,4 \cdot 10^{-3}$
Fe_2O_3	$2,5 \pm 0,2$	Ga	$5,0 \cdot 10^{-4}$
MnO	$0,025 \pm 0,005$	Y	$2,0 \cdot 10^{-3}$
CaO	$6,8 \pm 0,4$	Mo	$1,7 \cdot 10^{-3}$
MgO	$1,1 \pm 0,1$	Eu	$2,0 \cdot 10^{-3}$
Na_2O	$1,4 \pm 0,1$	La	$8,0 \cdot 10^{-3}$
K_2O	$1,5 \pm 0,1$	Pr	$3,0 \cdot 10^{-3}$
P_2O_5	$2,2 \pm 0,1$	Nd	$5,0 \cdot 10^{-3}$
BaO	$0,074 \pm 0,008$	V	$1,5 \cdot 10^{-2}$

Выход редкоземельных элементов в полученных концентратах достаточно низок, несмотря на повышенное по сравнению с исходной золой содержание.

Для максимально эффективного выделения редких элементов необходимо осуществлять комплексное разделение компонентов.

Золошлаковые отходы разделяются на две основные фракции: легкую золу уноса и тяжелые шлаки. Также эти отходы содержат недожог – несгоревшие частицы угля, обладающие потенциалом к повторному использованию в качестве топлива, алюмосиликатные полые микросферы, находящие применение в строительных материалах, магнитная фракция, состоящая из частиц оксидов железа и пригодная к использованию в металлургии.

Магнитная фракция легко удаляется с помощью электромагнитной сепарации. Удаление недожога эффективно с помощью флотации измельченных ЗШМ. Алюмосиликатные микросферы можно собрать с помощью воды: за счет низкой плотности микросферы будут всплывать на поверхности воды, после чего их механически собирают и высушивают [5].

С целью определения эффективности вышеописанных способов разделения компонентов золошлаковых отходов будут проведены работы по флотации золошлаковых материалов.

Вывод. В результате проведенной работы были изучены различные методы обогащения отходов химической, горной и угольной промышленности и применены к золошлаковым отходам сжигания угля, с целью получения из них концентрата, богатого редкими и редкоземельными элементами.

Список литературы

1. Арбузов С.И. Геохимия редких элементов в углях Центральной Сибири : автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. геол.-минерал. наук. – Томск, 2005.
2. Химия редких элементов. Редкоземельные элементы. Лантаноиды [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://portal.tpu.ru/SHARED/a/AMELINA/Tab3/Tab/Тема%203.%20РЗЭ.pdf>.
3. Аймбетова И.О. Как извлечь редкоземельные металлы из техногенных растворов урановой промышленности. – Шымкент, 2014.
4. Джевага Н.В. Термодинамическое описание извлечения и разделения редкоземельных элементов методами ионной флотации и экстракции в виде додецилсульфатов : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. хим. наук. – Санкт-Петербург, 2011.
5. Таскин А.В. Химико-технологические решения комплексной переработки золошлаковых отходов промышленности. – Владивосток, 2018.

УДК 622.627:625.84

ОБОСНОВАНИЕ МИНИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА ИЗ МОНОЛИТНОГО АРМИРОВАННОГО БЕТОНА В ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОНТАЖНОЙ МАШИНЫ ТИПА PETITTO MULE HAUL

Бубнов К.А., к.т.н. Новиньков А.Г., Заволокина Е.А.

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачёва
г. Кемерово, Россия

Аннотация. В статье выполнен расчет минимальной толщины дорожного полотна из монолитного армированного бетона в подземных горных выработках для эксплуатации монтажной машины типа Petitto Mule Haul. Выполнено моделирование нагрузок на дорожное полотно при транспортировании секций крепи монтажной машиной типа Petitto Mule Haul в монтажной камере.

Ключевые слова: армирование, дорожное полотно, моделирование нагрузок, монтажно-демонтажные работы, монтажная машина типа Petitto Mule Haul, подземная горная выработка, транспортирование секций крепи.

Внедрение самоходной техники для ведения монтажно-демонтажных работ исключает десятки опасных видов работ, присутствующих при традиционной технологии с применением лебедок, и обеспечивает высокую безопасность монтажно-демонтажных работ в самых сложных горно-геологических условиях.

Применение самоходной техники типа Petitto Mule Haul обеспечивает при монтаже секций крепи уменьшение удельной трудоемкости работ и повышает интенсивность транспортирования

тяжелого и крупногабаритного оборудования. Однако, при ведении маневровых работ на сопряжении транспортных и монтажных выработок увеличивается нагрузка на почву выработок. Особенно это актуально при неустойчивой почве выработок, либо при оставлении пачки угля в почве выработки.

При неустойчивой почве в подземных горных выработках при эксплуатации самоходного транспорта должны устраиваться дороги с твердым покрытием [1].

Действующими нормативными документами [1] толщина дорожного полотна в подземных горных выработках для эксплуатации самоходного транспорта не регламентируется.

В настоящее время в выработках с низкой несущей способностью почвы, склонной к интенсивному образованию колеи, на проезжей части выработки оборудуются специальные дорожные полотна:

- с использованием естественных монолитных пород, залегающих в почве выработки. Перед эксплуатацией верхний разрыхленный слой горной массы убирается до монолитного основания;
- из отсыпки крепкими породами фракцией 100-150 мм. Для этого верхний разрыхленный слой горной массы убирается до монолитного основания и на неё слоем укладывается отсыпка;
- применением гранулированного шлака (граншлака) для засыпки неровностей почвы выработки, мульт;
- добавления вяжущих материалов в обводненную почву: известь молотую негашеную, известь гидратную, известь гидрофобизированную, золы уноса сухого отбора (золошлаковые смеси);
- из монолитного бетона.

В настоящей статье для эксплуатации монтажной машины типа *Petitto Mule Haul* в монтажной камере при транспортировании секций механизированной крепи от сопряжения транспортной выработки до места установки секции крепи в ряд в монтажной камере рассмотрен вариант обустройства дорожного полотна на сопряжении транспортной выработки и монтажной камеры из монолитного армированного бетона (цементной смеси типа «УГМ-70»). Армирование – двухуровневое, диаметр арматуры (проволоки) – 5 мм, ячейка 150×150 мм.

Расчет толщины дорожного полотна для эксплуатации монтажной машины выполнен в соответствии с требованиями [2]. Моделирование нагрузок на дорожное полотно при транспортировании секций крепи монтажной машины выполнено с применением программного комплекса «Ли́ра-САПР».

Исходные данные для построения модели представлены в табл. 1 и 2. Общий вид монтажной машины с секцией крепи представлен на рис. 1.

Таблица 1

Характеристика пород в почве выработки

Номер слоя пород от почвы выработки	Наименование типа пород	Мощность слоя пород, м	Модуль Юнга, $E \times 10^{-5}$, ГПа	Сопротивление растяжению, МПа
1	Уголь	0,7-1,1	н/д	1,9
2	Алеврит мелкозернистый	3-7	40,1	5
3	Песчаник мелкозернистый	30-40	45,2	7

Таблица 2

Характеристика транспортных единиц

Тип машины	Собственный вес, т	Грузоподъемность, т
Монтажная машина <i>Petitto Mule Haul</i>	41	32

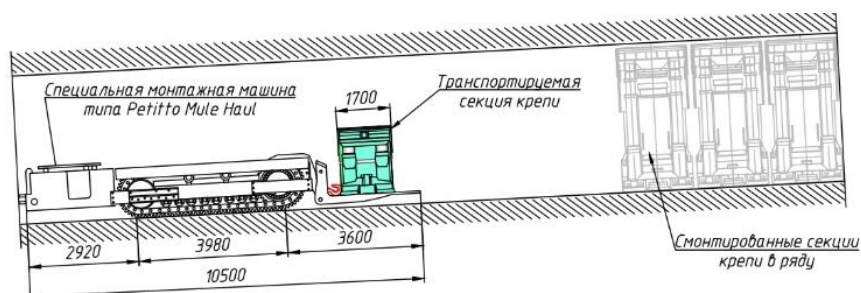


Рис. 1. Общий вид монтажной машины с секцией крепи при постановке секции крепи в ряд

Материал плиты. Дорожное полотно представляет собой композит, состоящий из однокомпонентной цементной смеси типа «УГМ-70», армированной сетками из высокопрочной проволоки класса Вр500, $d = 5$ мм, ячейка 150×150 мм. Заявленная прочность цементной смеси в возрасте 28 суток (40 МПа) соответствует средней прочности состава, полученной при испытаниях на кубических образцах. Таким образом, состав смеси соответствует марке бетона М400. Этой марке бетона соответствует класс бетона В30 с расчетной прочностью бетона при сжатии $R_b = 17,0$ МПа [2]. По структуре, используемый состав можно отнести к мелкозернистому бетону естественного твердения. Для такого бетона начальный модуль упругости составляет $E_b = 26000$ МПа [2]. Используем в дальнейших расчетах начальный модуль упругости, без учета его снижения за счет трещинообразования и нелинейной работы материала, т.к. сравнение результатов расчетов при различных соотношениях жесткостей плиты и основания показало, что использование начального модуля упругости вместо пониженного значения слабо влияет на изменение внутренних усилий.

Расчетное сопротивление растяжению проволоки класса Вр500 составляет $R_s = 415$ МПа [2].

Деформационные характеристики основания. Основание принято трехслойным. Первый слой – уголь (модуль упругости $E_1 = 2100$ МПа, толщина слоя $h_1 = 1$ м), второй слой – алевролит мелкозернистый (модуль упругости $E_1 = 40100$ МПа, толщина слоя $h_2 = 7$ м), третий слой – песок мелкозернистый (модуль упругости $E_2 = 45200$ МПа, толщина слоя $h_3 = 40$ м). В расчете использована двухпараметрическая модель основания. Коэффициенты упругости основания C_{1z} и C_{2z} определены в комплексе «Лира-САПР» как для линейно-упругого полупространства и составили для четырехузловых конечных элементов типа «Пластина» $C_{1z} = 704,6$ МН/м³ и $C_{2z} = 536,8$ МН/м³. Следует отметить, что двухпараметрическая модель основания может определяться по трем различным методикам. Используемая модель линейно-упругого полупространства дает наименьшие значения коэффициентов упругости, поэтому такой подход является более консервативным и может давать более высокие значения внутренних усилий в дорожной плите.

Моделирование нагрузок. Задавалось три нагружения: нагрузка от собственного веса дорожной плиты (загружение №1), нагрузка от монтажной машины без груза (загружение №2) и нагрузка от транспортируемого груза (загружение №3). При этом расчетное сочетание усилий (РСУ) соответствовало сумме внутренних усилий от обоих нагружений с коэффициентами сочетаний $\psi = 1,0$. Нагрузки задавались в виде равномерно распределенных полосовых нагрузок под каждую гусеницу с учетом того, что нагрузки от собственного веса транспортного средства распределены равномерно между гусеницами и равномерно по их длине. Нагрузки от веса транспортируемого груза распределялись поровну между гусеницами, но по длине гусеницы они менялись по линейному закону от 0 до максимального давления $p_{\max}$. Такой подход к заданию нагрузок от веса перевозимого груза будет более консервативным (в запас несущей способности), т.к. будет давать более высокие внутренние усилия в плите под гусеницами в задней части транспортного средства.

Равномерно распределенные нагрузки под каждую гусеницу транспорта от собственного веса транспорта составили (МН/м², МПа):

$$\left(\frac{41000 \cdot (10 \cdot 10^{-6})}{2 \cdot (0,6 \cdot 3,9)} \right) \cdot 1,2 = 0,1051, \quad (1)$$

где 41000 – вес монтажной машины, кгс (41 тс); 1,2 – коэффициент надежности по нагрузке (коэффициент перегрузки); 2 – количество гусениц; $0,6 \times 3,9$ – площадь контакта между гусеницей и дорожной плитой (0,6 м – ширина, 3,9 м – длина); $10 \cdot 10^{-6}$ – коэффициент перевода значений нагрузки из кгс в МН.

Среднее давление $p_{\text{ср}}$ под гусеницей транспортного средства от веса транспортируемого груза составило (МН/м², МПа):

$$\left(\frac{32000 \cdot (10 \cdot 10^{-6})}{2 \cdot (0,6 \cdot 3,9)} \right) \cdot 1,2 = 0,08205, \quad (2)$$

где 32000 – вес транспортируемого груза, кгс (32 тс); 1,2 – коэффициент надежности по нагрузке (коэффициент перегрузки); 2 – количество гусениц; $0,6 \times 3,9$ – площадь контакта между гусеницей и дорожной плитой (0,6 м – ширина, 3,9 м – длина); $10 \cdot 10^{-6}$ – коэффициент перевода значений нагрузки из кгс в МН.

Учитывая, что давление от веса транспортируемого груза меняется вдоль гусеницы по линейному закону от 0 до $p_{\max}$, значение $p_{\max}$ составило:

$$p_{\max} = 2 \cdot p_{\text{ср}} = 2 \cdot 0,08205 = 0,164 \text{ МН/м}^2 \text{ (МПа)}. \quad (3)$$

На рис. 2 приведены мозаики нагрузок от собственного веса монтажной машины и давления на бетон от веса транспортируемого груза.



Рис. 2. Мозаика нагрузок от собственного веса монтажной машины (а), мозаика давления на бетон от веса транспортируемого груза (б)

Параметры дорожного полотна. Минимальная толщина защитного слоя бетона принята равной 40 мм. Минимальные расстояния между стержнями верхней и нижней сеток арматуры приняты равным 50 мм. Таким образом, минимальная толщина дорожного полотна (h , мм) принята равной:

$$h = 2 \cdot 40 + 50 + 20 = 150 \text{ мм}, \quad (4)$$

где 40 мм – толщина каждого защитного слоя полотна; 50 мм – расстояние между стержнями верхней и нижней сеток арматуры; 20 мм – суммарная толщина стержней двух сеток арматуры).

Результаты расчета. Расчет велся методом конечных элементов в программном комплексе «Лира-САПР».

Изгибающие моменты в плитах M_x и M_y для загрузки №2 (нагрузка от собственного веса монтажной машины) приведены на рис. 3.

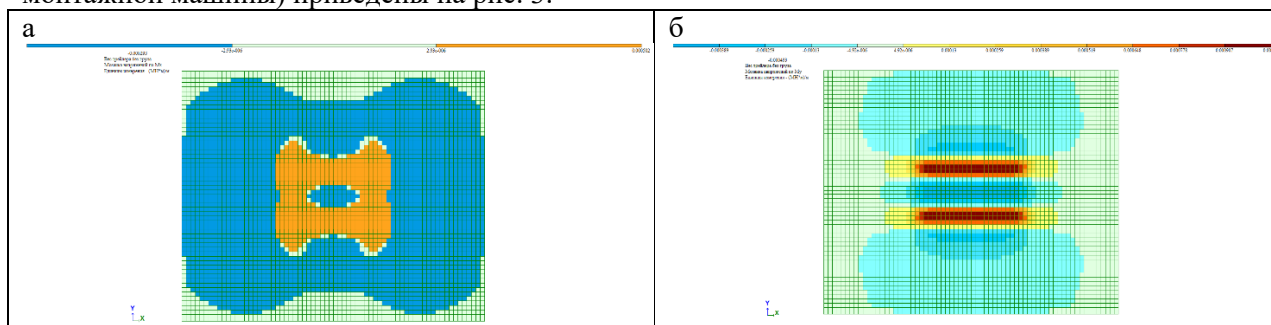


Рис. 3. Изгибающие моменты в плите в загрузке №2 (нагрузка от собственного веса монтажной машины): а – M_x ; б – M_y

Изгибающие моменты в плитах M_x и M_y для загрузки №3 (давление на железобетонную плиту от веса транспортируемого груза) приведены на рис. 4.

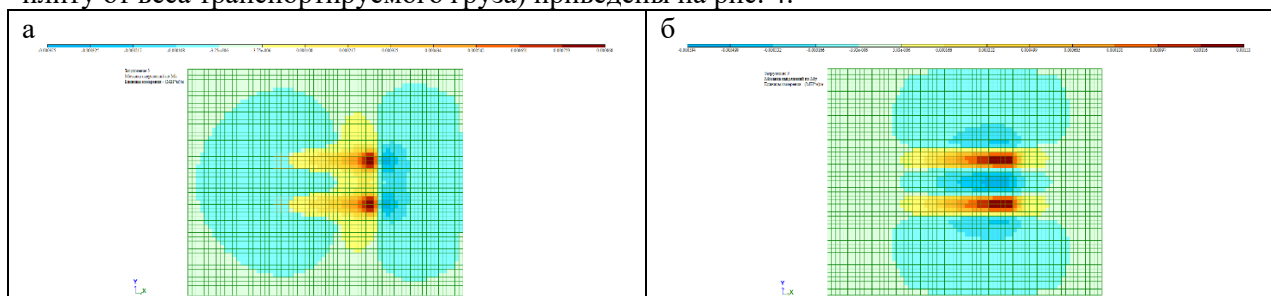


Рис. 4. Изгибающие моменты в плите M_x в загрузке №2 (давление на железобетонную плиту от веса транспортируемого груза): а – M_x ; б – M_y

Проверка несущей способности дорожного полотна [2] показала, что несущая способность дорожного полотна обеспечена:

- по критерию восприятия изгибающих моментов;
- по критерию восприятия крутящих моментов.

Выводы. В результате проведенных исследований установлено, что при минимально допустимой толщине дорожного полотна равной 150 мм и максимальном весе монтажной машины

равной 41 т, расчетный диаметр арматуры не превышает 4 мм для сеток с размером ячейки 150×150 мм.

Однако, исходя из условия минимального процента армирования [2] необходимо принимать арматуру диаметром не ниже 5 мм для сеток с размером ячейки 150×150 мм.

Для эксплуатации монтажной машины типа Petitto Mule Haul рекомендуется устройство дорожного полотна на сопряжении транспортной выработки и монтажной камеры из монолитного армированного бетона толщиной не менее 150 мм. Армирование рекомендуется двухуровневое, диаметр арматуры (проволоки) – 5 мм, ячейка 150×150 мм.

Список литературы

1. Технические требования по безопасной эксплуатации транспортных машин с дизельным приводом в угольных шахтах. – М., 1999.
2. СП 63.133330-2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».

УДК 622.83

ВЛИЯНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД В РАЙОНЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ НА УДАРООПАСНОСТЬ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

д.т.н. Лобанова Т.В., к.т.н. Линдин Г.Л., Лобанов С.А.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Обоснована актуальность и предложен порядок анализа удароопасности участков Шерегешевского железорудного месторождения в период 2016–2017 гг. Обнаружены облака концентрации сейсмособытий и участки активации нарушений. Определена их ориентация и действующие напряжения. Выявлены условия образования участков активации нарушений и крупных сейсмособытий в процессе отработки месторождения.

Ключевые слова: удароопасность, сейсмособытия, тектонические напряжения, активация нарушений, катакластическое течение, хрупкое разрушение, горный удар.

Важнейшей проблемой геомеханики является управление наведенной сейсмической активностью вокруг горнодобывающих предприятий. Ее актуальность в нашей стране связана с огромным богатством и разнообразием природных ресурсов, требующих достойного уровня эксплуатации. В странах, расположенных вокруг так называемого «огненного» пояса, она связана с жизненно важной необходимостью прогнозирования крупных землетрясений на тектонических разломах земной коры. В обоих случаях пока нет удовлетворительного решения этой проблемы. Нет даже понимания того, какие факторы являются решающими в подготовке хрупкого разрушения этих зон – крупного землетрясения или крупного горного удара?

На примере Шерегешевского железорудного месторождения (юг Кемеровской области) проведем анализ сейсмической активности в 2016–2017 гг. Предыстория вопроса была рассмотрена ранее [1, 2], где обобщены особенности проявления сейсмособытий на участках «Новый Шерегеш» и «Подруслый» в 2014, 2015 гг. и в первые два месяца 2016 г. По этим данным выполнена диагностика массива и составлен прогноз удароопасности данных участков на дальнейшую перспективу. Актуальность такого анализа была вызвана значительным увеличением количества толчков и низко частотных событий на участке «Подруслый» в конце 2015 – начале 2016 гг. по сравнению с 2014 г. Сейсмический эффект в этот период ощущался не только в горных выработках, но и на земной поверхности жителями п. Шерегеш. Это осложняло ведение горных работ на шахте и создавало социальную напряженность в поселке.

Все это время участки «Новый Шерегеш» и «Подруслый» были основными по добыче руды, поскольку там сосредоточено около 90 % очистных работ. Оработка месторождения осуществлялась одновременно двумя системами: этажно-камерной и подэтажным обрушением с торцовым выпуском руды при применении самоходной техники. С 2018 г. последняя стала единственной системой разработки месторождения, в результате заметно снизилась сейсмическая активность: количество толчков 3–5-го энергетического класса сократилось с 31-го в 2016 г., в котором проведено 6 массовых взрывов (МВ) мощностью 22–83 т ВВ (на участке «Новый Шерегеш» блоки № 25, 300, и 390; на участке «Подруслый» блоки № 9 (очередь 4) и № 10 (очереди 1, 2)),

до 15-ти в 2017 г., когда отбойка руды осуществлялась только технологическими взрывами (ТВ) даже при отработке запасов этажно-камерной системой. При этом каждый год возрастал объем годовой добычи сырой руды: если до 2015 г. он составлял около 1,7 млн. т, то в 2015 г. превысил 4,2 млн. т, в 2016 г. – 4,5 млн. т, а в 2017 г. – 4,8 млн. т.

Напряженно-деформированное состояние горного массива месторождения в этот период формировалось под влиянием роста интенсивности разработки участков «Новый Шерегеш» и «Подрусловый». Ежедневно с 7 до 8-ми часов утра проводилось от одного до пяти ТВ в очистных блоках на глубине $h = 370\text{--}510$ м с использованием до 3-х т взрывчатых веществ (ВВ) каждый.

Контроль сейсмической активности осуществлялся сейсмостанцией, регистрирующей дату и время толчков, их координаты и сейсмическую энергию. Поступающая информация обрабатывалась с целью оценки удароопасности массива горных пород и возможности горного удара (ГУ) в следующем порядке: сначала определяется распределение сейсмособытий (2300 точек на рис. 1), произошедших с 01.01.2016 по 31.12.2017 вокруг эпицентров разрабатываемых блоков № 390, 320, 300, 21, 22, 23, 25, 9 (4), 10 (1), (2), 11-13, 8, 9 (светлые квадраты 1–13 соответственно) и толчков 3–5-го энергетического класса (темные кружки). Затем определялись эллиптические облака концентрации эпицентров сейсмособытий (ОКЭС) и ориентация магистральных трещин, формирующихся в наиболее плотных ОКЭС. Согласно рис. 1 два ОКЭС расположены вдоль крутопадающего тектонического нарушения (ломаная линия) между участками «Новый Шерегеш» (ниже нарушения) и «Подрусловый» (выше нарушения) и еще два на участке «Новый Шерегеш»: более плотное – в районе блоков № 21 – 25 и менее плотное восточнее блоков 300, 320. Чем плотнее облако, тем больше в нем толчков 3 – 5-го энергетического класса.

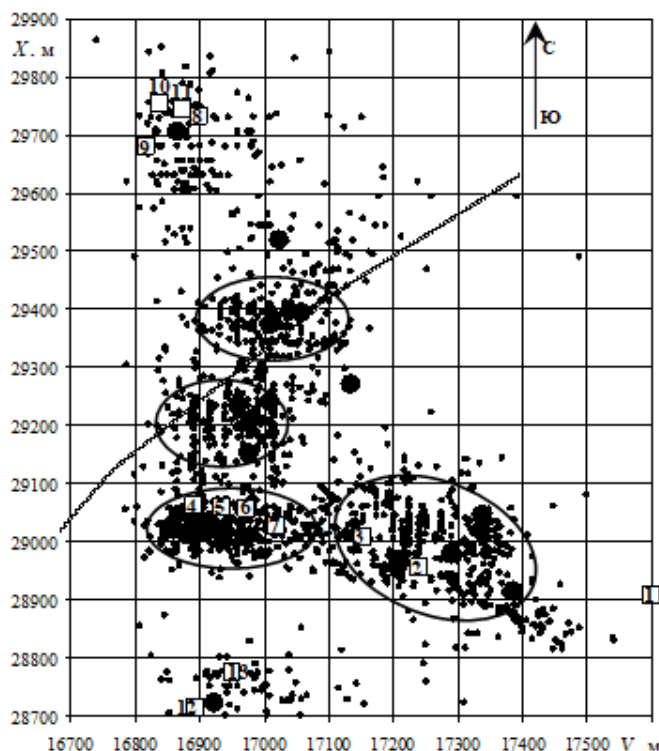


Рис. 1. Распределение сейсмособытий на участках «Новый Шерегеш» и «Подрусловый» в 2016 – 2017 гг.

Активное техногенное воздействие на фоне высоких тектонических напряжений периодически формирует рост сейсмической активности массива, происходящий по следующему сценарию. Сначала активируется большое количество трещин, растет их длина. Суммарный вклад этого ансамбля трещин напоминает пластическое течение, в котором роль дислокаций кристаллической решетки играют трещины, поэтому оно называется катакластическим течением горных пород [3]. В результате сдвига по трещинам возрастает объем трещинопорового пространства, в котором сначала падает, а затем растет давление флюида. Все это дестабилизирует равновесие массива горных пород и активирует участки нарушений, на которых падает эффективное обжимающее давление и трение сдвигу.

На рис. 2 представлено распределение четырнадцати участков (сплошные ломаные линии) активации, оперяющих тектоническое нарушение между участками «Новый Шерегеш» и «Подрусловый». Звездочкой отмечено начало активации каждого участка, а штрих-пунктирной линией – граница сейсмически активных зон.

Следует отметить, что возникновение этих участков является актом катакластического течения либо хрупкого разрушения массива в зависимости от скорости протекания активации и уровня излучаемой сейсмической энергии. Не случайно одной из вершин каждого из них является толчок 3–5-го энергетического класса, поскольку при сдвиге только часть накопленной вокруг этих участков энергии упругих деформаций тратится на вспарывание трещины, прорастание ее длины и трение бортов. В конечном итоге, эти затраты превращаются в тепловую энергию. Оставшаяся часть переходит в сейсмическую энергию конечного толчка. Если эта часть относится к 1–3-му энергетическому классу, то свидетельствует о катакластическом течении ансамбля трещин, а если к 4–6-му – о хрупком разрушении спаек бортов более крупной трещины.

В табл. 1 указаны дата, предшествующая технологическая операция и углы падения δ , простирания θ четырнадцати участков активации, на которых произошла динамическая подвижка бортов и выделилась сейсмическая энергия E_s 3 – 6-го класса.

Следует отметить, что все участки кроме 2, 9 и 10-го являются пологопадающими, а деформация нарушения – чистый взбрососдвиг, при котором один борт нарушения смещается вверх по другому в направлении, перпендикулярном линии пересечения плоскости нарушения и горизонтальной плоскости. Работу сдвига выполняют тектонические силы, а гравитация ему препятствует. Поэтому на этих участках достигается пассивное ренкиновское предельное напряженное состояние [4].

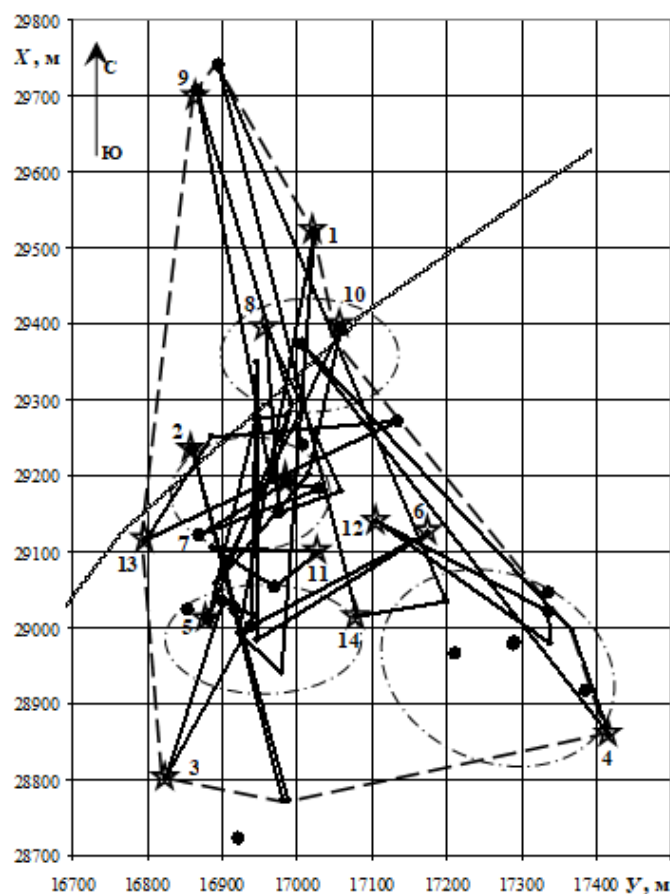


Рис. 2. Распределение участков активации тектонического нарушения между рудными участками «Новый Шерегеш» и «Подрусловый» в 2016 – 2017 гг.

Возникает законный вопрос, почему все участки имеют такую ориентацию, чем определяется их протяженность и энергетический уровень наблюдаемых сейсмособытий, и какую роль они исполняют?

Характеристика участков активации нарушения массива
рудных участков «Новый Шерегеш» (НШ) и «Подрусловый» (П) в 2016 – 2017 гг.

Номер участка	Дата	Технологическая операция	δ , град.	θ , град.	E_s , Дж
1	27.04.2016	ТВ бл. 9-12-142 (П)	45,2	149,8	$9,7 \times 10^2$
2	05.08.2016	МВ бл. 10, очередь 2 (П)	80,9	4,0	$1,3 \times 10^3$
3	17.08.2016	ТВ бл. 8-220 (НШ), 7-10-164 (П)	48,0	176,1	$4,4 \times 10^3$
4	30.11.2016	ТВ бл. 390 (НШ), 9-12-142, 8-11-120 (П)	45,3	44,9	$1,8 \times 10^3$
5	13.01.2017	ТВ бл. 5-220 (НШ), 1-142, 11-13-164 (П)	34,9	146,9	$4,6 \times 10^5$
6	13.01.2017	ТВ бл. 5-220 (НШ), 1-142, 11-13-164 (П)	12,1	12,0	$1,7 \times 10^3$
7	13.01.2017	ТВ бл. 9-220, 1-219, 1-164 (НШ)	11,6	70,5	$1,6 \times 10^5$
8	02.02.2017	ТВ бл. 1-219 (НШ), 9-12-142 (П)	26,8	5,2	$3,2 \times 10^3$
9	07.02.2017	ТВ бл. 1-195, 1-230, 5-220 (НШ), 11-13-164 (П)	70,0	14,9	$1,4 \times 10^3$
10	28.04.2017	ТВ бл. 21, 1-230 (НШ)	61,3	141,7	$1,8 \times 10^3$
11	08.07.2017	ТВ бл. 1-142 (П), 21-22 (НШ)	42,9	70,7	$4,6 \times 10^3$
12	21.09.2017	ТВ бл. 2-195 (НШ)	28,4	118,5	$2,2 \times 10^3$
13	25.09.2017	ТВ бл. 1-195 (НШ), 1-164 (П)	23,2	147,2	$1,6 \times 10^3$
14	24.11.2017	ТВ бл. 1-160 (НШ), 1-142 (П), 2-230 (НШ)	40,8	17,7	$1,2 \times 10^3$

Рассмотрим зависимость напряжений от ориентации, глубины активации участков нарушений, а также точки начала или окончания этого процесса. На рис. 3 изображена плоскость пологопадающего нарушения xq , на которой произошел чистый взбросо-сдвиг в направлении АВ, перпендикулярном линии пересечения плоскостей: нарушения xq и горизонтальной tq .

Тектоническое напряжение σ_t , действующее вдоль оси t , определяется углом простираения нарушения θ и действующими в массиве месторождения горизонтальными напряжениями $w_{x,y}$

$$\sigma_t = \gamma h (w_x \sin^2 \theta + w_y \cos^2 \theta).$$

Анализ [5] напряженного состояния в сейсмически активных структурах Алтае-Саянской складчатой области показал существенную неоднородность исходного поля тектонических напряжений вне зоны влияния горных работ на рудниках.

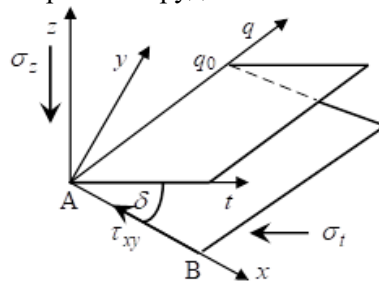


Рис. 3. Участок взбросо-сдвига бортов пологого нарушения

Максимальное тектоническое сжатие действует в горизонтальном направлении с азимутом простираения $330^\circ \pm 15^\circ$, а величина напряжения больше литосферного давления γh примерно в $w_1 = 2,5$ раза на глубине h , не превышающей 800 м. С ростом глубины тектонический коэффициент тоже возрастает. В крест простираения действует минимальное тектоническое сжатие, которое больше литосферного примерно в $w_2 = 1,3$ раза. Для Шерегешевского месторождения $w_1 = 2,6$, $w_2 = 1,4$ [5]. Поэтому касательное напряжение τ_{xy} в точках начала (звездочка на рис. 2) и окончания процесса активации участка пологопадающего нарушения имеет вид

$$\tau_{xy}^c = \gamma h^c \sin(2\delta)(w_t - 1)/2, \quad \tau_{xy}^\phi = \gamma h^\phi \sin(2\delta)(w_t - 1)/2; \\ w_t = w_x \sin^2(\theta) + w_y \cos^2(\theta), \quad (1)$$

где объемный вес пород $\gamma = 0,027$ МПа/м, а глубина h этих точек пологих нарушений изменяется в пределах 239 – 523 м.

Эффективное нормальное напряжение в точках нарушений определяется с учетом флюидного давления p_f трещинопорового пространства, которое рассчитывается методом реконструкции

напряжений [6] и в сейсмически активных зонах типа ОКЭС составляет $0,98\gamma h$, то есть чуть меньше литосферного давления. Поэтому эффективное нормальное обжатие бортов нарушения в конце процесса активации имеет вид

$$p_n^\phi = \gamma h^\phi \left(w_t \sin^2 \delta + \cos^2 \delta - K_{fl}^\phi \right), \quad K_{fl}^\phi = 0,98. \quad (2)$$

В зонах сейсмического затишья согласно [6] давление $p_{fl} = 0,65\gamma h$, поэтому эффективное нормальное обжатие бортов нарушения в начале этого процесса

$$p_n^c = \gamma h^c \left(w_t \sin^2 \delta + \cos^2 \delta - K_{fl}^c \right), \quad K_{fl}^c = 0,65. \quad (3)$$

В случае активации крутопадающего нарушения происходит сложный сдвиг бортов в направлении действия максимального касательного напряжения на его плоскости. В этом случае максимальное касательное напряжение рассчитываются иначе

$$\tau_{xy} = \gamma h \sqrt{w_\sigma^2 - w_n^2}, \quad w_\sigma^2 = w_x^2 \sin^2 \delta \sin^2 \theta + w_y^2 \sin^2 \delta \cos^2 \theta + \cos^2 \delta, \quad w_n = w_x \sin^2 \delta \sin^2 \theta + w_y \sin^2 \delta \cos^2 \theta + \cos^2 \delta - K_{fl}, \quad (4)$$

где вместо h подставляется глубина h^c точки нарушения, с которой начинается процесс активации, или h^ϕ – в которой он заканчивается (также вычисляется K_{fl}).

С помощью выражений (1) – (4) рассчитывается среднее по участку нарушения значение градиента напряжений

$$\text{grad}(p) = \frac{p_n^\phi - p_n^c}{r}, \quad \text{grad}(\tau) = \frac{\tau_{xy}^\phi - \tau_{xy}^c}{r}, \quad (5)$$

где r – расстояние от старта до финиша участка.

Результаты расчетов напряжений, их градиента вдоль нарушения согласно (1) – (5) и энергетический класс толчков для 14-ти участков, проявившихся при отработке участков «Новый Шерегеш» и «Подруслый» в 2016 – 2017 гг., представлены в табл. 2.

Следует отметить, что высоким значениям касательного напряжения отвечает, как правило, высокое эффективное обжатие нарушения, которое препятствует хрупкому разрушению – крупному динамическому толчку. Согласно экспериментальным данным по разрушению образцов горных пород [7] тип разрушения (хрупкое или вязкое) зависит от уровня обжимающего давления: в случае низкого уровня хрупкое разрушение является более эффективным механизмом релаксации накопленной энергии упругих деформаций и, наоборот, при высоких уровнях хрупкое разрушение развиваться не может.

Таблица 2

Расчетные значения напряжений в начале и в конце процесса активации, их градиента и энергетического класса толчков

Номер участка	Дата	p_n^c , МПа	p_n^ϕ , МПа	$\text{grad}(p)$, КПа/м	τ_{xy}^c , МПа	τ_{xy}^ϕ , МПа	$\text{grad}(\tau)$, КПа/м	$\lg(E_s)$
1	27.04.2016	4,22	3,98	-0,4	1,95	3,71	2,8	3,0 (3)
2	05.08.2016	8,26	5,36	-5,2	9,94	11,11	2,1	3,1 (3)
3	17.08.2016	9,65	4,13	-22,0	4,24	3,51	-2,9	3,6 (4)
4	30.11.2016	7,96	3,34	-7,0	3,67	3,10	-0,8	3,3 (3)
5	13.01.2017	6,33	2,51	-13,8	3,27	3,27	0	5,7 (6)
6	13.01.2017	3,99	0,55	-9,4	1,31	1,46	0,4	3,2 (3)
7	13.01.2017	3,65	0,43	-26,8	1,16	1,16	0	5,2 (5)
8	02.02.2017	4,34	1,39	-12,1	2,23	2,36	0,5	3,5 (3)
9	07.02.2017	9,73	6,48	-6,1	13,06	15,50	4,6	3,1 (3)
10	28.04.2017	8,07	6,78	-3,2	14,03	22,17	20,3	3,3 (3)
11	08.07.2017	8,21	3,91	-29,3	3,93	3,93	0	3,7 (4)
12	19.09.2017	4,02	1,83	-7,0	2,09	2,95	2,7	3,3 (3)
13	24.09.2017	4,65	1,45	-8,4	2,29	2,79	1,3	3,2 (3)
14	24.11.2017	7,10	3,14	-5,3	3,49	3,38	-0,2	3,1 (3)

Релаксация упругих напряжений вдоль участков нарушения осуществляется, в основном, путем катакластического течения горных пород, которое обеспечивает наиболее эффективный ме-

ханизм релаксации накопленной энергии упругих деформаций. В этом случае наблюдается медленное распространение процесса активации участка.

Если вдоль нарушений запасено упругой энергии больше, чем требуется на преодоление сил сопротивления сдвигу, то происходит ускорение этого процесса и толчок, сейсмическая энергия которого имеет на порядок более высокий уровень в зависимости от ориентации нарушения и его прочностных свойств: сцепления, эффективного нормального обжатия, внутреннего трения.

Рассмотрим возможные сценарии развития активации участка нарушения на примере участков 4, 5 согласно табл. 2. На участке 4 процесс вспарывания бортов нарушения начался южнее блока № 390 в зоне сейсмического затишья и закончился в ОКЭС вокруг нарушения между участками «Новый Шерегеш» и «Подрусловый», то есть в сейсмически активной зоне. Поэтому он сопровождался падением обжимающего эффективного давления и сопротивления вспарыванию. Однако из-за перепадов литосферного давления в начале и в конце сдвигающее напряжение тоже снижалось. В результате вспарывание приостанавливалось, а хрупкое разрушение бортов сменялось катакластическим течением. Средняя скорость распространения вспарывания от начала до окончания составила 0,4 м/с, а сейсмическая энергия последнего толчка – $1,8 \times 10^3$ Дж.

На участке 5 вспарывание шва и прорастание трещины началось в ОКЭС вокруг блоков № 21–25 и завершилось в другом ОКЭС вокруг тектонического нарушения между участками «Новый Шерегеш» и «Подрусловый», то есть в сейсмически активных зонах. Вспарывание сопровождалось в два раза более сильным падением обжимающего эффективного давления и сопротивления вспарыванию. При этом литосферное давление в начале и в конце не снижалось. В результате вспарывание протекало с ускорением, средняя скорость распространения вспарывания от начала до окончания составила 48,7 м/с, а сейсмическая энергия последнего толчка – $4,6 \times 10^5$ Дж, то есть выросла более чем на два порядка.

Сравнение сценариев наглядно доказывает, что для крупного толчка необходимо ускоренное развитие процесса вспарывания бортов участка нарушения, которое обеспечивается высоким отрицательным градиентом эффективного обжимающего давления и неотрицательным градиентом касательного напряжения на участке. Очевидно, с ростом глубины разработки месторождения наблюдается пропорциональный рост градиентов напряжений за счет литосферного давления.

Особое внимание обращено на распределение толчков 3 – 5-го энергетического класса, отражающих прорастание и слияние возникающих в массиве трещин длиной до одного метра и перераспределение энергии упругих деформаций из ОКЭС, наиболее плотные из которых содержат формирующуюся магистральную трещину длиной более 50-ти м, в участки сейсмического затишья, аккумулирующих энергию упругих деформаций. Поэтому, сейсмическая энергия готовящегося ГУ, в первую очередь, определяется энергетическим классом и плотностью этих толчков.

Рассмотрим уровень удароопасности в одном из выявленных в рассматриваемые периоды ОКЭС вокруг блоков № 21 – 25. На рис. 4 в вертикальной плоскости X, Z представлено распределение гипоцентра сейсмособытий (темные кружки), произошедших в 2016 г. (а) и в 2017 г. (б) ниже отметки +150 м в районе блоков № 21 – 25.

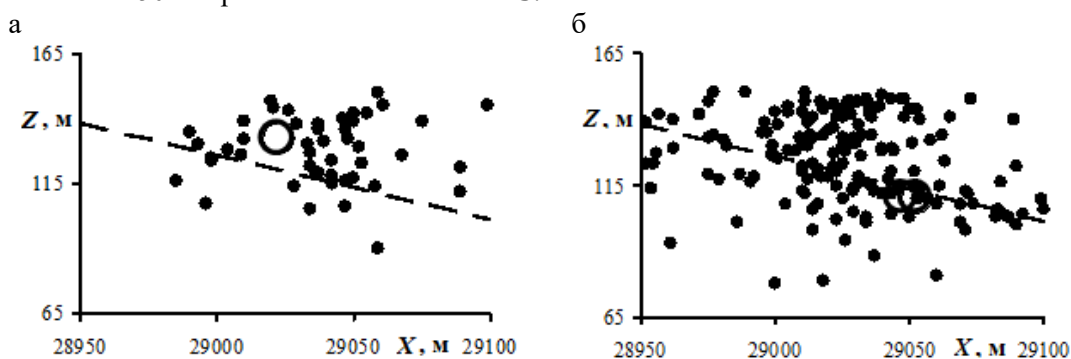


Рис. 4. Ориентация и уровень готовности очага возможного ГУ в районе блоков № 21 – 25

Штриховой линией отмечен линейный тренд вертикального сечения прорастающей под блоки № 21 – 25 пологопадающей трещины длиной около 70-ти м с углом падения 14° , середина которой расположена на глубине 570 м, и простирающейся на 170 м с запада на восток. Вид подвижки ее бортов – поперечный взброс всяческого крыла по лежащему в направлении оси X .

Единственный в 2016 г. толчок энергетического класса 3,3 (светлый кружок на рис. 4 а), расположенный выше линии тренда, говорит о неготовности трещины к хрупкому разрушению и

достаточной прочности спайки бортов. Однако, проводимые в большом количестве ТВ порождают продольные и поперечные волны. Причем, падающие волны приводят к дополнительному обжатию бортов, а отраженные от трещины – растяжению. Возникает циклическое нагружение трещины, находящейся постоянно под действием касательных составляющих тектонических напряжений, приводящее к накоплению многочисленных усталостных повреждений и снижению прочности шва. Ведь каждый толчок отражает вспарывание бортов и прорастание очередного участка трещины. Такое деформирование нарушенной зоны, как отмечалось выше, отражает катакластическое течение горных пород [5].

На рис. 4 б представлено распределение гипоцентров сейсмособытий, произошедших ниже отметки +150 м в ОКЭС вокруг блоков № 21 – 25 в следующем году. Заметим, что количество сейсмособытий в этой области увеличилось по сравнению с предыдущим периодом в 3,6 раза. Все это говорило об активном разрушении спайки бортов магистральной трещины и подготовке очага возможного ГУ, при котором сейсмическая энергия толчка, согласно выполненным расчетам, будет в пределах $4,45 \times 10^8$ Дж (энергетический класс 8,6).

Таким образом, выполненными исследованиями была установлена высокая потенциальная удароопасность участка «Новый Шерегеш» в районе блоков № 21 – 25 на гор. +115 м и ниже, что требовало повышенного внимания к сейсмической ситуации на данном участке и, при необходимости, применения мероприятий для снижения удароопасности. Исходя из представленных результатов исследований и решения технического совещания при их рассмотрении, специалистами шахты разработаны мероприятия по снижению удароопасности массива в районе блоков № 21 – 25, которые позволили избежать проявления крупного сейсмособытия на данном участке.

Выводы. На основе проведенного анализа сделаны следующие выводы. Обнаружены четыре участка концентрации 2300 эпицентров сейсмособытий, которые являются зонами стока накопленной в массиве энергии упругих деформаций. К этим участкам направлены все участки активации нарушений, инициируемых техногенным воздействием на ближайшие зоны относительного вакуума сейсмособытий. Всего выявлено 14 таких нарушений (плоскостей ослабления массива).

Для возникновения процесса активации нарушений необходимо наличие высоких значений градиента эффективного обжимающего давления, направленного к ближайшему облаку сейсмособытий: чем выше эти значения, тем выше энергетический уровень происходящих при активации толчков.

В результате накопленная в массиве энергия упругих деформаций расходуется частично на преодоление сопротивления взбросо-сдвигам по нарушениям и сейсмическую энергию толчков. Чем больше модуль градиента эффективного обжимающего давления и касательного напряжения в направлении активации нарушения, тем выше энергетический уровень сопровождающего этот процесс сейсмособытия вплоть до горного удара.

В рассмотренный период глубина разработки Шерегешевского месторождения и наблюдаемых участков нарушения не превышала 523 м, что, с учетом действующего литосферного давления, обуславливало возможность проявления толчков до шестого энергетического уровня.

Список литературы

1. Диагностика массива горных пород Шерегешевского месторождения на основе данных микросейсмического мониторинга / Т.В. Лобанова [и др.] // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2016. – № 3. – Т. 1. – С. 126 – 133.
2. Rock Mass Diagnostics Based on Microseismic Monitoring Data at Sheregesh Deposit / T.V. Lobanova [and etc.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – С. 012006. – URL: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/53/1/012006>.
3. Ребецкий Ю.Л. Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // Доклады РАН. – 2003. – Т. 388. – № 2. – С. 237 – 241.
4. Терцаги К. Теория механики грунтов. – М.: ГИЛАСМ. – 1961. – 507 с.
5. Шрепп Б.В. Управление геомеханическими процессами при разработке мощных удароопасных железорудных месторождений изменением геометрии и формы выработанного пространства : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.15.02, 05.15.11 : защищена 15.10.1996. – Новосибирск, 1996. – 49 с.
6. Ребецкий Ю.Л. Маринин А.В. Напряженное состояние земной коры западного фланга Зондской субдукционной зоны перед Суматра-Андаманским землетрясением 26.12.2004 // Доклады РАН. – 2006. – Т. 407. – № 1. – С. 106 – 109.
7. Mogi K. Deformation and fracture of rocks under confining pressure (2) compression test on dry rock sample // Bulletin of the earthquake research institute, University Tokyo. – 1964. – Vol. 42, Part 3. – P. 491 – 514.

ОЦЕНКА ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНОВ КУЗБАССА

¹к.т.н. Исаченко А.А., ²к.т.н. Петрова Т.В.

1 - филиал «Шахта «Ерунаковская-VIII» АО «ОУК «Южкузбассуголь»,
г. Новокузнецк, Россия

2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Изложены результаты анализа природно-техногенной сейсмичности в угледобывающих старопромышленных и новых районах Кузбасса. Выявлены факторы, влияющие на интенсивность и пространственное положение сейсмических событий. Доказана связь природных и техногенных явлений, в том числе вследствие ведения горных работ на угольных разрезах и шахтах.

Ключевые слова: угольное месторождение, сейсмика, подземные горные работы, открытые горные работы.

Введение. Кузнецкая котловина – это уникальная геологическая структура и сейсмически активный регион. Она представлена неглубокой котловиной в северо-западной части Алтае-Саянской горной области. Ее окружают горные структуры Кузнецкого Алатау, Горной Шории и Салаирского кряжа. Абсолютные отметки рельефа котловины увеличиваются при переходе от впадины к ее горному окружению. В Алтае-Саянской горной области характерна концентрация сейсмособытий в горном обрамлении и асейсмичность впадин. Исторические сейсмособытия зарегистрированы в 1898, 1903, 1966 годах [1]. В 1903 году землетрясение имело силу 9 баллов по шкале Росси-Фареля. Из объективных показателей большой силы этого землетрясения необходимо отметить то, что оно было зарегистрировано сейсмическими приборами в Иркутске, Красноярске, Ташкенте, Тифлисе и Юрьеве (самая удаленная сейсмостанция), где амплитуда колебаний маятников достигла 6 миллиметров. Землетрясение 1898 года было отмечено здесь весьма слабыми колебаниями.

Интенсивное наращивание угледобычи Кузбасса совпало с изменением соотношения количества горнодобывающих объектов, которые занимаются добычей угля открытым и подземным способами.

Так в настоящее время наблюдается создание отдельных угледобывающих кластеров (районов), которые изменили и продолжают изменять сейсмическую, геотехническую, геодинамическую обстановку региона.

Районы угледобычи Кузбасса находятся в условиях различной степени освоенности и условно делятся на участки недр: в старопромышленных районах, где в настоящее время закрыты угледобывающие предприятия (Прокопьевско-Киселевский, Кемеровский, Байдаевский район); с концентрацией предприятий преимущественно открытой угледобычи (Бочатский, Мрасский районы), предприятий с преимущественно подземной угледобычей (Ленинский район); с высокой концентрацией комплексного освоения недр (Томь-Усинский, Ускатский, Кондомский, Осинниковский, Ерунаковский районы).

Концентрация на относительно небольшой площади закрытых и действующих угледобывающих предприятий оказывает существенное влияние на изменение сейсмологической и геодинамической ситуаций региона [2].

Постановка задачи и ее решение. Важной народно-хозяйственной задачей является оценка природно-техногенной сейсмичности и её влияния на сейсмическую активность региона по мере освоения угольного месторождения.

Согласно [3] термин техногенная сейсмичность соответствует сейсмическим возмущениям земной коры при любых антропогенных явлениях. Источником геодинамического возбуждения может быть само техногенное воздействие или энергия земной коры. Согласно классификации [4], техногенная сейсмичность подразделяется на первичную и наведенную.

Первичная техногенная сейсмичность характеризуется сейсмическими волнами от крупномасштабных взрывов. Это как ядерные, так и химические взрывы.

Наведённая сейсмическая активность включает в себя индуцированную и инициированную. Инициированная сейсмичность характеризуется тем, что техногенное событие является источником энергии и спусковым механизмом сейсмического события. Индуцированная (триггерная) сей-

смичность – это событие, при котором антропогенная деятельность является спусковым механизмом, ускоряющим сброс естественной энергии.

Индукцированную сейсмичность предлагается относить к природно-техногенной, так как предшествующая событию энергия может накапливаться в течение долгого времени. Примером могут служить технологии добычи полезных ископаемых скважинными методами. Например, технология добычи газа, заблаговременная дегазация угольных пластов, плазменно-импульсное воздействие на угольный пласт. Вклад в создание индуцированной сейсмичности вносят гидросооружения, водохранилища, деформация земной коры при добыче угля открытым способом.

Основным фактором разрушения горных пород на карьерах является сила взрыва. Взрывные работы повышают напряжения в массиве горных пород бортов карьеров и в целике между открытыми и подземными горными работами [5, 6].

Анализ геомеханического состояния бортов разрезов показывает воздействие двойных вибрационных нагрузок. Первая очередь вибрационных нагрузок возникает от взрывных работ, а вторая – от спровоцированными взрывами техногенными сейсмическими событиями. Невысокий класс энергетических событий оказывает влияние на горные работы высокой частотой и длительностью по времени (до нескольких месяцев). Сложный характер воздействия приводит к изменению геомеханической ситуации, например, раскрытию трещин в массиве вблизи карьеров и изменению гидрогеологической ситуации. Изменение водонасыщения грунтов способствует развитию оползневых процессов и, как следствие, разрушению бортов.

Так результаты исследования сейсмической активности Калтанского угольного разреза [7] показали два типа сейсмической активизации. Крупные события связаны с открытыми горными работами с магнитудой более двух баллов. Они приурочены к локальным зонам отвалобразования Осинниковского поля. Последствия их влияния распространялись на значительной площади. Активизация сейсмичности в локальном районе техногенных взрывов зафиксирована на малых глубинах (первые километры). Слабые события, магнитудой менее двух происходили в районе горных работ по добыче угля шахты «Алардинская», которая находится в непосредственной близости от разреза.

Соответственно, были сделаны выводы, что отвалы, искусственно созданные грунтовые сооружения оказывают локальное сильное воздействие на поверхность Земли.

Увеличение добычи угля на разрезах Горловского угольного бассейна также сформировало условия проявления наведенной сейсмичности. После 2011 года увеличилась добыча угля, и в ответ на техногенное воздействие произошла сейсмическая активизация недр Горловской котловины. Колыванское землетрясение 2019 года [8] характеризовалось малой глубиной и приуроченностью к открытой горной выработке, что аналогично проявлениям наведенной сейсмичности Кузбасса.

Как отмечает автор [9], одним из основных факторов возникновения наведенной индуцированной сейсмичности является большая скорость подъема и сброса воды, что характерно, в том числе, для водосборников карьеров.

Комбинированная отработка, наряду с открытым [6] и подземным способами, является основным вариантом разработки угольных месторождений. В тоже время к ним иногда причисляются повторная, совместная открытая, открыто-подземная, а также геотехнологические способы, которые являются разновидностью основных способов. Под комбинированной предлагается понимать разработку угольного месторождения открытым и подземным способом, когда независимо от пространственного фактора требуется обязательный учет из взаимного влияния.

Взаимное влияние разных способов отработки месторождения основано на геомеханическом, гидрологическом, динамическом воздействиях. Установление степени зависимости влияния возможно только для конкретных горно-геологических условий.

Геомеханическими процессами, протекающими в техногенном полигоне подземной и открытой отработки месторождений, занимались учёные ВНИМИ, ИГД им. А.А. Скочинского, ВНИИГидроуголь, КузНИУИ, МГГУ, СибГИУ и др. Но стоит отметить, что до настоящего времени отсутствует единая методологическая базы установления взаимного влияния открытых и подземных работ. Например, в работе [10] не содержится полного перечня условий геомеханического взаимодействия протекающих процессов в земной коре при одновременном ведении открытых и подземных работ. Это не позволяет осуществлять проектирование и ведение горных работ для различных месторождений, т.к. не учитывается полный набор факторов взаимного влияния. Отдельные факторы рассматриваются в экспертной деятельности. Так ООО «СИГИ» [11] проанализи-

зировало аспекты гидрометрии затопленных шахт при подготовке рекомендаций по консервации шахты «Коксовая-2». Консервация шахты, которая была введена в эксплуатацию в 1935 году, проведена комбинированным способом – затоплены горные выработки до гор. -40 м, что исключило попадание воды в соседнее шахтное поле «Шахты им. Ворошилова».

Наибольшая степень влияния и технологической взаимосвязи происходят при одновременном ведении горных работ, совмещенных в одной вертикальной плоскости, что усиливает развитие геомеханических процессов.

Прогрессивное развитие научно-технических знаний [12] создает условия для появления новых терминов и понятий, а также ведет к различному толкованию уже давно существующих, устоявшихся и широко используемых специалистами. Расширение знаний диктует необходимость уточнения отдельных терминов для корректного их употребления. Часто это связано с различными уровнями подготовки инженерно-технических работников и специалистов. В работе [8] введен термин «сейсмическая активизация» - увеличение сейсмических событий (землетрясений, техногенных взрывов, горных ударов и пр.) в определенной ограниченной области. В настоящей работе предлагается разделить ряд терминов и понятий, приведенных ниже.

При оценке влияния степени освоения месторождения на сейсмическую активность важна актуализация терминологической базы. Значение горных терминов подразумевает их связь с существующими в данный период времени научно-техническими представлениями о исследуемом явлении и сопоставимости с их аналогами в смежных системах терминологии [12].

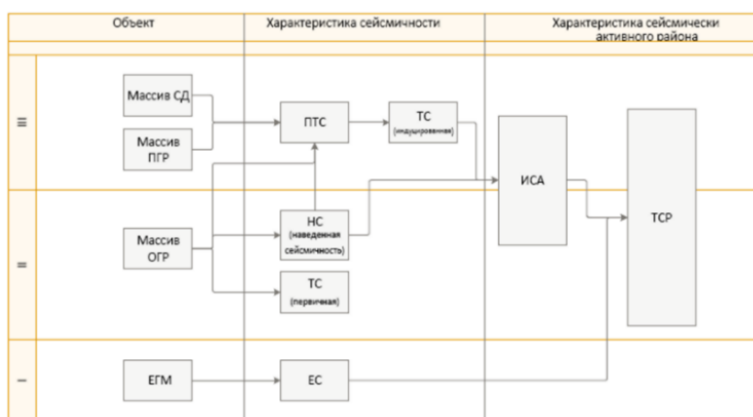
Сейсмическая активность в угледобывающем регионе характеризуется тремя уровнями (рис. 1).

Первый уровень – естественный горный массив (ЕГМ): состояние и процессы в горном массиве в естественном состоянии (ЕС). Естественный горный массив характеризуется антропогенной и технологической деятельностью человека; не изменяется напряженно-деформированное состояние массива горных пород. Частота проявления сейсмической активности аналогична частоте проявления сейсмической активности региона.

Второй уровень – состояние и процессы в горном массиве под воздействием техногенной сейсмичности (ТС). ТС является следствием комплекса работ по добыче угля открытым способом (ОГР). Комплекс включает: изменение ландшафта земной коры, вскрышные работы, работы по добыче угля, буровзрывные работы, формирование породных отвалов, работы по осушению (водотлива) и пр.

Техногенная сейсмичность (ТС) - это состояние горного массива, сейсмичность которого связана с техногенной деятельностью человека. Ярким примером техногенной сейсмичности являются технологические взрывы на карьерах. В данной работе не рассматриваются взрывы на рудных залежах, т.к. предметом исследования являются изменение сейсмичности массива горных пород на разных стадиях освоения угольного месторождения. Техногенная сейсмичность возникает при разработке нефти и газа, закачке жидких отходов, проведении взрывов [13].

Третий уровень – влияние процессов подземных и открытых горных работ, скважинной добычи полезных ископаемых.



ЕГМ – естественный горный массив, ЕС - естественная сейсмичность, ОГР – открытые горные работы, ТС – техногенная сейсмичность, ПГР – подземные горные работы, СД - скважинная добыча газа и воды, ПТС – природно-техногенная сейсмичность, ИСА – измененная сейсмическая активность, ТСР – техногенная сейсмичность района

Рис. 1. Уровни активизации сейсмической активности в зависимости от освоения месторождения

Скважинная добыча (СД) воды из недр, добыча газа и заблаговременная дегазация угольных пластов существенно влияют на изменение напряженно деформированного состояния массива горных пород за счет перемещения флюидов воды и газа.

Подземные горные работы (ПГР) - комплекс работ по добыче угля подземным способом. В него входят вскрытие и подготовка месторождения (лицензионного участка недр), очистные работы в длинных и коротких забоях. ПГР существенно меняют напряженно-деформированное состояние массива горных пород в окрестности ведения горных работ. Изменения происходят при влиянии комплекса факторов: выемка угля и формирование больших площадей выработанного пространства, неравномерное движение очистного забоя, ведение горных работ в изменчивых горно-геологических условиях, взаимное влияние обрабатываемых и ранее отработанных выемочных участков и пр.

Природно-техногенная сейсмичность (ПТС) - это состояние геомассива, который находится под влиянием горных работ. Влияние изменяет частоту и энергию сейсмических событий района ведения горных работ.

Измененная сейсмическая активность (ИСА) характеризует состояние горного массива, которое под влиянием СД, ПГР, ОГР изменяет частоту и энергию сейсмических событий, динамических явлений района ведения горных работ.

Техногенная сейсмичность района (ТСР) - это состояние сейсмичности горного массива пород, которое находится под влиянием ИСА.

Вывод. Предложенные в работе оценки активизации сейсмической активности горных пород в зависимости от стадии освоения угольного месторождения способствуют заблаговременной разработке мероприятий, направленных на минимизацию негативных последствий сейсмической активности.

Список литературы

1. Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе / А.Ф. Еманов [и др.] // Физическая геомеханика. - 2009. - № 1. - С. 37-43.
2. Геотехнические аспекты консервации шахты Кокосовая-2 / А.И. Быкадоров [и др.] // Перспективы инновационного развития угольных регионов России : сборник трудов IV междунар. науч.-техн. конф. - Прокопьевск : Изд. КузГТУ (филиал), 2014. - С.221-223.
3. Адушкин В.В. Техногенная сейсмичность: основные источники, причины возникновения и их классификация // Горная геомеханика и маркшейдерия в 3 тысячелетии. - СПб.: ВНИМИ, 2004. - С. 35-47.
4. Николаев А.В. Проблемы наведенной сейсмичности // Наведенная сейсмичность. - М.: Наука, 1994. - С. 5-15.
5. Проблемы комплексного освоения суперкрупных месторождений; под ред. К.Н. Трубецкого. - М.: ИПКОН РАН, 2004. - 416 с.
6. Быкадоров А.И., Ларичкин П.М., Свирко С.В. Геотехнические аспекты проектирования и разработки угольных месторождений комбинированным (открыто-подземным способом) // Рациональное и комплексное освоение потенциала твердых полезных ископаемых недр России: сб. статей. - 2017. - С. 211-225.
7. Техногенная сейсмическая активизация на юге Кузбасса (п. Малиновка) [Электронный ресурс] / А.А. Еманов [и др.]. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnogennaya-seysmicheskaya-aktivizatsiya-na-yuge-kuzbassa-p-malinovka/viewer>
8. Колыванское землетрясение 09.01.2019 с $M_L = 4.3$ около г. Новосибирска / А.Ф. Еманов [и др.] // Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»: сб. материалов в 9 т. - СГУГиТ, 2019 - №2. - С. 36-45.
9. Проблемы наведенной сейсмичности и инженерно-геологической защиты водохранилищ байкало-ангарского каскада / К.Г. Леви [и др.] // Геодинамика и тектонофизика. - №4. - С. 13-36.
10. Развитие технологии добычи малоценных запасов углей / А.А. Григорян [и др.] // Рациональное и комплексное освоение потенциала твердых полезных ископаемых недр России : сб. статей. - 2017. - С. 285-291.
11. Геотехнические аспекты консервации шахты Кокосовая-2 / А.И. Быкадоров [и др.] //Перспективы инновационного развития угольных регионов России : сб. трудов IV междунар. науч.-техн. конф. - Прокопьевск: Изд. КузГТУ (филиал) - 2014. - С.221-223.
12. Горная терминология: современное состояние и актуальность совершенствования / В.Н. Сытенков [и др.] // Рациональное и комплексное освоение потенциала твердых полезных ископаемых недр России : сб. статей. - 2017. - С. 175-181.
13. Цирель С.В. Закономерности развития техногенной сейсмической активности при ведении горных работ // Записки Горного института. - 2010. - Т.188. - С.58-62.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ПЛОЩАДИ ОБНАЖЕНИЯ НЕЗАКРЕПЛЕННОЙ ЧАСТИ КРОВЛИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ ООО «ШАХТА «АЛАРДИНСКАЯ»

Никитина А.М., Борзых Д.М., Риб С.В., Лесных А.С.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Приведены результаты инструментальной и визуальной оценки состояния горных выработок, приконтурного массива горных пород. Установлен максимальный пролет обнажения незакрепленной кровли в проходческом забое, при ширине выработки 5,5-6,0 м, а также время сохранения устойчивого состояния обнаженной кровли при проведении подготовительных выработок по пласту 3-За в условиях ООО «Шахта «Алардинская». Предложена технология ведения горных работ при увеличенном обнажении пород кровли пласта 3-За.

Ключевые слова: крепление, поддержание, обнажение, устойчивость.

Анализ работ по креплению горных выработок [1-3] показал, что крепление требует комплексного решения, как на стадии проектирования, так и в периоды ведения горных работ и эксплуатации. Предупредительно-профилактические меры по поддержанию выработок в рабочем состоянии должны быть составной частью задач управления горным давлением на угольных шахтах.

Обоснованное решение практических задач управления горным давлением позволяет выбрать рациональные параметры крепи выработок, а также технологию подготовительных работ. Как показывает практика, эти задачи решаются лишь путем шахтных экспериментов по определенной программе, включающей работы по оценке проявлений горного давления в различных горно-геологических и горнотехнических условиях.

Целью данной работы является определение экспериментальным путем максимальной площади обнажения незакрепленной части кровли при проведении горных выработок по пласту 3-За в условиях ООО «Шахта «Алардинская».

На начальном этапе были изучены горно-геологические характеристики пласта 3-За, пород кровли и почвы. Мощность пласта 3-За составляет 4,44-6,17 м. Пласт сложного строения и включает 2-3 породных прослоев, представленных алевролитом и углистым алевролитом суммарной мощностью до 0,5 м. Уголь полуматовый, полосчатой структуры за счет переслаивания матовых и блестящих разностей, крепкий $f = 1,5$. По своим качественным показателям уголь характеризуется: зольность 10,5–19,2%; влажность 1–2%; выход летучих веществ 15–16,3%; плотность чистых угольных пачек 1,51 т/м³; марка угля «ТС». Угол падения пласта 10–14°. Кливаж угля: азимут падения 220–230°, угол падения 75°. Гипсометрия пласта слабоволнистая. Сопротивление угля резанию 200-230 Н/мм².

Кровля пласта. Непосредственная – алевролит темно-серый, крупнозернистый за счет переслаивания с прослойками песчаника, крепостью $f = 6$, мощностью 0,5 – 3,0 м. На основной площади залегания пласта в кровле песчаник серый, мелкозернистый, слоистый, коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова 6, мощностью 7,0 – 23,0 м. Выше залегает алевролит темно-серый, крупнозернистый, с прослоями песчаника, коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова 7, мощностью 8,0-12,0 м. Почва пласта – алевролит крупнозернистый, крупнослоистый, устойчивая несклонная к пучению, мощностью 11-14 м, коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова 6. Глубина работ от поверхности 335-480 м. Природная газоносность 25-27 м³/т.

В соответствии с «Инструкцией по геологическим работам на угольных месторождениях Российской Федерации» непосредственная кровля пласта 3-За способна сохранять свою устойчивость от 0,5 ч до 2,0 ч в зависимости от площади обнажения. Для очистных забоев данное время справедливо для обнажения 1 м по простиранию и 30 м по падению, т.е. 30 м². Для подготовительного забоя максимально устойчивая площадь обнажения определяется в экспериментальном порядке.

В качестве объекта исследований выбраны действующие подготовительные забои по пласту 3-За: вентиляционный штрек 3-41; газодренажный штрек 3-42 (вентиляционный штрек 3-42).

Выработки проводятся по пласту от уклонов «восточного блока». Крепление выработок анкерное. Выработки проводятся вне зон повышенного горного давления (ПГД) и других осложня-

ющих факторов для ведения горных работ. Однако, небольшой участок вентиляционного штрека 3-41 попадает в зону ПГД от пласта 1. Глубина расположения выработок 335 – 480 м. Выкопировка с плана горных выработок по пласту 3-3а приведена на рис. 1.

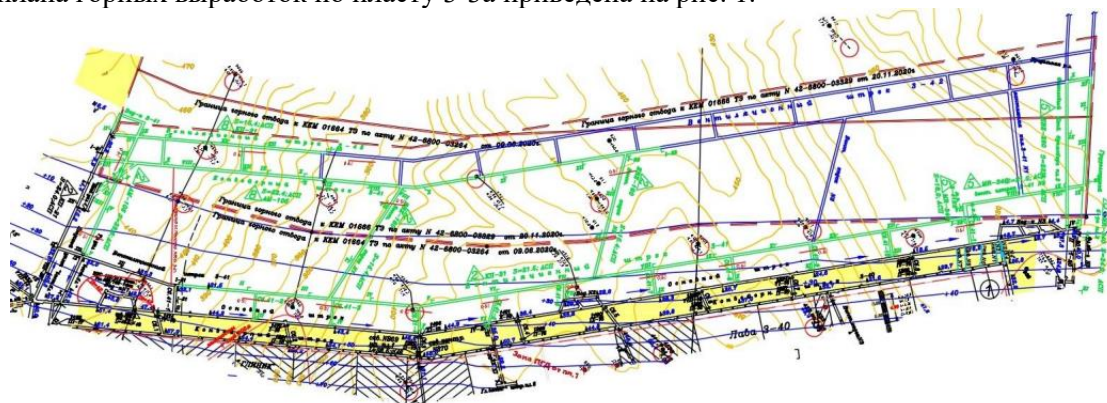


Рис. 1. Выкопировка с плана горных выработок

С целью установления максимальных пролетов обнажения незакрепленной кровли в проходческом забое, при ширине выработки от 5,5 до 6,0 м, а также установления времени сохранения устойчивого состояния обнаженной кровли проведено обследование массива пород кровли видеоэндоскопом WohlerVis 250. Эндоскопическое обследование осуществлялось в шпурах, образованных после выбуривания керна (табл. 1).

Обследование выработок производилось по методике, разработанной с учетом рекомендаций нормативных документов [4-8]. В обследуемых шпурах расслоений, влияющих на устойчивое состояние горных выработок, не выявлено. Породы кровли находятся в устойчивом состоянии.

Таблица 1

Место расположения шпуров

Номер шпура	Наименование выработки	Место бурения шпура, ПК, МТ	Глубина шпура
1	Вентиляционный штрек 3-41	МТ 8903-7м (вертикально в породы кровли)	2,56 м
2	Газодренажный штрек 3-42	МТ 9002+14м	2,86 м

* ПК- пикет; МТ - маркшейдерская точка

Для всех рассматриваемых подготовительных забоев установлена одинаковая ширина 6,0 м. Действующими паспортами установлено, что шаг крепи составляет не более 1,2 м при установке 5 анкеров в ряду и ширине горной выработки 5,5 м. Длина анкеров в кровле 2,2 м. Шаг крепи боков соответствует шагу крепи выработки по кровле. При высоте выработки 3,1 – 4,7 м, принято к установке 3 – 4 анкеров в ряду. Длина анкерной крепи боков принята аналогичной длине крепи кровли и составляет 2,2 м. Все размеры выбраны с учетом применяемой техники (комбайнов избирательного действия) и технологии возведения крепи (при помощи переносного пневматического анкероустановщика).

В ходе экспериментальных работ, максимальная заходка без крепления принималась с учетом двукратного и трехкратного шага крепи и технологического зазора от временной крепи максимальное обнажение незакрепленной части кровли не превышало 3,8м.

Выявлено, что при проведении горной выработки рассматриваемым способом существует вероятность отслоения угля с боков выработки и забоя.

Таким образом, крепление боков производится сразу после установки каждого ряда анкерной крепи кровли. То есть, после выемки очередной заходки, на глубину не более 3,8 м, сначала устанавливается ряд анкерной крепи кровли, затем ряд крепи боков, следующий ряд крепи кровли, затем ряд крепи боков. Эксперимент длился на протяжении двух смен по проведению горной выработки. Фиксировались процессы, происходящие в забое: изменения состояния приконтурного массива горной выработки; образование систем трещин и расслоений; время, затрачиваемое на выемку горной массы; максимальное время обнажения, при котором кровля находилась без крепи. Участок незакрепленной части кровли находился не более 120 минут (до истечения времени устойчивого состояния кровли, определённого геологическим отчетом).

Также при проведении выработок производились хронометражные наблюдения и мониторинг деформации кровли и боков выработок. Для измерения деформации боков выработки использовался метод измерения конвергенции между установленными контурными реперами (рис. 2).

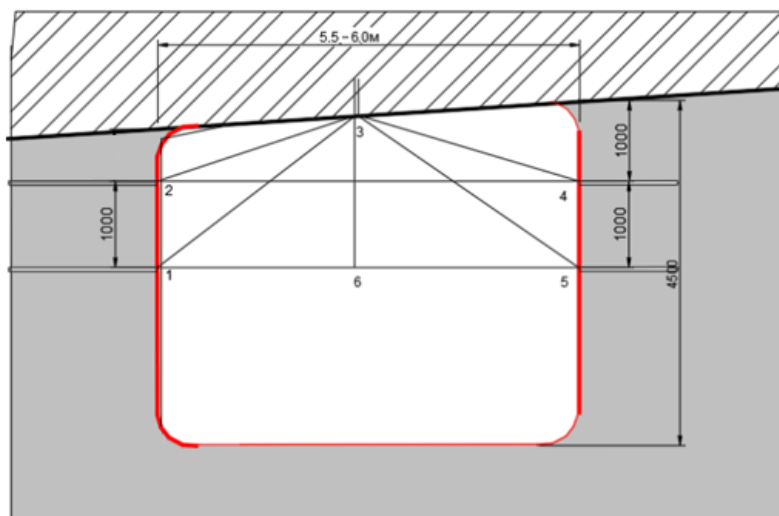


Рис. 2. Установка контурных реперов

Для измерения деформаций пород кровли использовался трехуровневый датчик контроля расслоения пород кровли. Результаты мониторинга деформации представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты мониторинга деформации

Вентиляционный штрек 3-41 ПК 24+2,2м							
Результаты замеров конвергенции							
	1-3	2-3	3-4	3-5	3-6	2-4	1-5
До отбойки	4,025	3,435	2,772	3,265	2,039	5,878	6,014
После отбойки	4,025	3,435	2,772	3,265	2,039	5,878	6,014
После крепления	4,026	3,436	2,773	3,266	2,041	5,878	6,014
Конвергенция, мм	1	1	1	1	2	0	0
Вентиляционный штрек 3-41 ПК 24+6м							
Результаты замеров конвергенции							
	1-3	2-3	3-4	3-5	3-6	2-4	1-5
До отбойки	3,668	3,552	2,823	3,386	2,124	6,011	6,177
После отбойки	3,670	3,554	2,823	3,387	2,124	6,011	6,177
После крепления	3,670	3,555	2,823	3,387	2,124	6,011	6,177
Конвергенция, мм	2	3	0	1	0	0	0

* ПК - пикет

Как видно из табл. 2, деформации кровли и боков выработки являются допустимыми, данные смещения возможно отнести к точкам локальных разгрузок массива.

Хронометражные наблюдения показали, что полный проходческий цикл суммарно не превышает 5 часов, а процесс крепления (установка двух рядов крепи кровли и двух рядов крепи каждого бока) не превышает 2 часов.

В ходе исследований установлено, что непосредственная кровля пласта 3-3а, в условиях ООО «Шахта «Алардинская» способна сохранять устойчивость длительное время. Эндоскопические обследования показали, что целостная структура кровли не нарушена трещинами и расслоениями.

Таким образом, рассматриваемая технология проведения выработок в условиях пласта 3-3а ООО «Шахта «Алардинская», при определенных горно-геологических и горнотехнических условиях, позволяет осуществлять проведение выработки с обнажением кровли до 22 м² с сохранением надлежащего уровня промышленной безопасности.

Рекомендации по технологии проведения выработок по пласту 3-3а в условиях ООО «Шахта «Алардинская». Технология проведения горных выработок при увеличенном обнажении пород кровли характеризуется двумя вариантами.

Первый вариант: в кровле горной выработки залегают породы с прочностью слоев при одноосном сжатии более 60 МПа и мощность их не превышает 0,8 м. При данных горно-геологических условиях, выемка горной массы из забоя суммарно с технологическим зазором должна составлять не более 3,0 м. Крепление осуществляется в пять этапов (рис. 3).

I этап. Выемка горной массы в забое из пласта на величину не более 2,4 м, суммарно с технологическим зазором не более 3,0 м.

II этап. Установка первого ряда крепи кровли выработки.

III этап. Установка первого ряда крепи боков выработки.

IV этап. Установка второго ряда крепи кровли выработки.

V этап. Установка второго ряда крепи боков выработки.

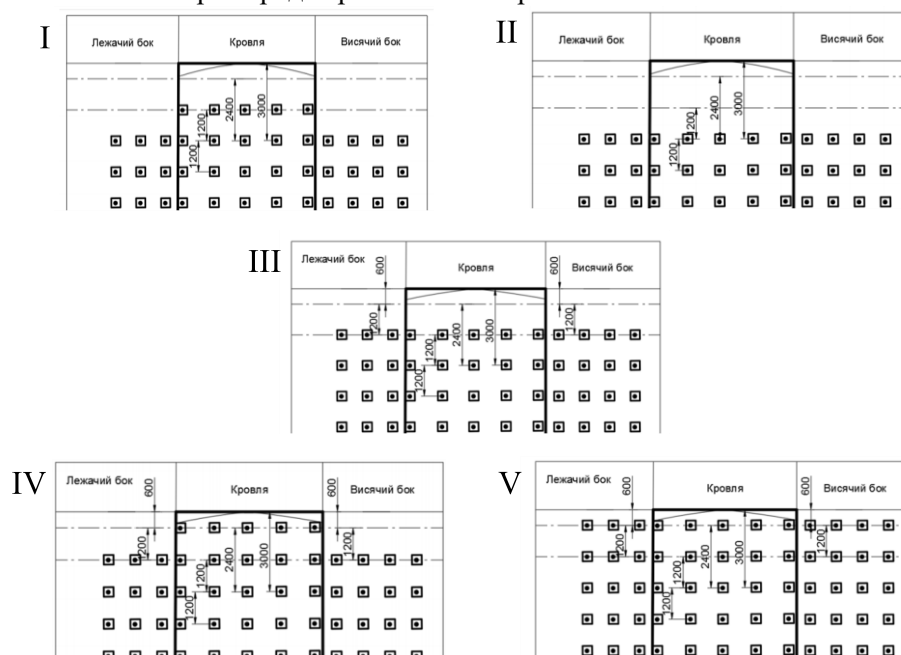


Рис. 3. Технология крепления горной выработки с обнажением незакрепленной части кровли не более 3,0м (I-V - этапы крепления)

Второй вариант: в кровле горной выработки залегают породы при прочности слоев при одноосном сжатии более 60 МПа и мощностью более 0,8 м (рис. 4).

При данных горно-геологических условиях, выемка горной массы из забоя суммарно с технологическим зазором должна составлять не более 3,8 м. Крепление осуществляется в семь этапов, рис. 4:

I этап. Выемка горной массы из забоя на величину не более 3,6 м, суммарно с технологическим зазором не более 3,8 м.

II этап. Установка первого ряда крепи кровли выработки.

III этап. Установка первого ряда крепи боков выработки.

IV этап. Установка второго ряда крепи кровли выработки.

V этап. Установка второго ряда крепи боков выработки.

VI этап. Установка третьего ряда крепи кровли выработки.

VII этап. Установка третьего ряда крепи боков выработки.

Ограничения применения описываемых технологий. Проведение выработок по рассматриваемым технологиям не может производиться:

- в зонах геологических нарушений, зонах влияния геологических нарушений;
- в зонах с неустойчивыми и обводненными породами;

- в зонах разрыва пласта, а также в условиях, где расчетные смещения кровли превышают 50 мм;
- в условиях интенсивного изменения напряженно-деформированного состояния горного массива (при входе в зону ПГД или выходе из зоны ПГД);
- в случае, если выявлена категория ОПАСНО по внезапным выбросам или горным ударам.

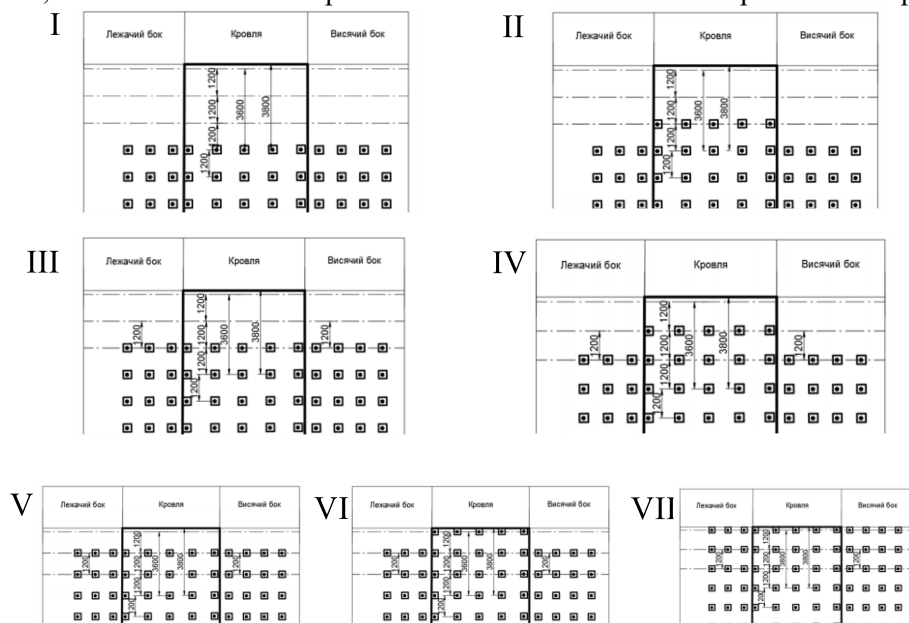


Рис. 4. Технология крепления горной выработки с обнажением незакрепленной части кровли не более 3,8м (I-VII - этапы крепления)

Вывод. Разработанные технологии проведения горных выработок по пласту 3-За, с площадью обнажения незакрепленной части кровли 22м^2 , являются безопасными и могут быть применимы в условиях ООО «Шахты «Алардинская», в условиях схожих с условиями проведения эксперимента до глубины 600 м и при ширине проводимых горных выработок до 6,0 м. В случае увеличения площади обнажения, геометрических размеров выработок необходимо выполнять дополнительные научно-исследовательские работы.

Список литературы

1. Черданцев Н.В., Преслер В.Т. Обоснование выбора параметров анкерной крепи для выработки, пройденной в анизотропном по прочности массиве горных пород // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2012. – № 2. – С. 115-124.
2. Применение инновационных технических средств для корректировки существующей методики выбора параметров анкерной крепи горных выработок / С.В. Риб [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №3. – С. 354-360.
3. Риб С.В., Борzych Д.М., Никитина А.М. Исследования распределения напряжений в породах кровли горной выработки при разных схемах расположения анкеров // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов : сб. науч. ст. – Новокузнецк, 2012. – С. 118-126.
4. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах : утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19.11.2020, № 448; зарег. 30.12.2020, № 61961.
5. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Правила безопасности в угольных шахтах : утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 № 507; зарег. 18.12.2020, № 61587.
6. Общие правила промышленной безопасности для организаций, осуществляющих деятельность в области промышленной безопасности опасных производственных объектов, ПБ 03-517-02 : постановл. Горгортехнадзора России от 18.10.2002г., №61-А ; зарег. в Минюсте РФ 28.11.2002, №3968.
7. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2020. – Серия 05. – Выпуск 49. – 148 с.
8. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР. – Л.: ВНИМИ, 1986. – 222 с.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИКОНТУРНОГО МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ ПРОВОДИМОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

Никитина А.М., Борzych Д.М., Риб С.В., Лесных А.С.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В процессе численных исследований определялось напряженно-деформированное состояние массива горных пород вокруг горной выработки при её проведении на глубине 600м. Приведен анализ распределения изолиний полных вертикальных и горизонтальных напряжений в кровле выработки, а также отношения остаточной прочности пород к исходной. Выявлены опасные зоны в приконтурных породах подготовительной выработки. Установлена максимальная площадь обнажения незакрепленной части кровли при проведении горных выработок по пласту 3-3а.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, крепление, устойчивость, напряжения, прочность.

Сложность задачи по повышению устойчивости породных обнажений горных выработок на шахтах в значительной мере обусловлена большим разнообразием горно-геологических условий – строению и прочности вмещающих пород, мощности пластов и пород и др. Потеря устойчивости пород происходит, главным образом, из-за того, что их вес G больше силы сцепления P на контакте с вышележащими породами ($G \geq P$).

При выполнении условия $G < P$ выработки целесообразно проводить с сохранением кровли, т.е. без присечки. В этих условиях опасные деформации и разрушения пород кровли происходят под действием изменяющихся в них напряжений в процессе эксплуатации выработок [1-4]. Потеря устойчивости пород наступает, когда длительная прочность пород меньше напряжений в породах. Прочность пород кровли зависит от слоистости, трещиноватости и других макро- и микродефектов строения. За счет слоистости прочность пород кровли пластов снижается в 1,5 – 4 раза, а за счет трещиноватости в 3 – 15 раз. Увеличение мощности слоев пород кровли при прочих равных условиях, сопровождается уменьшением обрушений пород кровли в призабойное пространство.

В существующих горнотехнических условиях на шахте решения, предусмотренные в утвержденной технической документации, обеспечивают обнажения незакрепленной части кровли при проведении горных выработок по пласту 3-3а с длиной заходки 1,8 метра. Для обоснования возможности скоростного проведения горных выработок необходимо в условиях действующего подготовительного забоя определить устойчивые пролеты кровли и время ее устойчивости до обрушения в проходческом забое. Все многообразие приемов и способов проведения горных выработок в условиях шахты сводится к технологической схеме, для которой в зависимости от используемого проходческого оборудования, параметров анкерной крепи выработки и горнотехнической ситуации выбран пролет обнажения кровли до установки крепи 3,8м (рис. 1).

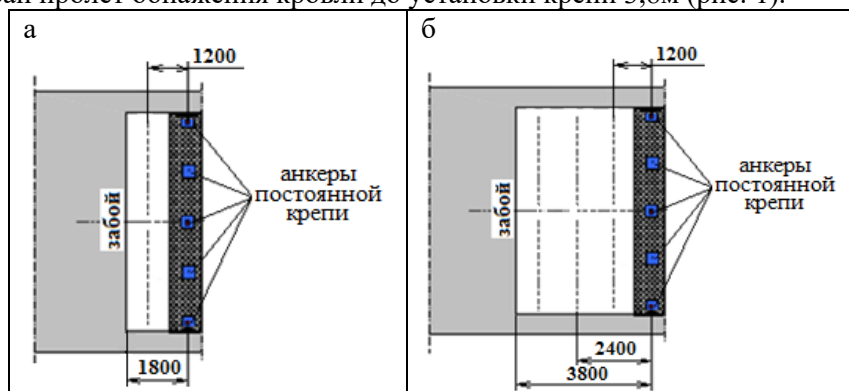


Рис. 1 - Пролёты кровли 1,8м (а) и 3,8м (б) до установки крепи в проходческом забое

Для изучения геомеханических процессов в углепородном массиве в условиях ООО «Шахта «Алардинская», в соответствии с поставленными задачами: определение максимальной площади обнажения незакрепленной части кровли при проведении горных выработок по пласту 3-3а до

глубины ведения горных работ 600м, разработана методика исследований. Методика включает характеристику методов и объектов исследований (рис. 2).

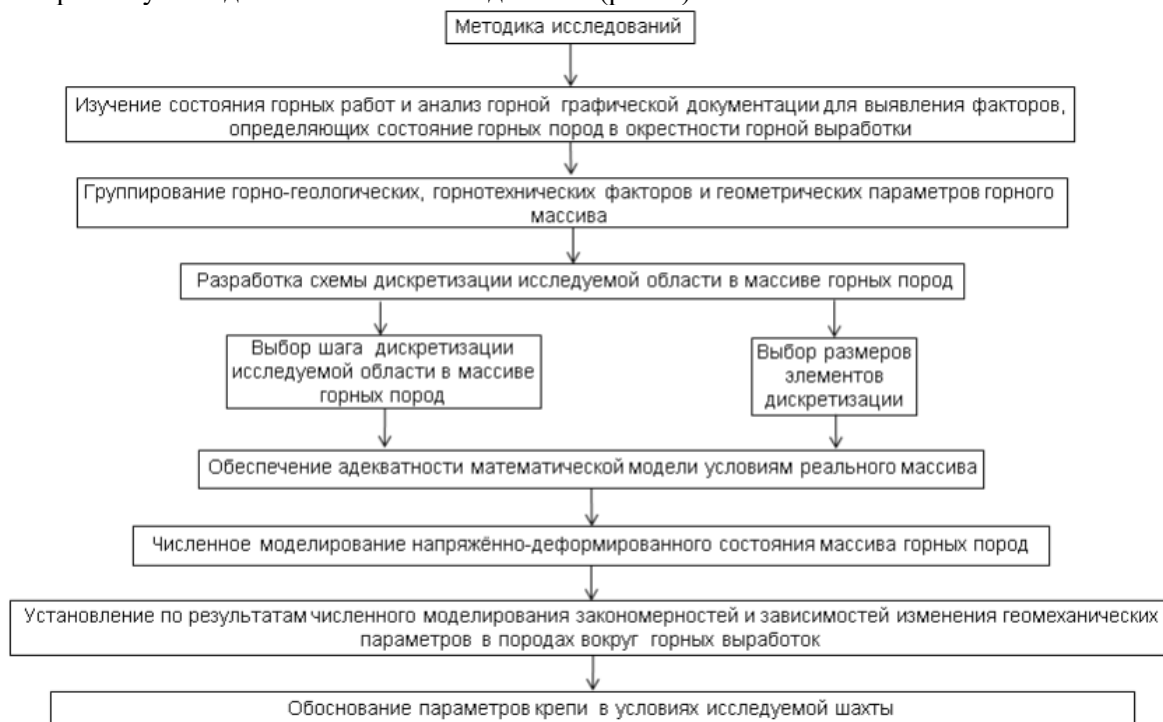


Рис. 2. Методика исследований геомеханических процессов

В качестве инструмента для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) углеродного массива выбран метод конечных элементов (МКЭ), алгоритм метода реализован на алгоритмическом языке FORTRAN.

Сущность метода конечных элементов заключается в численном решении систем дифференциальных уравнений геомеханики. Для этого бесконечная исследуемая область разделяется на множество конечных элементов, то есть непрерывная функция аппроксимируется множеством кусочно-непрерывных функций. Для решения поставленных задач решается двумерная задача, в которой учитывается слоистая структура массива горных пород, стратиграфия и литология, геологические нарушения, форма и размеры выработанного пространства [5-8].

Решение осуществляется в упругопластической постановке. Применяется комплекс программ CoalPillar, в основе которого реализован МКЭ. Комплекс проблемно-ориентированных программ CoalPillar, в основе которого заложен сеточный метод конечных элементов, предназначен для двумерного моделирования геомеханических процессов в углеродном массиве с учетом влияния его слоистости и неоднородного строения в виде породных прослоек, твердых включений, плывунов, дизъюнктивных геологических нарушений и системы взаимовлияющих очистных и подготовительных выработок.

Оценка качества автоматической дискретизации модели на конечные элементы осуществляется в программе Surfer. Геометрическая модель представлена в виде вертикального разреза, перпендикулярного осям горных выработок пласта 3-3а. Начало координат условной системы координат принято на пересечении кровли и правого бока горной выработки. В случае несоответствия положения или размеров конечных элементов реальной ситуации производится корректировка исходных данных.

Количество слоев в модели принято равным 100, а их мощность - от 0,05 до 100 м. Количество вертикальных линий на геометрической модели принимается 200 с расстоянием между ними от 0,01 до 100 м. Слои значительной мощности делятся на подслои для повышения точности расчета параметров НДС. Геометрическая модель разделяется на множество конечных элементов – 40400 треугольников.

На рис. 3 представлена модель горной выработки по пласту 3-3а при проведении участков с крепью и без крепи. Размеры геометрической модели по простиранию приняты 100 м, расчетная глубина залегания пласта 3-3а – 600м. При моделировании в качестве исходных приняты данные геологической колонки: в кровле пласта залегает алевролит мощностью 0,5-6,0м прочностью до

65 МПа. Ширина горной выработки принималась до 6,0 м, высота 4,5 м, средняя плотность пород 2500 т/м³. Учтены следующие исходные данные: глубина разработки до 600 м, угол падения пласта до 12°, коэффициент структурного ослабления при переходе от прочности лабораторного образца к прочности в массиве 0,5, коэффициент бокового давления в нетронутом массиве с учетом сейсмической активности южного Кузбасса $\lambda=0,5$.

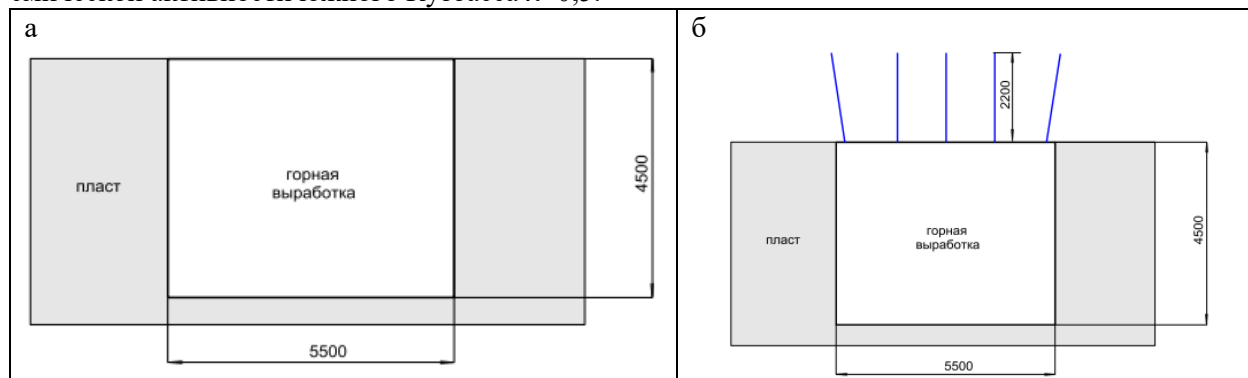


Рис. 3. Варианты моделей горной выработки

По результатам проведенных расчетов и анализа горнотехнических и технологических факторов, определяющих основное влияние на устойчивость породного обнажения установлено:

- при увеличении ширины выработки от 5,5 до 6 м смещения в выработке увеличиваются на 6 – 8 %;
- увеличение глубины расположения горных выработок пласта 3-3а от 300 до 600 м, приводит к росту смещений кровли в породах при $\sigma_{сж} < 45$ МПа в 3 – 3,5 раза и при $\sigma_{сж} = 45 – 80$ МПа в 2 – 2,4 раза;
- при прочности слоев на одноосное сжатие 55 – 65 МПа и мощности их более 0,8 м, породные обнажения кровли сохраняют устойчивое состояние свыше 2 часов.
- при мощности слоя от 0,1 до 0,4 м и прочности пород при сжатии до 40 МПа время устойчивого состояния сохраняется в пределах одного часа, а при мощности слоев менее 0,1 м, что обычно характерно для ложной кровли, время их устойчивого состояния составляет от 10 до 20 мин;
- смещение кровли горных выработок до попадания в зону ПГД происходит обычно равномерно, а в зоне ПГД протекает в 1,5 – 2,5 раза быстрее.

На рис. 4 представлены изолинии отношения остаточной прочности пород к исходной прочности ($K_{мр}$).

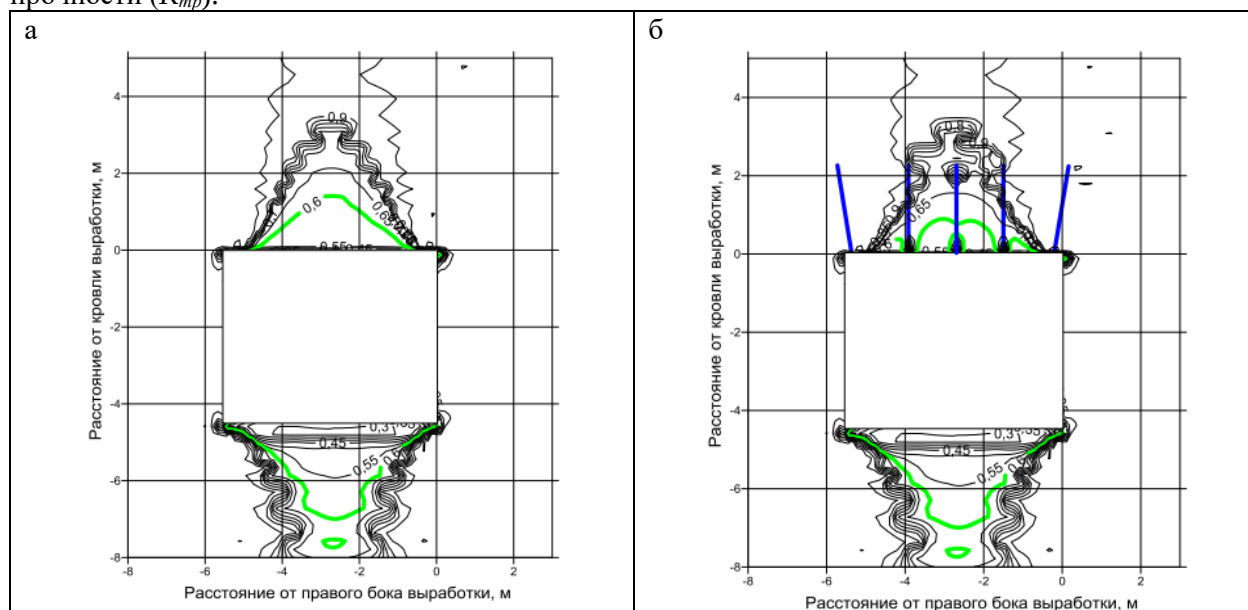


Рис. 4. Распределение изолиний отношения остаточной прочности к исходной в окрестности горной выработки (по сечению выработки в месте первого ряда анкерной крепи при глубине заходки 3,8 м): а - без крепи; б - с пятью анкерами

По результатам сопоставления расчетных значений отношений прочности и обследования состояния пород на контуре выработки установлено, что при отношении $K_{mp} \leq 0,5$ происходит разрушение угля или пород в виде кусков с высыпанием в выработку. При $0,5 < K_{mp} \leq 0,7$ формируются трещины, эта область рассматривается как зона предразрушения, при $K_{mp} > 0,7$ на контуре выработки дополнительные трещины техногенного происхождения, как правило, отсутствуют. В породах кровли горной выработки произошли следующие изменения: ширина свода предразрушения (изолиния с $K_{mp} = 0,6$) уменьшилась с 3,5 м до 2 м.

Из сравнения графиков на рис. 5 следует, что установка крепи привела к увеличению сжимающих напряжений в зоне закрепления анкеров. Это произошло за счет упрочнения угля и пород и сохранения ими несущей способности. Появились локальные зоны упрочнения в окрестности анкерных штанг. Крезь оказала влияние и на смещения контура выработки. После установки крепи конвергенция кровля-почва уменьшилась на 16%, а бок-бок в 1,6 раза.

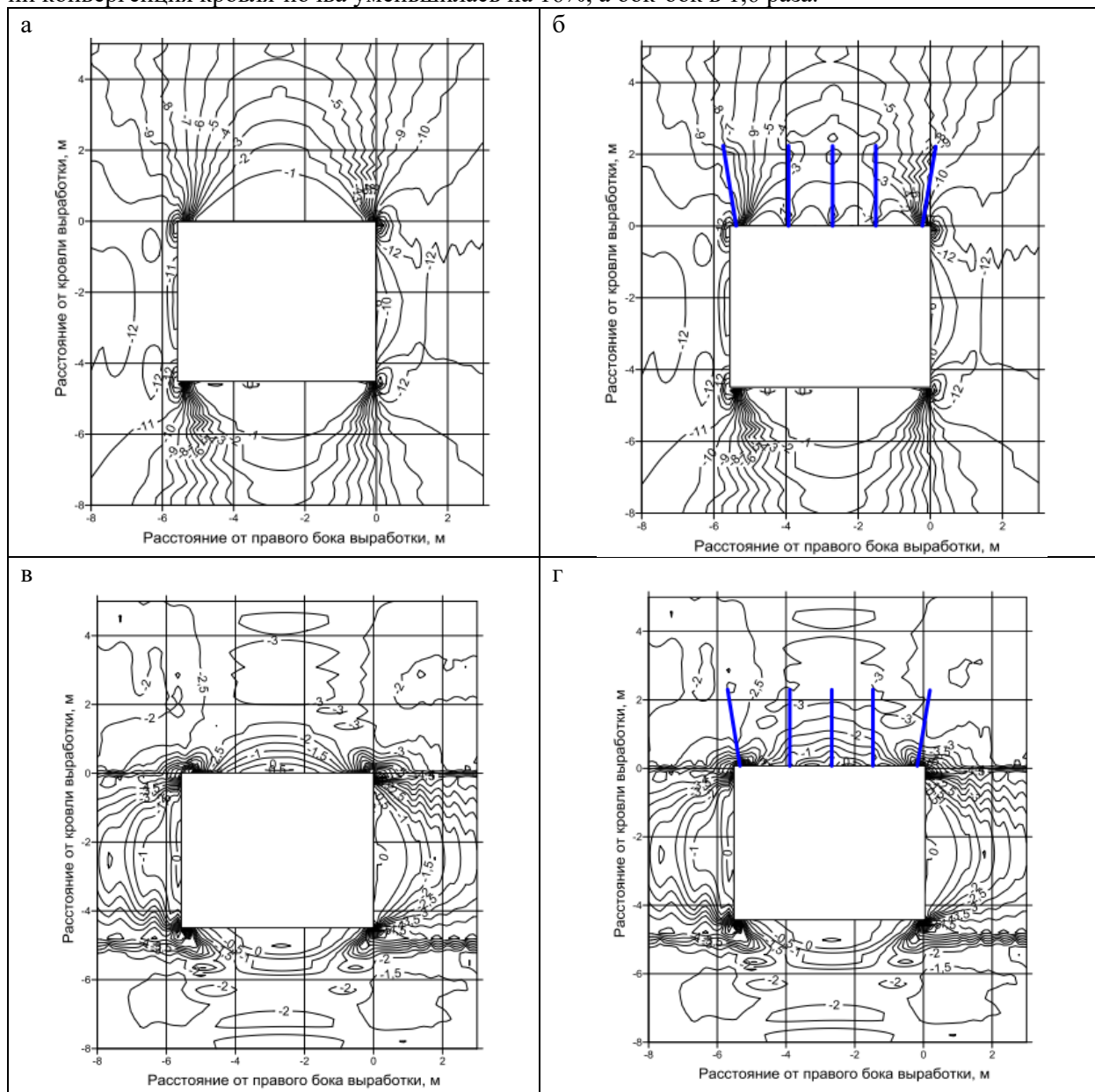


Рис. 5. Распределение изолиний полных вертикальных (а, б) и горизонтальных (в, г) напряжений в окрестности горной выработки (по сечению выработки в месте второго ряда анкерной крепи при глубине заходки 3,8 м): а, в - без крепи; б, г - с пятью анкерами

Вывод. Из результатов проведенных исследований - анализа распределения изолиний полных вертикальных и горизонтальных напряжений в кровле выработки, а также отношения остаточной прочности пород к исходной - следует, что наиболее явные участки расслоений прослеживаются по центру кровли горной выработки. Вероятные формирования систем трещин незакреп-

ленной части выработки возможны на высоту от кровли до 1,6м. Выявленные опасные зоны в приконтурных породах выработки позволят скорректировать техническую документацию проведения и крепления горной выработки. Полученные параметры анкерной крепи уменьшат размеры опасной зоны в окрестности подготовительной горной выработки: максимальное обнажение кровли выработки может быть до 3,8 м для данных горно-геологических и горнотехнических условий.

Список литературы

1. Третенков И.В. Влияние устойчивости породных обнажений в проводимых горных выработках на безопасность проходческих работ // Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах: материалы IV междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2000. – С. 85 – 87.
2. Черняк И.Л., Бурчаков Ю.И. Управление горным давлением в подготовительных выработках глубоких шахт. – М.: Недра, 1984. – 304 с.
3. Анкерное крепление горных выработок для повышения устойчивости углепородного массива / В. Ф. Демин [и др.] // Уголь. – 2013. – №11. – С. 70-73.
4. Яковлев Д. В. Нормативно-методические основы крепления горных выработок анкерной крепью на угольных шахтах России / Уголь. – 2014. – №7. – С. 12-14.
5. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 20629. Комплекс программ для прогноза геомеханических и технологических параметров подземных горных выработок и неоднородных угольных целиков с тестированием численной модели по результатам точечного мониторинга / Д.М. Борзых, С.В. Риб, В.Н. Фрянов ; Гос. акад. наук, ИНИПИ РАО. – 2014. – дата регистр. 09.12.2014.
6. Моделирование численными методами процессов обрушения пород кровли / Ю.М. Говорухин // Горный журнал. – 2019. – № 4. – С. 23–26.
7. Вылегжанин В.Н., Егоров П.В., Мурашев В.И. Структурные модели горного массива в механизме геомеханических процессов. – Новосибирск: Наука, 1990. – 295 с.
8. Домрачев А.Н., Риб С.В., Никитина А.М. Адаптация методов оценки риска обрушения подземных горных выработок к условиям шахт юга Кузбасса // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2016. – № 4. – С. 81–90.

УДК 622.85:622.271.45

ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИЙ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ США С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ

^{1,2}д.т.н. Зеньков И.В.

1 - Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика

М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия

2 - Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты исследования состояния открытых горных работ на угольных месторождениях Монтана, Вайоминг, Северная Дакота в США. В ходе дистанционного мониторинга и аналитических расчетов выявлено количество горных и транспортных машин, работающих в угольных карьерах, а также определен годовой объем экскавации вскрышных пород и угля на территории каждого штата. По результатам спутниковой съемки выявлен тренд в увеличении объемов открытой угледобычи на исследуемой территории США.

Ключевые слова: Соединенные штаты Америки, штаты Монтана, Вайоминг, Северная Дакота, угольные месторождения, открытые горные работы, угольные карьеры, годовой объем добычи угля, горные и транспортные машины, дистанционное зондирование Земли.

Введение. В структуре мировой добычи угля одно из лидирующих мест по праву принадлежит Соединенным штатам Америки. Основной объем добычи угля открытым способом сконцентрирован в трех штатах (Монтана, Вайоминг и Северная Дакота), находящихся в центральной части Североамериканского континента. Изучение экономической географии и основ мировой экономики всегда было связано с изучением размещения производительных сил в мировом формате, важнейшей частью которых является топливно-энергетический комплекс. Изучать мировые центры горной промышленности можно по информации, представляемой в научной литературе, в интернет-источниках. При этом степень достоверности происходящего в той или иной отрасли гор-

нодобывающей промышленности будет существенно разниться. Наша научно-практическая школа занимается исследованиями широкого спектра показателей, характеризующих горную промышленность: технологии разработки месторождений, размещение горных и транспортных машин, логистика, экология. Эти исследования мы проводим с использованием космоснимков высокого разрешения, находящихся в свободном доступе. С появлением технологий дистанционного зондирования Земли из космоса спектр исследований значительно расширился, о чем свидетельствуют работы российских и зарубежных исследователей [1-13]. Наша школа занимается изучением как технологических, так и экологических показателей российских и зарубежных предприятий горной промышленности с использованием спутниковых снимков [14]. По нашему мнению, эта тематика не потеряет своей актуальности в ближайшее десятилетие.

Исследование состояния открытых горных работ на месторождениях угля в штате Монтана. На территории штата Монтана мы выделили три центра открытой угледобычи с координатами на местности $45^{\circ} 46' 59''$ с. и $107^{\circ} 02' 27''$ з., $45^{\circ} 51' 30''$ с. и $106^{\circ} 52' 16''$ з., $45^{\circ} 05' 15''$ с. и $106^{\circ} 52' 16''$ з. По снимкам из космоса установлено, что угольные пласты мощностью до 25 м залегают горизонтально или с небольшим углом наклона в пределах $2-3^{\circ}$. Толща горных пород, покрывающих угольные пласты, состоит из двух слоев: верхний слой рыхлых отложений из горных пород четвертичного возраста, представленных глинами, суглинками, песками и др., имеет мощность до 15 м. Этот слой не требует перед его экскавацией буровзрывного рыхления. Между этим слоем и угольным пластом находятся крепкие песчаники мощностью до 40 м, перед выемкой которых необходимо их рыхление с использованием буровзрывного способа. Отметим, что горно-геологическое строение угольных месторождений в двух других штатах отличается от вышеописанного в сторону увеличения мощности толщи вскрышных пород.

Добыча угля производится в 12 карьерах. Суммарная протяженность фронта добычных работ составляет 37500 м. Выемка угольного пласта производится блоками протяженностью от 600 до 900 м. Половина выемочных блоков находится в затопленном состоянии. В карьерах с небольшой протяженностью фронта горных работ перемещение горной массы производят в карьерных автосамосвалах грузоподъемностью до 360 т. В карьерах, где расстояние между флангами более 2 км на вскрышных работах используют драглайны на перевалке пород в выработанное пространство карьера. Рабочие параметры драглайнов сопоставимы с драглайном ЭШ-100/100, работавшим во времена СССР на Назаровском угольном разрезе в Красноярском крае.

Драглайны вскрывают угольный пласт шириной до 90 м за одну заходку. Мехлопаты с канатным приводом рабочего оборудования и гидравлические экскаваторы с емкостью ковша в диапазоне $30-40 \text{ м}^3$ работают на выемке вскрышных пород в торцах карьера и на экскавации той толщи вскрышных пород, которая по технологическим параметрам не входит в вертикальную зону работы драглайнов. Аналогичными экскаваторами производится выемка угля. Рабочие параметры этих экскаваторов позволяют производить выемку угля одним уступом. В угольных карьерах в этом штате на транспортировке угля используют углевозы с донной разгрузкой грузоподъемностью 240 т и классические автосамосвалы грузоподъемностью до 360 т. Фрагмент выполнения вскрышных работ на опережающем уступе и добычных работ показан на рис. 1 [14].

На рис. 1 в кольце красного цвета мехлопата отгружает песчаники из развала, созданного взрывными работами. Высота забоя экскаватора не менее 20 м. Кольцами оранжевого цвета обведены автосамосвалы грузоподъемностью 240 т,двигающиеся на погрузку к экскаватору. В кольце синего цвета поливочная машина с емкостью водяного бака 80 м^3 через четыре форсунки производит увлажнение технологической автодороги с целью устранения образования пыли при движении по ней технологических автосамосвалов. В кольцах зеленого цвета находятся бульдозеры Caterpillar D11T со сферическими отвалами. Ниже уровня установки вскрышной мехлопаты по вертикали геологического строения месторождения находится слой крепких песчаников серого цвета, покрывающий угольный пласт. Этот слой впоследствии после его рыхления буровзрывным способом будет перевален в выработанное пространство карьера драглайном.

В нижней части рис. 1 в кольце желтого цвета мехлопата с емкостью ковша 40 м^3 отгружает уголь из развала в автосамосвал грузоподъемностью 360 т. Высота добычного экскаваторного забоя не менее 22 м. Направление движения экскаваторов в ходе отработки вскрышного и добычного уступа показано на рис. 1 стрелками. В кольце белого цвета находится погрузчик на автомобильном шасси для выемки нижней пачки угля и недоборов от мехлопаты в приоткосной части экскаваторного забоя.



Рис. 1. Фрагмент космоснимка вскрышных и добычных работ в угольном карьере на территории штата «Монтана» (США)

Расстояние транспортировки угля до пяти стационарных углепогрузочных складов и до тепловой станции с четырьмя энергоблоками общей мощностью 2600 МВт составляет 3-3,5 км. Уголь отгружают в железнодорожные составы из трех мощных магистральных тепловозов (два в голове состава и один в хвосте) и 114-120 вагонов. Общая масса угля в составе 9000 т. Одновременная погрузка составов может производиться на пяти территориально рассредоточенных складах, оборудованных накопительными емкостями силосного типа. Железнодорожные пути, уложенные вдоль силосных башен, имеют в плане форму петли, что обеспечивает непрерывную подачу поездов под погрузку и их сквозное движение. Все это способствует наивысшей производительности погрузочно-транспортных работ и достижению максимальных логистических показателей железнодорожного транспорта.

В угольных карьерах работает следующий парк горнотранспортного оборудования: 10 буровых станков, 9 драглайнов с ковшем емкостью 100 м³ и длиной стрелы 100 м, 11 гусеничных одноковшовых карьерных экскаваторов с емкостью ковша в диапазоне от 20 до 40 м³, 27 углевозов и 38 карьерных автосамосвалов. На выемке угля используют 6 погрузчиков на автомобильном шасси с емкостью ковша 20 м³. По нашей оценке, технологически и технически возможный суммарный годовой объем добычи угля в карьерах на территории штата Монтана составляет 85 млн. т. Годовой объем вскрышных работ выполняется в объеме не менее 195 млн. т.

Исследование состояния открытых горных работ на месторождениях угля в штате Вайоминг. На территории штата Вайоминг добыча угля производится в 25 карьерах в полосе шириной 16-25 км и протяженностью с севера на юг 115 км с координатами вершин на местности 44° 29' 36"с. и 105° 36' 38"з., 44° 29' 48"с. и 105° 23' 45"з., 43° 26' 22"с. и 105° 25' 48"з., 43° 26' 45"с. и 105° 07' 57"з. Рельеф местности, на которой производится разработка угольных месторождений пологий с высотными отметками в диапазоне 1250-1500 м.

Суммарная протяженность фронта добычных работ составляет 79320 м. Выемка угольного пласта производится блоками протяженностью от 670 до 1800 м. В одном из карьеров протяженность фронта работ по добычному уступу составляет 14,5 км. Менее половины выемочных блоков находится в затопленном состоянии. Горные работы в карьерах этого штата производятся по аналогии их производства в штате Монтана. В карьерах с небольшой протяженностью фронта горных работ перемещение вскрышных пород и угля производят карьерными автосамосвалами грузоподъемностью до 360 т и в автоуглевозах грузоподъемностью 240 т. В карьерах, где расстояние между флангами более 1,5 км на вскрышных работах используют драглайны с длиной стрелы 100 м и емкостью ковша 100 м³ для перевалки пород в выработанное пространство карьера.

Рассмотрим технологические аспекты производства вскрышных работ в одном из угольных карьеров на территории штата Вайоминг (рис. 2) [14]. В левой части рисунка мы видим горнотранспортное оборудование, работающее на передовом вскрышном уступе. В момент получения снимка из космоса мехлопата (в кольце красного цвета) находится с поднятой рукоятью с полным ковшем в ожидании порожнего автосамосвала. К экскаватору под погрузку задним ходом двигается автосамосвал (в этом же кольце). В кольце желтого цвета находится порожний автосамосвал. Гру-

женный автосамосвал,двигающийся в направлении породного отвала, обведен кольцом черного цвета. На снимке хорошо видно, что мехлопата в ближайшие часы закончит экскавацию развала. По ходу ее движения в секторе находится взрывной блок, начало которого частично показано на снимке. Взрывные скважины пробурены по диагональной сетке с размерами 10×12 м. Устья взрывных скважин обведены линией красного цвета. В правой части рисунка в секторе, обведенном линией желтого цвета, работают четыре бульдозера Caterpillar D11T со сферическими отвалами и один гидравлический экскаватор типа «обратная лопата» на понижении высоты развала вскрышных пород после взрывных работ. Направление движения экскаватора, установленного на отработке вскрышного уступа, и драглайна показано на рис. 2 стрелками.

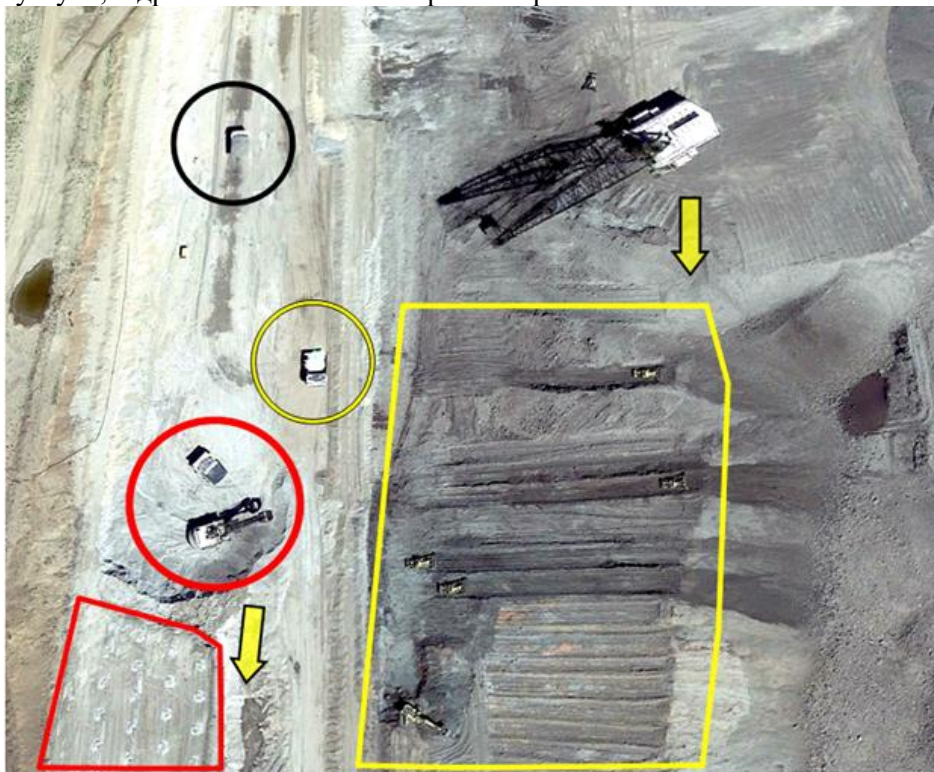


Рис. 2. Фрагмент космоснимка горных работ по вскрытию угольного пласта в карьере на территории штата «Вайоминг» (США)

Расстояние транспортировки угля до 16 стационарных углепогрузочных складов и до трех тепловых станций с шестью энергоблоками общей мощностью 1500 МВт составляет 4-5,5 км. Уголь отгружают в железнодорожные составы общей грузоподъемностью 9000 т. Одновременная погрузка составов может производиться на 16 территориально рассредоточенных складах, оборудованных накопительными емкостями силосного типа.

В угольных карьерах работает следующий парк горнотранспортного оборудования: буровые станки – 35 ед., драглайны с емкостью ковша 100 м³ и длиной стрелы 100 м – 15 ед., гусеничные одноковшовые карьерные экскаваторы с емкостью ковша в диапазоне от 20 до 40 м³ – 68 ед., углевозы – 12 ед. и 376 карьерных автосамосвалов. На выемке угля в секторах его недобора мехлопатами используют 12 погрузчиков на автомобильном шасси с емкостью ковша 20 м³. По нашей оценке, технологически и технически возможный суммарный годовой объем добычи угля в карьерах на территории штата Вайоминг составляет 290 млн. т. При этом годовой объем вскрышных работ должен составлять не менее 610 млн. т.

Исследование состояния открытых горных работ на месторождениях угля в штате Северная Дакота. На территории штата Северная Дакота выделено шесть центров открытой угледобычи и переработки угля с координатами на местности 47° 20' 10"с. и 101° 50' 05"з., 47° 25' 46"с. и 101° 44' 53"з., 47° 20' 30"с. и 101° 13' 45"з., 47° 28' 17"с. и 101° 04' 36"з., 47° 11' 27"с. и 101° 50' 58"з., 47° 05' 22"с. и 101° 20' 11"з. Отметим, что практически весь добытый уголь на территории этого штата перерабатывается на месте. По данным спутниковой съемки выявлено 8 угольных карьеров с общей протяженностью фронта работ по добычному уступу 18800 м. В непосредственной близости от угольных карьеров производят выработку электрической энергии 4 тепловые станции с установленной мощностью энергоблоков не менее 2000 МВт. Рядом с электростанциями работают

два химических завода по выпуску минеральных удобрений с разной годовой мощностью, запитанных с электростанций. Внешним потребителям уголь отгружают в железнодорожные составы на одном стационарном складе, оборудованном силосными накопительными емкостями.

В технологиях открытой разработки угольных месторождений используют аналогичное горнотранспортное оборудование, на котором базируется открытая разработка месторождений угля в штатах Монтана и Вайоминг. В угольных карьерах на территории штата Северная Дакота работает такой парк горнотранспортного оборудования: 9 буровых станков, 8 драглайнов с емкостью ковша 100 м³ и длиной стрелы 100 м, 25 гусеничных одноковшовых карьерных экскаваторов с емкостью ковша в диапазоне от 20 до 40 м³, 28 углевозов и 58 карьерных автосамосвалов. На выемке угля используют 4 погрузчика на автомобильном шасси с емкостью ковша 20 м³. По нашей оценке, технологически и технически достижимый суммарный годовой объем добычи угля в карьерах на территории штата Северная Дакота находится на уровне 70 млн.т. При этом годовой объем вскрышных работ должен быть не менее 145 млн. т.

Как показал обзор архива космоснимков, на исследуемой территории выявлено четырехкратное увеличение масштаба добычи угля открытым способом за последние 30 лет.

Вывод. По результатам спутниковой съемки, как средства объективного контроля, освобожденного от субъективистских оценок, определен технологически и технически достижимый уровень производственных мощностей по добыче угля в трех штатах США – Монтана, Вайоминг и Северная Дакота. По нашей оценке, общий объем добычи угля в карьерах на территории этих штатов по параметрам технологий производства горных работ и производительности горной техники находится на уровне 445 млн. т в год. При этом необходимо обеспечить объем вскрышных работ на уровне 950 млн. т, что является технически достижимым показателем. Вместе с тем фактический объем добычи угля будет регламентироваться рыночным спросом.

Список литературы

1. Титкова Т.Б. Изменение климатических условий формирования зимнего стока в бассейне Верхнего Дона по спутниковым и наземным данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. – № 1. – С. 147-157.
2. Елсаков В.В., Щанов В.М. Современные изменения растительного покрова пастбищ северного оленя Тиманской тундры по результатам анализа данных спутниковой съемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. – № 2. – С. 128-142.
3. Терехин Э.А., Постернак Т.С. Процессы лесовозобновления на залежных землях юга Западной Сибири и их анализ с применением данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. – № 4. – С. 161-172.
4. Методика оценивания эколого-экономического ущерба водным объектам по данным дистанционного зондирования Земли / О.В. Григорьева [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15. – № 1. – С. 233-244.
5. Жданова Е.Ю., Чубарова Н.Е. Пространственная изменчивость аэрозольной оптической толщины на территории Московского региона по спутниковым и наземным данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15. – № 7. – С. 236-248.
6. UAV-derived estimates of forest structure to inform ponderosa pine forest restoration / Adam Belmonte [and etc.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2020. – V. 6. – I. 2. – PP. 181-197.
7. Automated identification of avian vocalizations with deep convolutional neural networks / Zachary J. Ruff [and etc.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2020. – V. 6. – I. 1. – PP. 79-92.
8. Including 38 kHz in the standardization protocol for hydroacoustic fish surveys in temperate lakes / Anne Mouget [and etc.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2019. – V. 5. – I. 4. – PP. 332-345.
9. Detecting bird movements with L-band avian radar and S-band dual-polarization Doppler weather radar / Sidney A. Gauthreaux Jr [and etc.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2019. – V. 5. – I. 3. – PP. 237-246.
10. Remote sensing of three-dimensional coral reef structure enhances predictive modeling of fish assemblages / Lisa M. Wedding [and etc.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2019. – V. 5. – I. 2. – PP. 150-159.
11. Automated detection of bird roosts using NEXRAD radar data and Convolutional Neural Networks / Carmen Chilson [and etc.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2019. – V. 5. – I. 1. – PP. 20-32.
12. Phillip M. Stepanian, Djordje Mirkovic, Phillip B. Chilson. A polarimetric Doppler radar time-series simulator for biological applications // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2018. – V.4. – I. 4. – PP. 285-302.
13. Looking beyond wildlife: using remote cameras to evaluate accuracy of gridded snow data / Alexej P. K. Si-rén [and etc.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2018. – V. 4. – I. 4. – PP. 375-386.
14. <https://www.google.com.earth>.

ПРИМЕНЕНИЕ БЕТОНА ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА В ТЕХНОЛОГИИ БЕСТРАНШЕЙНЫХ МЕТОДОВ ПРОВЕДЕНИЯ КОММУНИКАЦИЙ

к.т.н. Корнеев В.А., к.т.н. Корнеева Е.В., Корнеев П.А., Кулебакин И.И.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье предлагается использование бетона из техногенных отходов сталеплавильного производства для защиты электрических кабелей от внешних воздействий при их прокладке бестраншейным методом.

Ключевые слова: отходы, бестраншейный метод, тампонажный раствор, технология набрызгобетонирования.

Проведение инженерных коммуникаций к зданиям и сооружениям, а также их ремонт открытым способом в условиях современной застройки городского сектора вызывает определённые трудности, обусловленные плотным расположением объектов инфраструктуры.

Упрощение технологических операций, повышение их оперативности, снижение себестоимости при прокладке подземных инженерных коммуникаций, а также сохранение ландшафта, может быть достигнуто за счёт применения бестраншейных методов. При подведении сетей электроснабжения к зданиям и сооружениям, как в России, так и за рубежом, эта технология получила широкое распространение. Ее суть заключается в бурении горизонтальной скважины специальной буровой установкой с дальнейшим размещением в ней кабеля в трубе, изготовленной из полиэтилена низкого давления (ПНД) [1].

Совершенствование бестраншейного метода проведения коммуникаций возможно в различных направлениях, одним из которых является поиск новых материалов для обсадки скважины с кабелем, способных заменить ПНД трубы, использование которых противоречит мировым трендам, направленным на снижение в хозяйственном обороте изделий, изготовленных из полиэтилена.

Наиболее целесообразным решением задачи по креплению стенок скважины без использования ПНД труб, является технология набрызгобетонирования с использованием бетона из техногенных отходов сталеплавильного производства.

Комплексная переработка техногенных отходов топливно-энергетического комплекса Кузбасса и производство строительных композиционных смесей различных классов по прочности, плотности и водонепроницаемости на их основе является основополагающей концепцией современного строительного материаловедения.

Значительная часть твердых минеральных отходов Кузбасса – шлаки сталеплавильного производства, выпускаемые и накопившиеся в больших количествах на крупнейших металлургических предприятиях полного цикла ОАО «Западно-Сибирский металлургический комбинат» и ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат», обеспечивающих значительную часть потребности страны в металле. Дальнейшее их интенсивное пополнение представляет серьезную экологическую опасность для региона.

На физико-механические свойства и состав шлаков предприятий, оказывает влияние минерально-сырьевая база, представленная железорудными месторождениями Алтае-Саянской складчатой области и Ангаро-Илимского железорудного района (руды с магнезиальной пустой породой и повышенным содержанием Al_2O_3), известняками Салаира, доломитами Горной Шории и кварцитами Антоновского рудника.

Сталеплавильные шлаки – это силикатные системы, по химическому составу близкие к портландцементу (оксид кальция в них связан в алюмосиликаты и силикаты), после активации (измельчения, включения активизирующих добавок) приобретают гидравлическую активность.

В работе, выполненной в соответствии с утвержденной стратегией социально-экономического развития Сибири, предлагается энергонасыщенные крупнотоннажные отходы сталеплавильного производства использовать в качестве сырья для бесцементной тампонажной смеси.

Тампонажные смеси широко используются при выполнении различных строительных работ: укрепления грунтов в основаниях зданий и сооружений, откосов и бортов котлованов и оползневых участков; строительстве подземных уличных переходов, развязок транспортных магистралей,

коллекторов, тоннелей, метрополитенов неглубокого заложения, дамб хвостохранилищ и шламо-накопителей а также в гидротехническом строительстве [2, 3].

Основное требованием при проектировании бесцементного тампонажного состава – получение заданных показателей качества.

В результате расчета соотношения компонентов был определен состав базового тампонажного материала (табл. 1).

Таблица 1

Состав тампонажного материала

Компоненты состава		Удельная поверхность, $S_{уд}$ (плотность, ρ)	Количество (% мас.)
Шлак ОАО «ЗСМК»	конверторный	$S_{уд} = 340 \text{ м}^2/\text{кг}$	48 - 50
	электросталеплавильный		33 - 35
Горелая порода шахтных отвалов			10
Шлам		$\rho = 1,310 \text{ г/см}^3$	остальное

Результаты проведенных лабораторных исследований по определению прочности при сжатии и водостойкости тампонажных составов с различным соотношением компонентов представлены в табл. 2.

Эксперименты показали, что при добавлении горелой породы в количестве < 9% уменьшается коэффициент размягчения (состав становится не водостойким), при добавлении > 11% уменьшается прочность тампонажного камня. Прочность получается недостаточной и при добавлении шлама > 8%, а < 6% не будет достигнута нужная консистенция смеси.

Таким образом, на основании экспериментов определен оптимальный состав тампонажного материала (состав №4) водостойкий, с прочностью при сжатии в возрасте 28 суток 11,18 МПа (М 100).

Таблица 2

Результаты экспериментов

№ состава	Вещественный состав, %, по массе				Прочность, МПа		Коэффициент размягчения	Примечание
	шлак		горелая порода	шлам	$R_{сух.}$	$R_{в.}$		
	конверторный	электросталеплавильный						
1	40	45	3	12	4,22	3,05	0,72	не водостойкий
2	45	40	5	10	8,43	6,12	0,72	не водостойкий
3	48	35	9	8	10,15	8,39	0,83	водостойкий
4	49	34	10	7	11,18	9,56	0,85	водостойкий
5	50	33	11	6	9,56	7,84	0,82	водостойкий

Поскольку для бесцементных тампонажных растворов из техногенного промышленного сырья не существует Рекомендаций по подбору составов и технологии их приготовления с оптимальными характеристиками, использовались натурные эксперименты.

Основным требованием при проектировании составов бесцементных тампонажных растворов является получение заданных показателей качества готовой продукции в соответствии с ГОСТ 1581-96 Портландцементы тампонажные. Технические условия.

Для возможности применения полученного композиционного состава в качестве базового тампонажного материала, изучались его физико-механические свойства: реологические (тампонажного раствора) и прочностные (характеристики затвердевшего камня). Определение основных

свойств тампонажного раствора и камня проводили в соответствии с ГОСТ 26798.1-96 Цементы тампонажные. Методы испытаний (табл. 3).

Таблица 3

Результаты испытаний разработанного тампонажного материала

Показатели	Результаты испытаний	Требования по ГОСТ 1581-96
Тонкость помола – удельная поверхность, м ² /кг	320	не менее 270
Водошламовое отношение	0,5	-
Плотность раствора, кг/м ³	1960	-
Плотность камня, кг/м ³	2000	-
Прочность при изгибе в возрасте 2 сут., МПа	2,79 - 3,98	не менее 2,7
Прочность при сжатии в возрасте 2 сут., МПа	5,22 – 5,68	-
Водоотделение, мл	< 1	не более 8,7
Время загустевания до консистенции 30 Вс, мин.	1200 - 1440	не менее 90

Вывод. Результаты экспериментов показали, что разработанный тампонажный материал на неорганической основе (из вторичных минеральных ресурсов) в результате сложных физико-химических процессов [4] превращается в тампонажный камень, и удовлетворяет основным требованиям ГОСТ 1581-96. Усадка и трещины при твердении отсутствуют. На разработанный состав получен патент «Тампонажный раствор» [5].

Список литературы

1. Бестраншейная прокладка кабеля. – Режим доступа: <http://бурение1.рф/kabel>.
2. Тонкодисперсное композиционное вяжущее для закрепления грунтов инъекционным способом / А.Н. Гришин [и др.] // Вестник МГСУ. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 12. – Вып. 11 (110).
3. Применение шлакощелочных вяжущих в технологии струйной цементации для усиления грунтов / А.И. Харченко [и др.] // Вестник МГСУ. Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 14. – Вып. 6.
4. Корнеева Е.В., Бердов Г.И. Формирование бесцементных систем твердения на основе оксидоудержающих техногенных продуктов // Глобальный научный потенциал. – 2016. – № 9 (66).
5. Пат. 2642736 РФ, МПК Е 21 В 33/138. Тампонажный раствор / Е.В. Корнеева ; заявл. 28.02.17; опубл. 25.01.18. – Бюл. № 3.

УДК 622.06

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОТРАБОТКИ МОЩНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ НА ШАХТАХ ЮЖНОГО КУЗБАССА

Варгольских А.А.

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачёва,
г. Кемерово, Россия

Аннотация. По результатам статистического анализа фактических показателей очистных забоев на восьми мощных угольных пластах Кузбасса выявлены факторы, ограничивающие рост объёмов добычи угля. Обоснованы технологические решения по рациональному управлению труднообрушаемыми породами кровли, форма и размеры угольных целиков, обеспечивающих устойчивость охраняемых выработок и изоляцию выработанного пространства от эндогенных пожаров.

Ключевые слова: мощный пласт, система разработки, угольный целик, обрушение кровли, очистной забой

По запасам угля Российская Федерация занимает второе место в мире. В нашей стране сконцентрировано по разным данным от 17,6 до 18,2% этого полезного ископаемого. В абсолютных цифрах это свыше 157 млрд. т (107,9 млрд. т бурого угля и 49,1 млрд. т каменного).

Угольные запасы сосредоточены в 22 бассейнах и 129 отдельных месторождениях. Не все они имеют промышленное значение. Большинство угольных предприятий сконцентрировано в Сибири и на дальнем Востоке [1]. Большинство месторождений углей в Кузбассе многопластовые. Средняя мощность угольных пластов в бассейне равна 4 м. Имеются значительные запасы углей – 31,8 млрд. т, добыча которых может осуществляться открытым способом. Основная масса этих

углей – 19,4 млрд.т или 60,9% сосредоточена в пластах мощностью от 3,51 до 15 м; 11,9 млрд. т (37,5%) сконцентрирована в пластах от 1,21 до 3,5 м и 496 млн. т в пластах мощностью свыше 15 м [2].

Результаты статистического анализа объёмов суточной добычи по результатам работы восьми очистных забоев на мощных пластах шахт Томь-Усинского и Ерунаковского месторождений представлены на рис.1. Как следует из графиков объёмы суточной добычи изменяются в широких пределах. Это подтверждается коэффициентами вариации V , вычисленными согласно [3] по формуле:

$$V = \frac{s}{\bar{x}} 100\%, \quad (1)$$

где s – среднее квадратическое отклонение, т/сут; $\bar{x}$ – среднее значение исследуемого показателя, т/сут.

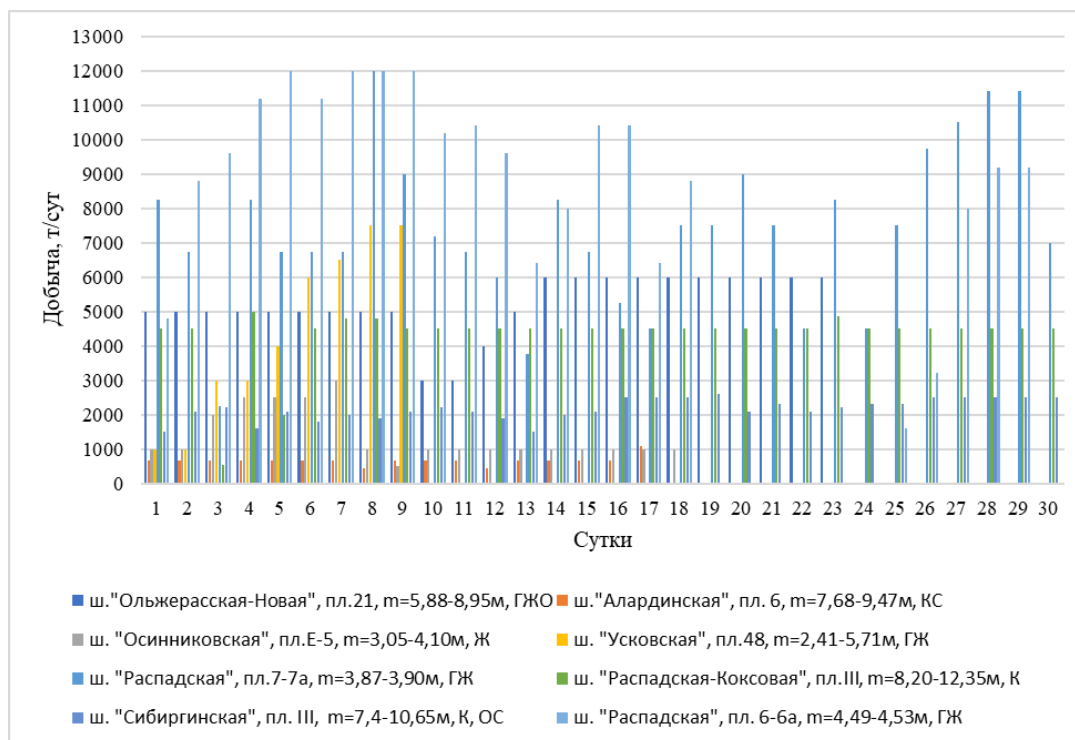


Рис. 1. Суточная добыча из очистных забоев на пластах мощностью $m > 3,5$ м

По результатам расчётов по формуле (1) установлено, что с увеличением мощности пласта коэффициент вариации возрастает от 33 до 59%, то есть мощность пласта является фактором, определяющим уровень добычи и промышленной безопасности. Полученные результаты статистической обработки показателей работы очистных забоев подтверждают актуальность исследований технологии отработки мощных пологих пластов с целью обоснования инновационных технологических решений, обеспечивающих повышение стабильности работы шахт в целом.

По результатам качественно-количественного анализа показателей работы очистных забоев на мощных пластах выявлены следующие факторы, негативно влияющие на эффективность и безопасность ведения горных работ [4, 5]:

- обрушения межслоевой пачки при отработке нижнего слоя по слоевой системе разработки мощного пласта;
- остановки очистного забоя при проведении профилактических мероприятий для предотвращения динамических явлений и эндогенных пожаров;
- склонность углей к самовозгоранию;
- наличие в геологической толще трудно обрушаемых пород;
- повышенная концентрация напряжений в краевых участках пластов и в угольных целиках.

Проведён анализ процессов и операций при негативном влиянии указанных факторов и выявлены направления по совершенствованию технологии отработки мощных пластов. Предлагается замена комплекса локальных мероприятий, выполняемых в зоне работы высокопроизводительных машин при обязательной их остановке по условиям безопасности, региональными мероприятиями, выполняемыми заблаговременно.

Например, приведение горного массива в безопасное состояние с применением региональных (дистанционных) способов, при постоянном мониторинге напряженно-деформированного состояния массива многофункциональной системой безопасности, с последующей интерпретацией результатов разгружающего воздействия на массив и выдачей разрешения на возобновление горных работ [6]. Для реализации региональных способов разгрузки массива горных пород необходимо применять геофизические методы контроля эффективности мероприятий [7].

Сложность отработки склонных к эндогенным пожарам мощных пологих угольных пластов с разделением на наклонные, горизонтальные либо поперечно-наклонные слои заключается в необходимости оставлении целиков различного назначения для охраны и поддержания выработок, оконтуривающих выемочную единицу и изоляции выработанного пространства на каждом слое. Поэтому предлагается вариант отработки мощных угольных пластов с выпуском угля подкровельной толщи в призабойное пространство нижнего слоя [5]. Эффективность этой системы разработки практически доказана шахтах Китая и России. При отработке угольных пластов с выпуском угля подкровельной толщи сокращается количество целиков, но между соседними выемочными столбами оставляется целик, ширину которого можно определять по действующим методическим документам.

Вывод. Для повышения стабильности добычи угля из очистных забоев рекомендуется:

- заблаговременное проведение мероприятий по разгрузке массива горных пород без остановок работы высокопроизводительного оборудования;
- применение системы разработки пласта на полную мощность с выпуском подкровельной толщи на конвейер нижнего слоя.

Список литературы

1. Добыча угля в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gruntovozov.ru/chastozadavayemiye-voprosy/dobyicha-kamennogo-uglya/dobyicha-uglya-v-rossii/>.
2. Большой архив документов. Большинство месторождений углей в Кузбассе многопластовые [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://odnopartiec.ru/5464>.
3. Теория статистики: учеб.-метод. комплекс // В.Г. Минашкин [и др.]. – М.: Изд. центр ЕАОИ. – 2008. – 296 с.
4. Отработка мощного угольного пласта механизированным комплексом с выпуском подкровельной пачки / С.И. Калинин [и др.]. – Кемерово: КузГТУ, 2011. – 224 с.
5. Клишин В.И. Обоснование технологий разработки мощных пологих и крутых угольных пластов с выпуском угля // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – №6. – С. 36-47.
6. Вернигор В.М. Технология управления состоянием горного массива [Электронный ресурс] / Neftegaz.RU. – 2019. – №10. – Режим доступа: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/prombezopasnost/499933-tekhnologiya-upravleniya-sostoyaniem-gornogo-massiva/>.
7. Методические указания по созданию систем контроля состояния горного массива и прогноза горных ударов как элементов многофункциональной системы безопасности угольных шахт / Д.В. Яковлев [и др.]. – СПб.: ВНИМИ, 2012. – 83 с.

ГОРНЫЕ МАШИНЫ И ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

**ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОМПЛЕКСОВ ГЛУБОКОЙ РАЗРАБОТКИ
УГЛЯ МЕТОДАМИ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ**

¹Копытин Д.В., ¹д.т.н. Тацienко В.П., ^{1,2,3}д.т.н. Герике Б.Л., ¹к.т.н. Дрозденко Ю.В.,
⁴к.т.н. Артамонов П.В.

1 – Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
г. Кемерово, Россия

2 – Прокопьевский филиал КузГТУ, г. Прокопьевск, Россия

3 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

4 – Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. На основе результатов диагностического обследования комплекса глубокой разработки угля построены опорные спектральные маски для каждого из узлов и агрегатов, нормирующие уровень интенсивности вибрации в различных частотных областях спектров, которые были использованы для оценки их технического состояния, а результаты мониторинга которых на протяжении 2-х лет подтвердили эффективность использования подхода для перехода на систему профилактического обслуживания.

Ключевые слова: открыто-подземная разработка, комплекс SHM, оценка технического состояния, техническое обслуживание, вибродиагностика, спектральные маски.

Введение. Анализ использования основного технологического оборудования для добычи угля открытым и подземным способами свидетельствует об усиливающейся зависимости шахт и разрезов от поставок импортного оборудования и запасных частей к нему [1, 2]. Особенно это заметно при ведении открытых горных работ, где доля импортного оборудования достигает 84%, а при комбинированном открыто-подземном способе – 100%.

В этих условиях особо остро ставятся вопросы технического обслуживания и ремонта этого оборудования [3]. Это связано с тем, что изменяются подходы к эксплуатации горношахтного и горнотранспортного оборудования, усложняется сама техника и технологические процессы её эксплуатации, ужесточаются требования промышленной и экологической безопасности. Большое количество разнообразных узлов и агрегатов, входящих в состав этого оборудования, имеют скрытый характер зарождения и развития неисправностей, что нередко становится причинами аварийных ситуаций [4]. Ряд аварий и техногенных катастроф различного масштаба последних лет заставляют по-новому переосмысливать требования к достоверности оценки текущего состояния оборудования и определению его остаточного ресурса с учетом последних достижений науки в области технической диагностики [5, 6].

На сегодняшний день на угольных предприятиях Кузбасса за основу принята система планово-предупредительных ремонтов оборудования, основной задачей которой является обеспечение работоспособности оборудования в течение заданного времени при минимальных затратах труда и материальных ценностей. Независимо от условий работы деталей и сборочных единиц горной техники ремонты планируются по календарному (или машинному) времени работы или объему переработанной горной массы.

Все это приводит [7-10]:

- к недоиспользованию ресурса отдельных деталей, агрегатов и сборочных единиц горного оборудования;

- к выполнению увеличенного объема разборочно-сборочных работ, не соответствующих техническому состоянию механизмов и увеличению вероятности быстрого изнашивания деталей, вызываемой приработкой из-за частой разборки и сборки;

- к значительному времени нахождения горного оборудования в ремонте.

Система планово-предупредительных ремонтов во многих случаях может быть принята за основу при обслуживании несложных машин и механизмов, но для основного безрезервного оборудования ее применение нецелесообразно. Поэтому дальнейшее развитие системы ремонтов должно предусматривать:

- установление дифференцированных критериев оценки ресурса деталей, сборочных единиц и агрегатов горного оборудования, учитывающих конкретные условия их эксплуатации;

- назначение конкретных сроков и объемов работ при ремонтах горного оборудования в зависимости от его фактического технического состояния.

Для решения всего спектра задач, связанных с повышением надежности работы оборудования и сокращением затрат на его обслуживание и ремонт, одной диагностической информации недостаточно [5, 6, 11]. Необходима реализация целого комплекса мероприятий, объединенных в рамках общей стратегии эффективной эксплуатации, обслуживания и ремонта оборудования. К таким мероприятиям относятся:

- достоверная оценка технического состояния всего парка технологического оборудования;
- своевременное выявление неисправностей и прогноз остаточного ресурса с использованием всего арсенала методов и средств технического диагностирования;
- контроль узлов и агрегатов горного оборудования на всех этапах жизненного цикла (входной контроль в процессе монтажа, приемосдаточные испытания, эксплуатация, предремонтный и послеремонтный контроль).

Постановка задачи. В мировой практике уже несколько десятилетий успешно применяется система разработки «Superior Highwaal Miners» (рис. 1) для добычи каменного угля открыто-подземным способом [12, 13]. Модели SHM-28 и SHM-29, произведенные фирмой SHM (г. Беркли, штат Вирджиния, США), являются первыми машинами такого рода, работающими в России. Эти системы являются идентичными и позволяют разрабатывать уголь из борта карьера на глубину до 270 м. Регулируемая высота качания исполнительного органа от 1,2 м до 3 м позволяет производить эффективную выемку угля из пластов мощностью от 1,3 до 3,0 м.



Рис. 1. Общий вид комплекса Superior HighwaalMiners

Опыт эксплуатации двух комплексов SHM-28 и SHM-29 на ЗАО «Разрез Распадский» ПАО «Распадская» [14, 15] показал хорошие результаты по добыче угля комбинированным открыто-подземным способом, но и выявил некоторые недостатки, присущие этому комплексу. Так, отсутствие сервисной службы требовало создания и внедрения системы профилактического обслуживания комплексов SHM на базе результатов мониторинга технического состояния и прогнозирования его изменения.

Методика проведения исследований. Для контроля технического состояния механического оборудования хорошо зарекомендовал себя метод вибрационного контроля [7, 10, 16], который позволяет обнаруживать до 77% возможных износовых отказов. Вибрационная диагностика применяется для:

- контроля текущего состояния оборудования;
- разделения множества возможных технических состояний агрегата на два подмножества – исправных и неисправных;
- обнаружения возможного дефекта на ранней стадии и прогнозирование его развития во времени;
- снижения риска возникновения аварийной ситуации;
- оценки остаточного ресурса, сроков и объемов ремонтных работ.

Ряд методов вибродиагностики основан на том, что определенные механические дефекты по мере развития генерируют вибрацию в определенных частотных полосах с определенным соотношением величин параметров, что требует использования так называемых спектральных масок для нормирования величины вибрации в различных частотных диапазонах:

$(0,5...2,5) \times f_r$ – для обнаружения дисбаланса и расцентровки;

$(7,5...15,5) \times f_r$ – для обнаружения дефектов в подшипниках качения;

$(2,5...10,5) \times f_r$ – для предупреждения о нарушениях жесткости;

$(z \pm 1) \times f_r$ – для распознавания дефектов зубчатых муфт и зубчатых передач,

где f_r – частота вращения приводного двигателя, z – число зубьев.

Для определения «нормального» состояния оборудования комплексов SHM был использован метод «средненормального» состояния – когда в качестве критериев «нормального» состояния принимались среднестатистические величины контролируемых параметров заведомо работоспособного агрегата, полученные при обработке результатов нескольких периодических измерений.

Выбор того или иного типа определения границы «хорошего» состояния зависит от статистического разброса данных замеров.

В первую очередь из данных, предназначенных для анализа, были исключены вызывающие сомнение в их достоверности. Для проверки однородности выборки, характеризующей достоверность статистических выводов, и исключения из дальнейшей обработки резко отклоняющихся значений, связанных с ненормальной работой агрегатов, целесообразно использовать критерий грубых ошибок наблюдений при допущении, что полученный экспериментальный ряд значений вибрации (выборка) подчиняется нормальному закону распределения

$$X_{np} = X_m + S q_{q,n},$$

где X_m – среднее арифметическое результатов измерений; S – оценка среднеквадратического отклонения результатов измерений; $q_{q,n}$ – квантиль распределения величины, взятый из таблиц для уровня значимости $\alpha = 99\%$ ($q_{q,n}=3$).

Все спектры, полученные в одноименных измерительных точках, рассматривались в частотном диапазоне, содержащем до 40-й гармоники частоты вращения ротора, для определения зон наибольшей гармонической активности.

Поскольку рекомендации стандарта ISO 2372 положены в основу национальных стандартов промышленно развитых стран (в том числе и большинства из действующих стандартов России), то при развертывании программы мониторинга технического состояния были использованы опорные спектральные маски, представленные в табл. 1.

В соответствии с требованиями табл. 1 были построены опорные спектральные маски, характеризующие каждый тип агрегатов, используемых на комплексах типа SHM.

Таблица 1

Опорные спектральные маски

Частотная полоса	Коэффициенты к среднеквадратическому значению виброскорости $V_{СКЗ}$	
	Тревога	Предупреждение
10... 1000 Гц	1	0,63
2 (10) Гц ...1,5 $\times f_r$	0,75	0,50
2 $\times f_r$	0,50	0,32
(3...4) $\times f_r$	0,32	0,20
(5...20) $\times f_r$	0,40	0,25
(21...50) $\times f_r$	0,25	0,20
Пиковое значение виброускорения, м·с ⁻²		
1 ... 10 кГц	40	20

На рис. 2 в качестве примера приведены опорные спектральные маски левого и правого приводов рабочего органа, на которых желтым цветом выделена граница «предупреждение», а оранжевым – граница «тревога».

Аналогичным образом были построены опорные спектральные маски для всех агрегатов, используемых на комплексах типа SHM (привода рабочего органа, привода погрузчика, приводов шнековых конвейеров, приводов маслостанции и насоса системы охлаждения, приводов скребкового конвейера и ленточного перегружателя).

Результаты исследований. Работа по проведению вибродиагностического обследования была проведена в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ ISO 10816-1-97 «Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях» и ГОСТ 12.1.012-2004 «Вибрационная безопасность. Общие требования».

Измерения и анализ параметров вибрации произведены с использованием коллектора/анализатора данных Кварц CU-060 №15 и программного обеспечения Диамант 2.04.

Построенные по результатам первичных обследований опорные спектральные маски позволили ускорить процесс анализа полученных в результате мониторинга данных, поскольку из анализа были исключены те результаты, в которых уровень вибрационного сигнала не превышал уровня «предупреждение».

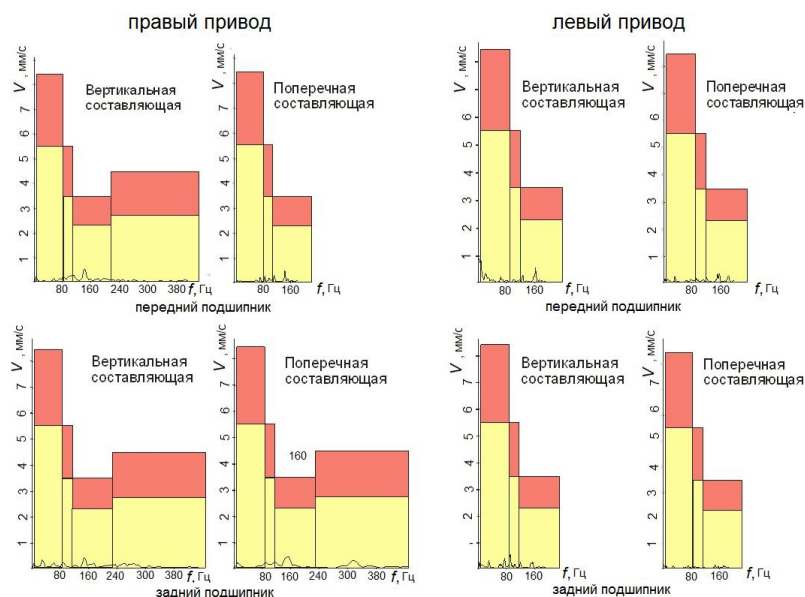


Рис. 2. Обобщенные спектральные маски для приводов режущей части комплекса Superior Highwaal Miners

Для дальнейшего анализа были выбраны 2 агрегата (привод скребкового конвейера и привод ленточного перегружателя, рис. 3), на которых была зафиксирована повышенная вибрация, превышающая границу «тревога».

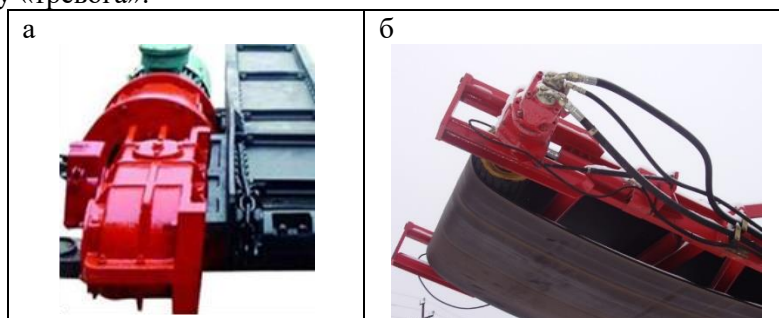


Рис. 3. Привода скребкового конвейера (а) и ленточного перегружателя (б) комплекса Superior Highwaal Miners

По общему уровню интенсивности вибрации техническое состояние привода ленточного перегружателя оценивается как **недопустимое**. Максимальная величина интенсивности вибрации зафиксирована на переднем подшипнике выходного вала редуктора.

На рис. 4 приведены спектры вибрации на заднем подшипнике приводного гидродвигателя ленточного перегружателя, а на рис. 5 – на выходном валу редуктора.

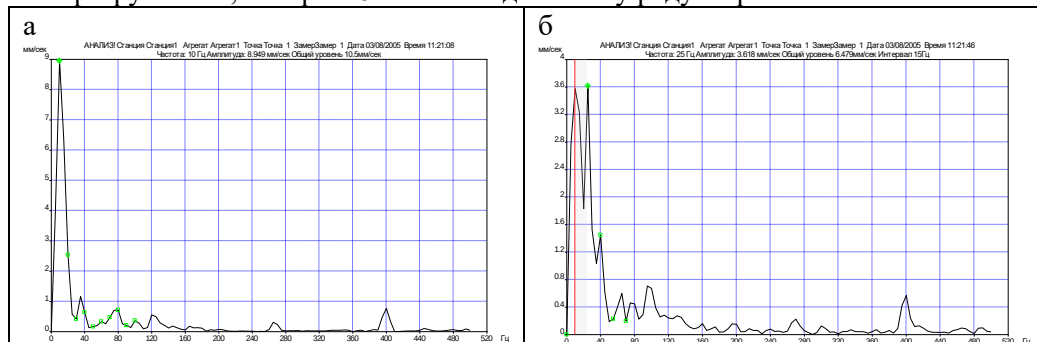


Рис. 4. Интенсивность вибрации на заднем подшипнике гидродвигателя ленточного перегружателя: а - вертикальная составляющая; б - поперечная составляющая

Спектральный анализ механических колебаний указывает на недопустимый дисбаланс выходного вала редуктора (а, следовательно, приводного барабана перегружателя), причем амплиту-

ды спектральных компонент на частоте ≈ 5 Гц достигают недопустимых величин (например, в вертикальной составляющей виброскорости, измеренной во 2 контрольной точке, амплитуда этой компоненты равна ≈ 17 мм/с). Кроме того, в спектре отмечаются зубцовые частоты (вторичные признаки проявления недопустимого дисбаланса). Результаты анализа позволяют утверждать о необходимости балансировки выходного вала редуктора и приводного барабана.

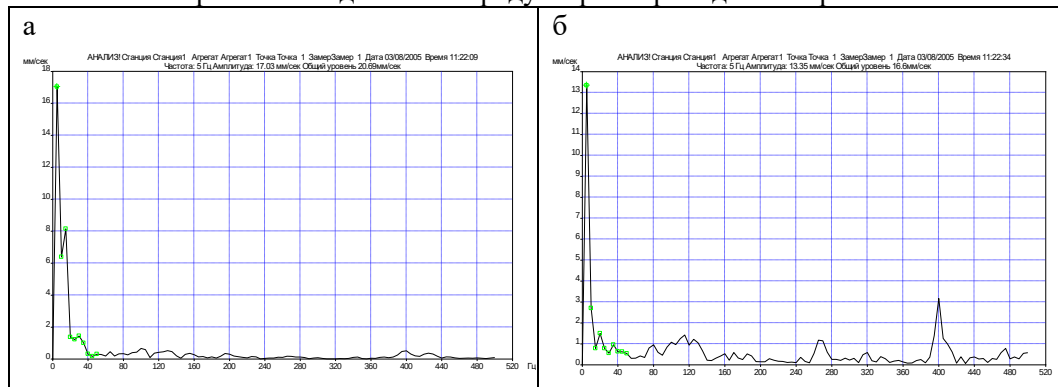


Рис. 5. Интенсивность вибрации на редукторе ленточного перегружателя:
а - вертикальная составляющая; б - поперечная составляющая

По общему уровню интенсивности вибрации техническое состояние привода скребкового конвейера также оценивается как **недопустимое**. Максимальная величина интенсивности вибрации зафиксирована на заднем подшипнике двигателя.

Максимальная зафиксированная величина $V_{СКЗ} = 13,7$ мм/с свидетельствует о недопустимом уровне вибрации приводного электродвигателя (рис. 6).

Спектральный анализ механических колебаний указывает на недопустимый дисбаланс ротора электродвигателя. Техническое состояние редуктора – допустимое (в спектре механических колебаний отмечаются зубцовые частоты). В качестве рекомендаций можно сделать вывод о необходимости двухплоскостной балансировки ротора электродвигателя и ревизии редуктора.

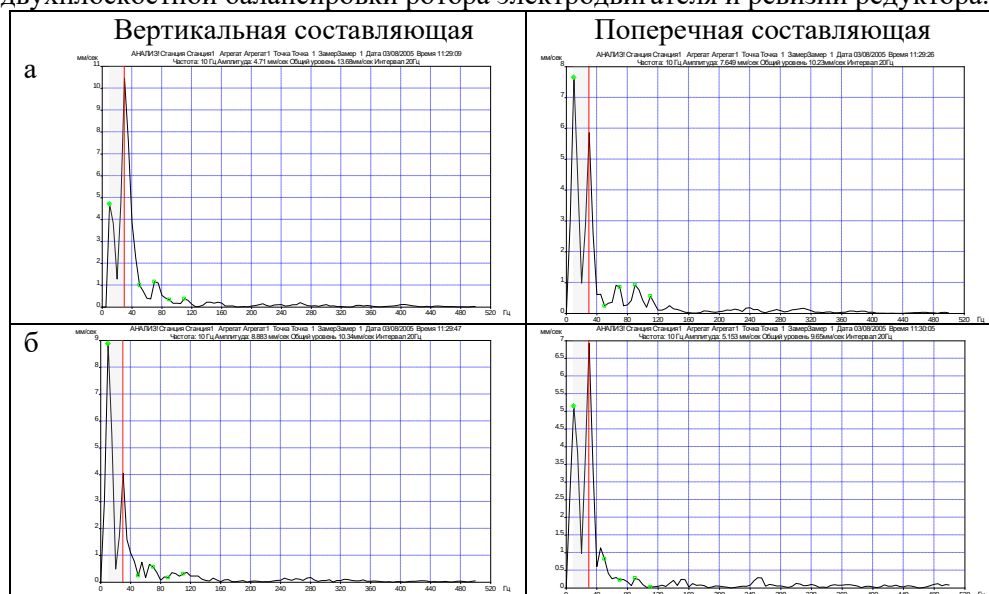


Рис. 6. Интенсивность вибрации на двигателе скребкового конвейера: а – передний подшипник, б – задний подшипник

Обсуждение результатов. Как известно, наиболее эффективным из методов вибродиагностики является постоянный (не реже двух раз в месяц) мониторинг, позволяющий своевременно получать точную и достоверную информацию о состоянии оборудования. Особенно актуальной представляется эта задача для комплексов типа SHM, не имеющих в России сервисной службы технического обслуживания. Мониторинг технического состояния комплексов типа SHM позволит создать нормативно-методическую базу оценки и прогнозирования технического состояния по параметрам механических колебаний (для чего потребуется значительный объем статистической

информации, необходимой для построения прогностических моделей). Кроме того, мониторинг вибрационных параметров позволит не только своевременно выявлять зарождающиеся дефекты и оценивать степень их опасности, но и явится основой для разработки экспертной системы диагностики подобных комплексов.

Выполнение вышеуказанных требований и рекомендаций позволило существенно повысить срок службы отдельных узлов и агрегатов комплекса SHM-29 и избежать выхода оборудования из строя, что, в конечном счете, положительным образом сказалось на производительности комплекса в целом и позволило минимизировать издержки, связанные с внезапными отказами.

Обработка статистических данных, собранных в ходе осуществления программы мониторинга технического состояния агрегатов SHM-29, позволила построить статистическую картину потери работоспособного состояния приводом ленточного перегружателя (рис. 7).

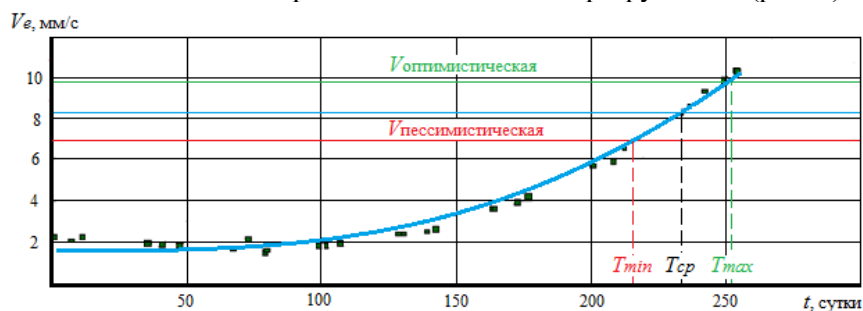


Рис. 7. Изменение СКЗ виброскорости во времени при дисбалансе выходного вала редуктора

Как показали результаты хронометражных наблюдений за работой КГРП №29 до и после внедрения разработанных мероприятий по климатической адаптации гидросистемы комплекса, а также разработанной «Методики» (рис. 8) сократились аварийные простои комплекса и время восстановления работоспособности его агрегатов. Коэффициент технического использования увеличился примерно в 1,3 раза с $K_{\text{ТИ}} = 0,617$ до $K_{\text{ТИ}} = 0,824$.

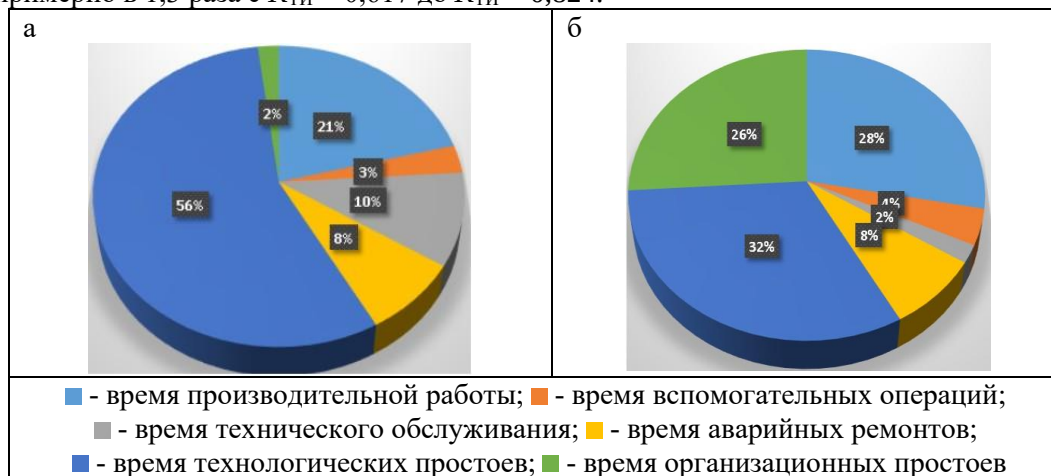


Рис. 8. Анализ результатов хронометражных наблюдений за работой КГРП №29 до (а) и после (б) внедрения разработанных мероприятий

Вывод. Разработанные технические решения по совершенствованию технического обслуживания и ремонта SHM №29 на основе использования прогнозных оценок остаточного ресурса гидромеханического оборудования позволят сократить издержки, связанные с внезапными отказами, оптимизировать логистику и складское хозяйство.

Источники финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-45-420018\20.

Список литературы

1. Рожков А.А., Карпенко Н.В. Анализ использования отечественного и зарубежного технологического оборудования на угледобывающих предприятиях России // Уголь. – 2019. – №7. – С. 58-64.

2. К вопросу импортозамещения и локализации производства основного технологического оборудования в угольной промышленности России /А.А. Рожков [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – № 2. – С. 50-57.
3. Герике Б.Л., Сушко А.Е., Герике П.Б. Внедрение цифровых технологий в области диагностики, обслуживания и ремонта горных машин и оборудования // Техника и технология горного дела. – 2018. – № 3. – С. 19-28.
4. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации: указ Президента Российской Федерации от 31 декабря 2015 г., № 683.
5. Предложения по внедрению на предприятии концепции технического обслуживания и ремонта горнотранспортной техники и оборудования/ И.М. Щадов [и др.] // ГИАБ – № 12. – 2015. – С. 134-143.
6. Клишин В.И., Писаренко М.В. Научное обеспечение инновационного развития угольной отрасли // Уголь. – № 9. – 2014. – С. 42-46.
7. Kelly, S. Graham. Advanced vibration analysis. – 2013. – 637 p. — (Dekker mechanical engineering).
8. Anil Rana. Optimal maintenance level of equipment with multiple components // Journal of Quality in Maintenance Engineering. – 2016. – Vol. 22. – Iss: 2. – P.180 – 187.
9. Ierace S., Cavalieri S. An analytic hierarchy process based model for the selection of decision categories in maintenance systems // Management and Production Engineering Review. – 2013. – Vol. 4. – No. 2. – P. 37–49.
10. Построение системы интеллектуального обслуживания редукторов горношахтного оборудования / Б.Л. Герике [и др.] // Горный журнал. – 2017. – № 12. – С. 68 – 73.
11. Герике Б.Л., Дрозденко Ю.В. Оценка технического состояния подшипниковых узлов горного оборудования по параметрам вибрации // Неразрушающий контроль и диагностика: научный журнал. – 2017. – № 2. – С. 71-75
12. Investigation in Highwaal Mining Instability / Kelly M. [et al.] // Pit 16BL South, Moura Mine, OLD. CSIRO Exploration and Mining Report. – 1998. – С. 467.
13. Shen Baotang. Highwaal Mining Stability / Taishan Academic Forum «Project on Mine Disaster Prevention and Control», October, 17-20 Qingdao, China. – Atlantis Press. – Amsterdam, Paris, Beijing. – 2014. – P. 184-189.
14. Нецветаев А.Г., Репин Л.П., Соколовский А. . Технология добычи угля с применением комплексов глубокой разработки пластов // Уголь. – № 11. – 2004. – С. 41-43.
15. Опыт вибродиагностического обследования горнодобывающего комплекса «SUPERION HIGHWELL MINERS» / Б.Л. Герике [и др.] // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2005. – №3. – С. 19-22.
16. Краковский Ю. М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. – Новосибирск: Наука, СО РАН, 2005. – 200 с.

УДК 621.879:681.518.5

ОБ ОДНОМ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕДУКТОРОВ ГОРНЫХ МАШИН

¹к.т.н. Герике П.Б., ^{1,2}д.т.н. Герике Б.Л.

1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

2 – Прокопьевский филиал КузГТУ, г. Прокопьевск, Россия

Аннотация. Разработанная методика оценки технического состояния редукторов горных машин на основе спектральных опорных масок прошла апробацию в условиях завода-изготовителя при их обкатке на заводском стенде и в производственных условиях. Результаты апробации предложенного критерия убедительно свидетельствуют о правильности выбранного подхода для диагностики уникальных сложных технических систем.

Ключевые слова: вибродиагностика, редукторы горных машин, механические дефекты, методика диагностирования, прогнозное моделирование, критерий.

Введение. Анализ основных методов вибрационной диагностики, существующих ограничений по их применению, достоинств и недостатков показал, что на сегодняшний день не существует какого-то одного метода, который мог бы одинаково успешно использоваться в рамках экспресс-диагностики и при периодическом мониторинге независимо от вида диагностируемого оборудования и условий его эксплуатации.

Так, замер эксцесса, крайне информативный при экспресс-диагностике подшипников качения, реализован далеко не во всех приборах, подвержен помехам и уступает спектральным мето-

дам при периодическом мониторинге. В свою очередь спектральные методы «подвержены» ошибкам II рода (принятие заведомо ложной гипотезы).

Кроме того, многие методы имеют ограничения на область применения. Существенно затрудняют диагностику низкая частота вращения, ударные нагрузки, источники случайной высокочастотной вибрации. Таким образом, каждый из методов имеет существенные ограничения и может быть использован лишь в небольшом количестве случаев (на определенной стадии развития дефекта или на конкретном оборудовании). Поэтому для эффективной оценки текущего состояния сложных механических систем необходимо использовать одновременно несколько различных методов, на основании которых впоследствии могут быть рассчитаны диагностические критерии.

Другая проблема, возникающая при диагностике, – необходимость использования дополнительных априорных данных (частота вращения, конструктивные характеристики и т.д.). Если частота вращения может быть примерно определена, то, например геометрические размеры подшипника или параметры геометрии зубчатой передачи, как правило, неизвестны. Поэтому при построении диагностических критериев использование априорной информации должно быть сведено к минимуму.

Любые параметры вибрации или типы замеров, полученные на работающем агрегате, содержат диагностическую информацию, характеризующую состояние одновременно нескольких узлов машины. Поэтому при решении задачи оценки состояния отдельных узлов по параметрам вибрации необходимо исключать из рассмотрения составляющие иной природы. На сегодняшний день алгоритмы подобной фильтрации отсутствуют, поэтому при анализе виброакустических сигналов необходимо оценивать возможное влияние на характер и величину механических колебаний сил различной природы от различных источников (вала, рабочего колеса, муфты и т.д.).

Подводя итоги сказанному, можно утверждать, что для диагностики сложных систем, к которым относятся зубчатые передачи, наилучшим критерием их технического состояния является спектральная опорная маска вибрации, построенная по результатам мониторинга технического состояния. При этом следует помнить, что при спектральном анализе вибрационных процессов должна быть использована информация о кинематике работы исследуемого редуктора, без которой вероятность постановки неверного диагноза (ошибки I и II рода) резко возрастает.

Кроме этого, с учетом требований современного производства для различных форм организации технического обслуживания и ремонта на предприятии в рамках создаваемой системы необходимо выполнять прогнозирование, оценивать остаточный ресурс и планировать оптимальным образом ремонтные мероприятия. Для этого при диагностике должны быть решены задачи выделения тренда из зашумленных данных и построения различного рода прогнозов.

Постановка задачи и методы её решения. При мониторинге технического состояния различного рода редукторов, используемых в горных машинах и оборудовании, необходимо производить замеры не только общего уровня вибрации в стандартном частотном диапазоне [1], но и регистрировать собственно виброакустический сигнал и спектр его мощности с использованием БПФ [2, 3], необходимые для построения спектральных опорных масок [4]. При этом частотный диапазон измерения должен охватывать составляющие от частоты выходного вала редуктора (как правило, $f_{\text{вых}}=2-5$ Гц) до обертонов зубчатых частот f_z (как правило, $nf_z \approx 3-4$ кГц). Измерение виброакустического сигнала в этом частотном диапазоне [2-4000 Гц] может быть осуществлено с использованием стандартных акселерометров с магнитным способом крепления на редукторах горных машин.

Зубчатые передачи являются наиболее сложным объектом диагностики с точки зрения анализа вибродиагностических сигналов, генерируемых в работающих редукторах, поскольку на их формирование оказывают влияние как внешние, так и внутренние факторы [5-9].

К внешним факторам могут быть отнесены величина и характер приложения силовой нагрузки, а также наличие в смазочном материале веществ, вызывающих коррозию и абразивный износ сопрягаемых деталей. Проявления внутренних факторов – взаимное перемещение посадочных поверхностей зубчатого колеса и вала, характер взаимодействия контактирующих поверхностей зубьев зацепления, неверное взаимное расположение деталей передачи, накопление усталостных повреждений – также сказываются на потере зубчатой передачей работоспособности. Все эти факторы сказываются на формировании механических колебаний, частотный и амплитудный состав которых определяется техническим состоянием зубчатой передачи.

Нормально функционирующая зубчатая передача даже при отсутствии дефектов может обладать весьма заметной вибрационной активностью. Колебания при этом возникают в широком диапазоне частот и могут иметь весьма сложный состав и характер.

Эксплуатационные дефекты зубчатой передачи условно можно разделить на следующие виды: абразивный износ зубчатого зацепления, выкрашивание зубьев (питтинг) зубчатых колес, трещины и излом зубьев зубчатых колес, а также заедание зубчатых колес [10-12]. Поскольку они являются возмущающими факторами, свойства вибрационного сигнала (форма сигнала и спектр вибрации, особенно спектр огибающей и кепстр) при наличии этих дефектов всегда меняются. В частности, в спектре могут меняться соотношения между основными частотами возбуждения, появляться новые спектральные составляющие, значительно изменяется уровень шумовой компоненты. В виброакустическом сигнале вибрации могут появляться ударные импульсы и изменяться соотношение между периодическими и шумовыми составляющими. Список наиболее часто используемых диагностических параметров зубчатой передачи в составе рядных редукторов приведен в табл. 1, а в составе планетарного редуктора – в табл. 2.

Таблица 1

Частоты, характерные для дефектов зубчатых передач в рядных редукторах

Частота	Вид дефекта изготовления	Вид дефекта сборки	Вид дефекта износа
f_r	Дисбаланс		
$k \times f_{r1}$ и $k \times f_{r2}$ ($k = 1, 2$, реже 3 и 4), $m \times f_z \pm n \times f_r$ ($m, n = 1, 2, \dots$)	Переменная погрешность шага зацепления	Нарушение соосности (перекос валов)	
$k \times f_r$ $k = 1, 2, \dots, 20$ и выше		Повышенный боковой зазор между колесами	
f_z	Постоянная погрешность шага зацепления		
$k \times f_z$, $k \times f_r$ рост шумовой компоненты $m \times f_m \pm n \times f_r$ ($m, n = 1, 2, \dots$)			Абразивный износ
$k \times f_r$, $m \times f_z \pm n \times f_r$, $m \times f_m \pm n \times f_r$ (флуктуация амплитуд, $n = 0, 1, 2, \dots$)			Выкрашивание зубьев
$k \times f_r$, $m \times f_z \pm n \times f_r$, $m \times f_m \pm n \times f_r$ (флуктуация амплитуд, $n = 0, 1, 2, \dots$), рост шумовой компоненты			Трещины и (или) излом зубьев

Таблица 2

Дефекты зубчатой передачи в составе планетарного редуктора и их основные диагностические параметры

Вид дефекта	Диагностические признаки
Бой солнечной шестерни	f_o , $n f_o^* \pm f_o$, $k f_z \pm f^*$
Перекос солнечной шестерни	$2 f_o$, $2 n f_o^* \pm 2 f_o$, $k f_z \pm 2 f^*$
Дефект зубьев солнечной шестерни	$k n f_o^* \pm k_1 f_o$, $k f_z \pm k_1 f^*$
Перекос сателлита	$4 f_g \pm k_1 f_v$, $k f_z \pm 2 f_g$
Дефект зубьев сателлита	$2 k f_g \pm k_1 f_v$, $k f_z \pm k_1 f_g$
Перекос короны	$2 n f_v$, $k f_z \pm 2 n f_v$
Дефект зубьев короны	$k n f_v$, $k f_z \pm k_1 n f_v$
Дефект зацепления	$k f_z$
Бой водила	$k f_v$, $f_o \pm f_v$, $k f_z \pm k_1 f_v$
Дефект подшипника сателлита	$k f_v$, $f_o \pm f_v$, $k f_z \pm f_g / 2$

Вид дефекта	Диагностические признаки
Дефект подшипника солнечной шестерни (води́ла)	kf_r + появление ударных импульсов и рост СКЗ на СЧ
Дефект смазки подшипника	Появление ударных импульсов и рост СКЗ на ВЧ

Примечание. f_o – частота вращения солнца; f_v – частота вращения води́ла; f_z – зубцовая частота; f_g – частота вращения сателлита; $f^* = f_o - f_v$ – частота вращения оси с дефектным подшипником; СЧ – средние частоты; ВЧ – высокие частоты; УВЧ – ультразвуковые частоты; СКЗ – среднеквадратичное значение вибрации; n – число сателлитов; $k=1,2,3,4,\dots$; $k_1=1,2,3,4,\dots$

Ряд методов вибродиагностики основан на том, что определенные механические дефекты по мере развития генерируют вибрацию в определенных частотных полосах с определенным соотношением величин параметров (рис. 1). Таким образом, производя разбиение частотного диапазона измерений на сравнительно узкие, возможно перекрывающиеся, частотные полосы и применяя индивидуальные для каждой полосы допустимые значения и критерии, можно распознавать появление ряда зарождающихся дефектов [13, 14].

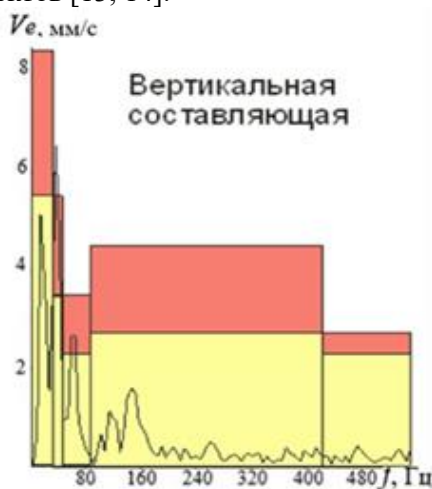


Рис. 1. Спектральная маска вибрации на редукторе скребкового конвейера

Определение технического состояния по спектральным опорным маскам позволяет распознавать дефекты в различных частотных диапазонах:

$(0,5-2,5) \times f_r$ – для обнаружения дисбаланса и расцентровки;

$(7,5-15,5) \times f_r$ – для обнаружения дефектов в подшипниках качения;

$(2,5-10,5) \times f_r$ – для предупреждения о нарушениях жесткости;

$(z \pm 1) \times f_r$ – для распознавания дефектов зубчатых муфт и зубчатых передач и т.д.

При этом обычно используют критерии допустимого технического состояния, определяемые по результатам нескольких измерений вибрации на заведомо работоспособном оборудовании (так называемое «нормальное состояние»), полученных в период приработки агрегата (рис. 2).



Рис. 2. Схема сбора данных для расчета средненормального уровня вибрации и критериев определения различных состояний

Большинство стандартов, регламентирующих допустимые значения вибрации, основано на статистической обработке достаточно большого количества данных по самым разнообразным ти-

пам оборудования различными исследовательскими группами. При этом в них определена схожая градация по классам состояния на основе назначения границ раздела различных технических состояний оборудования, отличающихся на 4, 8, ... дБ (соответственно, примерно в 1,6; 2,5; ... раза). Эти относительные величины и принято использовать в качестве разделительных границ для оценок технического состояния оборудования по параметрам вибрации [5, 13-15].

Для проверки однородности выборки, характеризующей достоверность статистических выводов, и исключения из дальнейшей обработки резко отклоняющихся значений целесообразно использовать критерий грубых ошибок наблюдений при допущении, что полученный экспериментальный ряд значений вибрации (выборка) подчиняется нормальному закону распределения [16-18]

$$X_{np} = X_m + S q_{q,n},$$

где X_m – среднее арифметическое результатов измерений; S – оценка средне-квадратического отклонения результатов измерений; $q_{q,n}$ – квантиль распределения величины, взятый из таблиц для уровня 99% ($q_{q,n}=3$).

Все спектры, полученные в одноименных измерительных точках, рассматривались в частотном диапазоне, содержащем до 20-й гармоники частоты вращения ротора f_r , для определения зон наибольшей гармонической активности. Было подтверждено, что с увеличением номера гармоники свыше 10 амплитуда уменьшается по экспоненциальному закону.

Результаты исследования. Рассмотрим использование этого критерия применительно к редукторам, изготавливаемым на ОАО «АНЖЕРОМАШ» и проходящим обкатку на заводском стенде перед отправкой потребителю [19].

В соответствие с «Методическими указаниями по проведению диагностических измерений редукторов, выпускаемых ОАО «АНЖЕРОМАШ» (далее Методика), все редукторы проходят обязательную обкатку на заводском стенде с регистрацией параметров механических колебаний на подшипниковых опорах приводного двигателя и собственно редуктора (рис. 3).

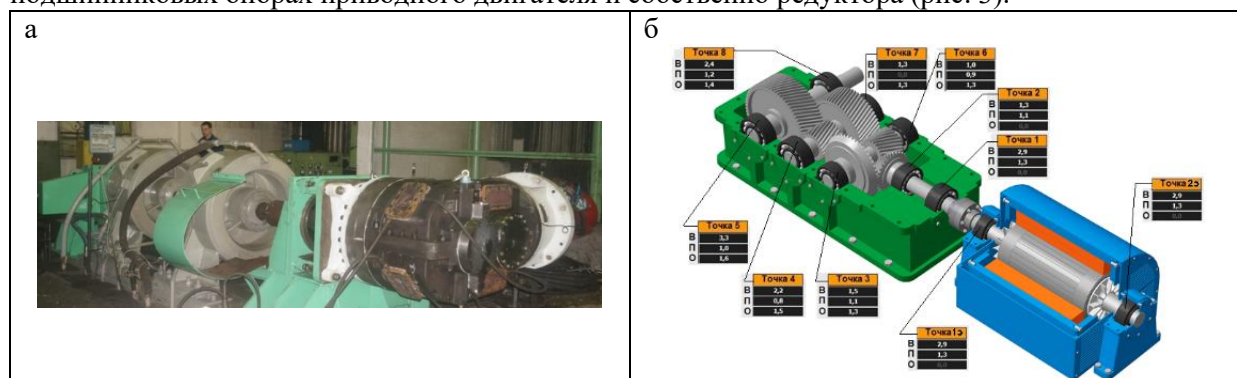


Рис. 3. Обкатка на стенде редуктора (а) и кинематическая схема замеров параметров вибрации в заданных контрольных точках (б)

Методика устанавливает виды и точность измерений, необходимых для контроля и оценки технического состояния редукторов при приемо-сдаточных испытаниях.

Оценка технического состояния редукторов производится на основе вибродиагностического обследования.

Аппаратное и программное обеспечение вибродиагностического обследования: персональный компьютер с АЦП и специализированным программным обеспечением (ПО «SafePlant»); многоканальный (не менее 2) виброанализатор с комплектом виброизмерительных преобразователей (сборщик данных CORVET).

В ходе проведенных вибрационных обследований редукторов все измерительные точки по количеству и типу контролируемых вибрационных параметров были отнесены к одной группе со следующими характеристиками параметров замеров: СКЗ виброскорости от 10 до 1000 Гц; спектр виброскорости в частотном диапазоне от 2 до 3000 Гц, 4 линейных усреднения (3200 линий); спектр виброускорения от 10 до 10000 Гц, 4 линейных усреднения (3200 линий); пиковое значение временного сигнала, м/с^2 .

На рис. 4 приведена блок-схема и алгоритм идентификации дефектов изготовления, сборки и эксплуатации редуктора.

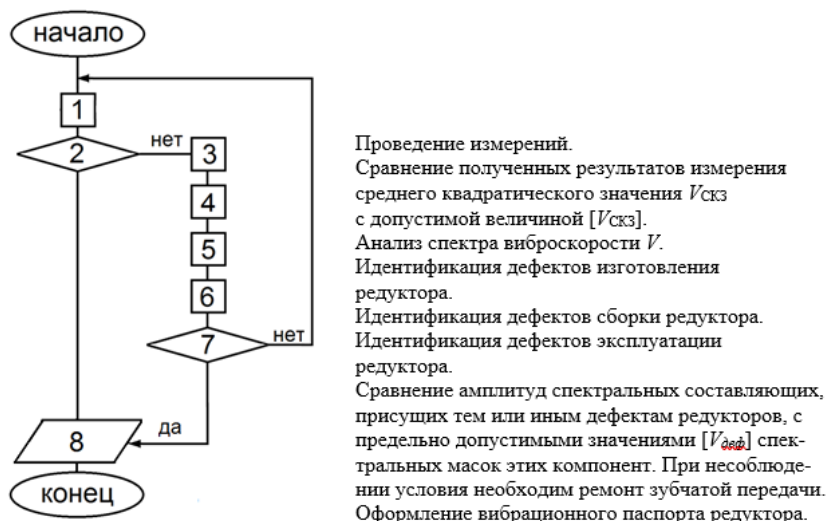


Рис. 4. Блок-схема и алгоритм идентификации дефектов редукторов по параметрам виброакустического сигнала

Пример идентификации при визуально-измерительном контроле обнаруженного дефекта по разработанной методике приведен на рис. 5.

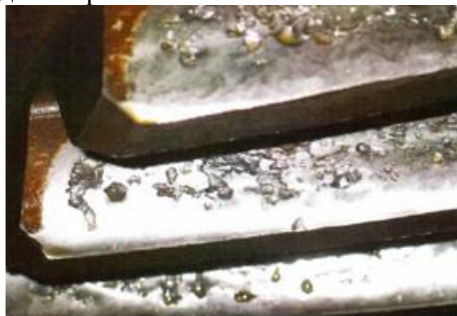


Рис. 5. Осповидное выкрашивание рабочей поверхности зубьев

Вывод. Разработанная методика идентификации дефектов зубчатых передач прошла апробацию на ОАО «АНЖЕРОМАШ» и в производственных условиях на разрезах и шахтах Кузбасса, где подтвердила свою эффективность и достоверность выводов и заключений.

Источники финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420010\21.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 10816-1-1997. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования. – М.: ФГУП СТАНДАРТИНФОРМ. – 18 с.
2. ГОСТ Р ИСО 8579-2-99. Контроль вибрационного состояния зубчатых механизмов при приемке. – М.: ФГУП СТАНДАРТИНФОРМ. – 12 с.
3. ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации. – М.: ФГУП СТАНДАРТИНФОРМ. – 28 с.
4. Герике Б.Л., Герике П.Б. Методология построения спектральных масок для динамического оборудования горных машин // Вестник КузГТУ. – № 4. – 2014. – С. 20 – 22.
5. Диагностика горных машин и оборудования / Б.Л. Герике [и др.] – М.: ИПО «У Никитских ворот», 2012. – 400 с.
6. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. – 459 с.
7. Kelly S. Graham. Advanced vibration analysis. –2013. – 637 p. – (Dekker mechanical engineering).
8. Диагностика дефектов машинного оборудования в нелинейной вибродиагностике методом каскадной демодуляции вибрации / Ф.Я. Балицкий [и др.] // Вестник научно-технического развития. – 2013. – Т. 12. – № 76. – С. 3-12.
9. Randall R.B. Vibration-Based Condition Monitoring. – UK: John Wiley & Sons, 2011.

10. Кравченко В.М., Сидоров В.А., Седуш В.Я. Техническое диагностирование механического оборудования. – Донецк. Юго-Восток, 2009. – 459 с.
11. Кравченко В.М., Сидоров В.А., Буцукин В.В. Классификация повреждений зубчатых передач // Горное оборудование и электромеханика. – 2012. – № 7. – С. 41-43.
12. Кравченко В.М., Сидоров В.А., Буцукин В.В. Повреждения зубчатых передач вследствие воздействия внутренних факторов // Горное оборудование и электромеханика. – 2012. – № 9. – С. 42-44.
13. Gajanand Gupta, Rajesh P Mishra. A SWOT analysis of reliability centered maintenance framework // Journal of Quality in Maintenance Engineering. – 2016. – Vol. 22. – Iss. 2. – P. 130-145.
14. Experimental Analysis of the Dynamic Characteristics of A Hybrid Aerostatic Bearing / L. Rudloff [et al.] // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2012. – Vol. 134 (18).
15. Franco Jefferds dos Santos Silva, Herbert Ricardo Garcia Viana, André Nasser Aquino Queiroz. Availability forecast of mining equipment // Journal of Quality in Maintenance Engineering. – 2016. – Vol. 22. – Iss. 4. – P. 418-432.
16. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. 8-е изд., стереотип. – М.: Высшая школа, 2002. – 575 с.
17. Герцбах И. Теория надежности с приложениями к профилактическому обслуживанию: монография / Под ред. В.В. Рыкова; пер. с англ. М.Г. Сухарева. – М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 263 с.
18. Фишер Р.А. Статистические методы для исследователей. – М.: Госстатиздат, 1958. – 267 с.
19. Герики Б.Л., Клишин В.И., Мокрушев А.А. Об одной оценке технического состояния опорных узлов горных машин // ФТПРПИ. – 2019. – № 6. – С. 106-114.

УДК 622.831.325

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

к.т.н. Абрамов И.Л.

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

Аннотация. Разработана методика оценки характеристик виброакустических сигналов горного оборудования для реализации непрерывного контроля напряженного состояния призабойного пространства с применением спектрально-акустического метода.

Ключевые слова: проходческий комбайн, редуктор привода, подшипник качения, спектрально-акустический метод, частотный анализ.

Работа горных машин и оборудования сопровождается вибрациями и шумами характеристики которых необходимы для решения различных практических задач, в частности для реализации спектрально-акустического метода непрерывного контроля напряженного состояния призабойного пространства [1].

Изменения напряженно-деформированного состояния призабойной области пласта, оценивание на основе анализа его акустических свойств в процессе разрушения горных пород рабочим органом комбайна, являются основой спектрально-акустического метода прогноза выбросоопасности. Для его реализации в бок выработки на некотором расстоянии от забоя бурят шпур длиной до 1,5 м, в который устанавливают приемник акустических колебаний. Упругие колебания от источника распространяются по горному массиву и достигают приемника. Спектральный анализ регистрируемого приемником сигнала по определенному алгоритму позволяет оценить уровень опасности [2].

В качестве зондирующего сигнала принято рассматривать сигнал, формирующийся при работе исполнительного органа комбайна.

При реализации спектрально-акустического метода необходимо решить задачу фильтрации акустических помех, генерируемых оборудованием в забое: приводы комбайна, буровое оборудование, конвейеры, вентиляторы местного проветривания, перегружатели. Источниками вибрации при работе проходческого комбайна являются: редуктор исполнительного органа с приводом, редуктор ходовой части, привод конвейера, привод насосной установки, привод питателя погрузки горной массы. В приводе исполнительного органа комбайна источниками вибрации являются конструктивные элементы редуктора исполнительного органа: электродвигатели, муфты, шестерни, колеса, шлицевые соединения, подшипники качения

Для анализа высокочастотных составляющих спектров акустического излучения, характерных для работы подшипников качения, выполнен анализ кинематической схемы привода исполнительного органа комбайна П110-01, широко применяемого на шахтах Кузбасса [3]. В редукторе установлены 24 подшипника: 3520Н, 3622Н, 53528Н, 53530Н, 3536, 3613Н, 53614Н, 53618Н, 9039417, 7318А, 8164Л, 3003164. Зная маркировку подшипника по каталогу, можно определить характеристики подшипника: геометрические размеры и конструктивные особенности, позволяющие рассчитать, с учетом частоты вращения, основные частоты, характеризующие работу подшипника качения (частота вращения сепаратора, частота прохождения тел качения по внутреннему и наружному кольцу, частота вращения тела качения и др.) [4-5].

Частоты механических колебаний приводов горных машин определяют следующие дефекты: дисбалансы роторов, несоосности при соединении валов муфтами, механические ослабления корпусных элементов, дефекты подшипников и зубчатых зацеплений. Каждому виду дефектов соответствуют определенные частоты, на которых они проявляются. Параметры вибрации агрегатов с подшипниками качения в значительной мере определяются конструктивными особенностями подшипникового узла (радиальные, радиально - упорные, спаренные подшипники) и самого агрегата (с горизонтальным и вертикальным положением ротора, соотношением статических нагрузок и др.).

Определив характерные частоты подшипника, можно рассчитать значения частот, на которых проявляются дефекты подшипника: расцентровка, износ, увеличенные радиальные зазоры, перекосы наружного или внутреннего кольца, повреждение тел качения, нарушение формы тел качения, нарушение внутренних зазоров, нарушение посадки, ослабления в корпусе, неуравновешенность, несоосность, неравномерный износ и др.

Для автоматизации расчета акустических характеристик оборудования проходческого забоя разработана программа для ЭВМ [6]. С ее помощью выполнен расчет характерных частот дефектов подшипников качения редуктора исполнительного органа проходческого комбайна П110-01.

Для систематизации и обработки результатов расчета параметров акустических сигналов разработана, сформирована и зарегистрирована «База данных акустических характеристик проходческого комбайна» [7].

Анализ результатов распределения частотных характеристик вибрации редуктора рабочего органа проходческого комбайна П110-01 представлен на рис. 1.

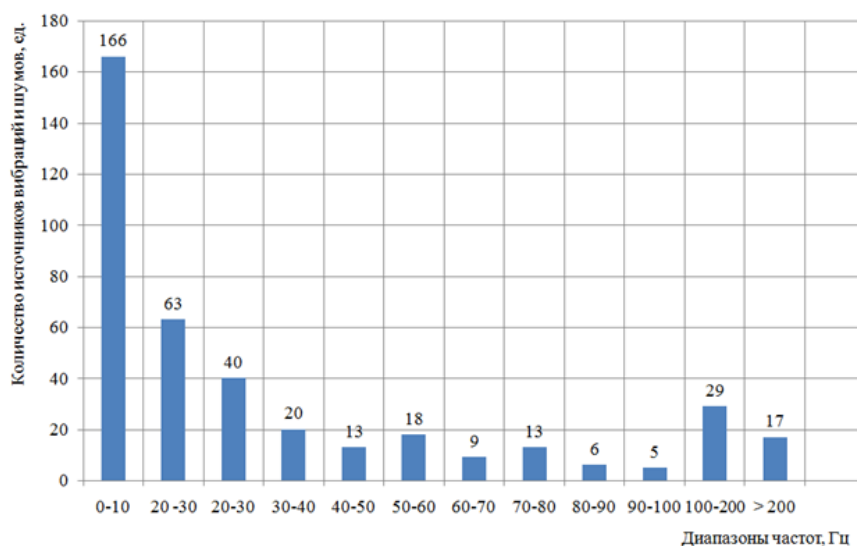


Рис. 1. Частотные характеристики виброакустических сигналов редуктора привода рабочего органа проходческого комбайна П110-01

Выводы. Разработанная методика оценки характеристик виброакустических сигналов горного оборудования позволяет решить задачу фильтрации акустических помех при реализации метода непрерывного контроля напряженного состояния призабойного пространства с помощью спектрально-акустического метода.

Список литературы

1. Мирер, С.В., Хмара О.И., Шадрин А.В. Спектрально-акустический прогноз выбросоопасности угольных пластов. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 1999. – 92 с.

2. Шадрин А.В., Абрамов И.Л. Исследование спектров акустического излучения горного оборудования, используемого для контроля напряженного состояния призабойного пространства // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2019. – № 5. – С. 22-29.
3. ТУ У12.00174065.116-96. Комбайн проходческий П110. Руководство по эксплуатации. Ч. 1 Устройство и эксплуатация. – ЗАО «НКМЗ», 2012. – 123 с.
4. Герике Б.Л., Абрамов И. Л., Герике П.Б. Вибродиагностика горных машин и оборудования : учеб. пособие. – Кемерово: КузГТУ, 2007. – 167 с.
5. Спектральный состав нагрузки в приводе резания проходческого комбайна / Б.Л. Герике [и др.] // Вестник КузГТУ. – 2007. – № 5. – С. 9-12.
6. Свидетельство № 2019662278 Российская Федерация. Программа расчета акустических характеристик оборудования проходческого забоя: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / И.Л. Абрамов; заявитель и правообладатель ФИЦ УУХ СО РАН. – № 2019619066; заявл. 23.07.19; зарегистр. в реестре баз данных 20.09.2019. – [1] с.
7. Свидетельство № 2019621476 Российская Федерация. База данных акустических характеристик проходческого комбайна: свидетельство об официальной регистрации базы данных / И.Л. Абрамов; заявитель и правообладатель ФИЦ УУХ СО РАН. – № 2019621055; заявл. 21.06.2019; зарегистр. в реестре баз данных 19.08.19.

УКД 622

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОРПУСОВ РАБОЧИХ КОЛЕС ШАХТНЫХ ОСЕВЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ СКОРОСТЯХ ВРАЩЕНИЯ

Панова Н.В., к.т.н.

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. В данной статье рассматриваются пути повышения окружных скоростей вращения корпусов рабочих колес шахтных осевых вентиляторов, при проектировании применены методы топологической оптимизации с использованием программного комплекса ANSYS.

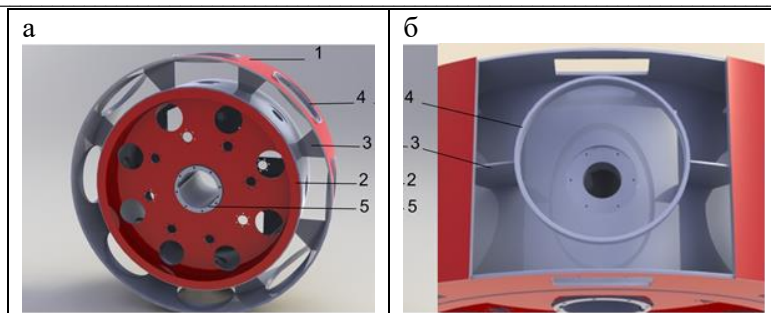
Ключевые слова: осевой вентилятор, топологическая оптимизация, корпус рабочего колеса, напряженное состояние.

В шахтах с ростом глубины ведения работ и выделений вредных примесей, а также эволюцией вентиляционных параметров за период эксплуатации возрастает необходимость увеличения поля покрытия требуемых режимов проветривания. В ИГД СО РАН разработаны методы проектирования аэродинамических схем со сдвоенными листовыми лопатками рабочего колеса (РК) по безразмерным характеристикам путем задания расчетных режимов на поле требуемых параметров проветривания. На этой базе разработан ряд вентиляторов ВО, с повышенными эксплуатационными характеристиками по сравнению с вентиляторами ВОД. Данный ряд вентиляторов не превышает окружных скоростей вращения по концам лопаток в 120 м/с. Ряд осевых вентиляторов ВО может обеспечить показатели по давлению и производительности на уровне и выше зарубежных аналогов при окружных скоростях вращения по концам лопаток до 160 м/с [1, 2].

При увеличении окружных скоростей вращения наблюдается рост действующих нагрузок на лопатки, корпус РК и ротор вентилятора в целом. Поэтому одной из главных задач при проектировании является исследование динамики и прочности основных узлов высоконагруженных роторов шахтных осевых вентиляторов. Корпус рабочего колеса находится под воздействием центробежных сил от собственных масс и масс закрепленных на нем лопаточных узлов.

Максимальные напряжения в корпусе РК наблюдаются в обечайке, так как она находится на значительном удалении от оси вращения и подвергается воздействию собственного веса и сил инерции. Для их снижения при скоростях вращения по концам лопаток до 120 м/с достаточно установки в обечайку гильз, при скоростях вращения по концам лопаток до 160 м/с, необходимо устанавливать дополнительные сегментные стяжки (рис. 1), что позволяет снизить напряжения в обечайке в два раза.

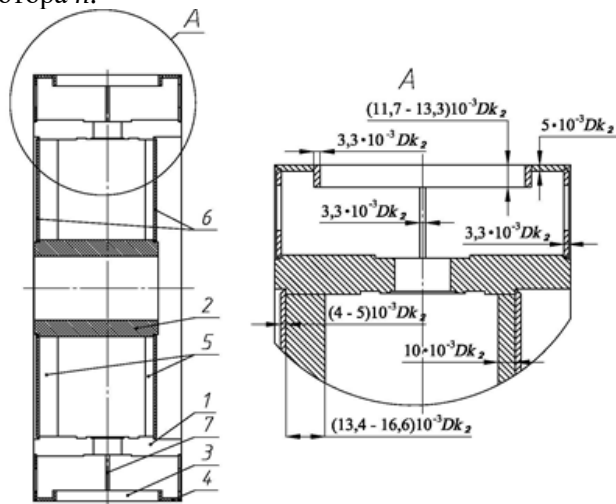
В ходе проведенных исследований найдены зависимости напряжений в корпусе рабочего колеса от толщины обечайки и разных толщинах стяжек, с учетом уменьшения массы конструкции толщина стяжки определяется величиной $3,3 \cdot 10^{-3}D$, толщина обечайки – диапазоном $(4,7 - 5,0) \cdot 10^{-3}D$.



1 – обечайка; 2 – силовой пояс; 3 – сегментная стяжка; 4 – гильза; 5 – ступица
Рис. 1. Корпус РК с сегментными стяжками: а - вид сбоку; б - вид сверху

Рекомендуется устанавливать минимальную по высоте, конструктивно допустимую гильзу, т.к. чем выше гильза, тем выше максимальные эквивалентные напряжения в обечайке.

По результатам, выявленным в ходе исследования и путем введения поправочного коэффициента k_2 , разработана параметрическая модель корпуса РК (рис. 2). Модель позволяет проектировать корпус РК для вентилятора с диаметром в пределах от 3000 до 5000 мм при окружных скоростях вращения по концам лопаток до 160 м/с. При проектировании необходимо задать диаметр D РК и частоту вращения ротора n .



1 – силовой пояс; 2 – ступица; 3 – гильза; 4 – обечайка; 5 – ребра жесткости; 6 – опорные диски; 7 – плоская сегментная стяжка; D – диаметр РК; k_2 – поправочный коэффициент
Рис. 2. Параметрическая модель корпуса РК

Поправочный коэффициент k_2 определен исходя из условий прочности и необходимой отстройки от резонанса в результате численных экспериментов ряда исследуемых машин, и определяется выражением:

$$k_2 = 3.3 \cdot 10^{-7} D n.$$

По разработанной параметрической модели смоделированы корпуса рабочих колес вентиляторов с диаметром 3000, 3600, 4300, 5000 мм и с частотой вращения соответственно 1000, 750, 600, 500 об/мин. Проведены исследования данных корпусов на собственные частоты колебаний и НДС. Исследования показали, что сконструированные корпуса рабочих колес удовлетворяют условиям прочности и достигается необходимая отстройка от резонанса [3, 4].

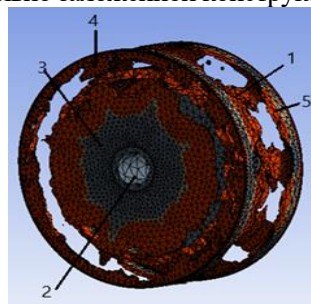
Возможность дальнейшего увеличения окружных скоростей вращения до 230 м/с рассмотрим совместно с применением топологической оптимизации при проектировании корпуса рабочего колеса методом математического моделирования с использованием программного комплекса ANSYS [5].

Цель топологической оптимизации – получение оптимального распределения материала при заданных нагрузках и граничных условиях [6-8]. Рассматривается возможность оптимизации с обеспечением допустимого уровня напряжений в элементах корпуса рабочего колеса с учетом предельных прочностных характеристик используемых материалов и принятых коэффициентов запаса прочности.

В программном пакете ANSYS для топологической оптимизации используется метод: SIMP (Solid Isotropic Material with Penalty, твердый изотропный материал с пенализацией) [9]. Осново-полагающая идея SIMP-метода заключается в создании поля виртуальной плотности заданной геометрии, которое представляет собой поле безразмерных относительных плотностей ρ , где каждому элементу сетки присваивается значение ρ от 0 до 1. Перед оптимизацией поле плотности однородно ($\rho = 1$). Назначение метода состоит в уменьшении количества элементов конструкции с нулевой и некоторой промежуточной относительной плотностью при заданных граничных условиях и заданном условии оптимизации – снижении массы до определенного процента от первоначальной конструкции.

В данной статье возможность оптимизации корпуса рабочего колеса рассмотрена на примере осевого вентилятора главного проветривания ВО-36К с диаметром рабочего по концам лопаток 3600 мм и окружной скоростью вращения 226 м/с, масса колеса до оптимизации 3692 кг. Перед оптимизацией задается масса конечной конструкции в процентах от массы первоначальной конструкции – 70%, тем самым определяется диапазон изменения виртуальной плотности. Задаются области в которых производить оптимизацию не надо, в нашем случае это ступица и места крепления лопаток.

Проводим статический расчет прочности для определения минимальной податливости, а далее проводим оптимизацию корпуса рабочего колеса. На рис. 3 представлено распределение материала в корпусе рабочего колеса после оптимизации, где серым цветом показаны участки, которые необходимо оставить в первоначальном виде, а оранжевым участки, в которых после оптимизации можно снизить металлоёмкость по сравнению с изначально заложенной конструктивно.



1 - силовой пояс; 2 – ступица; 3 - опорный диск; 4 - несущий диск; 5 - обечайка

Рис. 3. Распределение материала в корпусе рабочего колеса после оптимизации

После топологической оптимизации в ANSYS поверхность тела не получается гладкой, а состоит из граней элементов сетки, оставшихся после оптимизации, поэтому необходимо провести интерпретацию конечно-элементной модели к твердотельной. Эта работа является отдельным достаточно сложным процессом. Для сглаживания поверхностей на 3D моделях есть несколько методов: метод обрисовки моделей вручную в пакетах 3D-моделирования, использование PolyNURBS сплайнов или сглаживание сетки в специальных пакетах, например Autodesk meshmixer [10]. Стоит учесть, что при сглаживании и преобразовании полученной конечно-элементной модели в твердотельную возможно изменение характеристик прочности. Окончательная форма оптимизированного корпуса рабочего колеса должна прорабатываться с учетом уровня затрат и технологических возможностей изготовления, и прочих факторов.

Вывод. В результате проведенной оптимизации установлено, что можно уменьшить массу силового пояса, один опорный диск сделать несущим, а второй более тонким или перейти на схему рабочего колеса с одним опорным диском. Кроме того, установлено, что при проектировании можно применить элементы ферменной конструкции. Все это позволит при окружных скоростях вращения до 230 м/с обеспечить необходимую прочность конструкции.

Список литературы

1. Петров Н.Н., Панова Н.В., Грехнёва Е.Ю. Адаптация аэродинамических характеристик главных вентиляторов к изменениям вентиляционных режимов шахт // ФТПРПИ. – 2013. – №5. – С. 119-126.
2. Красюк А.М., Лугин И.В., Косых П.В., Русский Е.Ю. Обоснование способа продления ресурса шахтных двухступенчатых осевых вентиляторов главного проветривания // ФТПРПИ. – 2019. – №3. – С. 150-167.
3. Петров Н.Н., Панова Н.В. Анализ влияния конструктивных элементов корпуса рабочего колеса на прочности высоконагруженных вентиляторов серии ВО // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 7 – С. 17-20.

4. Петров Н.Н., Панова Н.В. Исследование прочности рабочих колес со сдвоенными листовыми лопатками ряда высоконагруженных вентиляторов главного проветривания шахт // Научный вестник НГТУ. – 2013. – №1 (50). – С. 190-194.
5. Красюк А.М., Русский Е.Ю. К вопросу оптимального проектирования лопаток осевых вентиляторов с повышенными скоростями вращения // ФТПРПИ. – 2020. – №6. – С. 161-169.
6. Saleem W., Lu H., Yuqing F. Topology Optimization – Problem Formulation and Pragmatic Outcomes by integration of TOSCA and CAE tools // Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS 2008). – SanFrancisco, USA. – 6 p.
7. Eschenauer H., Olhoff N. Topology Optimization of Continuum Structures: A Review // ASME Applied Mechanics Reviews. – 2001. – Vol. 54. – No. 4. – Pp. 331-390.
8. Continuum structural topological optimization with dynamic stress response constraints / L.A. Zhao [et al.] // Advances in Engineering Software. – 2020. – Vol. 148. – (102834).
9. Кротких А.А. Максимов П.В. Исследование и модификация метода топологической оптимизации SIMP : междунар. науч.-исслед. журнал. – 2016. – №01(55). – С. 91-94.
10. Максимов П. В., Фетисов К. В. Анализ методов доработки конечно-элементной модели после топологической оптимизации : междунар. науч.-исслед. журнал. – 2016. – № 9 (51). – Часть 2 . – С. 58-60.

УДК 62-112.5

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗГРУЗКИ СМЕРЗШЕГОСЯ УГЛЯ ИЗ ОТКРЫТЫХ ПОЛУВАГОНОВ

¹к.т.н. Куликова Е.Г., ²к.т.н. Левенсон

1 – Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

2 – Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. Рассмотрены различные методы принудительной разгрузки сыпучих материалов после их перевозки открытыми полувагонами. Обоснованы целесообразность и эффективность ударного метода разгрузки смёрзшегося угля. Приведены результаты численного моделирования взаимодействия трубчатого рабочего органа с разрушаемым массивом, установлено влияние угла его внутреннего конуса на диаграмму напряжений, возникающих в момент удара.

Ключевые слова: разгрузка полувагонов, смёрзшийся сыпучий материал, удар, угол при вершине внутреннего конуса.

Открытый полувагон – распространенное транспортное средство, используемое для доставки различных сыпучих материалов, в том числе каменного угля, от места добычи до места непосредственного использования или переработки (рис. 1). Он легко загружается погрузочными машинами, не требуя особых приспособлений, и также легко разгружается как нижним способом с использованием приямков и транспортеров, так и верхним способом с применением грейферов.



Рис. 1. Доставка угля открытыми полувагонами

Однако во время транспортировки открытыми полувагонами грузы не защищены ни от влаги, ни от температурных изменений окружающей среды, что ведет к определенным трудностям работы в зимнее время в областях пониженных температур, связанным со смерзанием сыпучих материалов и невозможностью их разгрузки традиционными способами.

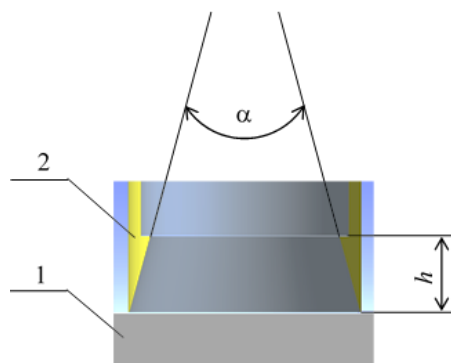
Поэтому на отправочных пунктах применяются различные методы предотвращения смерзания сыпучих материалов [1–4]. К ним относятся полное просушивание или смешивание мокрого материала с сухим с последующим понижением общей влажности, добавление к перегружаемой массе специальных реагентов, позволяющих уменьшить температуру застывания активной части влаги и снизить прочность смерзания, и т.д. Подобные методы повышают время и стоимость погрузочных работ, а значит и доставки сыпучего материала в целом.

Поэтому чаще применяется принудительная разгрузка полувагонов.

Специалистами Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета был предложен электрогидроимпульсный экспресс-метод, заключающийся в создании ударной волны за счет взрыва одноразовых электровзрывных патронов, размещаемых в предварительно просверленных в смерзшейся массе шпурах [5–7]. При достаточной эффективности данный способ разгрузки отличается сложностью оборудования и необходимостью контроля точности создания предварительных шпуров, что не всегда возможно в производственных условиях. Кроме того, применение взрывных технологий для разгрузки угля в условиях железнодорожной станции не безопасно для подвижного состава и обслуживающего персонала.

Наиболее распространённым методом механического воздействия на смерзшуюся сыпучую массу является вибрационный. Устройства, реализующие его, как правило, состоят из двух узлов: направляющей (накладной) рамы и движущегося в ней рабочего (рыхлящего) органа. Примером может служить стационарная виброрыхлительная установка (ВРУ), представляющая собой металлическую конструкцию со штырями, приводимыми в движение от трех вибромодулей [8]. ВРУ располагается на железнодорожных путях вдоль их продольной оси. Полувагон с мерзлым грузом, загоняется под установку, после чего вибромодули включаются в работу и под действием своего веса и вынуждающей силы внедряют штыри в затвердевшую массу, разрыхляя ее и способствуя выпуску через открытый люк полувагона. Такое оборудование имеет простую конструкцию и удобно в использовании, однако требует повышенных затрат энергии на работу, так как в безударном режиме вибрационного воздействия недостаточно для разупрочнения смерзшегося сыпучего материала. Кроме того, для работы с легко воспламеняющимися материалами, такими как смерзшийся уголь, электрические дебалансные вибровозбудители должны быть во взрывобезопасном исполнении.

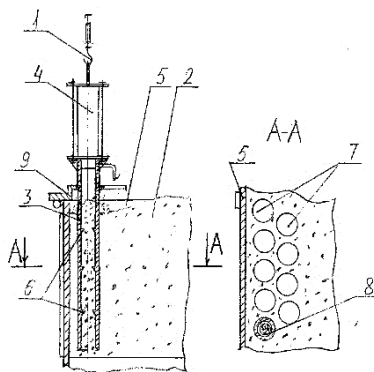
В ИГД СО РАН был предложен более эффективный метод разрыхления смерзшихся материалов. Он основан на импульсном воздействии ударного узла на трубчатый рабочий орган, внутренние стенки которого образуют конусную поверхность (рис. 2) [9, 10].



1 – разрушаемый материал; 2 – рабочий орган;
 h , α - высота и угол внутреннего конуса соответственно
 Рис. 2. Трубчатый рабочий орган ударного устройства

Принцип действия устройства заключается в следующем. С помощью грузоподъемного механизма 1 (рис. 3) рабочий орган 3 с закрепленным на нем ударным приводом 4 устанавливается торцом на поверхность смерзшегося груза. Работа происходит при открытых люках полувагона. Привод 3 создает ударные импульсы, передаваемые грузу через рабочий орган 3, который, внедряясь в смерзшийся массив, отделяет от него цилиндрический элемент 8, разрушаемый внутри рабочего органа элементами внутреннего конуса 6. Дойдя до нижней поверхности массива, рабочий орган освобождается от кусков груза под действием их собственного веса. Затем устройство извлекают и переставляют на новое место, при этом в массиве на всю его толщину образуется цилиндрическая полость 7. За счет создания нескольких таких скважин по всей поверхности полува-

гона происходит ослабление внутренних связей между частицами смерзшегося груза, что способствует его выгрузке.



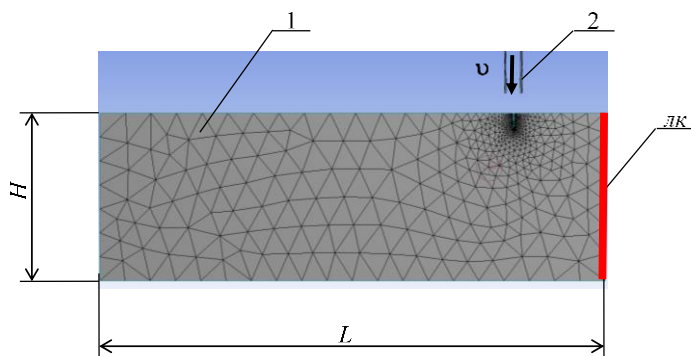
1 – грузоподъемный механизм; 2 – груз; 3 – рабочий орган; 4 – ударный привод; 5 – полувагон; 6 – элементы внутреннего конуса; 7 – цилиндрические полости; 8 – отделяемый элемент

Рис. 3. Устройство для разрушения смерзшегося груза в полувагоне

Благодаря такому подходу основная часть энергии, передаваемая при ударе, воспринимается материалом, находящимся внутри рабочего органа, а не рассеивается по всей смерзшейся массе. За счет этого увеличивается скорость внедрения рыхлителя и уменьшается передача ударной волны на стенки полувагона.

Рассматриваемый метод разрыхления может быть реализован любым ударным узлом одностороннего действия, например, пневмомолотом, а его эффективность зависит от параметров внутреннего конуса трубчатого рабочего органа, в частности от угла при его вершине α . Влияние этого угла на диаграмму напряжений, создаваемых в мерзлом сыпучем материале при ударе, а также передаваемых на стенки накопительной емкости (например, вагона) определялось методом численного моделирования с помощью модуля Explicit Dynamics программного комплекса ANSYS [11].

Динамическая задача решалась в плоской постановке. Численная модель включала в себя продольное сечение блока разрушаемого материала 1 и рабочего органа 2 (рис 4). Блок материала представлял собой прямоугольник, размеры которого принимались в масштабе 4:1 к габаритам серийного полувагона. Для моделирования поведения материала была выбрана упруго-пластичная модель Друкера-Прагера, а именно Concrete NL (бетон) с плотностью 2300 кг/м^3 и двумя заменяемыми значениями модуля сдвига $7,88 \cdot 10^9 \text{ Па}$ и $17,00 \cdot 10^9 \text{ Па}$.



1 – блок разрушаемого материала; 2 – трубчатый рабочий орган; лк – линия контроля напряжения

Рис. 4. Численная модель разрушения смерзшегося материала

Металлоконструкция полувагона на моделировалась. Ее фиксирующее влияние на материал принималось в виде жесткой заделки блока 1 по вертикальным граням.

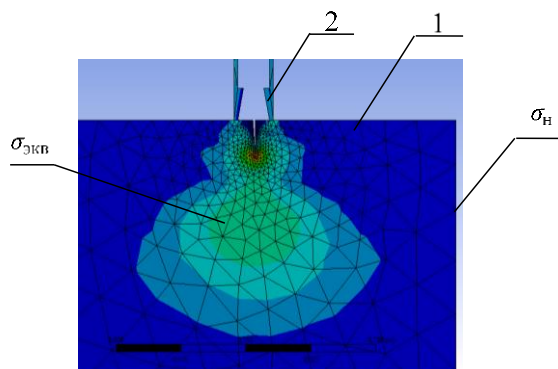
Рабочий орган ударного устройства рассматривался в виде двух плоских фигур, форма которых соответствовала продольному сечению его диаметрально расположенных стенок. «Внутренние» грани стенок имели уклон в направлении друг друга, равный $3^\circ - 17^\circ$, и высоту, изменяющуюся в диапазоне $0,05 - 0,10 \text{ м}$, что оставляло $0,6 - 1,2$ от внутреннего диаметра рабочего органа $d_{\text{вн}}$. Правая «стенка» рабочего органа располагалась на расстоянии $\frac{L}{6}$ от ближайшей зафиксированной грани блока разрушаемого материала.

Рабочий орган перемещался только вертикально.

Величина энергии, передаваемая от рабочего органа материалу в начальный момент расчета, задавалась кинетической энергией, изменяемой за счет начальной скорости рабочего органа в диапазоне $1 - 10$ м/с и равной $0,5m - 50m$ (где m – масса ударной части машины).

Для учета трещиноватости смёрзшегося материала в области взаимодействия рабочего органа с поверхностью блока материала 1 предусмотрен малый клиновидный вырез, ослабляющий напряженное состояние в данной области, несмотря на сплошность материала, принятого для моделирования.

При разбиении модели на конечные элементы использован автоматический размер сетки со сгущением в области начальной трещины (рис. 4).



1 – блок разрушаемого материала; 2 – трубчатый рабочий орган; $\sigma_{\text{экв}}$ – эквивалентное напряжение в материале; $\sigma_{\text{н}}$ – нормальное напряжение, передаваемое материалом стенке вагона

Рис. 5. Диаграмма напряжений

В процессе исследований изменялся угол наклона внутренних стенок, и фиксировалось максимальное эквивалентное напряжение, возникающее в разрыхляемом материале в момент удара, (рис. 5) и соответствующее ему максимальное нормальное напряжение на близлежащей закрепленной вертикальной грани блока 1. С целью получения точных результатов расчета [12] напряжения анализировались в первые $0,10 - 0,15$ секунды после удара.

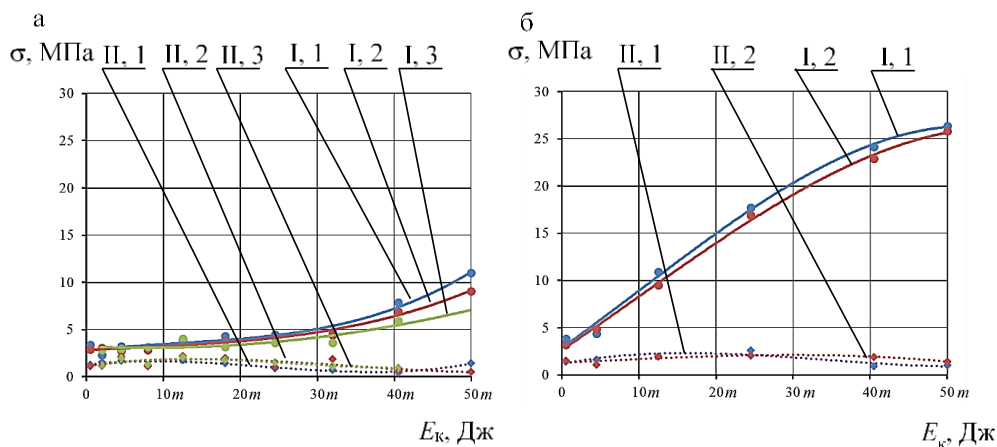
Данные численного моделирования были сопоставлены с результатами, полученными ранее в лабораторных условиях при разрушении угле-цементных блоков, а также при производственных испытаниях на участке разгрузки угля одной из дистанций пути Западно-Сибирской железной дороги [9].

Результаты расчетов показали, что за счет ударного воздействия трубчатого рабочего органа наибольшее напряжение разрушаемого материала создается под трубой в направлении удара, а не у ее боковых граней. Энергия, полученная при взаимодействии, расходуется на вертикальный рост инициированной трещины (рис. 5). С увеличением начальной скорости движения рабочего органа растет энергия удара, а значит и напряжение, испытываемое материалом. При этом более явно становится влияние угла при вершине внутреннего конуса трубы (рис. 6). При энергии более $30m$ увеличение наклона стенок на 14° приводит к росту максимального эквивалентного напряжения материала в $1,5 - 2,0$ раза.

Представленные данные подтверждаются результатами лабораторных экспериментов, ранее полученными при разрушении углецементных блоков. Согласно им [9], с уменьшением угла внутреннего конуса увеличивается давление, достаточное для нарушения целостности массива, и материал начинает разрушаться за счет меньшего погружения рабочего органа. Если при $\alpha = 20^\circ$ эффект достигался с внедрением трубы в блок на $3/4$ его высоты, то при $\alpha = 20^\circ$ – на $1/3$.

Идентичные результаты были получены и в производственных условиях. Следствием прохода трубчатого рабочего органа под действием ударного воздействия являлась цилиндрическая полость в смерзшемся массиве грунта глубиной примерно $3/4$ высоты вагона, переходящая в обратную воронку.

Было отмечено, что в сравнении с клиновидными рабочими органами использование трубчатого позволяет снизить передачу напряжения от разрушаемого смерзшегося массива на стенки вагона. Как показали результаты численных экспериментов, при всех вариантах нагружения в независимости от угла внутреннего конуса напряжение на закрепленной грани блока, имитирующей стенку вагона, составило не более $3 - 5$ МПа (не более 10% от допускаемого напряжения стали).



модуль сдвига разрушаемого материала: $a = 7,88 \cdot 10^9$ Па, $b = 17,00 \cdot 10^9$ Па;

I – максимальное эквивалентное напряжение в образце $\sigma_{\text{экв}}$; II – максимальное напряжение на закрепленной грани образца σ_n ;

угол при вершине внутреннего конуса: 1 - 34°; 2 - 20°; 3 - 6°.

Рис. 6. Зависимость напряжения σ , возникающего в разрушаемом материале, от кинетической энергии рабочего органа E_k

В ходе лабораторных исследований также было установлено, что внедрение рабочего органа вблизи от стенки экспериментальной емкости не вызвало деформации ее тонких стенок, что подтвердило предположение об отсутствии воздействия на них распирающих сил.

Выводы. Использование трубчатого рабочего органа, внутренние стенки которого имеют коническую поверхность, позволяет концентрировать напряжение в разрыхляемом материале внутри трубы и непосредственно в области ее внедрения, что повышает эффективность передачи энергии удара. Данный эффект усиливается с увеличением угла внутреннего конуса.

Результаты численных и лабораторных экспериментов подтвердили безопасность предлагаемого ударного метода разрыхления смерзшихся материалов для металлоконструкции открытого полувагона.

Список литературы

1. Учитель А.Д., Кормер М.В., Шмельцер Е.О. Методы предотвращения смерзания углей при их транспортировке // Весник Криворожского национального университета. – 2013. – № 4(33). – С.124-130.
2. АО «Каустик». Пыление и смерзание угля: проблемы и решения // Уголь. – 2018. – № 4(1105). – С. 43-45.
3. Гушин А.А, Ермакова А.Ю., Мирошниченков А.М. Исследование смерзаемости угля при складировании и транспортировке // ГИАБ. – 2016. – С 140-154.
4. Патент 2564349 РФ. Профилактическое средство против смерзания и примерзания угля, вскрышных пород при транспортировании и хранении / А.М. Мирошниченков [и др.], КемТИПП и ЗАО «Капролактамы Кемерово». – № 2014103821/05; заявл. 04.02.2014; опублик. в БИ № 27, 2015.
5. Ким К.К., Шпилев М.А. К вопросу об эффективной технологии разгрузки смерзшегося угля // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 1(38). – С. 66-67.
6. Ким К.К., Шпилев М.А. Электрогидроимпульсный экспресс-метод разгрузки смерзшегося угля из полувагонов // Ученые записки. – 2015. – № IV-1(24). – С. 22-27.
7. Ким К.К., Полунин И.С. Экономическая эффективность электрогидроимпульсного комплекса по разгрузке угля // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 3(76). – С.33-37.
8. Основные технологические решения по эффективной разгрузке смерзшегося груза из железнодорожных полувагонов / С.П. Минеев [и др.] // ВісникДніпропетровськогонаціональногоуніверситетузалізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2012. – № 40. – С. 124-130.
9. Повышение эффективности выпуска смерзшегося угля из полувагонов / С.Я. Левенсон [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 2. – С. 358-363.
10. ПМ 2203844 РФ. Способ и устройство для рыхления и разгрузки смерзшихся или слежавшихся грузов, преимущественно из полувагонов / А.Я. Тишков [и др.], ИГД СО РАН. – № 2001108046/28; заявл. 26.03.20014; опублик. в БИ № 13, 2003.
11. Wilhelm Rust, Karl Schweizerhof. Finite element limit load analysis of thin-walled structures by ANSYS (implicit), LS-DYNA (explicit) and in combination // Thin-Walled Structures. –2003. – Vol. 41. – P. 227–244.

12. Кравчук А.С., Кравчук А.И. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS/LS-DYNA и основам LS-PREPOST с примерами решения задач [Электронный ресурс]. В 3 ч. Ч. 2. – Минск : БГУ, 2013. – 122 с.

УДК 621.926

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ПРИВОДА ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЫ, РАБОТАЮЩЕЙ НА СДВИГ

¹д.т.н. Никитин А.Г., ¹Шабунов М.Е., ¹Курочкин Н.М., ²к.т.н. Баженов И.А.

1 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

2 – Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. Приведено описание конструкции дробилки, в которой разрушение перерабатываемого материала происходит за счет сил, действующих на дробимый кусок в одной плоскости навстречу друг другу, при этом в обрабатываемом куске возникают только касательные напряжения, что позволяет уменьшить расход энергии на единицу готовой продукции почти в два раза.

Ключевые слова: дробилка, энергоэффективность, мощность, сила, напряжение, ребро.

Введение. Расход энергии на дробление различных материалов составляет большую долю (до 5%) в энергетическом балансе мира. Многие промышленные производства, в том числе горные, перерабатывают в больших количествах сыпучие материалы различных классов крупности. В большинстве случаев нужная крупность достигается измельчением кусков на фрагменты в дробилках [1].

Состояние вопроса. Мощность электродвигателя определяется с учетом мощности, затраченной на преодоление всех сил сопротивлений при работе дробилки:

$$N_{\text{ДВИГ}} = \frac{N_1 + N_2}{\eta}, \quad (1)$$

где N_1 – мощность, необходимая на дробление материала; N_2 – мощность, затраченная на трение в подшипниках; η – КПД передачи.

Расчет мощности проводится для единичного акта дробления, то есть при разрушении одного исходного куска с последующей корреляцией, учитывающей возможность одновременного дробления нескольких кусков.

Одним из основных показателей процесса дробления является энергоэффективность дробления, которая определяется массой дроблёного материала, получаемой при расходовании единицы электроэнергии.

В промышленности используются дробилки для разрушения хрупких материалов сжатием (валковые, щековые, конусные) и ударом (зубчатые, молотковые).

Дробилки сжатия делятся на следующие виды: щековые, в которых разрушение происходит за счет встречного рабочего движения плит [2]; валковые, разрушающие кусок при затягивании его в зазор между вращающимися друг навстречу другу [3]; конусные, в которых дробление осуществляется сжатием материала между конусами, расположенными с эксцентриситетом один внутри другого [4]. Дробление хрупкого материала в этих дробилках осуществляется силами сжатия, создающими в куске нормальные напряжения, по предельным значениям которых рассчитывают их мощность. Дробилки, работающие на сжатие разрушаемого материала, имеют примерно одинаковую удельную энергоёмкость, то есть одинаковый расход энергии на разрушение единичного объема материала равной прочности [5]. Разрушение сжатием самый энергоёмкий из известных способов дробления [6].

Ударные (роторные и молотковые) дробилки предназначены для ударного дробления различных хрупких материалов с помощью бил, жестко закрепленных на роторе, вращающемся вокруг горизонтальной оси [7], при этом разрушение происходит за счет раскалывания.

Разрушение хрупких пород ударом и сжатием требуют различных энергозатрат, необходимых для разрушения материала, при этом разрушение сжатием требует почти полтора кратных затрат энергии, по сравнению с разрушением ударом. Однако, дробилки ударного действия имеют существенный недостаток, который выражается в том, что лишь 25 – 30 % готового продукта получают с заданным фракционным диапазоном [8].

Известны конструкции одновалковых дробилок, у которых кусок подается в зазор между валком и сплошной неподвижной плитой. В процессе работы в разрушаемом материале генерируется сложное напряженное состояние, при котором на кусок дробимого материала действуют как сжимающие силы, вызывающие в куске действие нормальных сжимающих напряжений, так и внутренний крутящий момент, вызывающий действие касательных напряжений [9]. При действии в материале сложного напряженного состояния прочность оценивается через эквивалентное напряжение, предел прочности которого меньше, чем при действии только нормальных напряжений [10]. Этим достигается уменьшение расхода энергии на дробление при прочих равных условиях на 20 – 30 % по сравнению с дробилками, работающими на сжатие.

Объект исследования. С целью повышения энергоэффективности процесса разрушения хрупких материалов в Сибирском государственном индустриальном университете разработана конструкция роторно-конусной дробилки [11], в которой дробление происходит за счет генерации в куске только касательных напряжений, под действием которых возникает деформация сдвига (среза). При таком виде деформации предел прочности для данного материала принимает минимально возможное значение, равное примерно 0,5 от величины предела прочности при сжатии [12]. Отсюда следует, что такой способ дробления является наиболее энергоэффективным по сравнению со всеми другими при получении готового продукта заданной крупности.

В процессе работы рассматриваемой дробилки разрушение перерабатываемого материала происходит за счет сил, действующих на дробимый кусок в одной плоскости навстречу друг другу, то есть обеспечивается условие генерации в куске только касательных напряжений.

Дробилка состоит из корпуса 1, выполненного заодно с неподвижным конусом и расположенного соосно с ним вращающегося внутреннего конуса 2 с приводом 3 (рис. 1). Вращающийся внутренний конус установлен в радиальных подшипниках 5 и опирается на упорный подшипник 4. На рабочих поверхностях конусов по их образующим расположены ребра 6. В верхней части корпуса 1 имеется течка 7 для подачи материала, а в нижней – разгрузочные окна 8.

Дробление происходит следующим образом. Кусок дробимого материала 9 через течку 7 подается в зону дробления, образованную рабочими поверхностями конусов 1 и 2. При вращении внутреннего конуса 2 ребра 6, расположенные на рабочих поверхностях конусов периодически располагаются друг напротив друга и образуют каналы, в которые под действием сил гравитации кусок 9 проваливается на глубину, на которой его поперечный размер равен величине зазора между поверхностями неподвижного внешнего и вращающегося внутреннего конусов 1 и 2. При дальнейшем вращении внутреннего конуса 2 кусок 9 зажимается между боковыми поверхностями ребер 6 и за счет возникновения в нем касательных напряжений развивается деформация сдвига и кусок разрушается.

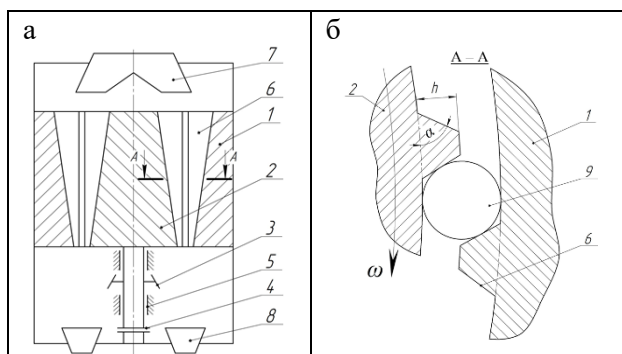


Рис. – Схема роторно-конусной дробилки: а – вид дробилки в разрезе; б – сечение А-А

Размеры ребра характеризуются следующими параметрами: высотой ребра h и углом наклона боковой поверхности ребра к основанию α . Их значения определяются следующим образом. Высота ребра h не должна быть больше, чем 0,5 от величины зазора между поверхностями неподвижного и вращающегося внутреннего конусов, чтобы обеспечить возможность вращения внутреннего конуса. При $\alpha = 90^\circ$ разрушение дробимого куса происходит под действием только касательных напряжений.

Мощность, расходуемая на дробление материала, потребляется на преодоление момента силы M :

$$M = P \cdot l, \quad (2)$$

где P – величина силы, необходимой для осуществления дробления; $l = R + h$ – плечо силы P относительно центра валка; R – расстояние от оси дробилки до основания ребра; h – высота ребра, тогда мощность, необходимая на дробление материала:

$$N_1 = M \cdot w, \quad (3)$$

где w – угловая скорость вращения внутреннего конуса.

Величина силы, необходимой для осуществления дробления

$$P = \tau \cdot A, \quad (4)$$

где τ – величина касательных напряжений, возникающих в дробимом куске; $A = \pi \cdot r^2$ – площадь поперечного сечения дробимого куска; r – радиус дробимого куска. Следовательно, с учетом выражений (3) и (4), мощность, необходимая на дробление материала:

$$N_1 = \tau \cdot A \cdot l \cdot w. \quad (5)$$

Мощность, расходуемая на преодоление силы трения в опорном радиальном подшипнике:

$$N_2 = \pi \cdot w \cdot d_g \cdot P \cdot f \quad (6)$$

где f – коэффициент трения в подшипнике; d_g – внешний диаметр подшипника.

Совместное решение выражений (1), (5) и (6) позволяет рассчитать мощность электродвигателя дробильной машины, работающей на сдвиг:

$$N_{\text{двиг}} = \frac{N_1 + N_2}{\eta} = \frac{\tau \cdot A \cdot w}{\eta} (l + \pi \cdot d_g \cdot f). \quad (7)$$

Учитывая, что величина касательных напряжений определяется соотношением:

$$\tau = 0,5 \cdot \sigma_{\text{сж}}, \quad (8)$$

можно сделать вывод, что энергопотребление уменьшится на 50 % по сравнению с дробилками сжатия.

Таким образом, конструирование дробилок, в которых разрушение перерабатываемого материала происходит за счет генерации в куске только касательных напряжений, позволяет уменьшить расход энергии на единицу готовой продукции почти в два раза.

Вывод. Приведено описание конструкции дробилки, в которой разрушение перерабатываемого материала происходит за счет сил, действующих на дробимый кусок в одной плоскости навстречу друг другу, при этом в обрабатываемом куске возникают только касательных напряжений. Использование дробилок, в которых разрушение перерабатываемого материала происходит за счет генерации в куске только касательных напряжений, позволяет уменьшить расход энергии на единицу готовой продукции почти в два раза.

Список литературы

1. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
2. TelSmith. Jaw-crushers. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://telsmith.com/products/crushing-equipment/jaw-crushers>.
3. Egbe, E.A.P., Olugboji, O.A. Design, Fabrication and Testing of a Double Roll Crusher // International Journal of Engineering Trends and Technology. – 2016. – Vol. 35. – Num. 11. – P. 511–515.
4. Johansson M., Quist J., Evertsson M., Hulthen E. Cone crusher performance evaluation using DEM simulations and laboratory experiments for model validation // Minerals Engineering. – 2017. – Vol. 103–104. – P. 93–101.
5. Никитин А.Г., Сахаров Д.Ф. Сравнительный анализ энергозатрат дробилок, работающих на сжатие // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. – №4. – С. 56–57.
- 1.6. Масленников В. А. Дробилки, разрушающие материал сжатием // Известия вузов. Горный журнал. – 1996. – № 10–11. – С. 124–138.
7. L.L. Zhao, F. Zang, Z.B. Wang. Multi-object optimization design for differential and grading toothed roll crusher using a genetic algorithm // Journal of China University of Mining and Technology. – 2008. – Vol. 18. – Iss. 2. – P. 316–320.
8. Фишман М.А. Дробилки ударного действия. – Москва : Госгортехиздат, 1960. – 189 с.
9. Силовой анализ процесса разрушения хрупких материалов в одновалковой дробильной машине с упором на валке / А.Г. Никитин [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2019. – Т. 62. – № 4. – С. 303–307.
10. Goulet J. Resistance des materiaux. – Bordas Paris, 1976. – 192 p.
11. Патент № 2526738 РФ. Роторное дробильное устройство / Никитин А.Г. [и др.]; заявл. 18.06.2013; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24, 2014.
- 2.12. Степин П.А. Соппротивление материалов : учеб. – Санкт-Петербург : Лань, 2014. – 320 с.

ПСЕВДОХАОТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

д.т.н. Никитин А.Г., к.т.н. Тагильцев-Галета К.В., к.ф.-м.н. Лактионов С.А.

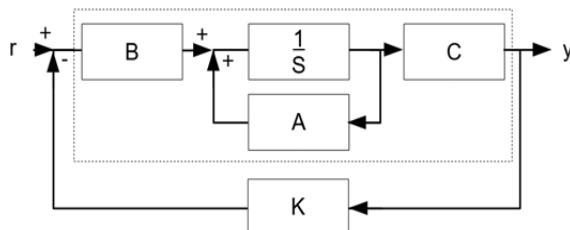
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Рассмотрен метод генерации псевдослучайного отклика в линейной динамической системе. Приведен пример перехода системы к псевдохаотическому поведению. Приведен расчет усталостных нагрузок в распорной плите приведенным методом. Показано преимущество данного метода в расчетах усталостных нагрузок.

Ключевые слова: динамический хаос, система управления, дробильная машина, распорная плита, усталостное нагружение, аварийная ситуация.

В существующих производственных системах процессы управления рассматриваются полностью детерминированными, однако существуют ситуации, когда полностью детерминированные системы демонстрируют хаотическое поведение.

Рассмотрим систему управления в общем виде (рисунок 1) [1]. Объект управления состоит из преобразователя входного сигнала r к внутренней переменной, блока реализующего сравнение сигнала, приходящего по обратной связи и блока преобразования внутренней переменной к выходной переменной y , а также блока обратной связи. Такая система является динамической.



r – начальное воздействие на систему; A – оператор состояния системы; B – оператор преобразования к внутренней переменной; C – оператор преобразования к выходной переменной; $1/S$ – оператор дифференцирования; K – оператор регулирования; y – выходная переменная

Рис. 1. Структура системы управления

Выходной сигнал такой системы представляет собой кривую, изображенную на рис. 2.

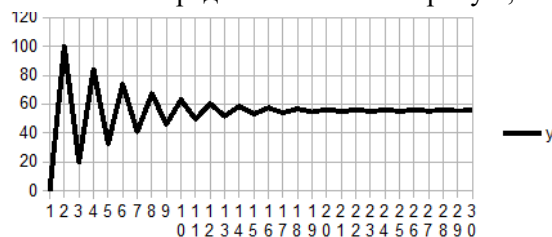


Рис. 2. Выходной сигнал системы управления

В современных информационных системах (в том числе промышленных) чаще всего используется преобразование данных из одной системы счисления в другую, которое является линейным. Для систем с основанием k число x записывается в виде суммы разрядов.

$$x = \sum_{k=0}^{n-1} a_k b^k. \quad (1)$$

При значительной сложности используемых алгоритмов могут случаться методические ошибки, например, отсутствие обратного перехода к исходной системе счисления с основанием k .

$$x = c_k = d_l;$$

$$d_l \Rightarrow d_k.$$

Такая ошибка может быть не обнаружена даже на этапе предварительного тестирования, так как выходные значения не будут превышать допустимых. Однако выходные значения, принятые таким образом, не будут явно связаны с входными значениями, порождая псевдослучайные выходные значения.

Полученная система имеет полностью линейные преобразования, однако способна к генерации псевдослучайного выходного сигнала (рис. 3).

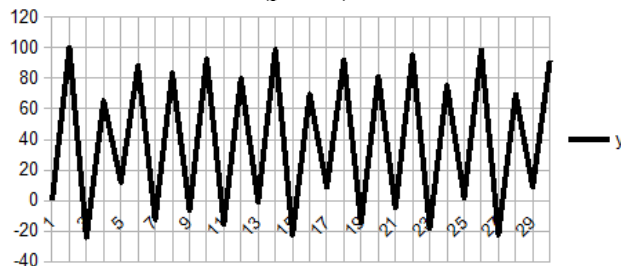


Рис. 3. Псевдослучайный выходной сигнал системы

Система демонстрирует случайное поведение, сходное с хаотическим. Хаос в динамических системах обычно вызывается нелинейностью уравнений [2], однако данная система способна к хаотическому поведению при линейности всех входящих в нее уравнений.

Рассмотрим критерии хаотичности системы [2]:

- расхождение траекторий по Ляпунову;
- ограниченность фазового объема системы;
- перемешивание траекторий.

Полученная система демонстрирует только часть таких признаков:

- фазовый объем системы ограничен из-за наличия обратной связи;
- траектории перемешиваются вследствие ограниченности фазового пространства (рис. 4).

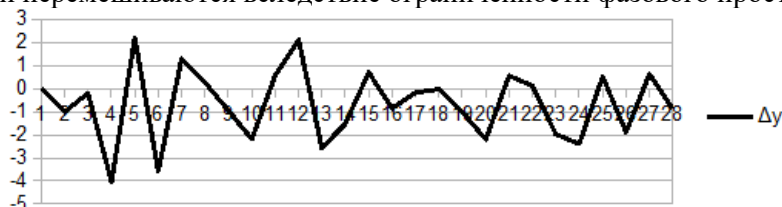


Рис. 4. Расстояние между близкими траекториями фазового пространства

Экспоненциальное расхождение траекторий по Ляпунову не выражено (рис. 4), что не позволяет судить об хаотичности полученной системы. Тем не менее, система, полученная таким способом, позволяет исследовать поведение объектов при случайных воздействиях.

Одним из примеров такой системы является моделирование процессов измельчения горной породы в дробильной машине. Дробильная машина осуществляет измельчение породы, характеристика которой предполагается неизменной ($\sigma = \text{const}$), при этом в реальных условиях в зоне дробления могут оказаться предметы с параметрами, превышающими заданные, что может привести к аварийной ситуации. В качестве превентивной меры используются различные защитные устройства, например, распорные плиты, однако существует возможность ложного срабатывания таких устройств при колебаниях характеристик материала внутри допустимого диапазона [3].

Для проверки гипотез разрушаемости распорных плит от усталостных нагрузок используются методы математической статистики, однако результаты таких расчетов дают лишь приблизительную оценку допустимой нагрузки. [4]

Рассмотрим процесс усталостного нагружения распорной плиты периодической, переменной по величине, нагрузкой.

$$\frac{dl}{dN} = A * \Delta K^n, \quad (2)$$

где l – длина трещины, мм; N – количество нагружений; A, n – эмпирические коэффициенты; ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжений.

С учетом исследования Маартена [5] количество нагружений рассчитывается статистически:

$$\lg(N) = \lg(\bar{N}) + U * S, \quad (3)$$

где $\bar{N}$ – среднее количество нагружений; U – квантиль закона нормального распределения; S – дисперсия срока службы.

Очевидно, что методы теории усталости предлагают лишь приблизительные оценки. Однако предложенный метод позволяет моделировать переменные нагрузки разной величины с целью

нахождения более точного значения параметра разрушения распорной плиты, в частности моделировать сигнал нагружения распорной плиты аналогично рисунку 3.

Вывод. Предложен метод генерации динамических систем со случайным (псевдохаотическим) выходным сигналом на основе линейной системы, пригодный для моделирования случайных процессов и различных аварийных ситуаций, связанных с нестационарностями, в частности, при расчетах количества нагружений распорной плиты при докритических нагрузках.

Список литературы

1. Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Рапопорт Л.Б. Математическая теория автоматического управления: учеб. пособие. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 504 с.
2. Хайтун С.Д. От эргодической гипотезы к фрактальной картине мира: рождение и осмысление новой парадигмы. – М.: КомКнига, 2007. – 312 с.
3. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. Конструкция, расчет особенности эксплуатации – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
4. Партон В.З. Механика разрушения: от теории к практике. – М.: Издательство ЛКИ, 2016. – 240 с.
5. Johnston G.O. A review of probabilistic fracture mechanics literature // Reliability Engineering. – 1982. – № 3. – P. 423-448.

УДК 625.7:004.942

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕДУРЫ ВОЗВРАТА ИНВЕСТИЦИЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ ГОСУДАРСТВЕННО-ЧАСТНОГО ПАРТНЕРСТВА В АВТОДОРОЖНОМ КОМПЛЕКСЕ

¹д.т.н. Новичихин А.В., ²Буйвис В.А.

1 – Петербургский государственный университет путей сообщения,
г. Санкт-Петербург, Россия

2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Определены особенности реализации проектов в автодорожном комплексе. Выполнен анализ транспортно-эксплуатационного состояния улично-дорожной сети г. Новокузнецк. Разработана процедура возврата инвестиций в инфраструктурные проекты в автодорожном комплексе, реализуемых с применением механизма государственно-частного партнерства. Для оценивания ожидаемого платежеспособного спроса на проезд по платной дороге предложен алгоритм корректировки маршрутов доставки грузов.

Ключевые слова: автодорожный комплекс, проект государственно-частного партнерства, плата за проезд, алгоритм корректировки маршрутов, процедура возврата инвестиций.

Состояние улично-дорожной сети крупных городов не в полной мере соответствует требованиям безопасности дорожного движения, доля дорожно-транспортных происшествий, зарегистрированных в 2020 году, приходящаяся на городской сети превышает 60% [1, 2]. В настоящее время задача повышения безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах крупных городов решается в рамках национальных проектов «Безопасные и качественные автомобильные дороги» и «Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры» [3, 4]. Одним из направлений, позволяющих снизить нагрузку улично-дорожной сети крупных городов, является строительство автомобильных обходов. Всего в рамках проекта «Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры» предусмотрено до 2024 г. строительство обходов вокруг 18 крупных городов. В Кемеровской области, в рамках реализации проекта, предусмотрено строительство транспортных обходов городов Мариинск и Кемерово [4].

По состоянию на январь 2021 года город Новокузнецк по промышленному потенциалу и численности населения является основой экономики Кемеровской области - Кузбасса и Кузбасского территориально-производственного комплекса. Обследованием улично-дорожной сети города Новокузнецка, проведенным в 2017 году в рамках национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги», были выявлены [1, 5]:

– несоответствия нормативным требованиям протяженности улично-дорожной сети города составляет 52,7%;

– доля улично-дорожной сети, работающей в режиме перегрузки, превышает 60% её протяженности;

– количество мест концентрации дорожно-транспортных происшествий (аварийно-опасных участков) на дорожной сети – 42 единицы.

В рамках реализации проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» (БКАД) предусмотрено достижение к 2024 году следующих показателей [5, 6]:

- доведения в г. Новокузнецке доли улично-дорожной сети, соответствующей нормативным требованиям до 85% от ее общей протяженности в 2017 году;
- снижение количества мест концентрации дорожно-транспортных происшествий (аварийно-опасных участков) на улично-дорожной сети в два раза по сравнению с 2017 годом;
- снижение доли улично-дорожной сети, работающей в режиме перегрузки, на 10% по сравнению с 2017 годом.

Таким образом, реализация мероприятий, предусмотренных проектами «Безопасные и качественные автомобильные дороги» и «Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры» способна обеспечить долю улично-дорожной сети г. Новокузнецка, работающей вне режима перегрузки, не более 50% от её протяженности.

Одним из инструментов повышения безопасности дорожного движения на улично-дорожной сети г. Новокузнецка является привлечение инвестиций в инфраструктурные проекты, реализуемые с применением механизма государственно-частного партнерства (ГЧП). Успешность реализации проектов ГЧП обусловлена уровнем и эффективностью возврата инвестиций. В связи с возрастанием доли инфраструктурных проектов реализуемых за счет механизмов ГЧП становятся актуальными вопросы совершенствования процедуры возврата инвестиций. В настоящее время практика реализации автодорожных проектов ГК «Автодор» предполагает три механизма возврата инвестиций: прямой сбор платы, выплаты из бюджета и смешанный [7].

Выбор механизма возврата инвестиций в инфраструктурные проекты ГЧП определяется эффективностью сбора платы за проезд. Существующие российские подходы к методике определения платы за проезд транспортных средств по платным автомобильным дорогам [8] позволяют разделить процесс на два этапа:

- определение значения размера платы за проезд;
- определение ожидаемого платежеспособного спроса на проезд по платным дорожным объектам.

На первом этапе определяется размер платы за проезд, которая учитывает:

- величину сокращения транспортных расходов при включении в маршрут движения платной автомобильной дороги (за счет снижения расхода горюче-смазочных материалов, износа шин, расходов на ремонт транспортных средств и прочих эксплуатационных расходов);
- сокращение времени доставки грузов и пассажиров;
- максимальный размер платы за проезд транспортных средств на участках автомобильных дорог, на которых реализуются инфраструктурные проекты в автодорожном комплексе с применением механизма ГЧП, установленный нормативными документами;
- повышение комфорта и безопасности движения.

На первом этапе у проектов, соответствующих условию (1), возврат инвестиций осуществляется выплатами из бюджета.

$$\sum_i \sum_j \sum_k \Delta_{t_{об}}^{ijk} \leq \sum_i \sum_j \sum_k T_t^{ijk}, \quad (1)$$

где $\Delta_{t_{об}}^{ijk}$ – экономия средств при движении по участкам платной автомобильной дороги, обслуживаемых i – ой организацией, относящихся к k – му административному району, по которым осуществляется j – ый вид перевозок, в расчетный период t , руб./авт.; T_t^{ijk} – величина тарифа за проезд по участкам платной автомобильной дороги, обслуживаемых i – ой организацией, относящихся к k – му административному району, по которым осуществляется j – ый вид перевозок, в расчетный период t , руб./авт.

На втором этапе методом экспертных оценок [8] определяется величина ожидаемого платежеспособного спроса на проезд по участкам автомобильных дорог, на которых реализуются инфраструктурные проекты в автодорожном комплексе с применением механизма ГЧП. В проектах, соответствующих условию (2), механизмом возврата инвестиций является прямой сбор платы.

$$\begin{cases} \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F PRV_{факт}^{Hf} + \sum_{g=1}^G \sum_{f=1}^F PBV_{факт}^{gf} \leq \sum_i \sum_j \sum_k (T_t^{ijk} \cdot N_t^{ijk}); \\ T_{t_{макс}}^{ijk} \geq T_t^{ijk} < \Delta_{t_{об}}^{ijk}, \end{cases} \quad (2)$$

где $PRV_{\text{факт}}^{gf}$ – фактическое значение объема участия h – го публичного партнера в инфраструктурном j – ом проекте, реализуемом по f – ой организационно – правовой модели ГЧП, руб.; $PBV_{\text{факт}}^{gf}$ – фактическое значение объема чистых дисконтированных расходов средств g -го бюджета бюджетной системы Российской Федерации в инфраструктурном j – ом проекте, реализуемом по f – ой организационно – правовой модели ГЧП, руб.; N_t^{ijk} – величина ожидаемого платежеспособного спроса на проезд по участкам платных автомобильных дорог, обслуживаемых i – ой организацией, относящихся к k – му административному району, по которым осуществляется j – ый вид перевозок, в расчетный период t , авт.; $T_{t \text{ макс}}^{ijk}$ – максимальный размер платы за проезд транспортных средств на участках автомобильных дорог, на которых реализуются инфраструктурные проекты в автодорожном комплексе с применением механизма ГЧП, обслуживаемых i – ой организацией, относящихся к k – му административному району, по которым осуществляется j – ый вид перевозок, в расчетный период t , руб.

Максимальный размер платы за проезд транспортных средств на участках автомобильных дорог, на которых реализуются инфраструктурные проекты в автодорожном комплексе с применением механизма ГЧП, устанавливается и регулируется Постановлениями Правительства Российской Федерации [8].

У проектов, соответствующих условию (3), механизм возврата инвестиций смешанный

$$\begin{cases} \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F PRV_{\text{факт}}^{Hf} + \sum_{g=1}^G \sum_{f=1}^F PBV_{\text{факт}}^{gf} \leq \sum_i \sum_j \sum_k (T_t^{ijk} \cdot N_t^{ijk}); \\ T_{t \text{ макс}}^{ijk} < T_t^{ijk} < \Xi_{t_{об}}^{ijk}. \end{cases} \quad (3)$$

Недостатком данной методики является высокая субъективность получаемых оценок и возможность манипулирования параметрами проектов ГЧП в связи с отсутствием апробированного инструментария решения подобных задач на основе модельного подхода. Ожидаемый платежеспособный спрос на проезд на платных участках N_t^{ijk} может оказаться на 20-30% ниже прогнозного значения, что создает угрозу потери до 100% инвестиций частным партнерам.

В данной работе предлагается отказаться от определения величины ожидаемого платежеспособного спроса методом экспертных оценок и воспользоваться методикой приведенной в [9]. Методика содержит алгоритм корректировки маршрутов доставки грузов с учетом состояния системы распределения ресурсов автодорожного комплекса. Данный алгоритм, содержит дополнительный инструментарий в виде набора индикаторов:

- инфраструктурный индикатор Ind_1 , характеризующий протяженность участков транспортных коммуникаций, на которых имеются ограничения пропускной и провозной способности из-за несоответствия нормативным требованиям;
- индикатор транспортной работы Ind_2 характеризует объем перевозок, следующий по резервным маршрутам вследствие неудовлетворения нормативным требованиям автомобильных дорог, по которым проложены основные маршруты, транспортно-эксплуатационным показателям;
- эксплуатационный индикатор Ind_3 , характеризующий величину отправок, доставленных автомобильным транспортом в сроки, превышающие нормативный (договорной) срок;
- социальный индикатор Ind_4 характеризует величину дополнительного времени нахождения населения в пути из-за несоответствия автомобильных дорог нормативным требованиям;
- экономический индикатор Ind_5 характеризует эффективность инвестиций, направленных в систему автодорожного комплекса, в качестве индикатора предлагается использовать чистый дисконтированный доход.

Процесс корректировки основывается на количественной и нечеткой форме представления первичных и промежуточных данных [9].

Применение алгоритма для решения задачи многокритериального выбора варианта маршрута позволяет получить решение, максимально удовлетворяющее всем требованиям, заявленным пользователями объектов автодорожного комплекса.

Процедура возврата инвестиций в инфраструктурные проекты ГЧП в автодорожном комплексе с определением величины ожидаемого платежеспособного спроса при помощи алгоритма корректировки маршрутов представлена на рис. 1.

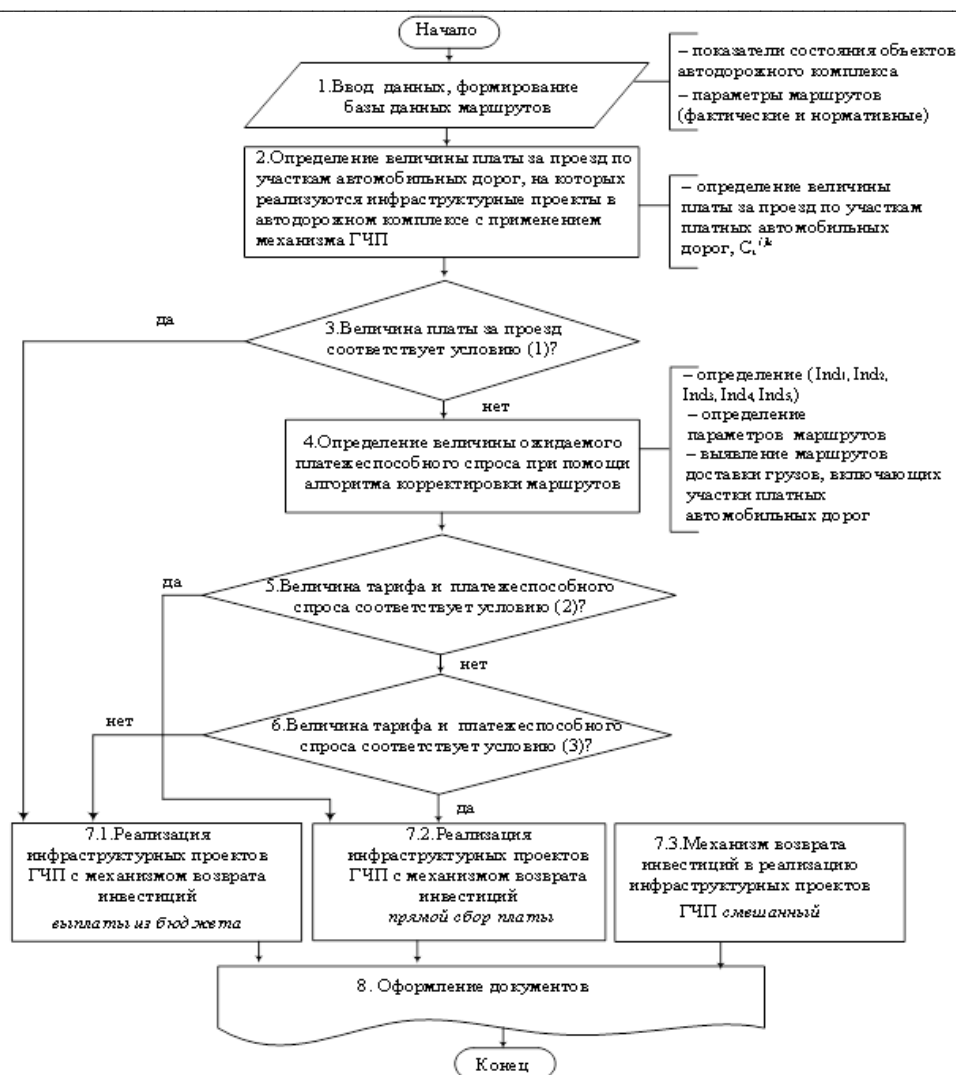


Рис. 1. Процедура возврата инвестиций в инфраструктурные проекты ГЧП в автодорожном комплексе с определением величины ожидаемого платежеспособного спроса при помощи алгоритма корректировки маршрутов

В данной работе в условиях г. Новокузнецка выполнено моделирование процесса возврата инвестиций в проект повышения технического уровня и эксплуатационного состояния Новокузнецкой кольцевой автомобильной дороги (НКАД). В рамках реализации проекта с частным партнером заключается контракт жизненного цикла, по которому выполняются работы по проектированию, реконструкции и последующей эксплуатации объекта. Частично возврат инвестиций и окупаемость проекта предусмотрены за счет получения платы за видеофиксацию случаев нарушения ПДД [11]. Альтернативный маршрут предусматривает движение по улично-дорожной сети г. Новокузнецк и пос. Колачево, включая ул. Куйбышева, ул. Димитрова.

Рассмотрено два варианта возврата инвестиций в проект повышения технического уровня и эксплуатационного состояния НКАД:

- вариант А по процедуре, утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации №47 от 30.01.2016 г. [8];
- вариант В по процедуре, предложенной в данной работе (рис. 1).

Результаты моделирования процесса определения механизма возврата инвестиций в проект повышения технического уровня и эксплуатационного состояния НКАД представлены в табл. 1.

Согласно данным таблицы 1, вариант В экономически выгодней для частного партнера. Его реализация позволяет получить большую прибыль 796,43 млн. руб. и меньший срок окупаемости 8,4 г. При необходимости снижения нагрузки на улично-дорожную сеть г. Новокузнецка до значений варианта А рекомендуется перейти на смешанный механизм возврата инвестиций и выплатами из бюджета компенсировать более 92,31 млн. руб. публичному партнеру.

Таблица 1

Результаты моделирования процесса возврата инвестиций в проект повышения технического уровня и эксплуатационного состояния

Наименование показателя	Значение	
	существующее положение (вариант А)	по предложенному алгоритму (вариант В)
Протяженность маршрута по сравнению с альтернативным, км	12,6	12,6
Экономия времени в пути следования, час	0,2	0,3
Сокращение количество ДТП, ДТП/год	64	57
Ожидаемый платежеспособный спрос на проезд, авт./сут.	13000	10500
Увеличение интенсивности движения, тыс. авт./год	1880,48	967,98
Величина платы за проезд, руб.	20,50	24,00
Объем инвестиций включает:		
капитальные вложения, млн. руб.	157,2	157,2
единовременные затраты на организацию платного проезда – КПП для сбора платы за проезд и взвешивания транспортных средств, ограждающие устройства и т. д., млн. руб.	55,00	55,00
установку устройств видео фиксации нарушений ПДД, млн. руб.	6,10	6,10
устройство дополнительных полос на подъемах и улавливающих тупиков, млн. руб.	7,40	7,40
Ежегодные затраты включают:		
капитальный ремонт через 6 лет, млн. руб./км	102,35	89,28
текущее содержание млн. руб./км·год	31,78	27,776
текущее содержание на организацию платного проезда, млн. руб./год	5,5	5,5
Доходы от получения платы за видеофиксацию случаев нарушения ПДД, млн. руб./год	2,76	1,76
Срок окупаемости, лет	9,7	8,4
Чистый дисконтированный доход, за период реализации проекта, млн. руб.	704,12	796,43
Механизм возврата инвестиций	прямой сбор платы	прямой сбор платы

Вывод. Реализация предложенной процедуры предусматривает на различных этапах выполнения проекта использование механизмов возврата инвестиций в зависимости от изменения внешних или внутренних факторов. Алгоритм корректировки маршрутов доставки грузов позволяет исключить субъективность получаемых оценок и возможность манипулирования параметрами проектов ГЧП при определении ожидаемого платежеспособного спроса на проезд. Предлагаемая процедура возврата инвестиций позволяет получить значение платы за проезд, максимально удовлетворяющей всем требованиям, заявленным инвесторами и пользователями объектов автодорожного комплекса.

Список литературы

1. Безопасные и качественные автомобильные дороги. Национальный проект. – URL: <https://www.admnkz.info/web/guest/people/transport/bkd/>.
2. Безопасность на дорогах. Годовой отчет по аварийности. – URL: <https://kuzdor.ru/wp-content/KuzdorSiteSection/RoadSafety/AnnualReportOnAccidents/Analiz-avarijnosti-za-2020.pdf>.
3. Безопасные и качественные автомобильные дороги : паспорт нац. проекта утв. президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам 24 декабря 2018. – URL: <http://static.government.ru/media/files/rBdyoIr3S9IDP8Q871XXYaktpKWGc0NY.pdf>.

4. Об утверждении Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 30 сентября 2018 г., №2101-р. – URL: <http://government.ru/docs/34297/>.

5. Буйвис В.А., Новичихин А.В. Методические особенности распределения ресурсов при реализации мероприятий по повышению безопасности улично-дорожной сети г. Новокузнецка // Образование – наука – производство: материалы IV всерос. науч.-практ. конф. – Чита: ИрГУПС, 2020. – С.119-125.

6. Итоги БКАД в Новокузнецке за 2019 год. – URL: http://www.admnkz.info/web/guest/news/one/asset_publisher/JE0WkfMvNUCn/content/id/2684327/.

7. Министерство экономического развития Российской Федерации. Рекомендации по реализации проектов государственно-частного партнерства. Лучшие практики. – Москва. – 2018 г. – URL: http://economy.gov.ru/wps/wcm/connect/82489feb-7ce4-41bd-8830-be47cf70063c/metodic_26_12.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=82489feb-7ce4-41bd-8830-be47cf70063c.

8. О плате за проезд транспортных средств по платным автомобильным дорогам общего пользования федерального значения, платным участкам таких автомобильных дорог (в том числе если платным участком автомобильной дороги является отдельное искусственное дорожное сооружение) : пост. Правительства Российской Федерации от 30.01.2016, № 47. – URL: <https://sudact.ru/law/postanovlenie-pravitelstva-rf-ot-30012016-n-47/>.

9. Буйвис В.А., Новичихин А.В. Алгоритм корректировки маршрутов доставки грузов с учетом состояния системы распределения ресурсов автодорожного комплекса // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – № 6. – С. 191-197.

10. Буйвис В.А., Новичихин А.В. Разработка и выбор сценариев распределения ресурсов автодорожного комплекса на основе механизма государственно-частного партнерства // Системы управления и информационные технологии. – 2020. – № 2 (80). – С. 89-93.

11. Буйвис В.А., Новичихин А.В. Моделирование сценариев повышения технического уровня и эксплуатационного состояния Новокузнецкой кольцевой автомобильной дороги, реализуемых на основе механизма государственно-частного партнерства // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 4 (68). – С. 127–134.

УДК 622.85:622.271.45

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО РЕМОНТУ ГОРНЫХ МАШИН В УСЛОВИЯХ РЫНОЧНОЙ ЭКОНОМИКИ

^{1,2}Д.Т.Н. Зеньков И.В.

1 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика
М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия

2 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных
технологий, г. Красноярск, Россия

Аннотация. В статье представлены основные положения по внедрению интегрированных систем управления производством на машиностроительных предприятиях по ремонту горных машин в условиях рыночной экономики. Разработан алгоритм управления производством, являющийся ядром интегрированной системы. Созданная система управления при внедрении на предприятиях будет способствовать повышению их конкурентности на рынке услуг по ремонту горного оборудования.

Ключевые слова: ремонт горных машин, ремонтно-механический завод, интегрированная система управления производством, резервы производства, производственные и трудовые ресурсы, инвестиции в основной капитал.

Введение. В последние годы в пяти горнодобывающих регионах Сибирского федерального округа (Новосибирская, Кемеровская, Иркутская области, Красноярский край, Республика Хакасия) ежегодно в карьерах перерабатывают горные породы объемом не менее 3,1 млн. т. Количество горных и транспортных машин, по нашей оценке, составляет 5425 ед., из них 1052 карьерных одноковшовых экскаватора. Суммарная стоимость последних находится в диапазоне 38-40 млрд. руб. Ежегодные амортизационные отчисления предусматривают проведение всех видов ремонта экскаваторов на общую сумму не менее 4 млрд руб. Из имеющегося парка горнотранспортного оборудования наиболее трудоемкими и затратными являются ремонты экскаваторов. Ремонты агрегатов и узлов экскаваторов проводят как в механических мастерских, так и на крупных ремонт-

но-механических заводах, имеющих отраслевую принадлежность. Повышение конкурентоспособности ремонтно-механических заводов на рынке услуг по ремонту горного оборудования может быть достигнуто за счет трансформации существующих систем управления, в которых необходимо отразить широкий спектр хозяйственной деятельности промышленных предприятий. Эта тематика приобретает большую актуальность в работе предприятий в условиях рыночной экономики. Обзор специальной литературы, выборочно представленной в списке, указывает на отсутствие решений в области разработки интегрированных систем управления для крупных ремонтно-механических заводов, работающих на рынке услуг по ремонту горного оборудования [1-11].

Разработка алгоритма, как основы ядра интегрированной системы управления предприятием по ремонту горных машин. В исследуемых горнодобывающих регионах Сибирского федерального округа исторически ремонт агрегатов и узлов карьерных экскаваторов производился на ремонтно-механических заводах, принадлежащих крупным производственным объединениям по добыче угля. Большое количество горной техники, требующей проведения восстановления, не позволяло проводить политику оказания ремонтных услуг горнодобывающим предприятиям, имеющим другую отраслевую принадлежность. С началом перехода экономики России на рыночные рельсы при возникновении новых форм собственности необходим пересмотр маркетинговой политики в области производства ремонтных работ в горнодобывающем секторе, направленной на привлечение сторонних заказов. В настоящее время практически все ремонтно-механические заводы работают с небольшим отклонением в ту или иную сторону от точки безубыточности.

В новых условиях считаем целесообразным переход на управление предприятиями по ремонту горного оборудования путем создания интегрированной системы управления производством (ИСУП). Ядром такой системы является разработанный алгоритм, включающий проведение специальных расчетов технико-экономического характера в несколько этапов (рис. 1). Отметим, что при создании интегрированной системы управления в нашем случае мы не касаемся совокупности стандартов менеджмента ИСО-9001, 14001, OHSAS 18001 и системы социальной ответственности SA 8000. На фоне невысоких технико-экономических показателей применение этих стандартов уходит на второй план, но в создании (ИСУП) они используются.



Рис. 1. Алгоритм построения интегрированной системы управления машиностроительным предприятием по ремонту горных машин в условиях рыночной экономики

На первом этапе используется созданная информационная база управления предприятием. В любом случае проводится расчет производственного потенциала предприятия (блок 1): суммарная производительность станков по механической обработке металла, мощность сварочных линий, линий по разделке листового металла и металлопроката, установок по металлургическому переделу и др. Определяется возможный выпуск изделий из металла с учетом их сложности и веса. Также выявляются так называемые «узкие места», т.е. то, что при возможном увеличении производственной мощности будет ее сдерживать.

На втором этапе всесторонне исследуются возможности трудового потенциала (блок 2): количество рабочих необходимых профессий (токари, фрезеровщики, сварщики и др.), обладающих необходимой квалификацией и производственными навыками, а также способностью к быстрому переобучению и повышению уровня профессиональных знаний. На третьем этапе производится сбор информации о предстоящих ремонтах всех видов горных машин, работающих в карьерах угольной корпорации, на перспективу до пяти лет (блок 3). Далее производится консолидация информационно потоков с отражением результатов расчетов в блоках с 1 по 3 с целью дальнейшей аналитической обработки полученных показателей. В результате сопоставления полученных показателей выявляются скрытые возможности машиностроительного предприятия по увеличению выпуска товарной продукции (блок 4). В случае отсутствия скрытых резервов ремонтно-механический завод производит ремонтные работы горного оборудования, работающего в карьерах корпорации, являющейся собственником завода. Это обстоятельство рассматривается в блоке 5 (рис. 1).

Второй вариант развития предприятия предусматривает на основе гарантированно выявленных скрытых производственных мощностей привлечение заказов на ремонтные работы со стороны горнодобывающих предприятий, не входящих в угольную отрасль (блок 6). Это предприятия по добыче открытым способом золота, цементного сырья, металлургических флюсов, руд цветных металлов, щебеночные карьеры. После сбора информации об объемах ремонтов горных машин с этих горных предприятий производится сопоставление этих показателей с выявленными скрытыми возможностями ремонтно-механического завода (блок 7). По результатам аналитической обработки собранной информации вырабатывается решение о практической реализации одного из возможных вариантов организации работ. Первый предусматривает выполнение работ, обеспечивающих увеличение объема в одну смену, либо продолжительность смены необходимо увеличить с 8 до 10-12 часов (блок 8). Второй вариант более сложный в плане организации работ и оговаривает перевод предприятия на двухсменный режим, либо на трехсменный с организацией работы одной смены, в которую будут производиться подготовительные работы (блок 9). В этом блоке производится более детальный расчет показателей, в ходе которых устанавливается потребность в квалифицированных кадрах, более тщательно проверяются производственные линии с поиском всех рисков невыполнения увеличившегося объема работ по выполнению ремонтных компаний.

В блоке 10 определяются технико-экономические показатели производственной мощности машиностроительного предприятия, скорректированной в сторону увеличения производственной мощности. Определяется будущая доходность работы предприятия от всех видов хозяйственной деятельности. Здесь необходимо сделать ставку на то, что при увеличении объемов работ увеличиваются такие показатели как фондоотдача, снижаются закупочные цены на расходные материалы и комплектующие. Все это в итоге позитивно скажется на снижении цен на ремонтные работы. В основе предстоящей трансформации работы ремонтно-механического завода лежит общеизвестный экономический эффект от масштаба производства. В блоке 11 определяется потребность в инвестициях в основной капитал: станки, обрабатывающее оборудование, технологические линии, а также необходимость инвестиций в трудовые ресурсы.

Дополнительные объемы производства ремонтных работ на имеющемся оборудовании неизменно улучшит экономические показатели предприятия, при этом по вполне очевидным причинам работа предприятия будет сдвигаться в сектор, находящийся на графике справа от точки безубыточности. На величину сдвига будет напрямую влиять общая загруженность предприятия.

Взаимодействие предприятия машиностроительной отрасли с внешней средой, внутреннее – между структурными подразделениями выстраивается посредством организации информационных потоков, генерируемых в учетном, аналитическом, организационном блоках. Техническая сторона обеспечивается специалистами IT-подразделения головного офиса корпорации, в собственности которой находится ремонтно-механический завод. В ходе разработки и внедрения ИСУП комплекс работ проводится в три временных периода. На начальном этапе собирают информацию о достигнутых технологических, производственных показателях, характеристиках трудовых ресурсов, выявляют финансовую сторону хозяйственной деятельности предприятия. Предварительно строят конфигурацию модели намечаемых бизнес-процессов, используя информацию по принципу «что имеется на предприятии» и что необходимо сделать с позиции трансформации управления, чтобы изменить ситуацию в русло «что мы хотим получить в долгосрочной перспективе». Параллельно вырабатывают стратегию развития ИСУП.

Далее производится проектирование ИСУП с учетом особенностей производственной деятельности, стратегических планов и др. Эскизно прорисовываются управленческие информационные потоки, их частота и направления. Разрабатываются необходимые модули для встраивания их в действующую информационную систему. Также производится корректировка применяемых модулей в программном обеспечении. На заключительном этапе разработанную ИСУП вводят в действие путем сбора разработанных и скорректированных модулей и подпрограмм в единое целое. Проводят стендовые испытания и обучение управленческого персонала – пользователей новой ИСУП.

Вывод. Разработанный подход к формированию интегрированной системы управления производством на машиностроительных предприятиях по ремонту горных машин при внедрении потребует перенастройки действующих информационных систем управления. Вместе с тем, привлечение дополнительных заказов с горных предприятий, не входящих в угольную отрасль и работающих в радиусе суточного автомобильного перехода (700-800 км), позволит существенно улучшить технико-экономические показатели ремонтно-механических заводов, снизить в целом издержки на ремонтные работы, повысить инвестиционную привлекательность этого вида деятельности, направленной на восстановление работоспособности горного оборудования.

Список литературы

1. Математическая модель интегрированной цепочки поставок / В.М. Буре [и др.] // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2019. – Серия 10. – Т. 15. – Выпуск 3. – С. 353-361.
2. Буре В.М., Карелин В.В., Буре А.В. Оценка объема заказа товара при возможном падении спроса // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2018. – Серия 10. – 2018. – Т. 14. – Выпуск 3. – С. 252-260.
3. Захаров А.О., Коваленко Ю.В. Построение и сужение множества Парето в асимметричной задаче коммивояжера с двумя критериями // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2018. – Серия 10. – Т. 14. – Выпуск 4. – С. 378-392.
4. Бахтизин А.Р., Низамутдинов М.М., Орешников В.В. Подход к решению проблемы управления стратегическим развитием региона с использованием адаптивно-имитационной модели // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2019. – Серия 10. – Т. 15. – Выпуск 3. – С. 362-374.
5. Бурков В.Н., Буркова И.В., Засканов В.Г. Метод сетевого программирования в задачах календарного планирования // Автоматика и телемеханика. – 2020. – № 6. – С. 17-28.
6. Малах С.А., Сервах В.В. Максимизация удельной приведенной прибыли в системах управления запасами // Автоматика и телемеханика. – 2020. – № 5. – С. 106-118.
7. Сафонов П.И. Двойственный алгоритм прогнозирования технологических матричных структур в динамических моделях типа затраты-выпуск // Автоматика и телемеханика. – 2019. – № 8. – С. 109-128.
8. Горелов М.А., Ерешко Ф.И. Информированность и децентрализация управления // Автоматика и телемеханика. – 2019. – № 6. – С. 156-172.
9. Лавлинский С.М., Панин А.А., Плясунов А.В. Модели Штакельберга в территориальном планировании // Автоматика и телемеханика. – 2019. – № 2. – С. 111-124.
10. Тюлин А.Е., Чурсин А.А. Основы технологии построения интеллектуальной системы управления созданием уникальной продукции // Вестник машиностроения. – 2020. – № 8. – С. 71-74.
11. Бурдо Г.Б. Повышение эффективности технической подготовки производства в многономенклатурном машиностроении // Вестник машиностроения. – 2018. – № 8. – С. 78-86.

УДК 622.85:622.271.45

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ И ЛОГИСТИКИ УГОЛЬНЫХ ПОТОКОВ В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ШТАТА ТЕХАС В США

^{1,2} д.т.н. Зеньков И.В.

**1 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика
М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия**

**2 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных
технологий, г. Красноярск, Россия**

Аннотация. В статье представлены результаты исследования технологических и технических аспектов производства открытых горных работ на угольных месторождениях штата Техас в США. В ходе дистанционного мониторинга и аналитических расчетов выявлено количество горных и транспортных машин, ра-

ботающих в угольных карьерах, а также определен годовой объем экскавации вскрышных пород и угля, поставляемого на тепловые электростанции. По результатам спутниковой съемки выявлен стабильный тренд в добыче угля открытым способом на территории исследуемого штата.

Ключевые слова: Соединенные штаты Америки, штат Техас, топливно-энергетический комплекс, угольная генерация электроэнергии, угольные карьеры, годовой объем добычи угля, горные и транспортные машины, дистанционное зондирование Земли.

Введение. Поступательное движение в развитии науки и технике подразумевает повсеместный переход в промышленности на энергосберегающие технологии. Вместе с тем в экономике имеются энергоемкие производства, потребность которых в электрической энергии невозможно покрыть использованием солнечных батарей и ветряных генераторов. В мировой экономике одним из регионов, на территории которого развиваются энергоемкие производства, является штат Техас в США. В последние десятилетия на территории этого штата интенсивно производится добыча как жидких углеводородов, так и энергетического угля в карьерах. По результатам спутниковой съемки установлено что в секторе между городами Даллас и Хьюстон работают крупные объекты топливно-энергетического комплекса – угольные карьеры и тепловые станции с угольной генерацией электрической энергии. На наш взгляд, технологические решения, системы разработки, показатели работы горных и транспортных машин, т.е. мировой производственный опыт всегда применялся в качестве информации для обучения новых поколений специалистов в области горного дела независимо от государственной принадлежности и политической обстановки в мире. Последнее является актуальной задачей в области горных наук. В последние годы интенсивное освоение космоса способствует получению новых знаний о территориях Земли, а также исследованию прикладных отраслевых проблем, имеющим место во всем разнообразии биосферных оболочек, решения которых представлены в виде небольшой подборки трудов российских и зарубежных ученых [1-13].

Исследование состояния открытых горных работ на месторождениях угля в штате Техас. На территории штата мы выделили два сектора с условными названиями А и Б (рис. 1) [16]. Сектор А имеет в плане форму полосы с размерами 24-32×214 км, длинная ось которой ориентирована в направлении юго-запад – северо-восток. Сектор Б – многоугольник, длинная ось которого протяженностью 140 км ориентирована в направлении северо-запад – юго-восток. Результаты дистанционного зондирования показали, что в секторе А работает 8 угольных карьеров, а в секторе Б – девять. Общая протяженность фронта добычных работ по единственному уступу во всех карьерах определена на уровне 37420 м. В секторе А электрическая энергия вырабатывается на 5 тепловых станциях, а в секторе Б – на 4 станциях.

По снимкам из космоса установлено, что угольные пласты при средней мощности 10 м залегают горизонтально. Толща горных пород, покрывающих угольные пласты, состоит из двух слоев: верхний слой мощностью до 15 м представлен горными породами четвертичного возраста (глины, суглинки, пески и др.); нижний – надугольный слой мощностью до 50 м сложен более плотными алевритами светло-серого цвета. Все вскрышные породы не требуют перед их экскавацией буровзрывного рыхления. Отметим, что горно-геологическое строение угольных месторождений в обоих секторах является схожим с небольшим отличием в сторону уменьшения мощности толщи вскрышных пород от вышеописанной. Рельеф местности, на которой производится разработка угольных месторождений равнинный с высотными отметками в диапазоне 90-130 м.

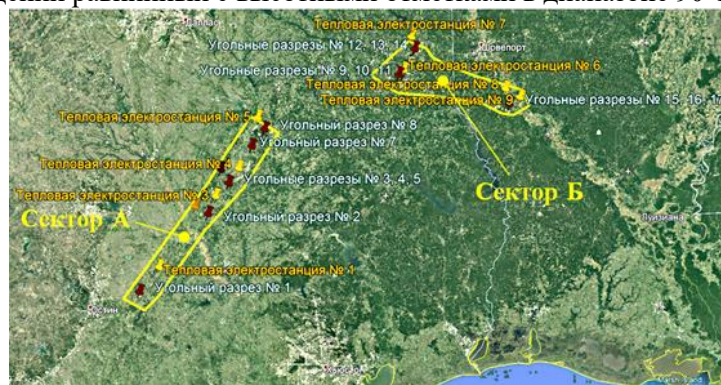


Рис. 1. Фрагмент космоснимка с расположением объектов топливно-энергетического комплекса на территории штата Техас (США)

Горизонтальное залегание угольных пластов и их мощность позволяют формировать технологии разработки месторождений с применением мощных драглайнов на перевалке надугольной толщи вскрышных пород в выработанное пространство карьеров. Количество драглайнов с емкостью ковша 20-90 м³ и длиной стрелы от 60 до 95 м в карьерах варьирует от одного до трех в зависимости от длины фронта вскрышных работ и от нагрузки на добычные забои. Драглайны вскрывают угольный пласт шириной до 110 м за одну заходку. Вскрышная толща в контурах карьерных полей с мощностью угольного пласта в среднем 10 м размещается во внутренних отвалах без переэкскавации.

На каждом карьере слой вскрышных пород, который по вертикали не входит в объем, удаляемый драглайном, обрабатывается различными выемочными машинами: гидравлическими экскаваторами типа «прямая» и «обратная лопата», а также скреперами, в составе которых находится один автомобильный тягач с колесной формулой 4×4 с двумя-тремя прицепными двухосными ковшами каждый емкостью 15 м³. Отметим, что технология разработки горных пород скрепером заключается в том, что эта экскавационно-транспортная машина производит выемку пород тонкими слоями, а после заполнения ковша (ковшей) транспортирует содержимое на породные отвалы.

Гидравлические экскаваторы с емкостью ковша 10-16 м³, установленные на выемке вскрышных пород, работают в комплексе с автосамосвалами грузоподъемностью 90-130 т. Все вскрышные породы за исключением объема строительного периода укладывают на место отработанного угольного пласта. Организация работ на внутренних отвалах выглядит так: драглайн укладывает надугольную толщу вскрышных пород в выработанное пространство карьера нижним ярусом. Сверху отсыпают вторым ярусом те горные породы передового вскрышного уступа, которые по технологическим параметрам не включаются в объемы выемки драглайном.

Далее с небольшой задержкой по времени на породных отвалах проводится технический и биологический этапы рекультивации с высадкой саженцев деревьев. На территориях с открытой разработкой угольных месторождений в этом штате рекультивацию проводят с высокой эффективностью итоговых показателей по двум направлениям – лесовосстановление на породных отвалах и создание искусственных водоемов в остаточных карьерных выработках. Отметим, что по истечении 10-12 лет рекультивированные горнопромышленные ландшафты определяются только наличием остаточных карьерных выработок, заполненных водоемами, которые узнаются на снимках из космоса по их форме в плане. Выемка угольного пласта производится блоками протяженностью от 500 до 1800 м. На экскавации угля задействованы гидравлические экскаваторы типа «обратная лопата», погрузчики на автомобильном шасси с емкостью ковша 15 м³, а также фрезерные комбайны. Все выемочное оборудование работает в комплексе с углевозами грузоподъемностью 200 т и автосамосвалами грузоподъемностью 90-130 т.

Добытый уголь доставляют на тепловые электрические станции. При этом в логистике угольных потоков задействованы все виды транспорта, обеспечивающие высокие технико-экономические показатели (табл. 1). С пяти угольных карьеров уголь доставляется до тепловых станций с использованием автомобильного и конвейерного транспорта. Наибольшая протяженность конвейерной линии с 10-ю точками перегрузки угля отмечена в одном из звеньев ТЭК: угольный разрез № 1 – тепловая станция № 1.

В шести звеньях «карьер – тепловая станция» угольная логистика имеет следующую комбинацию: автосамосвалы и углевозы вывозят уголь из забоев на прикарьерные склады; на складах уголь загружают в железнодорожные составы из одного тепловоза (аналог российского тепловоза ТЭ-8), 44 вагонов (каждый грузоподъемностью 112,5 т) и одной тяговой дизельной секции в хвосте состава. Масса перевозимого угля одним составом равна 4950 т. На железнодорожных путях, проложенных от станции № 3 к стационарному угольному складу, на который доставляется уголь из карьеров № 3, 4 и 5, в постоянной работе находятся два таких состава.

Автомобильный транспорт на доставке угля из добычных забоев в карьерах до расходных складов на тепловых станциях применяют в пяти звеньях «карьер – тепловая станция». Особенностью одного звена (угольный карьер № 14) является наличие промежуточного склада, на который уголь с добычного уступа доставляется углевозами и в карьерных автосамосвалах, а в дальнейшем загружается в магистральные полуприцепы грузоподъемностью 40 т для его перевозки по автомобильным дорогам общего пользования при доставке на тепловую станцию.

На тепловую станцию № 6 уголь, добытый в карьерах № 9, 10 и 11, транспортируют с прикарьерных складов в двух железнодорожных составах из одного тепловоза (аналог российского тепловоза ТЭ-8), 20 вагонов и одной тяговой дизельной секции. Вместе с тем потребности станции

в угле невозможно удовлетворить за счет его добычи в этих карьерах. По данным спутниковой съемки установлено, что недостающий объем угля (примерно 60 %) доставляется по трансконтинентальной железной дороге «север-юг» (авторское название) из штата Вайоминг.

Таблица 1

Основные характеристики угольных карьеров и логистики угольных потоков в штате Техас

Номер угольного карьера	Протяженность добычного фронта, м/объем добычи угля, млн. т	Номер тепловой станции/вид транспорта и дальность транспортировки угля, км
№ 1	6700/11,5	1/автомобильный 7,5 км+конвейерный 26 км
№ 2	1800/3,8	2/автомобильный 8,2 км
№ 3	2000/4,5	3/ автомобильный 6 км+железнодорожный 21 км
№ 4	2800/5,5	3/ автомобильный 3,8 км+железнодорожный 21 км
№ 5	2400/4,8	3/автомобильный 8,3 км+железнодорожный 21 км
№ 6	3100/5,8	4/автомобильный 4,3 км+конвейерный 2,4 км
№ 7	3000/5,7	4/ автомобильный 16,5 км+конвейерный 2,4 км
№ 8	2200/4,7	5/ автомобильный 10,1 км
№ 9	1700/3,6	6/ автомобильный 4,9 км+железнодорожный 6,5 км
№ 10	1050/2,0	6/ автомобильный 3,7 км+железнодорожный 6,5 км
№ 11	1850/3,9	6/ автомобильный 2 км+железнодорожный 20 км
№ 12	3500/6,0	7/автомобильный 14,5 км
№ 13	1800/3	7/автомобильный 17 км
№ 14	1050/2,0	7/автомобильный 34 км
№ 15	900/1,2	8/автомобильный 8,6 км+конвейерный 5,2 км
№ 16	800/1,1	8/автомобильный 4,2 км+конвейерный 11,3 км
№ 17	700/1,0	9/ автомобильный 5,3 км

По нашей оценке в карьерах, работающих в секторе А, на горных работах и транспортировке горных пород находится следующее горнотранспортное оборудование: драглайны с емкостью ковша от 20 до 90 м³ – 12 ед., гидравлические экскаваторы типа «прямая» и «обратная лопата» с емкостью ковша до 18 м³ – 16 ед., погрузчики на автомобильном шасси с емкостью ковша 15 м³ – 14 ед., фрезерные комбайны – 4 ед., карьерные автосамосвалы грузоподъемностью до 130 т – 52 ед., углевозы (тягач+полуприцеп) грузоподъемностью 200 т – 34 ед., шарнирно-сочлененные автосамосвалы повышенной проходимости грузоподъемностью 30 т – 7 ед., скреперы – 12 ед. Имеющийся парк горных и транспортных машин может обеспечить по техническим показателям годовой объем добычи угля на уровне 40 млн. т. Годовой объем вскрышных работ должен составлять не менее 180 млн. т.

В угольных карьерах, находящихся в секторе Б, работает следующий парк горных и транспортных машин: драглайны с емкостью ковша от 20 до 90 м³ – 13 ед., гидравлические экскаваторы типа «прямая» и «обратная лопата» с емкостью ковша до 18 м³ – 17 ед., погрузчики на автомобильном шасси с емкостью ковша 15 м³ – 16 ед., фрезерные комбайны – 6 ед., карьерные автосамосвалы грузоподъемностью до 130 т – 68 ед., углевозы (тягач+полуприцеп) грузоподъемностью 200 т – 26 ед., шарнирно-сочлененные автосамосвалы повышенной проходимости грузоподъемностью 30 т – 11 ед., скреперы – 36 ед. Этот парк горнотранспортного оборудования может обеспечить по техническим показателям годовой объем добычи угля на уровне 30 млн. т. Годовой объем вскрышных работ должен составлять не менее 140 млн. т.

Как показал обзор архива космоснимков, на исследуемой территории на участках угольных месторождений выявлено чередование вывода угольных карьеров из эксплуатации и ввод новых карьеров, производственные мощности по добыче угля которых позволяют компенсировать выбывающие мощности.

Выводы. В ходе дистанционного мониторинга на территории штата Техас выявлено 17 действующих карьеров по добыче угля, средняя техническая годовая производительность по горной массе которых находится на уровне 22,9 млн т. Технически и технологически достижимый объем добычи угля составляет 70 млн. т в год для сжигания его на 9 тепловых электрических станциях. Обеспечить этот объем добычи угля должно выполнение вскрышных работ не менее 320 млн. т в год.

В технологиях ведения открытых горных работ реализованы оригинальные инженерные решения такие, как выемка угля фрезерными комбайнами, выемка вскрышных пород скреперами на передовом уступе. Объем добычи угля на карьерах является величиной постоянной во времени и устанавливается в зависимости от выработки электрической энергии на тепловых станциях.

Список литературы

1. Крутских Н. В. Оценка трансформации природной среды в зоне воздействия горнодобывающих предприятий с использованием данных дистанционного зондирования земли // Горный журнал. – 2019. – № 3. – С. 88-93.
2. Legostaeva Y. B., Ksenofontova M. I., Popov V. F. Geoecologic situation at site of drainage brine utilization during development of primary deposits in Yakutia // Eurasian Mining. – 2019. – № 1. – P. 43-48.
3. Канализационные выбросы в прибрежной зоне Черного моря: наблюдение и дистанционный контроль из космоса / А.А. Кучейко [и др.] // Экология и промышленность России. – 2019. № 12. – С. 54-60.
4. Симонова Ю.В., Станичный С.В., Лемешко Е.М. Исследование краткосрочных повышений уровня моря в прибрежной зоне в районе Южного берега Крыма с использованием данных контактных и спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17. – № 4. – С. 238-245.
5. Миклашевич Т.С., Барталев С.А., Плотников Д.Е. Интерполяционный алгоритм восстановления длинных временных рядов данных спутниковых наблюдений растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. – № 6. – С. 143-154.
- 6.. Camera trapping reveals trends in forest duiker populations in African National Parks / Timothy G. O'Brien [et al.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2020. – Vol. 6. – Iss. 2. – P. 168-180.
7. Engaging 'the crowd' in remote sensing to learn about habitat affinity of the Weddell seal in Antarctica / Michelle A. LaRue [et al.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2020. – Vol. 6. – Iss. 1. – P. 70-78.
8. Invasive buffelgrass detection using high-resolution satellite and UAV imagery on Google Earth Engine / Kaitlyn Elkind [et al.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2019. – Vol. 5. – Iss. 4. – P. 318-331.
9. Estimates of landscape composition from terrestrial oblique photographs suggest homogenization of Rocky Mountain landscapes over the last century / Julie A. Fortin [et al.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2019. – Vol. 5. – Iss. 3. – P. 224-236.
10. Improved assessment of mangrove forests in Sundarbans East Wildlife Sanctuary using WorldView 2 and TanDEM -X high resolution imagery / Md Mizanur Rahman [et al.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2019. – Vol. 5. – Iss. 2. – P. 136-149.
11. Teja Kattenborn, Fabian Ewald Fassnacht, Sebastian Schmidlein. Differentiating plant functional types using reflectance: which traits make the difference? // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2019. – Vol. 5. – Iss. 1. – P. 5-19.
12. Mapping woody plant community turnover with space-borne hyperspectral data – a case study in the Cerrado / Pedro J. Leitão [et al.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2019. – Vol. 5. – Iss. 1. – P. 107-115.
13. Economical crowdsourcing for camera trap image classification / Pen-Yuan Hsing [et al.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2018. – Vol. 4. – Iss. 4. – P. 361-374.
14. <https://www.google.com.earth>

УДК 519.68

ЭКСПЛУАТАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕШЕНИЯ ПРИ СЕРВИСНОМ ТЕХНИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ И РЕМОНТЕ БОЛЬШЕГРУЗНОЙ ТЕХНИКИ КОМПАНИИ ООО «МАЙНТЕК МАШИНЕРИ»

д.т.н. Булакина Е.Н., Недзельская О.Н., Бикинеева А.Н., Моисеев В.В., Почуфаров Д.О., Кетов А.В.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Аннотация. Горнодобывающая промышленность является одной из основных отраслей, определяющих энергетический суверенитет страны. В данной статье проведены исследования эффективности принятия организационно – управленческих решений, обособленного подразделения ООО «Майнтек Машинери», официального дилера горной техники фирмы HITACHI, на территории Российской Федерации.

Ключевые слова: горнодобывающая промышленность, сервисное обслуживание, техническое обслуживание, ремонт, организация, управление, официальный дилер, эффективность.

Сегодня, в условиях роста урбанизации и устойчивой зависимости экономики от минералов, металлов и угля, полезные ископаемые пользуются наибольшим спросом за всю историю. В России горнодобывающая промышленность является одной из основных отраслей, определяющих энергетический суверенитет страны. Постоянное увеличение объемов добычи ресурсов, в частности руды и угля, влечет за собой рост спроса на специальную технику и оборудование, а труднодоступность месторождений, сложные климатические условия и специфика работ в свою очередь диктуют особые требования к средствам механизации [1-3].

Самые распространенные виды карьерной техники, применяемые для горнодобывающей промышленности, – это экскаваторы разных типов, самосвалы большой/средней грузоподъемности, тракторы, погрузчики, бульдозеры, грейдеры. Все они различаются по типу, мощности, грузоподъемности и техническим параметрам, обеспечивая определенный спектр выполняемых задач, высокую производительность, упрощение технологического процесса и других преимуществ.

В данной статье мы рассматриваем деятельность компании ООО «Майнтек Машинери», официального дилера горной техники фирмы HITACHI на территории Российской Федерации.

Исследовательская часть. ООО «Майнтек Машинери» (г. Москва) было открыто в конце 2016 года и с 1 января 2017 года является единственным официальным дистрибьютором «Hitachi Construction Machinery» в России, уполномоченным продавать технику горного класса, запасные части к ней, а также оказывать техническое и сервисное обслуживание. На рис. 1 представлен модельный ряд техники Hitachi поставляемый компанией ООО «Майнтек Машинери» в Россию.

 EH3500 Номинальная мощность двигателя (кВт) ISO 9249, net 1 491 кВт Максимальная скорость хода (км/ч) 56 км/ч Номинальная грузоподъемность (кг) 191 000 кг	 EH4000 Номинальная мощность двигателя (кВт) ISO 9249, net 1 964 кВт Максимальная скорость хода (км/ч) 56 км/ч Номинальная грузоподъемность (кг) 221 000 кг	 EH5000 Номинальная мощность двигателя (кВт) ISO 9249, net 2 125 кВт Максимальная скорость хода (км/ч) 56 км/ч Номинальная грузоподъемность (кг) 296 000 кг
 EX1200-6 Номинальная мощность двигателя (кВт) 567,0 кВт (760 HP) Эксплуатационная масса (кг) 111 000 – 114 000 кг Емкость ковша, нагруженного согласно ISO 5,20 – 6,70 м³	 EX1900-6 Номинальная мощность двигателя (кВт) 810,0 кВт (1 086 HP) Эксплуатационная масса (кг) 191 000 – 192 000 кг Емкость ковша, нагруженного согласно ISO 4,40 – 12,0 м³	 EX2600-6 Номинальная мощность двигателя (кВт) 1 119,0 кВт (1 500 HP) Эксплуатационная масса (кг) 252 000 – 254 000 кг Емкость ковша, нагруженного согласно ISO 15,0 – 17,0 м³
 EX3600-6 Номинальная мощность двигателя (кВт) 1 450 кВт (1 944 HP) Эксплуатационная масса (кг) 350 000 – 362 000 кг Емкость ковша, нагруженного согласно ISO 21,0 – 23,0 м³	 EX5600-6 Номинальная мощность двигателя (кВт) 2x 1 119 кВт (2x 1 500 HP) Эксплуатационная масса (кг) 533 000 – 537 000 кг Емкость ковша, нагруженного согласно ISO 27,34 м³	 EX8000-6 Номинальная мощность двигателя (кВт) 2x 1 450 кВт (2x 1 944 HP) Эксплуатационная масса (кг) 825 000 – 837 000 кг Емкость ковша, нагруженного согласно ISO 40-43 м³

Рис. 1. Модельный ряд техники Hitachi

С января 2017 года по май 2019 года были открыты структурные подразделения для послепродажного обслуживания тяжелых машин компании Hitachi эксплуатируемых на всей территории Российской Федерации в следующих городах: город Екатеринбург, Свердловская область; город Кемерово, Кемеровская область; город Новокузнецк, Кемеровская область; город Хабаровск, Хабаровский край; город Абакан, республика Хакасия; город Костомукша, республика Карелия; город Улан-Удэ, республика Бурятия; город Магадан, Магаданская область; город Старый Оскол, Белгородская область. На рис. 2 представлено расположение всех подразделений компании на карте России.

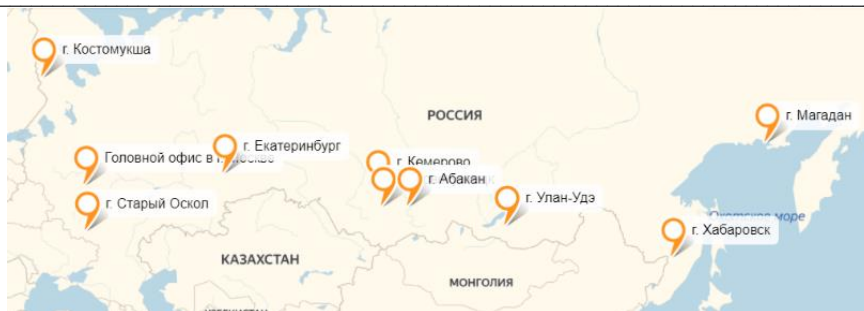


Рис. 2. Расположение подразделений компании на карте

Философия компании – быть с клиентом как можно ближе, чтобы вместе строить прочные партнерские отношения. Данная философия базируется на опыте мировых компаний доказавших, что тесная связь с партнером и понимание партнера является залогом успеха в бизнесе.

Организационная структура предприятия. Организационная структура предприятия представлена на рис. 3.



Рис. 3. Структура управления

Характеристика обособленных подразделений. Основной задачей обособленных подразделений является непосредственное взаимодействие с заказчиками по всем вопросам, связанным с приобретением и дальнейшей эксплуатацией горной техники НГАСН.

Основную часть вопросов с заказчиками, связанных с приобретением техники и поставками запасных частей, решает Руководитель ОП, так же он решает вопросы по функционированию обособленного подразделения.

Сервисные механики по распоряжению начальника участка по обслуживанию и ремонту карьерного оборудования осуществляют выезд на места и проводят необходимое ТО либо ремонтные работы любой сложности.

Существующая организация ТО и Р личного подвижного состава. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей компании производится на специализированных станциях технического обслуживания, являющимися официальными дилерами данной техники в регионе.

Функционирование службы сервиса. Служба сервиса во всех регионах выполняет техническое обслуживание и ремонтные работы любой сложности горной техники НГАСН, за исключением ремонтных работ двигателей фирмы Cummins, установленных на карьерных экскаваторах и самосвалах с жесткой рамой, для их ремонта привлекаются специалисты официального дилера фирмы Cummins.

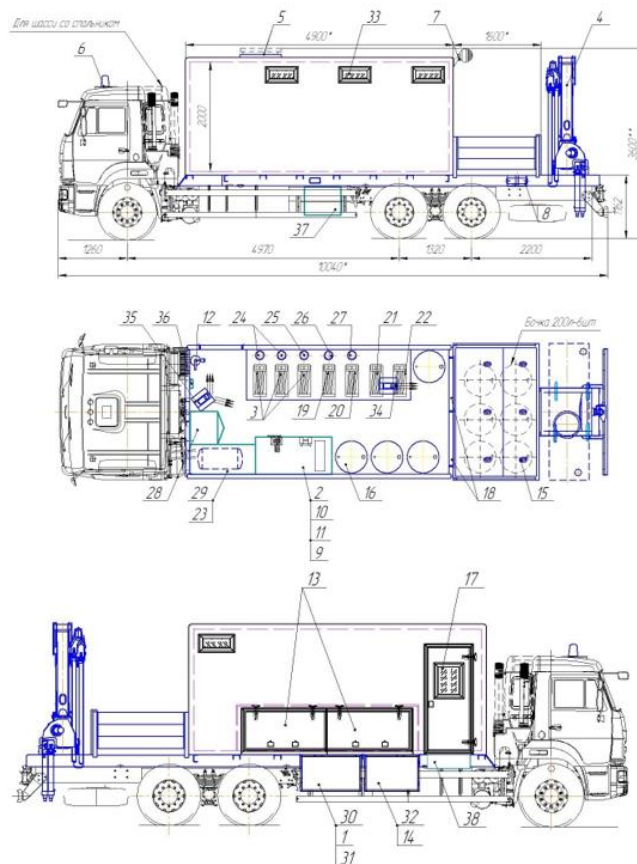
Заявки на выполнение работ от заказчиков поступают начальнику участка по обслуживанию и ремонту карьерного оборудования, он дает распоряжение IC-администратору оформить по программе IC планируемые работы и сформировать предварительную калькуляцию либо спецификацию (зависит от условий договора на сервисное обслуживание), после чего начальник участка по обслуживанию и ремонту карьерного оборудования согласовывает с заказчиком данную калькуляцию и сроки выполнения работ по ней. В указанные сроки начальник участка по обслуживанию и ремонту карьерного оборудования направляет сервисных механиков на технику клиента для выполнения необходимых работ. Механики по факту выполнения необходимых работ составляют

технический акт на выполненные работы и подписывают его у уполномоченных представителей заказчика. После возвращения на базу далее механики сдают технические акты 1С-администратору для проведения работ по программе 1С и формирования закрывающих бухгалтерских документов.

В случае необходимости капитального ремонта узла либо агрегата данный узел направляется в подразделение в г. Новокузнецке, где имеется цех капитального ремонта узлов и агрегатов. Там производят его мойку, разборку и дефектовку, после чего составляется дефектная ведомость и коммерческое предложение на его ремонт. В случае если стоимость ремонта узла превышает 75% стоимости нового узла клиенту предлагается обмен старого узла на новый по программе REMAN по стоимости равной 75% нового узла.

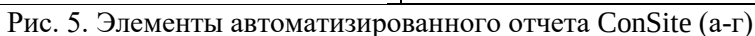
Технологическое оборудование и инструмент ОП в г. Абакане. На данном предприятии для проведения технического обслуживания и ремонта техники заказчика имеется необходимое оборудование и инструментальная оснастка для максимальной механизации всех процессов.

Основным технологическим оборудованием является передвижная мастерская на базе автомобиля КАМАЗ 65115, укомплектованная всем необходимым оборудованием для максимальной механизации процесса технического обслуживания и ремонта тяжелых экскаваторов и самосвалов фирмы Hitachi. Схема компоновки передвижной ремонтной мастерской представлена на рис. 4.



- 1 – компрессор гидравлический Dynaset; 2 – стол-верстак типа ВП-3; 3 – катушка Graco DX-30; 4 – КМУ SIBERIA 105A3; 5 – люк аварийно-вентиляционный; 6 – проблесковый маячок оранжевого цвета; 7 – фара-искатель; 8 – ящик инструментальный; 9 – станок сверлильный; 10 – тиски; 11 – точильный станок; 12 – огнетушитель; 13 – люк для доступа к катушкам маслораздачи и пневмоинструмента; 14 – генератор гидравлический Dynaset; 15 – кольца крепления груза; 16 – бочка 200 литров; 17 – дверь боковая с окном; 18 – дверь задняя; 19 – катушка для консистентной смазки Graco; 20 – катушка для отработанного масла; 21 – катушка для пневмоинструмента соединение 1/2 дюйма; 22 – катушка для пневмоинструмента соединение 3/4 дюйма; 23 – ресивер 110 литров; 24 – насос Graco Fire-Ball 3:1; 25 – насос Graco Fire-Ball 3:1 с фильтром; 26 – насос Graco Fire-Ball 50:1; 27 – насос Graco Husky; 28 – шкаф для спецодежды; 29 – стеллаж над ресивером; 30 – ящик для компрессора и радиатора охлаждения гидросистемы; 31 – вентилятор системы охлаждения гидросистемы; 32 – ящик для генератора и гидрораспределителя; 33 – окно; 34 – дизельный отопитель Webasto 2,2 кВт; 35 – дизельный отопитель Webasto 5,5кВт; 36 – аптечка; 37 – бак гидравлический; 38 – лестница в ящике

Рис. 4. Компоновка передвижной ремонтной мастерской



Так же все оперативные данные можно вывести в виде таблицы. Данная информация помогает оказывать клиенту всестороннюю помощь в решении вопросов, связанных с проблемами при эксплуатации техники, контролем расхода ГСМ, планированием сроков капитального ремонта узлов техники.



Исходя из проведённых исследований и фиксированных данных наработки, экскаватор Hitachi EX1200-6 за март месяц выполнил работу 450 часов из 608 часов общей работы двигателя. Эффективность эксплуатации составляет примерно 75%, отсюда следует, что 25% времени работы

двигателя он не выполнял никаких операций. Общее время простоя техники за весь период эксплуатации машины составило 4045 часа из 11003 часов, то есть, примерно 36% всего времени работы двигателя техники.

Выполнение планово-предупредительного ремонта экскаватора HITACHI EX1900-6.

Как пример, на апрель месяц, у обособленного подразделения ООО «Майнтек Машинери» в г. Абакане было запланировано проведение планово-предупредительного ремонта карьерного экскаватора Hitachi EX1900-6 при наработке 48 000 мото-часов, у клиента АО «УК «Разрез Степной».

Для проведения планово-предупредительного ремонта с клиентом был согласован список необходимых запасных частей. Клиентом были приобретены все необходимые запасные части и агрегаты.

Необходимые узлы и агрегаты для проведения планово-предупредительного ремонта: опорно-поворотный подшипник – 1 шт., двигатель QSKTA-38 – 1 шт., основные гидравлические насосы – 3 шт., вспомогательные гидравлические насосы – 2 шт., редуктор механизма поворота – 1 шт., гидромоторы хода – 2 шт., комплект элементов электропроводки – 1 шт., гидромотор привода вентилятора – 1 шт., центральный шарнир – 1 шт., натяжитель гусеничной ленты – 2 шт., гидроцилиндр подъема стрелы – 2 шт., гидроцилиндр рукояти 2 шт., гидроцилиндр ковша – 2 шт., радиатор гидравлический – 2 шт., элемент радиатора охлаждения двигателя – 4 шт., ремкомплект редуктора привода насосов (подшипники, шестерни, уплотнения) – 1 шт., а так же необходимые для установки данных компонентов запасные части (уплотнительные кольца, прокладки и т.д.).

Вывод. В качестве главного показателя работы для тяжелых горных машин используется коэффициент технической готовности. Для безаварийной работы горной техники Hitachi завод-изготовитель рекомендует строго придерживаться указанным срокам проведения планово-предупредительных ремонтов и разработанных методических указаний по её эксплуатации.

Список литературы

1. Dynamics of development of the industry of Khakassia, technology solutions of a coal cluste / E.N Bulakina [and etc.] // Conf. IOP Ser.: Earth Environ. Sci. – 2019. – 377. – 012014.
2. Infrastructure management Software systems today «IT» in the automation of production processes / O.N Nedzelskay [and etc.] // Conf. IOP Ser. Springer. – 2020. – 9789811522437.
3. Industrial single-industry areas socio-ekonomik development based on cluster approach / A.N Bikineeva [and etc.] // Conf. IOP Ser. Mater Sci. Eng. – 2019. – 454. – 200312.

УДК 622.661(033):622.012.2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТОРА «ИЗНОС» В ПРИВОДНЫХ ЕДИНИЦАХ ПРИ РАБОТЕ ШАХТНЫХ ПОДВЕСНЫХ МОНОРЕЛЬСОВЫХ ДИЗЕЛЕВОВ

к.э.н. Новоселов С.В.

г. Кемерово, Россия

Аннотация. В статье раскрыта актуальность разработки методик определения оптимальных режимов функционирования монорельсовых дизелевозов при снижении фактора износа в приводных единицах в шахтных условиях. Применение методик расчета объемной и линейной интенсивности износа приводных колес шахтного подвешного монорельсового дизелевоза позволит обеспечить экономию времени, энергии и материалов.

Ключные слова: приводные единицы, износ, трение, нагрузка, установившейся режим, катастрофический износ, оптимизация, экономия.

Роль шахтного транспорта на угольных шахтах в современных условиях интенсификации процессов угледобычи неуклонно повышается. Эффективность подземной угледобычи достигается взаимодействием технологических, технических и организационных направлений деятельности на основе прогрессивных технологий, интенсификации подземной угледобычи и безопасной работой, что определено технологической и технической политикой ведущей угольной компании России – СУЭК в работах [1-4]. Эффективность использования современных горно-транспортных машин рассмотрена в ряде исследований по специальности 05.05.06 – «Горные машины в комплексы» в корреляции с тематикой статьи [5-7] и др. Работа шахтных машин при повышенных

нагрузках и интенсивных режимах работы увеличивает износ их частей, узлов и рабочих органов. Происходит интенсивное внедрение на российский рынок вспомогательной горнотранспортной машиностроительной продукции и зарубежной техники, представленной в последнее время шахтными подвесными локомотивами с дизельным приводом. Они широко применяются в системе вспомогательного транспорта, в том числе при монтажно-демонтажных работах, скорость проведения которых определяет ввод в работу выемочного участка и последующую добычу, обеспечивающую финансовый результат, что актуализирует тематику исследований износа.

Трибология, научная дисциплина, изучающая трение и износ, определяет изнашивание материалов как процесс разрушения поверхностных слоев трущихся тел, который приводит к уменьшению размеров тел (износу) в направлении, перпендикулярном к поверхности трения. Интенсивность изнашивания пар трения зависит от свойств материалов деталей, технологической подготовки поверхностей и их качества, а также от условий службы - нагрузки, температуры, смазки и др.

Многообразие возникающих в контактном слое изменений, приводит к различным видам износа. Вид износа нельзя определить одним термином, название его должно содержать несколько характеристик. Механизм разрушения поверхностного слоя различный. По характеру промежуточной среды различают износ при трении без смазки, износ при граничном трении и при наличии абразива. По характеру деформирования поверхностного слоя различают износ при упругом контакте, пластическом контакте и при микрорезании. При постоянных условиях трения имеют место три стадии процесса изнашивания: приработка, период установившегося режима и катастрофический износ [8].

После приработки поверхностей наступает период установившегося изнашивания, характеризующийся минимальной интенсивностью изнашивания для заданных условий трения. Как показывают многочисленные исследования [8-10] и др., отделение частичек износа преимущественно происходит в результате многократных повторных нагружений единичной фрикционной связи.

В случае монорельсовых дизелевозов, необходимо учитывать величину силы прижима ведущих колес к монорельсу, массу перевозимых секций, состояние монорельса, угол наклона трассы, температурный режим работы, что подробно рассмотрено в [11].

Фактически, физико-механические свойства материалов приповерхностных слоев отличаются от свойств основной массы материала. Учет физико-химических и механических факторов при рассмотрении разрушения поверхностных слоев тел при трении дает основание рассматривать процесс изнашивания как кумулятивный, т.е. суммирующий действие отдельных факторов, при повторном многократном нагружении фрикционных связей до отделения частицы износа. Этот вид изнашивания имеет место в самых разнообразных условиях в узлах трения. Для инженерных расчетов износа (U) соприкасающихся поверхностей, по [11], имеем формулу (1):

$$U = I \cdot L, \quad (1)$$

где I – линейная интенсивность изнашивания, мм/км; L – путь трения, км.

На основе (1) можно рассчитать износ в системе взаимодействия «монорельс – приводные колеса» подвешенного шахтного локомотива, при наличии систематизированных данных износа приводных колес различных диаметров дизелевозов и условий нагружения: веса, пути, скорости, коэффициентов сопротивления движению (трения). Для снижения износа в приводных единицах шахтных монорельсовых дизелевозов необходимо оптимизировать нагрузку и рационально проектировать трассу подвесных монорельсовых дорог.

Предлагается следующий метод расчета износа за длину пройденного пути, на основе эксплуатационных данных [11] (табл. 1).

На основе расчета объемной и линейной интенсивности износа можно определять фактический срок службы приводных колес и время их замены, а также планировать ремонтные работы дизелевозов по приводным единицам.

Исследования проблем, связанных с транспортированием тяжелых грузов (секций механизированных комплексов) при монтажно-демонтажных работах, становится особенно значимыми при формировании высокопроизводительных очистных забоев. Потенциальное сокращение сроков демонтажа на 1 сутки, при среднесуточной нагрузке на комплексно-механизированный забой по России в 2019 г. в 4543 тонну [12], и средней цене 50 долл. за тонну (курс рубля к доллару 1:75) даст - экономию 17,04 млн. руб. в сутки.

Следующий момент актуальности и значимости расчетов, связанных с оптимизацией режимов работы монорельсовых дизелевозов – снижение износа приводных колес при достижении

предельных размеров, при стоимости порядка 12500 руб. / штука, при шести приводах эти затраты составят 150000 рублей за цикл работы, который фактически колеблется, в зависимости от условий, в интенсивном режиме 168 часов и 800 часов при нормальном режиме.

Таблица 1

Расчет износа за пройденную длину пути

Марка дизельного	Объем материала удаленного на пути трения до критического диаметра, мм ³	Ширина приводных колес, мм	Максимальная радиальная величина износа, мм	Моточасы движения дизельного, час	Средняя скорость движения, км/ч	Пройденный путь, км	Объемная интенсивность износа, мм ³ /км	Линейная интенсивность износа, мм/км
DLZ 110F	1014735	95	20	700	2,0	1400	724,81	0,014
DLZ 110F-II	1277745	95	25	650	2,1	1365	936,07	0,018
DLZ 210F	1971644	95	65	630	3,4	2142	920,46	0,030
	2387610	100	40	610	3,6	2196	1087,25	0,018

По результатам оптимизационных исследований [11] предлагается метод расчета экономических эффектов от снижения износа приводных колес и за счет повышения ресурса их работы, (табл. 2).

Таблица 2

Расчет экономического эффекта от снижения износа приводных колес

Марка дизельного	Предельный диаметр приводных колес, мм	Безремонтное время работы приводной пары, обычный режим, ч	Безремонтное время работы приводной пары, оптимизированный режим, ч	Выигрыш во времени, ч	Коэффициент увеличения ресурса	Стоимость приводного колеса, р	Относительный эффект с одной пары трения за счет увеличения ресурса, руб.	Косвенный эффект от выигрыша времени пуска очистного участка, млн. руб./сут.
DLZ 110F	330	600	900	300	0,5	12500	6250×2=12500	213
DLZ 110F-II	330	590	700	110	0,186	12500	2325×2=4650	78,1
DLZ 210F	360	700	950	250	0,357	12500	4464×2=8928	177,5
BIZON 120-X	330	600	800	200	0,333	12500	4162,5×2=8325	142

Анализ табл. 2 позволяет сделать вывод, что оптимизация параметров режима работы дизельного дает значительную экономию как на замене приводных колес дизельного, так и в сокращении времени ввода в действие очистного участка при монтаже, что обеспечивает значительный косвенный эффект.

Выводы. Согласно исследованиям, приведенным в [11], определено, что на износ приводных колес дизельного влияют основные факторы:

- характер работы в тяговом режиме (скорость движения, нагрузка);
- состояние внешней среды работы (температура, влажность, скорость вентиляционной струи);
- состояние трассы (коэффициент трения, угол наклона, кривизна, состояние монорельса);
- перегрев двигателя дизельного вызывает дополнительные простои, а значит значительные пусковые нагрузки и интенсивный износ;
- масса доставляемых секций также увеличивает объемную интенсивность износа, мм³/км и линейную интенсивность износа, мм/км.

Все вышеперечисленное требует рационального управления дизелевозом в конкретных условиях при поддержании оптимальных параметров режима работы двигателя, в тяговом и установившемся режимах, при ориентировании на скорость движения и температурный режим, что обеспечивается оптимизацией данных параметров и разработкой конкретных инструкций.

Кроме того, теоретические и методические вопросы минимизации износа в парах трения и оптимизации режимов работы горных транспортных машин, их тяговых параметров, актуальны и для сферы образования, в частности для студентов специальности 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», а также для аспирантов и соискателей по специальности 05.05.06 «Горные машины в комплексы».

Список литературы

1. Артемьев В.Б. АО «СУЭК» в 2018 – прогрессивные технологии и инновации на службе производства // Уголь. – 2019. – №3. – С. 4-9
2. Артемьев В.Б. Технологические и организационные механизмы эффективного функционирования угольной компании при комплексном освоении месторождений: автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. – М., 2004. – 44 с.
3. Ютяев Е.П. Обоснование технологии разработки высокогазоносных угольных пластов: автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. – Кемерово, 2019. – 45 с.
4. Мешков А.А., Казанин О.И., Сидоренко А.А. Реализация производственного потенциала высокопроизводительного оборудования – ключевое направление совершенствования подземной добычи энергетических углей // ГИАБ. – 2020. – №12. – С. 156-165.
5. Гутаревич В.О. Развитие основ создания шахтных подвесных монорельсовых дорог с оптимальными динамическими параметрами: автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук – Донецк, 2017. – 36 с.
6. Гутаревич В.О., Игнаткина Е.Л. Исследование режима торможения подвижного состава шахтной подвесной монорельсовой дороги с учетом зазоров в сцепках // Горный журнал. – 2020. – №5. – С. 108-115.
7. Кондрашкин Ю.А. Методика расчета технических характеристик подвесной монорельсовой дороги с локомотивным органом тяги // ГИАБ. Отдельный выпуск. – 2009. – №10. – С. 56-76.
8. Крагельский И.В., Непомнящий Е.Ф. Теория износа высокоэластичных материалов // Пластмассы в подшипниках скольжения (исследования и опыт применения). – М.: «Наука», 1965. – С. 49-56.
9. Марченко Е.А., Непомнящий Е.Ф., Харач Г.М. Циклический характер накопления искажений II рода в поверхностном слое как физическое подтверждение усталостной природы износа // Докл. АН СССР. – 1968. – Т. 181. – № 5. – С. 1103-1104.
10. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика – новая отрасль науки. – М.: Знание, 1958. – 64 с.
11. Эксплуатационные и технико-экономические расчеты шахтных подвесных монорельсовых дизелевозов при транспортировании секций механизированных комплексов: монография / С.В. Новоселов [и др.]. – Кемерово, 2016. – 154 с.
12. Таразанов И.Г., Губанов Д.А. Итоги угольной промышленности России за январь-декабрь 2019 // Уголь. – 2020. – №3. – С. 54-69.

УДК 621.791.042

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИТАНА НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НАПЛАВЛЕННОГО ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ СИСТЕМЫ Fe-C-Si-Mn-Cr-Mo-Ni СЛОЯ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ИЗНОСА д.т.н. Козырев Н.А., к.т.н. Усольцев А.А., к.т.н. Кибко Н.В., Михно А.Р., к.т.н. Козырева О.А. Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Приведены результаты исследования структуры и свойств наплавленного слоя порошковыми проволоками системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Mo-Ni дополнительно легированной титаном. Наплавка исследуемыми порошковыми проволоками осуществлялась на подложку из стали марки 09Г2С с использованием флюса, изготовленного из шлака производства силикомарганца.

Ключевые слова: наплавка, сварочный флюс, порошковая проволока, титан, микроструктура, неметаллические включения, твердость, степень износа.

Введение. Механизмы машин горного оборудования, испытывающие абразивное и ударное изнашивание при эксплуатации, преждевременно выходят из строя. Износ рабочих поверхностей вызывает необходимость в проведении их восстановления. Поэтому разработка материалов, значительно повышающих износостойкость таких деталей, и использование технологии их восста-

новления, является важной задачей. Наиболее перспективным является использование наплавки порошковой проволокой на изнашивающиеся поверхности деталей.

Качество наплавленного (восстановленного) слоя при ремонте деталей, работающих в условиях интенсивного износа в большей степени, зависит от выбора сварочных материалов и их технологических свойств. Состав этих материалов полностью определяет состав жидкого шлака, состав атмосферы дуги, химический состав наплавленного слоя, от которого зависит структура, механические свойства восстановленной детали [1-6].

В данной работе проведено исследование влияния порошка титана (ПТС), введенного в состав порошковой проволоки на микроструктуру, твердость и износостойкость наплавленного ею слоя. В лабораторных условиях были изготовлены образцы порошковых проволок с использованием соответствующих порошкообразных материалов. В ходе проведения исследования был определен химический состав наплавленного металла, проведен металлографический анализ, определены механические свойства. В результате металлографического анализа установлены: размер бывшего зерна аустенита, дисперсность мартенсита в структуре наплавленного металла, уровень загрязненности его неметаллическими включениями. Показано, что измельчению игл мартенсита в структуре наплавленного слоя, повышению твердости и износостойкости способствует увеличение содержания титана с 0,008 до (0,013-0,035) % при одновременном изменении химического состава. Изменение степени легированности порошковой проволоки системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Mo-Ni оказывает влияние на уровень загрязненности неметаллическими включениями наплавленного ею слоя.

Материалы и методы исследования. С целью изучения влияния введения порошка титана в порошковые проволоки на микроструктуру, твердость и износостойкость при наплавке под марганецсодержащим флюсом изготовлены проволоки с расчетным (без учета угара) содержанием порошка титана.

Для изготовления порошковых проволок были использованы порошкообразные материалы: углеродфторсодержащий материал (пыль газоочистки алюминиевого производства), железный порошок ПЖВ-1 по ГОСТ 9849-86, порошок хрома ПХ-1С по ТУ 14-1-1474-75, порошок марганца МР-0 по ГОСТ 6008-82, порошок кремния КР-1 по ГОСТ 2169-69, молибденовый порошок МПЧ по ТУ 48-19-69-80 порошок никеля ПНК-1Л5 по ГОСТ 9722-97, порошок титана ПТС по ТУ 14-22-57-92.

Наплавка образцов осуществлялась на подложку из стали марки 09Г2С с использованием сварочного флюса, изготовленного из шлака производства силикомарганца, разработанного в условиях СибГИУ [7-9], с химическим составом, масс: в данной работе 0,52 FeO; 16,15 MnO; 29,13 CaO; 42,40 SiO₂; 6,80 Al₂O₃; 1,39 MgO; 0,18 Na₂O; 0,59 K₂O; 0,23 S; 0,022 P; 0,004 ZnO; 0,024 C; 0,32 F; 0,17 TiO₂; 0,033 Cr₂O₃.

Химический состав наплавленного слоя исследуемых образцов изучали атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС -71. Исследование химического состава шлаковых корок проводили с использованием рентгенофлюоресцентного метода на спектрометре XRF-1800.

Исследование микроструктуры и степени загрязненности неметаллическими включениями слоя, наплавленного порошковой проволокой системы Fe-C-Cr-Mn-Si-Mo-Ni-Ti, проводили с помощью металлографических микроскопов METAM PB-34 и OLYMPUS GX-51 в светлом поле в диапазоне увеличений от $\times 100$ до $\times 1000$ с использованием пакета прикладных программ для металлографических исследований NEXSYS ImageExpert Sample 2 и Siams Photolab 700 соответственно. Программа NEXSYS ImageExpert Sample 2 предназначена для качественного анализа изображений методом визуального сравнения полей зрения шлифа с эталонными шкалами или размерными сетками. Возможность хранения программой в компьютере всех требуемых для работы эталонных шкал позволяет одновременно наблюдать на экране монитора исследуемую структуру и эталон при равном увеличении, проводить сравнительный анализ микроструктуры и на его основе формировать отчет, включающий статистические параметры, гистограммы распределения и исходное изображение. Программа предоставляет возможность накапливать результаты анализа, как по ряду полей зрения в соответствии с единичной шкалой, так и по ряду шкал в пределах одного стандарта. В программе реализован блок линейного измерителя, который позволяет производить единичные измерения линейных размеров структурных составляющих, как на снятых изображениях реальных структур, так и на изображениях эталонных шкал, представленных в программе. Программа позволяет произвести быструю оценку размеров структурных элементов на изображении посредством наложения масштабных сеток: мерный отрезок, перекрестие, сетка.

Исследование степени загрязненности наплавленного слоя неметаллическими включениями проводили с помощью программного обеспечения микроскопа МЕТАМ РВ-34 по ГОСТ 1778-70. Полированную поверхность продольных шлифов изучали при увеличении $\times 100$ методом сравнения с эталонными шкалами, включенными в программу.

Величину первичного зерна аустенита и характеристики мартенсита в структуре наплавленного порошковой проволокой слоя исследовали после травления полированных шлифов в 4% растворе HNO_3 в этиловом спирте с помощью металлографического микроскопа МЕТАМ РВ-34 по ГОСТ 5639-82 при увеличении $\times 100$ и по ГОСТ 8233-56 при увеличении $\times 1000$ соответственно методом сравнения с эталонными шкалами. Величину зерна определяли при использовании эталонной шкалы для определения величины зерна в сталях, включенной в прикладную программу, посредством визуального сравнения исследуемой структуры и эталона. При этом анализируемой структуре был назначен соответствующий балл и сформирован отчет по серии полей зрения. Размер игл мартенсита определяли с использованием блока линейного измерителя.

Измерение твердости наплавленного порошковой проволокой слоя выполняли по методам Бринелля и Роквелла в соответствии с требованиями ГОСТ 9012-59 и ГОСТ 9013-59.

Износостойкость наплавленного слоя исследуемых образцов определяли путем проведения испытаний на износ на машине 2070 СМТ-1.

Результаты исследования и их обсуждение. Химический состав наплавленного слоя и шлаковых корок, определенный атомно-эмиссионным и рентгенофлюоресцентным методами представлен в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав наплавленного слоя

Номер образца	Массовая доля элементов, %												
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Ti	V	Mo	Al	Nb	S	P
C1	0,24	1,36	1,44	4,75	0,34	0,05	0,008	0,004	0,62	0,012	0,003	0,050	0,019
C2	0,24	1,72	1,19	5,97	0,37	0,06	0,013	0,005	0,85	0,013	0,003	0,055	0,026
C3	0,27	2,51	1,61	4,64	0,27	0,06	0,019	0,004	0,67	0,043	0,004	0,034	0,019
C4	0,27	2,66	1,68	4,63	0,27	0,06	0,035	0,004	0,64	0,045	0,004	0,044	0,010

Таблица 2

Химический состав шлаковых корок

№ образца	Массовая доля элементов, %																	
	FeO	MnO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	S	P	ZnO	C	F	BaO	TiO ₂	SrO	Cr ₂ O ₃	WO ₃
C1	1,84	6,27	35,49	43,53	7,51	1,32	0,32	0,59	0,21	0,021	0,005	0,041	0,33	0,88	0,14	0,27	0,46	0,001
C2	1,98	6,23	36,48	41,58	7,52	1,15	0,27	0,58	0,21	0,021	0,007	0,070	0,29	0,97	0,15	0,29	0,35	0,28
C3	2,34	6,24	34,52	41,45	7,75	1,31	0,40	0,60	0,24	0,021	0,003	0,057	0,66	0,85	0,16	0,29	0,76	0,53
C4	1,65	6,23	35,87	42,26	7,19	1,11	0,37	0,59	0,21	0,021	0,006	0,062	0,37	0,91	0,14	0,28	0,77	0,015

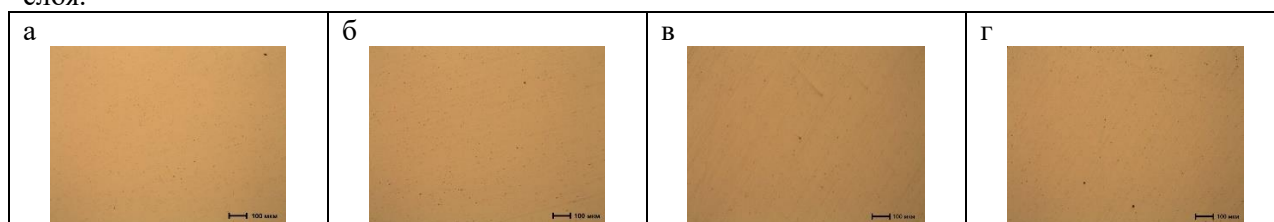
В результате изучения характера неметаллических включений наплавленного слоя порошковой проволокой системы Fe-C-Cr-Mn-Si-Mo-Ni-Ti выявлена загрязненность оксидными неметаллическими включениями, в частности силикатами недеформирующимися и оксидами точечными (табл. 3, рис. 1).

Таблица 3

Характеристика неметаллических включений исследуемых образцов

Номер образца	Загрязненность неметаллическими включениями, балл		
	Оксиды точечные	Силикаты недеформирующиеся	Нитриды точечные
C1	3 а	3а	—
C2	4а	2а	—
C3	4а	2б	1а
C4	4а	5б	2а

Установлено, что изменение химического состава исследуемой порошковой проволоки оказывает влияние на уровень загрязненности неметаллическими включениями наплавленного ею слоя.

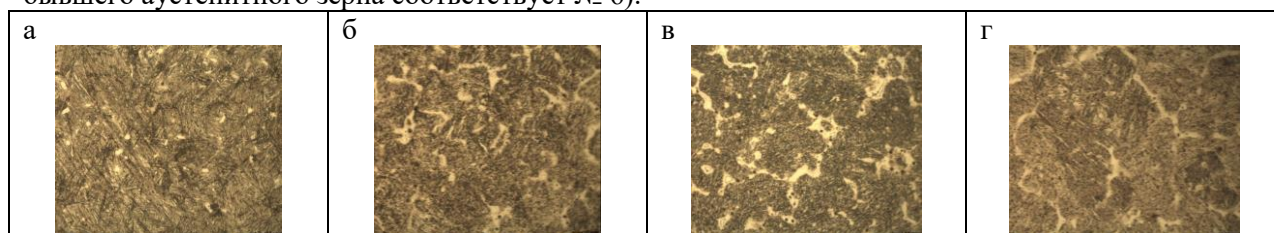


а – образец С1, б – образец С2, в – образец С3, г – образец С4

Рис. 1. Неметаллические включения наплавленного слоя порошковой проволокой системы Fe-C-Cr-Mn-Si-Mo-Ni-Ti

Наименьшая загрязненность наплавленного слоя неметаллическими включениями наблюдается при содержании титана 0,008 % и 0,013 % в его составе. При повышении содержания титана до 0,019 % и 0,035 % в наплавленном слое установлено присутствие в нем нитридов точечных, кроме силикатов недеформирующихся и оксидов точечных.

Микроструктура наплавленных слоев равномерная, имеет в основном дендритное строение и представляет собой мелкоигльчатый и среднеигльчатый мартенсит (балл 3, 4 и 5) с размером игл (2 – 8) мкм в бывших зернах аустенита, по границам которых располагаются тонкие прослойки δ -феррита, и небольшое количество аустенита остаточного в виде отдельных участков (рис. 2, табл. 4). В структуре наплавленного слоя с содержанием титана 0,008 % наблюдается наименьшее количество δ -феррита. Величина бывшего зерна аустенита по шкале зернистости соответствует № 5. В периферийных областях структуры исследуемых наплавленных слоев, кроме наплавленного слоя с наименьшим содержанием титана, присутствует более мелкозернистая структура (величина бывшего аустенитного зерна соответствует № 6).



а – образец С1, б - образец С2, в - образец С3, г - образец С4

Рис. 2. Микроструктура наплавленных слоев порошковой проволокой системы Fe-C-Cr-Mn-Si-Mo-Ni-Ti, x 500

Таблица 4

Характеристики структуры исследуемых образцов

Номер образца	Номер зерна	Балл мартенсита	Размер игл мартенсита, мкм
1	5	5	4-8
С2	5	3	2-4
С3	5	3	2-4
С4	5	4	2-6

Установлено, что увеличение содержания титана с 0,008 % до (0,013-0,035) % при одновременном изменении содержания остальных элементов в наплавленном слое способствует уменьшению размера игл мартенсита, не оказывая влияния на величину первичного зерна аустенита. Мартенсит меняется от среднеигльчатого до мелкоигльчатого. Иглы мартенсита наименьшего размера наблюдаются в структуре наплавленных слоев с содержанием титана 0,013 % и 0,019 %. Повышение содержания в наплавленном слое титана до 0,035 % обеспечивает укрупнение игл мартенсита (рис. 2, табл. 2).

Показано, что изменения микроструктуры при варьировании химического состава наплавленного слоя сопровождаются изменением его свойств.

Повышение содержания титана способствует увеличению значений твердости, измеренной методами Бринелля и Роквелла, и износостойкости (табл. 5). Наилучшие результаты наблюдаются

при наибольшем содержании титана в составе наплавленного слоя (0,035 %). Однако, при этом обеспечивается измельчение мартенсита в структуре наплавленного слоя в меньшей степени, по сравнению с 0,013 % и 0,019 % титана.

Таблица 5

Степень износа и твердость исследуемых образцов

Номер образца	Пределы твердости по HB	Пределы твердости по HRC	Средняя твердость HB	Средняя твердость HRC	Степень износа (г/оборот·10 ⁻⁵)
C1	355-396	33-40	375	35	7,77
C2	410-466	42-47	437	44	6,59
C3	434-581	45-49	506	46	6,04
C4	444-575	44-50	509	47	5,24

Выводы. Увеличение содержания титана от 0,008 % до 0,035 % при одновременном изменении химического состава исследуемой порошковой проволоки оказывает влияние на уровень загрязненности неметаллическими включениями наплавленного ею слоя. Наименьшая загрязненность неметаллическими включениями наблюдается при содержании титана в составе наплавленного слоя в количестве 0,008 % и 0,013 %. Для наплавленных слоев с более высоким содержанием титана 0,019 % и 0,035 % установлено присутствие нитридов точечных (кроме оксидных неметаллических включений).

Повышение содержания титана при одновременном изменении содержания остальных элементов в составе наплавленных слоев, полученных при использовании многокомпонентных проволок системы Fe-C-Cr-Mn-Si-Mo-Ni-Ti, обеспечивает измельчение игл мартенсита. Мартенсит меняется от среднеигльчатого до мелкоигльчатого. Наибольший эффект улучшения микроstructures наплавленных порошковой проволокой слоев наблюдается при содержании в нем титана в количестве 0,013 % и 0,019 %. Их структура характеризуется величиной бывших зерен аустенита, соответствующей шкале зернистости № 5, внутри границ которых располагается мелкоигльчатый мартенсит с размером игл до 4 мкм.

Увеличение содержания титана при одновременном изменении химического состава исследуемой порошковой проволоки способствует повышению твердости (с 375 до 509 HB; с 35 до 47 HRC) и износостойкости наплавленных слоев (степень износа уменьшается с 7,77 до 5,24 г/об·10⁵).

Список литературы

1. Яковлев Д.С., Шахматов М.В. Применение порошковой проволоки при многодуговой сварке // Сварочное производство. – 2015. – № 11. – С. 3-9.
2. Еремин Н.Е., Лосев А.С. Порошковая проволока для наплавки уплотнительных поверхностей запорной арматуры // Омский научный вестник. – 2014. – №2. – С. 45-47.
3. Ташев П. Наномодифицирование в процессе сварки и наплавки / П. Ташев [и др.] // Новые материалы и технологии в космической технике. – 2017 – №1. – С. 16-21.
4. Wang Q., Li X. Effects of Nb, V, and W on microstructure and abrasion resistance of Fe–Cr–C hardfacing alloys // Weld International. – 2010. – Vol. 89. – P. 133–139.
5. Соколов Г.Н. Лысак В.И. Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей: монография. – Волгоград: РПК «Политехник», 2005. – 284 с.
6. Антонов А.А. Артемьев А.А., Соколов Г.Н. Структура и свойства абразивностойкого наплавленного сплава системы Fe-Cr-C-Mo-Ti-Ni-B // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2016. – № 9. – С. 671- 672.
7. Разработка новых сварочных флюсов на основе шлака силикомарганца / Н. А. Козырев [и др.] // Сварка и контроль. – 2018: материалы междунар. науч.-техн. конф., 18-21 сентября 2018 г. – Пермь, 2018. – С. 168–182.
8. Разработка новых сварочных флюсов на основе шлака силикомарганца и ковшевого электросталеплавильного шлака / Н. А. Козырев [и др.] // Сварочное производство. – 2020. – № 2 (1023). – С. 16–21.
9. Разработка новых сварочных флюсов на основе шлака силикомарганца / Н. А. Козырев [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – № 6 (1422). – С. 55–66.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ И СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ**д.т.н. Юрьев А.Б., Шевченко Р.А., д.т.н. Козырев Н.А., Михно А.Р., к.и.н. Гутак О.Я.****Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия**

Аннотация. Представлены результаты проведенных дилатометрических, металлографических и дюрометрических исследований процесса распада переохлажденного аустенита стали R350LHT при непрерывном охлаждении и в изотермических условиях были построены термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита стали R350LHT.

Ключевые слова: рельсы, контактная сварка, термическая обработка, ток, импульс, режим сварки, твердость, зона термического влияния.

Сварка железнодорожных рельсов основана на детальном представлении основных характеристик и особенностей рельсовых сталей. Кроме химического состава, к числу таких характеристик относятся данные о положении критических точек и кинетике распада переохлажденного аустенита, о чувствительности стали к перегреву и росту зерна, о прокаливаемости и физико-механических свойствах стали. Большое значение имеют сведения о кинетике превращения переохлажденного аустенита, на основании которых решаются вопросы обеспечения необходимой толщины закаленного слоя, осуществляется выбор режимов термической обработки и соответственно обеспечение требуемых и показателей получаемых физико-механических свойств [1-7].

Следует отметить, что большинство видов термической обработки конструкционных сталей проводят с нагревом обрабатываемого материала выше критических температур A_{c1} или A_{c3} , то есть до температур существования высокотемпературной фазы – аустенита, а формирование окончательного структурного состояния стали в таком случае происходит при распаде аустенита, который переохладили ниже критических точек [8].

Наиболее полной характеристикой превращений аустенита при охлаждении для каждой стали являются изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита.

Изотермические диаграммы характеризуют кинетику распада аустенита при постоянной температуре переохлаждения. Такие диаграммы наглядны для сравнительной оценки разных сталей, а также для выявления роли легирования и других факторов (температуры нагрева, размера зерна, пластической деформации и т.п.) на кинетику распада переохлажденного аустенита [9].

Термокинетические диаграммы характеризуют кинетику распада аустенита при непрерывном охлаждении. Эти диаграммы менее наглядны, но они имеют большое практическое значение, так как при термической обработке распад аустенита происходит при непрерывном изменении температуры, а не в изотермических условиях. Если известны скорости охлаждения в разных сечениях реальных изделий, то, нанося соответствующие кривые скоростей охлаждения на термокинетическую диаграмму, можно определить температуру превращений аустенита и оценить получаемую при этом структуру [10].

Превращение аустенита в субкритическом интервале температур может развиваться несколькими путями с образованием различных структурных составляющих. Обычно различают диффузионный, бездиффузионный и промежуточный механизмы превращения, которые развиваются каждый по своему закону и кинетике [9].

При диффузионном превращении аустенита происходит образование избыточных фаз феррита или карбида и образование феррито-карбидной смеси различной степени дисперсности. В зависимости от степени дисперсности феррито-карбидную смесь часто называют перлитом, сорбитом или трооститом. Две фазы в перлите (феррит и цементит) имеют вид чередующихся, близко расположенных друг к другу пластинок

При более низких температурах обычно протекает промежуточное превращение аустенита. Температурный интервал и кинетика промежуточного превращения зависят в основном от химического состава аустенита. Этот интервал с увеличением содержания углерода и легирующих элементов смещается в сторону более низких температур.

Характерной особенностью промежуточного превращения является то, что при достижении определенного процента распада при данной температуре развитие превращения приостанавлива-

ется, оставляя большее или меньшее количество непревращенного аустенита. Чем ниже температура превращения, тем полнее происходит промежуточное превращение и тем меньше остается нераспавшегося аустенита.

Под влиянием развития промежуточного превращения наблюдается изменение состава непревращенной части аустенита, главным образом по углероду, а возможно, и по некоторым другим элементам. В зависимости от химического состава стали непревращенный аустенит или обогащается, или обедняется углеродом, либо заметного изменения состава не происходит.

Продукты промежуточного превращения (бейнит) имеют игольчатое строение. При еще более низких температурах обычно развивается бездиффузионное превращение, связанное с образованием мартенсита и называемое мартенситным. В отличие от диффузионного или промежуточного превращения, мартенситное превращение развивается с очень большой скоростью.

Как и при промежуточном превращении, при мартенситном превращении при данной температуре процесс не доходит до конца, оставляя какое-то количество непревращенного аустенита. Чем больше степень переохлаждения аустенита ниже мартенситной точки, тем полнее происходит мартенситное превращение и тем меньше остается непревращенного аустенита. Температурный интервал мартенситного превращения почти однозначно определяется химическим составом аустенита. С увеличением содержания углерода и большинства легирующих элементов он смещается в область более низких температур [9].

Структура кристаллов мартенсита зависит от температуры мартенситного превращения, т.е. положения точки M_n . При низких температурах мартенситного превращения (высокоуглеродистые стали) образуется пластинчатый (игольчатый) мартенсит, имеющий форму пластины или линзы. Пластинчатые кристаллы имеют двойникованное строение. В большинстве легированных конструкционных, а также углеродистых сталей при содержании менее 0,6 % C образуется пакетный (реечный) мартенсит. Пакетный мартенсит состоит из тонких параллельных мартенситных пластин, образующих пакет, имеющий приблизительно одинаковые линейные размеры по всем направлениям.

Кинетика превращений аустенита, т.е. вид диаграммы распада, зависит от множества факторов и прежде всего от химического состава аустенита. Поэтому температурные условия развития того или иного превращения могут меняться в весьма широких пределах.

Рельсы железнодорожные широкой колеи типов Р75 и Р65 изготавливают по ГОСТ 51685-2013 из конвертерной стали и электростали. Легирование стали некарбидообразующим кремнием уменьшает содержание железа в эвтектоиде, а легирование карбидообразующим марганцем увеличивает содержание углерода в эвтектоиде. Оба легирующих элемента смещают точку S в сторону меньших содержаний углерода. Таким образом, по структуре в равновесном состоянии рассматриваемая сталь марки R350LHT является эвтектоидной.

В углеродистых и некоторых низколегированных сталях, содержащих некарбидообразующие элементы, диффузионное и промежуточное превращения протекают в близких температурных интервалах. Кремний и марганец, растворяющиеся в феррите, повышают устойчивость аустенита и сдвигают вправо кривые начала превращения. Также на представленных диаграммах видно, что кремний относит минимальную устойчивость аустенита в область высоких температур, марганец, наоборот, смещает эту зону в сторону более низких температур [11].

Легирование стали кремнием и марганцем влияет и на кинетику промежуточного превращения. Марганец увеличивает продолжительность инкубационного периода промежуточного превращения, понижает температуру минимальной устойчивости аустенита и максимальную скорость превращения. Кремний вызывает торможение даже при самых низких температурах промежуточного превращения, при этом он способствует максимальному насыщению остаточного аустенита углеродом. Так в сталях с 0,3...0,6 % C содержание углерода в остаточном аустените при промежуточном превращении может возрасти в 2 - 3 раза.

Легирующие элементы не оказывают заметного влияния на кинетику мартенситного превращения, но значительно изменяют положение мартенситных точек. Марганец существенно снижает температуру начала мартенситного превращения и увеличивает количество остаточного аустенита в закаленной стали. Кремний же не влияет на температурный интервал мартенситного превращения [11].

Данные предпосылки легли в основу разработки новой технологии сварки рельсов. Первые исследования проведены с использованием стали марки R350LHT по EN 13674-1:2017, за исключением более низкого содержания ванадия, близкой стали марки Э76ХФ по ГОСТ Р 51685-2013,

используемой для производства дифференцированной термоупрочненных рельсов на отечественных предприятиях. Для описания возможных структурных состояний, которые возможно получить при непрерывном охлаждении, а также в изотермических условиях, построены термокинетические и изотермические диаграммы распада переохлажденного аустенита исследуемой стали и на основании данных материалов проведена разработка новой технологии сварки дифференциально термоупрочненных рельсов.

Материалы и методики исследования. Дилатометрический анализ проводили на закалочном дилатометре Linseis RITA L78 с горизонтальным расположением образцов. Для непосредственного определения реальной температуры исследуемого образца использовали термопару К-типа (Ni–NiCr), которую приваривали к боковой поверхности цилиндрических образцов. Нагрев проводили в инертной среде газообразного гелия высокой чистоты марки 6.0 (по ТУ 0271-001-45905715–02, чистота 99,9999 %). Охлаждение проводили в потоке газообразного гелия высокой чистоты марки 6.0. Исследуемые дилатометрические образцы имели форму цилиндра высотой 9–11 мм и диаметром 3–4 мм. Сбор и обработку данных эксперимента осуществляли с помощью пакета программ WIN – DIL и Linseis Data Evaluation.

Для определения положения критически точки Ac1 (температура начала превращения) нагрев образца из исследуемой стали проводили со скоростью 1,5 °C/с до температуры 1000 °C. Температуру нагрева для построения термокинетической и изотермической диаграммы задали на 50 °C выше температуры окончания превращения. Температурный интервал превращения определяли по точке отрыва касательной от линейного участка термического расширения до и после фазового превращения.

При построении термокинетической диаграммы распада переохлажденного аустенита стали R350LHT нагрев образцов из исследуемой стали осуществляли со скоростью 1,5 °C/с до температуры 825 °C с выдержкой при этой температуре нагрева 15 минут. Охлаждение с температуры нагрева осуществляли со скоростями 100, 30, 10, 7,5, 5; 1 и 0,1 °C/с до температуры 30 °C. На термокинетической диаграмме распада переохлажденного аустенита по оси абсцисс откладывается время от момента начала охлаждения с температуры нагрева.

При построении изотермической диаграммы распада переохлажденного аустенита стали R350LHT нагрев образцов из исследуемой стали осуществляли со скоростью 1,5 °C/с до температуры 825 °C с выдержкой при этой температуре нагрева 15 минут. С температуры нагрева до температуры изотермической выдержки охлаждали со скоростью 100 °C/с. Изотермическую выдержку в области переохлажденного аустенита проводили при температурах 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300 и 250 °C. На изотермической диаграмме распада переохлажденного аустенита по оси абсцисс откладывается время от момента начала изотермической выдержки.

МикродюрOMETрический анализ проводили в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 на микротвердометре DuraScan 70 фирмы EMCO-TEST (Австрия) для проведения испытаний по Виккерсу по методу восстановленного отпечатка вдавливанием четырехгранной алмазной пирамиды с квадратным основанием при нагрузке 500 г. На каждом образце измерения проводили по двум взаимно перпендикулярным диаметрам от края до края образца. В качестве числа твердости принято среднее арифметическое из 10 измерений.

Металлографические исследования проводили на микрошлифах образцов с использованием светового инвертированного микроскопа Olympus GX 51 при увеличении 500 крат. Обработку изображений проводили с применением программно-аппаратного комплекса анализа изображений SIAMS 700, а также при помощи программного обеспечения Olympus Stream Motion, версия 1.8.

Микрошлифы изготавливали путем запрессовки образцов на установке CitoPress-10 (Struers, Дания) при температуре 120 °C. Общее время на запрессовку и охлаждение составило 5 минут.

Процедуру получения микрошлифов производили на автоматизированном станке Tegramin-30 (Struers, Дания). Для выявления структуры осуществляли травление микрошлифа 3%-м раствором азотной кислоты в этиловом спирте.

Исследование процессов распада переохлажденного аустенита проводили методами дилатометрического, металлографического и дюрOMETрического анализа.

Эксперименты и результаты. Химический состав исследуемой стали R350LHT приведен в табл. 1.

Из представленных в табл. 1 данных видно, что по содержанию химических элементов исследуемый металл соответствует требованиям EN 13674-1:2017 для стали марки R350HT, а также

стали марки Э76ХФ по ГОСТ Р 51685-2013, за исключением ванадия, содержание которого ниже требований стандарта.

Таблица 1

Марка стали	Химический состав исследуемой стали									
	Содержание элемента, масс. %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	V	Al	Mo	S	P
Исследуемый металл	0,81	0,56	0,97	0,27	0,08	0,004	0,003	0,007	0,005	0,013
R350LHT по EN 13674-1:2017	0,70-0,82	0,13-0,60	0,65-1,25	≤0,30	≤0,20	≤0,030	≤0,004	≤0,20	≤0,025	≤0,030
Э76ХФ по ГОСТ 51685-2013	0,71-0,82	0,25-0,60	0,75-1,25	0,20-0,80	≤0,20	0,03-0,15	≤0,004	-	≤0,020	≤0,020

Для определения температуры нагрева под аустенитизацию перед непрерывным охлаждением для построения термокинетической диаграммы распада переохлажденного аустенита проводили непрерывный нагрев до температуры 1000 °С со скоростью 1,5°С/с, что соответствует скорости нагрева посадкой в горячую печь.

По результатам непрерывного нагрева по дилатометрической кривой с использованием метода касательной была определена критическая точка A_{c1} и температура окончания превращения при непрерывном нагреве. Так, температура A_{c1} составила 708 °С, а температура окончания превращения – 775 °С. Таким образом, для нагрева при исследовании была выбрана температура 825 °С для аустенизации, превышающая температуру окончания превращения на 50 °С.

Нагрев для последующего изучения распада переохлажденного аустенита при непрерывном нагреве проводили со скоростью 1,5°С/с до температуры 825 °С. Выдержка при температуре аустенизации составляла 15 минут. Охлаждение проводили со скоростями 100, 30, 10, 7,5, 5; 1 и 0,1°С/с до температуры 30 °С.

Температуры начала и окончания превращения при нагреве и охлаждении определяли по точке отрыва касательной от линейного участка термического расширения до и после фазового превращения.

На образцах после дилатометрических измерений во время процесса термической обработки по заданным режимам были изготовлены микрошлифы и исследована микроструктура, а также проведен микродюрметрический анализ.

По результатам исследования была построена термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита (рис. 1). При охлаждении со скоростями 0,1 и 1 °С/с аустенит стали R350LHT претерпевает распад по перлитному механизму. Температурный интервал превращения находится между 706 – 637 °С и 691 – 617 °С, соответственно.

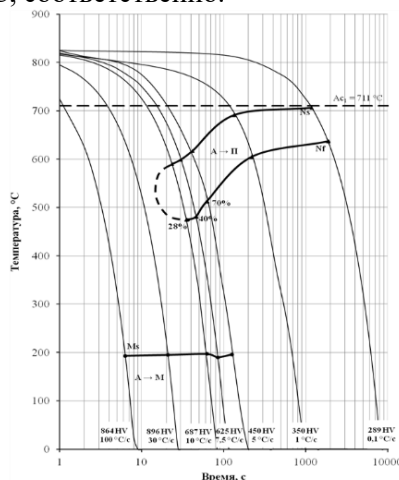


Рис. 1. Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита стали марки R350LHT

В структуре образцов после дилатометрических исследований обнаружены перлитные колонии, что приведено на рис. 2 а-б. Следует отметить, что после охлаждения с более низкой скоро-

стью структура перлита более крупная и обладает меньшей твердостью – 289 HV, что обусловлено более высоким температурным интервалом превращения, где более активно происходят диффузионные процессы, связанные с превращением аустенита в перлит. При большей скорости охлаждения ($1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$) твердость стали возрастает до 350 HV, что вызвано получением более дисперсной феррито-карбидной смеси.

Увеличение скорости охлаждения до $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ вызывает развитие превращения по двум механизмам: по перлитному и по мартенситному. В интервале температур $604 - 513\text{ }^{\circ}\text{C}$ развивается перлитное превращение аустенита. При этом процентное содержание феррито-карбидной смеси в структуре составляет 70 % (рис. 2в). При дальнейшем охлаждении оставшийся после перлитного распада аустенит превращается в мартенсит при температурах ниже $196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Твердость стали при этом составляет 450 HV.

Охлаждение со скоростью $7,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ также вызывает превращение аустенита по перлитному и мартенситному механизму. При этом в интервале $599 - 481\text{ }^{\circ}\text{C}$ в перлит превращается 40 % аустенита (рис. 2 г), а оставшийся аустенит превращается в мартенсит при температурах ниже $190\text{ }^{\circ}\text{C}$. Другими словами увеличивается количество мартенсита в структуре, что также приводит к росту твердости до 625 HV.

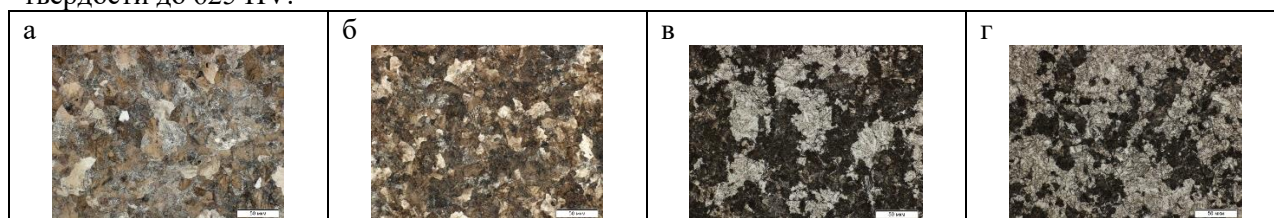


Рис. 2. Структура стали R350LHT после непрерывного охлаждения со скоростями 0,1 (а), $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ (б), $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ (в), $7,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ (г)

Дальнейшее повышение скорости охлаждения с температуры $825\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ вызывает снижение температурного интервала перлитного распада аустенита до $590 - 475\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом доля превратившегося в перлит аустенита уменьшается до 28 % (рис. 3, а). Твердость стали R350LHT в результате находится на высоком уровне – 687 HV.

При охлаждении со скоростью $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ в структуре наблюдается мартенситная структура, что свидетельствует об отсутствии перлитного превращения в стали R350LHT при такой скорости охлаждения (рис. 3, б). Твердость исследуемой стали в данном случае равна твердости мартенсита заковки и составляет 896 HV.

Охлаждение со скоростью $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ также приводит к подавлению перлитного превращения и развитию мартенситного при температурах ниже $193\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3, в). Твердость стали в данном случае также равна твердости мартенсита заковки и составляет 864 HV.



Рис. 3. Структура стали R350LHT после непрерывного охлаждения со скоростями $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ (а), $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ (б), $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ (в)

Выводы. По результатам проведенных дилатометрических, металлографических и дюрOMETРИЧЕСКИХ исследований процесса распада переохлажденного аустенита стали R350LHT при непрерывном охлаждении и в изотермических условиях были построены термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита стали R350LHT.

При исследовании распада переохлажденного аустенита при непрерывном охлаждении установлено, что охлаждение со скоростями $0,1$ и $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ вызывает распад аустенита стали R350LHT по перлитному механизму. В интервале скоростей от 5 до $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ распад аустенита происходит по перлитному и мартенситному механизму, что приводит к формированию перлитомартенситной структуры. При охлаждении аустенита исследуемой стали со скоростями 30 и $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ аустенит превращается по мартенситному механизму с получением мартенситной структуры.

с высокой твердостью. При увеличении скорости охлаждения стали R350LN наблюдается увеличение твердости от 289 (при 0,1 °C/с) до 864-896 HV (при 100 и 30 °C/с, соответственно).

Для гарантированного обеспечения перлитной структуры охлаждения стали R350LHT должно производиться со скоростями не более 1 °C/с. Вместе с тем, следует отметить, необходимость проведения дополнительных исследований кинетики распада аустенита стали марки R350HT при непрерывном охлаждении со скоростями 1-5 0C/с для уточнения предельных скоростей охлаждения, при которых обеспечивается полностью перлитная структура.

Для оценки влияния содержания ванадия на кинетику превращения аустенита в рельсовой стали, исследование будет продолжено на рельсовой стали марки Э76ХФ.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420003 р_а «Развитие физико-химических и технологических основ создания принципиально нового способа сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов».

Список литературы

1. Разработка технологии производства дифференцированно термоупрочненных рельсов на ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» / Е.В. Полевой [и др.] // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых креплений: сб. науч. докл., ОАО «УИМ». – Екатеринбург, 2014. – С. 93 – 101.
2. Myers J., Geiger G.H., Poirier D.R. Structure and properties of thermit welds in rails // Welding Journal. – 1982. – Vol. 258. – P. 8 – 19.
3. Investigation of structure and mechanical properties of aluminothermic welded joints of rails / L.B. Tikhomirova [et al.] // Vestnik YuUrGU. Seriya: Metallurgiya [Bulletin of the South Ural state university. Series "Metallurgy"]. – 2016. – Vol. 16. – No. 3. – P. 90 – 95.
4. Теория сварочных процессов : учеб. изд. / А.В. Коновалов [и др.] – Москва : МГТУ им. Баумана, 2007. – 559 с.
5. Weingrill L., Krutzler J., Enzinger N. Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails // Materials Science Forum. – 2016. – Vol. 879. – P. 2088-2093.
6. Yamamoto R., Komizu Y., Fukada Y. Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas pressure weld interface: joining phenomena of gas pressure welding // Welding International. – 2014. – Vol. 28. – Issue 7. – P. 510–520.
7. Mitsuru F., Hiroaki N., Kiyoshi N. Rail flash-butt welding technology // JFE Technical Report. – 2015. – № 20. – P. 159 – 163.
8. Блантер М.Е. Теория термической обработки : учеб. для вузов. – М.: Металлургия, 1984. – 328 с.
9. Попов А.А. Попова Л.Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита: Справочник термиста. – М.; Свердловск: Машгиз, 1961. – 430 с.
10. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.
11. Зюзин В.И. Влияние легирующих элементов на кинетику изотермического превращения и распада аустенита: труды Уральского филиала АН СССР. – М.: Металлургиздат, 1941. – 109 с.

УДК 621.791.042.3

НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПЛАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

к.т.н. Усольцев А.А., д.т.н. Козырев Н.А., Михно А.Р., к.т.н. Крюков Р.Е., Шевченко Р.А.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Приведены результаты исследований новых наплавочных материалов для восстановления рабочих поверхностей деталей, работающих в условиях высокого ударно-абразивного износа. Изучено влияние введения в состав порошковой проволоки порошка титана, на твердость, износостойкость, микроструктуру восстановленной поверхности.

Ключевые слова: порошковая проволока, наплавка, микроструктура, твердость, износостойкость, техногенные отходы.

Введение. Ремонт горного оборудования, работающего в условиях высокого ударно-абразивного износа, требует значительных затрат на их замену или восстановление. Одним из наиболее эффективных методов упрочнения и восстановления таких деталей является электроду-

говая наплавка порошковыми проволоками [1-6]. Так же для этих целей ведётся разработка и изготовление специальных наплавочных материалов, которые благодаря оптимально подобранному химическому составу способствуют обладанию высокой твердости, а также абразивной и ударно-абразивной износостойкости [7-10].

Методы исследования. Многослойная наплавка образцов проводилась с помощью сварочного трактора ASAW-1250. Химический состав исследуемых образцов определяли по ГОСТ 10543-98 рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомноэмиссионным методом на спектрометре ДФС-71. Испытания на износ образцов производили на машине 2070 СМТ-1. Твёрдость наплавленных слоев измеряли с помощью твердомера УЗИТ-3. Металлографическое исследование микрошлифов осуществляли с помощью оптического микроскопа OLYMPUSGX-51 в светлом поле в диапазоне увеличений $\times 100 - 1000$ после травления поверхности образцов в 4 %-ном растворе азотной кислоты. Величину зерна определяли по ГОСТ 5639-82 при увеличении $\times 100$. Дисперсность мартенсита оценивали при сопоставлении структуры с эталонами соответствующих шкал и размеров игл мартенсита с данными таблицы № 6 ГОСТ 8233-56. Определение длины игл мартенсита осуществляли с помощью пакета прикладных программ для металлографических исследований SiamPhotolab 700. Исследование продольных образцов наплавленного слоя на наличие неметаллических включений проводили по ГОСТ 1778-70.

Результаты и всестороннее рассмотрение вопроса. Изготовление порошковой проволоки проводилось с использованием порошкообразных материалов: железного порошка ПЖВ-1 по ГОСТ 9849-86, порошка марганца МР-0 по ГОСТ 6008-82, порошка кремния КР-1 по ГОСТ 2169-69, порошка хрома ПХА-1М по ТУ 14-1-1474-75, порошка никеля ПНК 1Л5 по ГОСТ 9722-97, порошка феррованадия марки ФВ50У 0,6 по ГОСТ 27130-94, молибденового порошка МПЧ по ТУ 48-19-69-9, порошка титана ПТС по ТУ 15-1958 и пыли газоочистки алюминиевого производства в качестве углеродфторсодержащего материала взамен графита аморфного.

С целью изучения влияния введения порошка титана в порошковые проволоки при наплавке под марганецсодержащим флюсом изготовлены четыре порошковые проволоки с различным содержанием порошка титана. При этом изучался полученный с использованием данных порошковых проволок наплавленный металл (соответственно образцы: Т1; Т2; Т3; Т4).

Наплавка образцов осуществлялась с использованием разработанного в условиях СибГИУ [11] сварочного флюса, изготовленного из шлака производства силикомарганца с химическим составом, масс. %: 0,52 FeO; 29,13 CaO; 16,15 MnO; 42,40 SiO₂; 1,39 MgO; 6,80 Al₂O₃; 0,17 TiO₂; 0,59 K₂O; 0,18 Na₂O; 0,024 C; 0,23 S; 0,022 P; 0,32 F; 0,004 ZnO; 0,033 Cr₂O₃. Наплавка исследуемых образцов осуществлялась с использованием режима наплавки, рекомендованного по ГОСТ 26101-84: сила тока 620А, напряжение 32В, скорость наплавки 20 см/мин. Химический состав наплавленного металла представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав наплавленного слоя

Маркировка образца	Массовая доля элементов, %												
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Ti	V	Mo	Al	Nb	S	P
T1	0,36	0,96	1,21	5,57	0,7	0,08	0,001	0,31	1,29	0,024	0,002	0,057	0,023
T2	0,42	0,9	1,18	5,63	0,72	0,08	0,021	0,38	1,37	0,027	0,004	0,055	0,024
T3	0,41	1,34	1,65	5,89	0,7	0,07	0,064	0,34	1,32	0,038	0,003	0,044	0,028
T4	0,39	0,98	1,24	5,45	0,71	0,05	0,067	0,32	1,25	0,038	0,002	0,051	0,029

Исследование образцов наплавленного слоя на наличие неметаллических включений (табл. 2, рис. 1) проводили по ГОСТ 1778-70. Полированную поверхность изучали при увеличении $\times 100$.

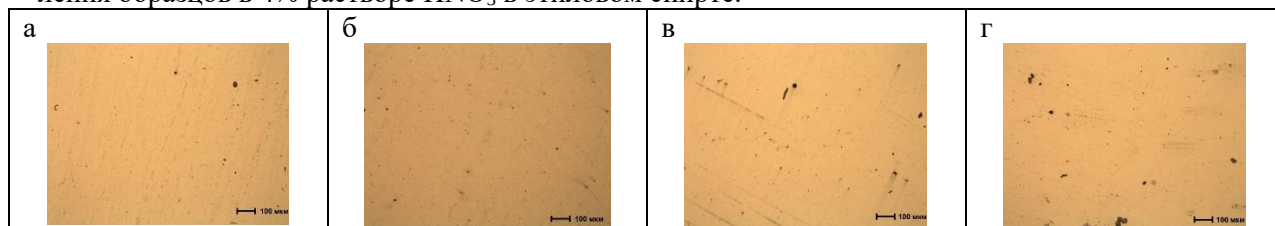
Таблица 2

Неметаллические включения наплавленных образцов

Номер образца	Типы неметаллических включений	
	Оксиды точечные	Силикаты недеформирующиеся
T1	2а	4а, 2б
T2	2а	4а, 1б
T3	2а	4а, 5б
T4	2а	4а, 5б

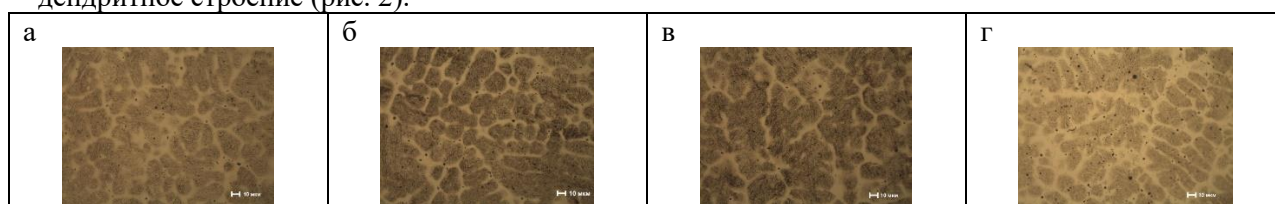
Металлографические исследования полированных микрошлифов проводились с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 в светлом поле в диапазоне увеличений от $\times 100$ до

×1000. Микроструктуру наплавленных образцов изучали при увеличении ×500 (рис. 2) после травления образцов в 4% растворе HNO_3 в этиловом спирте.



а - образец Т1, б - образец Т2, в - образец Т3, г - образец Т4
Рис. 1. Неметаллические включения исследуемых образцов, х100

Металлографический анализ показал, что микроструктура наплавленных слоев представляет собой мелкоигльчатый и среднеигльчатый мартенсит (балл 3-5) с размером игл 3 – 9 мкм, сформировавшийся внутри границ бывшего зерна аустенита, небольшое количество аустенита остаточного в виде отдельных участков и тонкие прослойки δ -феррита. Структура равномерная, имеет дендритное строение (рис. 2).



а - образец Т1, б - образец Т2, в - образец Т3, г - образец Т4
Рис. 2. Микроструктура наплавленных образцов

Величина бывшего зерна аустенита по шкале зернистости соответствует № 6 и №5 (табл. 3, рис. 2). В периферийных областях образцов присутствует более мелкозернистая структура (величина бывшего аустенитного зерна соответствует №7).

Таблица 3

Характеристика неметаллических включений и структуры исследуемых наплавленных слоев

Номер образца	Номер зерна	Балл мартенсита	Размер игл мартенсита, мкм
1	5	5	4-9
82	6	4	3-6
83	6	4	4-7
84	6	3	2-5

Измерение твердости наплавленного слоя (табл. 4) исследуемых образцов выполняли по методу Бринелля с помощью ультразвукового твердомера УЗИТ-3 в соответствии с требованиями ГОСТ 9012-59.

Износостойкость наплавленного слоя исследуемых образцов определяли по схеме диск-колотка путем проведения испытаний на износ на машине 2070 СМТ-1. Результаты износостойкости исследуемых образцов представлены в табл. 4

Таблица 4

Степень износа и твердость исследуемых образцов

Номер образца	Пределы твердости по НВ	Пределы твердости по HRC	Средняя твердость НВ	Средняя твердость HRC	Степень износ (г/оборот·10 ⁻⁵)
T1	402-573	40-46	473	43	2,94
T2	456-510	45-48	484	45	2,76
T3	475-561	45-50	507	48	2,37
T4	445-526	45-48	487	46	2,61

На основе полученных данных по химическому составу, износостойкости и твердости исследуемых образцов построены зависимости, представленные на рис. 3.

Построенные зависимости указывают на влияние содержания титана в наплавленном слое на твердость износостойкость исследуемых образцов.

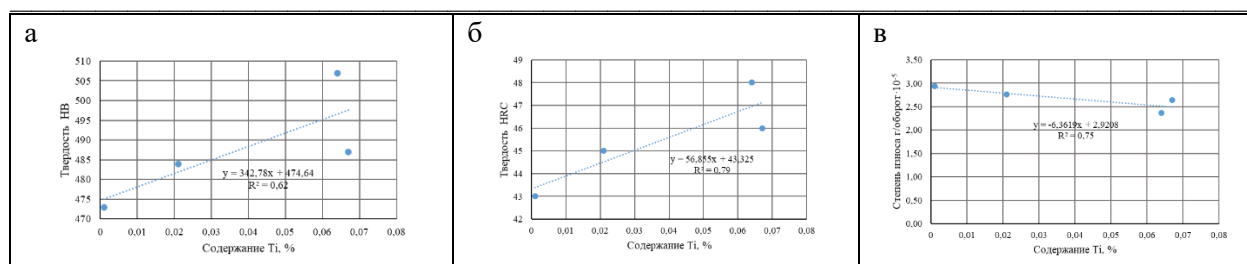


Рис. 3. Зависимость твердости HB (а), твердости HRC (б), степени износа (в) от содержания титана в наплавленном слое

По результатам вычислений получены зависимости, адекватность которых фактическим значениям проверялась по показателю средней ошибки аппроксимации:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{Y_i - \tilde{Y}_i}{Y_i} \right| \cdot 100, \quad (1)$$

где m – количество наблюдений; $\tilde{Y}_i$ – вычисленное значение результирующего показателя; Y_i – фактическое значение результирующего показателя.

Построены регрессионные модели степени износа и твердости наплавленного слоя от массовой доли элементов, в основном определяющих исследуемые свойства:

Степень износа (г/оборот $\cdot 10^{-5}$) = $6,946 + 0,18 \cdot \text{Mn} - 0,757 \cdot \text{Cr} - 6,459 \cdot \text{Ti}$ (ошибка аппроксимации 0,003%);

HB = $140,141 - 16,738 \cdot \text{Mn} + 63,335 \cdot \text{Cr} + 334,885 \cdot \text{Ti}$ (ошибка аппроксимации 0,0015%);

HRC = $-3,69 - 4,734 \cdot \text{Mn} + 9,40 \cdot \text{Cr} + 64,70 \cdot \text{Ti}$ (ошибка аппроксимации 0,0025%).

Выводы. Проведенные исследования указывают высокую степень угара титана в наплавленном слое и высокое содержание марганца.

Увеличение содержания титана в наплавленном металле способствует повышению твердости и износостойкости.

Математические модели степени износа и твердости от химического состава наплавленного слоя могут быть использованы при разработке новых порошковых проволок для наплавки.

В результате увеличения содержания титана с 0,001 до 0,021 - 0,067% при одновременном изменении содержания остальных элементов в наплавленном слое наблюдается уменьшение размера первичного аустенитного зерна и игл мартенсита. В наплавленном слое с наибольшим содержанием титана 0,067% мартенсит в структуре имеет более мелкоигольчатое строение, по сравнению с остальными наплавленными слоями.

Уменьшение величины первичного зерна аустенита при повышении содержания титана в составе наплавленного слоя, вероятно, связано с его тормозящим влиянием на рост зерна. Титан относится к группе элементов, труднорастворимые карбиды которых создают «барьеры» из мельчайших частиц, препятствующие объединению соседних зерен в одно зерно.

Проведенные исследования указывают на возможность использования разработанных порошковых проволок для восстановительной наплавки деталей, работающих в условиях высокого ударно-абразивного износа.

Список литературы

1. Тепляшин М.В., Комков В.Г. Исследования влияния легирующих элементов на износостойкость в сплавах, предназначенных для электрошлаковой наплавки бил молотковых мельниц // Ученые заметки ТОГУ [Электронный ресурс]. – 2013. – Том 4. – № 4. – С. 1554-1561.
2. Барчуков Д.А. Преимущества легирования молибденом быстрорежущих сталей для выполнения упрочнения // Наука сегодня. Фундаментальные и прикладные исследования: материалы междунар. науч. - практ. конф. – Тверь, 2016. – С. 19-20.
3. Разработка порошковой проволоки для наплавки запорной арматуры / Н.Н. Еремин [и др.] // Омский научный вестник. – 2014. – №2 (130). (Серия «Машиностроение и машиноведение»). – С. 45-47.
4. Ефименко Н. Г. Модифицирование, рафинирование и легирование иттрием применительно к сварке сталей // Автоматическая сварка. – 2002. – № 6. – С. 9–14.
5. Ерофеев В.А., Захаров С.К., Кузнецов О.В. Особенности технологии дуговой наплавки упрочняющих слоёв на стальную подложку // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 11. – Ч. 1. – С. 132-138.
6. Моделирование влияния легирующих элементов на точку «М» и фазовый состав наплавленных Fe-Cr-Mn метастабильных сталей / Я.А. Чейлах [и др.] // Вестник Приазовского гос. техн. ун-та : сб. науч. тр. – Мариуполь, 2013. – Вып. 27. – С. 82-90.

7. Орлик А.Г. Чернышов Г.Г. Разработка технологии механизированной дуговой наплавки покрытия с заданным комплексом свойств, стойкого к гидроабразивному износу // Машиностроение. – 2012. – №8. – С. 55.
8. Малинов В.Л. Исследование методом регрессивного анализа зависимостей износостойкости в условиях абразивного и ударно-абразивного изнашивания от химического состава наплавленного металла на Fe-Cr-Mn-V-C основе // Вестник Приазовского гос. техн. ун-та : сб. науч. тр. – Мариуполь, 2011. – Вып. 2 (23). – С. 110.
9. Разработка новой порошковой проволоки на основе пыли газоочистки силикомарганца / Н.А. Козырев [и др.] // Сварочное производство. – 2019. – № 10 (1019). – С. 28-33.
10. Разработка порошковой проволоки для наплавки деталей, работающих в условиях износа / А.И. Гусев [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61. – № 11. – С. 898-906.
11. Разработка новых сварочных флюсов на основе шлака силикомарганца / Н.А. Козырев [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – Вып.6(1422). – С.55-66.

УДК 621.791.042.3

ВЛИЯНИЕ ВВЕДЕНИЯ ПОРОШКА ТИТАНА В СОСТАВ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ НАПЛАВКИ ПОД СЛОЕМ ФЛЮСА ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

д.т.н. Козырев Н.А., Михно А.Р., к.т.н. Усольцев А.А., к.т.н. Крюков Р.Е.,
д.т.н. Гизатулин Р.А.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Изучено влияние введения титана в порошковую проволоку системы Fe—C—Si—Mn—Cr—W—V на свойства наплавленного слоя, выполненного автоматической наплавкой под слоем флюса. Изготовление наплавочных материалов выполнено с использованием техногенных отходов металлургического производства. Изучено влияние титана на микроструктуру и износостойкость восстановленной поверхности.

Ключевые слова: порошковая проволока, порошок титана, наплавка, шлак производства силикомарганца, микроструктура, твердость, износостойкость, техногенные отходы.

В настоящее время остро стоит проблема повышения долговечности быстро изнашиваемых узлов машин, работающих в условиях высокого абразивного износа. Восстановление изношенных деталей является важным резервом повышения эффективности использования различных машин и механизмов. [1-8].

Восстановление изношенных деталей возможно с помощью наплавки, нанося расплавленный металл на поверхность изделия, нагретую до оплавления или до температуры надежного смазывания жидким наплавленным металлом. Наплавленный металл связан с основным металлом весьма прочно и образует одно целое с изделием. Толщина наплавленного металла, образованного одним или несколькими слоями, может быть различной 0,5 - 10 мм и более.

На сегодняшний день существуют различные способы проведения наплавки: электрошлаковая, электромагнитная, лазерная, вибродуговая, импульсно-дуговая, электродуговая наплавка под слоем флюса, плазменная, электроконтактная наплавка [9]. Все перечисленные способы обладают некими преимуществами, но и имеют ряд недостатков, сдерживающих их широкое применение.

В настоящее время наиболее распространённым способом восстановления рабочих поверхностей, является наплавка под слоем флюса. Процесс характеризуют: высокая производительность, качество и безопасность работы сварщика, несложный процесс, возможность формирования наплавленных поверхностей с большим диапазоном свойств. Наплавка под слоем флюса имеет и недостатки: высокую стоимость оборудования (как правило, оборудование, применяемое в ходе наплавки под слоем флюса, стоит дороже, чем оборудование для ручной дуговой наплавки с применением стержневых электродов с покрытием), большую зону нагрева (из-за чего этот вид наплавки не может быть применен в тех случаях, когда требуется наплавка металла на мелкие изделия, особенно, в том случае, если эти изделия обладают достаточно сложной формой), кроме того, часто к недостаткам этого вида наплавки относят и тот факт, что он снижает усталостную

прочность металлической детали, причем, показатель снижения прочности металла может в некоторых случаях достигать 40%.

Изучением возможности управления механическими показателями (твердость, износостойкость) при наплавке под слоем флюса занимаются многие ученые.

Целью представленной работы является изучение влияния введения в состав порошковой проволоки порошка титана (ПТС) на микроструктуру, твердость и износостойкость наплавленного под слоем флюса металла.

Для проведения лабораторных экспериментов были изготовлены несколько образцов порошковой проволоки с различным содержанием титана (табл. 1). Изготовление порошковой проволоки осуществляли с использованием порошкообразных материалов: железного порошка ПЖВ-1 по ГОСТ 9849-86, хрома ПХ-1С по ТУ 14-1-1474-75, марганца МР-0 по ГОСТ 6008-82, кремния КР-1 по ГОСТ 2169-69, никеля ПНК 1Л5 по ГОСТ 9722-97, углеродфторсодержащего материала – пыли газоочистки алюминиевого производства, а также порошка титана ПТС по ТУ 14-22-57-92. Наплавку исследуемых составов порошковых проволок проводили под флюсом, изготовленным из шлака силикомарганца [10] производства Западно-Сибирского электрометаллургического завода флюса для наплавки марки НФП по ТУ 20.59.56.120-001-14796818-2020.

Таблица 1

Компонентный состав исследуемых порошковых проволок									
Маркировка проволок	Компонентный состав порошковых проволок, г								
	Углеродфторсодержащий материал	ПХА-1М	МР-0	КР-1	ПВТ	ВЭЛ-1	ПНК-1Л5	ПТС	ПЖВ-1
1	8,88	7	2,2	2,64	21	0,8	1,6	0,1	остальное
2								0,2	
3								0,6	
4								1	
5								1,6	

Наплавка исследуемых образцов осуществлялась на стальные пластины марки 09Г2С с использованием режима наплавки, рекомендованного по ГОСТ 26101-84, сила тока 620А, напряжение 32В, скорость наплавки 20 см/мин. После проведения наплавочных работ был изучен химический состав наплавленных образцов, проведены механические испытания на износ и металлографические исследования.

Химический состав исследуемых наплавленных образцов (табл. 2) определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомноэмиссионным методом на спектрометре ДФС-71 по ГОСТ 10543–98.

Таблица 2

Химический состав наплавленного слоя														
Номер образца	Массовая доля элементов, %													
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Ti	W	V	Mo	Al	Nb	S	P
1	0,52	1,23	1,94	2,49	0,05	0,04	0,024	7,71	0,30	0,037	0,034	0,002	0,047	0,013
2	0,52	1,29	1,96	2,61	0,06	0,04	0,037	8,27	0,32	0,036	0,042	0,003	0,042	0,012
3	0,62	1,27	1,97	2,88	0,05	0,04	0,053	8,81	0,34	0,036	0,036	0,005	0,040	0,014
4	0,67	1,20	1,98	2,69	0,06	0,04	0,062	8,80	0,34	0,037	0,046	0,003	0,012	0,012
5	0,73	1,45	2,05	2,69	0,06	0,04	0,13	8,83	0,40	0,038	0,040	0,002	0,040	0,015

Испытания на износ образцов производили на машине 2070 СМТ–1. Твердость наплавленных слоев измеряли с помощью твердомера УЗИТ-3 (табл. 3).

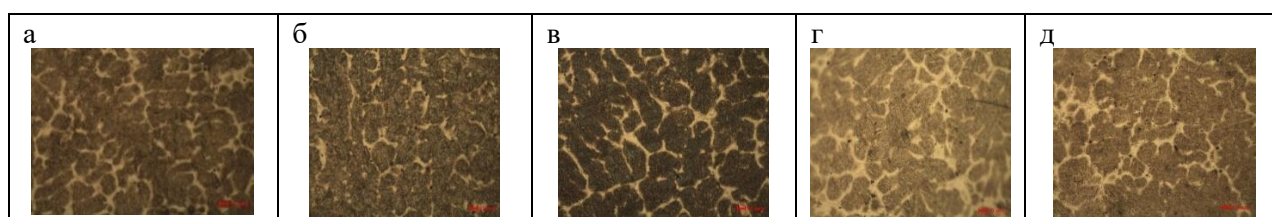
Металлографическое исследование микрошлифов (рис. 1) осуществляли с помощью оптического микроскопа OLYMPUSGX-51 в светлом поле в диапазоне увеличений $\times 100 - 1000$ после травления поверхности образцов в 4 %-ном растворе азотной кислоты. Величину зерна определяли по ГОСТ 5639-82 при увеличении $\times 100$. Дисперсность мартенсита оценивали при сопоставлении структуры с эталонами соответствующих шкал и размеров игл мартенсита с данными таблицы № 6 ГОСТ 8233-56. Определение длины игл мартенсита осуществляли с помощью пакета прикладных программ для металлографических исследований SiamPhotolab 700.

Таблица 3

Результаты проведения испытаний на твердость и износ

Номер образца	Твердость HRC	Твердость HB	Скорость износа, г/об
1	$\frac{55^*}{52-55^{**}}$	$\frac{589^*}{614-689^{**}}$	1,94
2	$\frac{54}{53-55}$	$\frac{695}{642-730}$	1,85
3	$\frac{58}{56-59}$	$\frac{684}{651-746}$	1,29
4	$\frac{58}{56-58}$	$\frac{763}{713-830}$	1,20
5	$\frac{58}{56-60}$	$\frac{778}{705-838}$	1,12

* Среднее значение, ** минимальное, максимальное значение



а – образец 1, б – образец 2, в – образец 3, г – образец 4, д – образец 5

Рис. 1. Микроструктура наплавленного металла в зависимости от содержания титана в порошковой проволоке, $\times 500$

Исследование образцов наплавленного слоя на наличие неметаллических включений (табл. 4) проводили по ГОСТ 1778-70.

Таблица 4

Неметаллические включения наплавленных образцов

Номер образца	Загрязненность неметаллическими включениями, балл	
	Оксиды точечные	Силикаты недеформирующиеся
1	1a	1a
2	1a, 2a	1a
3	1a, 2a	1a, 2a
4	1a, 2a	1a, 2a
5	1a, 2a	1a

Установлено, что повышение содержания титана при одновременном изменении содержания остальных химических элементов в составе наплавленного слоя незначительно влияет на степень загрязненности неметаллическими включениями.

Для всех исследуемых образцов отмечена незначительная загрязненность неметаллическими включениями, не оказывающая негативное влияние на свойства наплавленного слоя и допустима для использования исследуемой порошковой проволоки.

Выводы. Введение в состав порошковой проволоки Fe-C-Si-Mn-Cr-W-V титана повышает твердость наплавленного слоя и повышает износостойкость образцов.

Введение в состав порошковой проволоки порошка титана оказывает незначительное влияние на степень загрязненности исследуемых наплавленных слоев оксидными включениями.

Структура металла с добавлением титана, представляет мартенсит, сформировавшийся внутри границ бывшего зерна аустенита, небольшое количество аустенита остаточного в виде отдельных участков и тонкие прослойки δ -феррита. В микроструктуре образцов присутствует карбидная сетка.

Увеличение содержания титана в наплавленном слое способствует уменьшению размера игл мартенсита, а также размера бывшего зерна аустенита. В микроструктуре образцов присутствует

среднеигльчатый и мелкоигльчатый мартенсит. Размер игл мартенсита варьируется от 2 до 9 мкм.

Список литературы

1. Чинахов Д.А., Григорьева Е.Г., Майорова Е.И. Влияние расхода защитного газа на форму наплавляемого валика при восстановлении изношенных деталей // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – №3. – С. 37-42
2. Проскурин А.Д., Козик Е.С., Щикочихина Л.Н. Повышение физико-механических свойств низкоуглеродистых сталей с помощью наплавки износостойких покрытий // Вестник ОГУ. – 2011. – №10 (129). – С. 227.
3. Малинов В.Л. Износостойкость наплавленного металла с метастабильным аустенитом при абразивном и ударно-абразивном воздействии // Вестник Приазовского гос. техн. ун-та : сб. науч. тр.– Мариуполь, 2012. – Вып. 25. – С. 148.
4. Емелюшин А.Н., Петроченко Е.В., Нефедьев С.П. Исследование структуры и ударно-абразивной износостойкости покрытий системы Fe–C–Cr–Mn–Si, дополнительно легированных азотом // Сварочное производство. – 2011. – № 10. – С. 18–22.
5. Нефедьев С.П., Дёма Р.Р., Котенко Д.А. Абразивная и ударно-абразивная износостойкость твёрдых наплавленных покрытий // Вестник ЮУрГУ. – 2015. – Т. 15. – № 1. – (Серия «Металлургия»). – С. 103–106.
6. Луговая В.А., Ярошик В.В. Особенности наплавки композиционных сплавов при упрочнении рабочих поверхностей тел вращения / Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – Вып. 40(59). – (Серия «Строительство и архитектура»). – С. 166-173.
7. Влияние увеличения содержания хрома и углерода в порошковой проволоке системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo–V на физико-механические свойства наплавляемого металла / Н.А. Козырев [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2020. – Т.76. – №5. – С. 488-495.
8. Наплавка порошковыми проволоками C– Si–Mn–Mo –V–B и C – Si – Mn – Cr–Mo – V деталей горнорудного оборудования / А.И. Гусев [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60. – № 4. – С. 318-323.
9. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. – Рипол Классик, 1985.
10. Разработка новых сварочных флюсов на основе шлака силикомарганца / Н.А. Козырев [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018.– Вып.6(1422). – С. 55-66.

УДК 519.237: 669.018.25

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГОРНОШАХТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО УДАРНО-АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА, ПУТЕМ НАПЛАВКИ

Гусев А.И., д.т.н. Козырев Н.А., к.т.н. Усольцев А.А., к.т.н. Крюков Р.Е., Михно А.Р.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Исследование порошковых проволок системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Mo–Ni–V–Co для наплавки. Изучение влияния состава порошковой проволоки рассматриваемой системы на свойства наплавленного слоя. Проведение опытно-промышленных испытаний защитного покрытия, выполненного наплавкой новой порошковой проволокой предлагаемой системы на лопасти шнека очистного комбайна.

Ключевые слова: порошковая проволока, наплавка, микроструктура, твердость, износостойкость, многофакторный анализ.

Введение. Важнейшим резервом увеличения объема производства продукции и экономии срока службы оборудования является повышение работоспособности исполнительных органов очистных и проходческих комбайнов, работающих в условиях ударно – абразивного износа. Поэтому актуальной задачей является разработка новых материалов, значительно повышающих износостойкость таких деталей и использование технологии их восстановления. [1-8]. Для легирования материалов, работающих в условиях абразивного износа, в основном, используются наплавочные материалы (сплавы на железоуглеродистой основе), содержащие хром, марганец, никель. В сочетании с перечисленными элементами в наплавочные материалы также вводят карбидообразующие элементы: вольфрам, ванадий, титан и молибден. Широкое распространение для наплавки

абразивно-изнашивающихся изделий получили наплавочные проволоки систем Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo типа А и В по классификации МИС [9].

Методы исследования. Лабораторные исследования проводили по схеме, приведенной в работах [10–11]. Многослойную наплавку образцов производили с предварительным подогревом пластин до 350°C и последующим (после наплавки) замедленным охлаждением. Наплавку осуществляли сварочным трактором ASAW-1250 с наплавлением новой порошковой проволоки на пластины. В состав ряда образцов проволоки вводили: никель, кобальт, вольфрам; аморфный углерод заменили на углеродфторсодержащую пыль со следующим химическим составом, масс. %: $Al_2O_3 = 21-46$; $F = 18-27$; $Na_2O = 8-15$; $K_2O = 0,4-6$; $CaO = 0,7-2,3$; $SiO_2 = 0,5-2,5$; $Fe_2O_3 = 2,1-3,3$; $C_{общ} = 12,5-30,2$; $MnO = 0,07-0,9$; $MgO = 0,06-0,9$; $S = 0,09-0,19$; $P = 0,10-0,18$. Дисперсность такого материала позволяет проводить хорошее смешение с металлической составляющей шихты порошковой проволоки. Наплавку проводили на пластины из стали 09Г2С в 6 слоев. Изготовление проволоки проводилось на лабораторной машине. Диаметр изготовленной проволоки 5 мм, оболочка выполнена из ленты Ст3. В качестве наполнителя использовались порошкообразные материалы: порошок железа марки ПЖВ1 по ГОСТ 9849-86, порошок ферросилиция марки ФС75 по ГОСТ 1415-93, порошок высокоуглеродистого феррохрома марки ФХ900А по ГОСТ 4757-91, порошок углеродистого ферромарганца ФМн 78(А) по ГОСТ 4755-91, порошок никеля ПНК-1Л5 по ГОСТ 9722-97, порошок ферромolibдена марки ФМо60 по ГОСТ 4759-91, порошок феррованадия марки ФВ50У0,6 по ГОСТ 27130-94, порошок кобальта ПК-1У по ГОСТ 9721-79, порошок вольфрамовый ПВН ТУ 48-19-72-92.

Химический состав металла, наплавленного на пластины, определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС -71. Измерение твердости исследуемых образцов выполняли по методу Роквелла в соответствии с требованиями ГОСТ 9013-59.

Металлографическое исследование микрошлифов осуществляли с помощью оптического микроскопа OLYMPUSGX-51 в светлом поле в диапазоне увеличений от $\times 100$ до $\times 1000$ после травления поверхности образцов в 4 %-ном растворе азотной кислоты. Величину зерна определяли по ГОСТ 5639-82 при увеличении $\times 100$. Дисперсность мартенсита оценивали при сопоставлении структуры с эталонами соответствующих шкал и размеров игл мартенсита с данными таблицы № 6 ГОСТ 8233-56. Определение длины игл мартенсита осуществляли с помощью пакета прикладных программ для металлографических исследований SiamPhotolab 700. Исследование продольных образцов наплавленного слоя на наличие неметаллических включений проводили по ГОСТ 1778-70. Полированную поверхность изучали при увеличении $\times 100$ с помощью металлографического микроскопа ЛабoМет-1И.

Скорость истирания наплавленного слоя опытных образцов определяли путем проведения испытаний на износ на машине 2070 СМТ-1 по схеме диск – колодка.

При опытно-промышленных испытаниях для изготовления защитных пластин вырубались пластины металла размером 200x150x10 мм из стали 09Г2С, далее на эти пластины выполняли нанесение защитного покрытия методом автоматической наплавки под слоем флюса на постоянном токе обратной полярности (электрод «+», деталь «-») на режимах $I=450A$, $U=-30V$, скорость сварки $V=10m/min$. одиночными валиками высотой до 3мм в два прохода (для исключения перемешивания с основным металлом) в нижнем положении. После чего на машине термической резки вырезался необходимый контур защитных пластин, далее на пластинах снимались фаски 3x8мм для установки и приварки их на лопасти шнека комбайна 4LS20, наиболее подверженных абразивному износу, т.к. они выполняют погрузку горной массы на конвейер. Приварку пластин выполняли полуавтоматической сваркой в среде защитных газов Ar-CO₂ на режимах $I=180A$, $U=25V$, $V=8,5 m/min$.

Результаты и всестороннее рассмотрение вопроса. Химический состав наплавленного металла приведен в табл. 1.

Металлографические исследования показали (табл. 2), что микроструктура наплавленного слоя порошковой проволокой системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Mo–Ni–V–Co состоит из мартенсита, формирующегося внутри границ бывшего аустенитного зерна, аустенита остаточного, присутствующего в небольшом количестве в виде отдельных островков, и тонких прослоек δ -феррита, располагающегося по границам бывших зерен аустенита, при отсутствии хрома – структура феррито-перлитная.

Таблица 1

Химический состав наплавленных слоев, масс. %

Номер образца	C	Si	Cr	Mo	Mn	Al	Ni	Co	W	Cu	V	Ti	S	P
1	0,4	0,72	5,26	0,52	0,84	0,02	0,42	0,100	0,001	0,07	0,050	0,003	0,037	0,025
2	0,45	0,8	4,98	0,5	0,77	0,02	0,56	0,110	0,001	0,07	0,040	0,005	0,044	0,023
3	0,27	0,78	5,50	0,48	0,77	0,02	0,61	0,080	0,001	0,10	0,040	0,001	0,042	0,019
4	0,38	0,62	4,98	0,47	0,80	0,02	0,82	0,090	0,001	0,07	0,040	0,02	0,038	0,020
5	0,19	0,77	4,17	0,38	0,61	0,108	0,34	0,051	0,001	0,07	0,020	0,012	0,054	0,024
6	0,19	0,63	4,06	0,38	0,65	0,066	0,30	0,056	0,001	0,08	0,030	0,024	0,056	0,019
7	0,20	0,59	4,12	0,38	0,61	0,031	0,30	0,121	0,001	0,06	0,020	0,007	0,049	0,019
8	0,20	0,64	4,03	0,39	0,60	0,052	0,30	0,199	0,001	0,08	0,030	0,020	0,058	0,021
9	0,20	0,59	0,01	0,33	0,56	0,019	0,30	0,053	7,740	0,10	0,005	0,005	0,072	0,017
10	0,20	0,55	0,01	0,34	0,49	0,025	0,26	0,071	7,420	0,09	0,010	0,001	0,048	0,014
11	0,20	0,58	0,01	0,34	0,52	0,057	0,28	0,071	7,550	0,09	0,010	0,003	0,038	0,014
12	0,21	0,55	0,01	0,35	0,52	0,054	0,27	0,061	7,650	0,08	0,020	0,001	0,036	0,017
13	0,26	0,78	7,10	0,39	1,49	0,082	0,32	0,001	0,001	0,07	0,020	0,010	0,033	0,009
14	0,22	0,73	5,95	0,32	1,38	0,095	0,29	0,001	0,001	0,09	0,030	0,033	0,029	0,014
15	0,26	0,75	6,30	0,32	1,23	0,085	0,30	0,001	0,001	0,09	0,020	0,003	0,034	0,012
16	0,26	0,75	6,06	0,34	1,16	0,077	0,30	0,001	0,001	0,09	0,040	0,024	0,033	0,016
17	0,13	0,56	3,94	0,25	0,91	0,02	0,26	0,003	0,030	0,08	0,006	0,001	0,033	0,017
18	0,17	0,61	6,00	0,37	1,20	0,014	0,39	0,002	0,025	0,10	0,006	0,002	0,033	0,015
19	0,17	0,54	5,90	0,37	1,19	0,009	0,38	0,002	1,640	0,01	0,002	0,002	0,033	0,015
20	0,10	0,49	4,15	0,23	0,92	0,009	0,25	0,004	0,025	0,09	0,030	0,001	0,033	0,017
21	0,19	0,54	6,21	0,38	1,15	0,007	0,40	0,002	0,025	0,09	0,040	0,002	0,031	0,015
22	0,23	0,67	4,18	0,4	0,94	0,03	0,27	0,013	0,040	0,07	0,005	0,001	0,029	0,016
23	0,28	0,61	3,57	0,39	0,93	0,02	0,27	0,020	4,660	0,07	0,003	0,001	0,032	0,015
24	0,21	0,78	4,12	0,37	1,01	0,03	0,26	0,190	0,080	0,07	0,008	0,001	0,030	0,015

Наиболее благоприятными основами для износостойких сплавов при восстановлении деталей оборудования является мартенситная и аустенитная. При этом в зависимости от общего строения сплава и наличия избыточных фаз, в разных случаях предпочтительной может оказаться та или другая основа. Совмещение этих двух основ (мартенсита с определенным количеством аустенита) может обеспечить наиболее благоприятное сочетание свойств наплавленного сплава.

С увеличением количества углерода в сплаве возрастает количество остаточного аустенита, а также количество карбидов и карбидная неоднородность. При высоком содержании хрома в сплаве, кроме образования специальных карбидов хрома, происходит упрочнение хромом аустенита и мартенсита. Хром, как и углерод, в целом способствует повышению не только твердости, но и износостойкости металла.

Введение разного количества марганца и никеля в состав наплавочных материалов позволяет менять количество остаточного аустенита, который в свою очередь может по-разному влиять на износостойкость материалов. Марганец и никель сходны в том отношении, что они оба растворяются в аустените, увеличивают его устойчивость и тем самым способствуют самым увеличению количества остаточного аустенита. Никель не входит в состав карбидов и в основном легирует твердый раствор (основу). Марганец содержится как в твердом растворе, так, частично и в карбидах. С повышением количества марганца в материале возрастает склонность к росту зерна при нагреве, что неблагоприятно сказывается на его свойствах (увеличивается хрупкость). Легирование наплавочных материалов вольфрамом и ванадием приводит к образованию их карбидов, что повышает износостойкость материала. К тому же вольфрам, находясь в твердом растворе, в некоторой степени увеличивает устойчивость аустенита.

Анализ полученных результатов показал, что степень влияния различных химических элементов на твердость наплавленного слоя и скорость износа образцов разная. В исследуемых пре-

делах углерод, хром, молибден, никель, марганец и, в незначительной, мере ванадий одновременно повышают твердость наплавленного слоя и уменьшают скорость износа образцов.

Таблица 2

Характеристики наплавленного металла

Номер образца	Структура	Величина зерна аустенита, балл	Твердость, HRC	Скорость истирания, г/об
1	Мартенсит	7	49	0,0000140
2	Мартенсит	6 и 7	52	0,0000056
3	Мартенсит	6	50	0,0000710
4	Мартенсит	6 и 7	52	0,0000140
5	Мартенсит	6 и 7	45	0,0000710
6	Мартенсит	6 и 7	43	0,0000390
7	Мартенсит	6 и 7	43	0,0000440
8	Мартенсит	6 и 7	37	0,0000730
9	Феррито-перлитная	5 и 6	23	0,0002060
10	Феррито-перлитная	6	26	0,0000480
11	Феррито-перлитная	5	22	0,0000360
12	Феррито-перлитная	6	26	0,0000390
13	Мартенсит	7	55	0,0000280
14	Мартенсит	7	41	0,0000550
15	Мартенсит	7	45	0,0000074
16	Мартенсит	7	45	0,0000340
17	Мартенсит	6 и 7	40	0,0000280
18	Мартенсит	6	45	0,0000540
19	Мартенсит	6	49	0,0000430
20	Мартенсит	6 и 7	38	0,0001420
21	Мартенсит	6	48	0,0000550
22	Мартенсит	6	43	0,0000330
23	Мартенсит	6 и 7	49	0,0000650
24	Мартенсит	6 и 7	42	0,0000300

При исследовании влияния использования вольфрама и кобальта на свойства наплавленного слоя установлено, что повышение концентрации вольфрама несколько увеличивает твердость наплавленного металла, однако, при этом снижается износостойкость. Это, по-видимому, связано с высокопрочной твердой мартенситной матрицей, в которую «вмонтированы» более твердые карбиды вольфрама. Низкая вязкость матрицы не позволяет удерживать на поверхности карбиды вольфрама, в результате чего износ осуществляется не по схеме равномерного истирания поверхности, а по схеме выкрашивания высокопрочных частиц карбидов из матрицы, в результате чего в матрице образуются трещины, способствующие дополнительному износу матрицы.

Анализ полученных результатов показал, что степень влияния различных химических элементов на твердость наплавленного слоя и скорость износа образцов разная (рис. 1). В исследуемых пределах углерод, хром, молибден, никель, марганец и, в незначительной мере, ванадий, одновременно повышают твердость наплавленного слоя и уменьшают скорость износа образцов.

Таким образом, углерод, марганец, хром, молибден, никель, и, в незначительной мере, ванадий в исследуемых пределах одновременно повышают твердость наплавленного слоя и уменьшают скорость износа образцов. При этом низкая вязкость матрицы не позволяет удерживать на поверхности карбиды вольфрама, в результате чего износ осуществляется не по схеме равномерного истирания поверхности, а по схеме выкрашивания высокопрочных частиц карбидов из матрицы, в результате чего в матрице образуются дополнительные трещины, способствующие дополнительному износу матрицы.

Введение в состав шихты кобальта не оказывает заметного влияния на твердость и абразивный износ наплавленного слоя, что связано с получением более вязкой, но менее твердой матрицы. В случае отсутствия твердых частиц карбидов, вмонтированных в матрицу, эффект от введения кобальта отрицательный. Следует также отметить, что влияние вольфрама на твердость наплавленного слоя и скорость износа образцов, в первую очередь, связано со структурой метал-

лической матрицы, причем замена мартенситной структуры в наплавляемом слое на феррито-перлитную также не оказало большого положительного влияния на износостойкость.

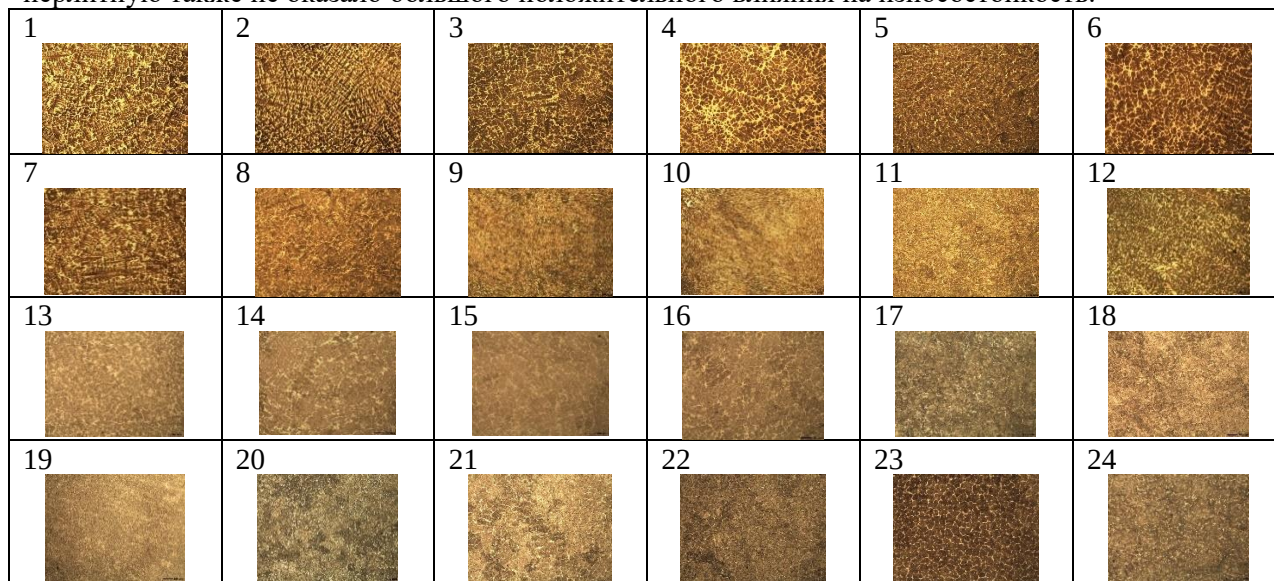


Рис.1 – Микроструктура образцов наплавленного слоя $\times 100$

Математико-статистическими методами проведена оценка влияния химического состава порошковых проволок на скорость износа и твердость наплавленного слоя, позволившая изучить закономерности изменения результирующего показателя в зависимости от поведения различных факторов [12].

Зависимости твердости наплавленного слоя и его износостойкости от массовой доли элементов, полученные в результате проведенного анализа:

– твердость наплавленного слоя

$$\text{HRC} = 35,884 + 22,840 \cdot \text{C} + 11,079 \cdot \text{Si} - 15,903 \cdot \text{Mn} + 4,785 \cdot \text{Cr} + 10,118 \cdot \text{Mo} + 1,399 \cdot \text{Ni} - 38,964 \cdot \text{Al} - 24,126 \cdot \text{Co} - 65,841 \cdot \text{Cu} - 0,057 \cdot \text{W} + 17,887 \cdot \text{Ti} - 76,116 \cdot \text{V} - 76,351 \cdot \text{S} - 239,206 \cdot \text{P}$$

(ошибка аппроксимации составляет 4,2%);

– скорость износа образцов (И)

$$\text{И} = -0,00025 - 0,00034 \cdot \text{C} + 0,000171 \cdot \text{Si} + 0,000144 \cdot \text{Mn} - 0,000008 \cdot \text{Cr} - 0,00014 \cdot \text{Mo} + 0,0000308 \cdot \text{Ni} - 0,00076 \cdot \text{Al} - 0,000088 \cdot \text{Co} + 0,000227 \cdot \text{Cu} + 0,0000074 \cdot \text{W} + 0,00017 \cdot \text{Ti} + 0,000633 \cdot \text{V} + 0,002836 \cdot \text{S} + 0,005644 \cdot \text{P}$$

(ошибка аппроксимации составляет 8,14%).

Для прогнозирования твердости наплавленного слоя и его износостойкости при изменении химического состава наплавленного металла использовались полученные функциональные зависимости, результат исследования защищен патентом РФ на порошковую проволоку [13]. Апробация новой порошковой проволоки проводилась на пластинах, установленных на шнеке диаметром 2м, очистного комбайна JOY 4LS20 (рис. 2).



Рис. 2. Защитные пластины на шнеке комбайна JOY 4LS20

Выводы. Установлено, что повышение концентрации вольфрама несколько увеличивает твердость наплавленного металла, однако, при этом снижается износостойкость.

Показано, что низкая вязкость матрицы не позволяет удерживать на поверхности карбиды вольфрама, в результате чего износ осуществляется не по схеме равномерного истирания поверхности, а по схеме выкрашивания высокопрочных частиц карбидов из матрицы, в результате чего в матрице образуются дополнительные трещины, способствующие дополнительному износу матрицы.

Показано, что введение в состав шихты кобальта не оказывает заметного влияния на твердость и абразивный износ наплавленного слоя, что связано с получением более вязкой, но менее твердой матрицы. В случае отсутствия твердых частиц карбидов, вмонтированных в матрицу, эффект от введения кобальта отрицательный.

По результатам проведенного многофакторного корреляционного анализа были определены зависимости твердости наплавленного слоя и его износостойкости от массовой доли элементов, входящих в состав порошковых проволок системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Mo-Ni-V-Co. Полученные зависимости могут быть использованы для прогнозирования твердости наплавленного слоя и его износостойкости при изменении химического состава наплавленного металла.

Установка на лопасти шнека очистного комбайна пластин, наплавленных новой порошковой проволокой системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo, позволяет увеличить межремонтный интервал.

Разработанная новая порошковая проволока системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo на 19,3% эффективнее по сравнению с покрытием, выполненным наплавочной проволокой DRATEC Draht-Technik GmbH (Германия) марки DT-SG 600F.

Список литературы

1. Тепляшин М.В., Комков В.Г. Исследование влияния легирующих элементов на износостойкость в сплавах, предназначенных для электрошлаковой наплавки бил молотковых мельниц // Ученые заметки ТОГУ [Электронный ресурс]. – 2013. – Том 4. – № 4. – С. 1554-1561.
2. Тепляшин М.В., Комков В.Г., Стариенко В.А. Разработка экономолегированного сплава для восстановления бил молотковых мельниц // Ученые заметки ТОГУ [Электронный ресурс]. – 2013. – Том 4. – № 4. – С. 1543-1549.
3. Разработка и исследование новой порошковой ленты для наплавки колес мостовых кранов / Л.С. Малинов [и др.] // Сварочное производство. – 1995. – № 10. – С. 22-25.
4. Меськин В.С. Основы легирования стали. – М.: Металлургия, 1964. – 684 с.
5. Ерофеев В.А., Масленников А.В., Зайцев О.И. Определение технологических характеристик плавления порошковой проволоки с сердечником из порошка тугоплавких металлов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 11. – Ч. 1. – С. 15-21.
6. Чейлях Я.А., Чигарев В.В. Разработка состава экономолегированной Fe-Cr-Mn наплавленной износостойкой стали с регулированием содержания метастабильного аустенита // Вестник Приазовского гос. техн. ун-та : сб. науч. тр. – Мариуполь, 2011. – Вып. 22. – С. 104-106.
7. Малинов В.Л. Износостойкость наплавленного металла с метастабильным аустенитом при абразивном и ударно-абразивном воздействии // Вестник Приазовского гос. техн. ун-та : сб. науч. тр. – Мариуполь, 2012. – Вып. 25. – С. 155.
8. Малинов В.Л., Малинов Л.С. Структура и износостойкость хромомарганцевого наплавленного металла // Автоматическая сварка. – 2012. – № 7. – С. 14.
9. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б.Е. Патона. – М.: Металлургия, 1974 – 768 с.
10. Изучение структуры и свойств металла, наплавленного порошковой проволокой системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Mo-Ni-V-Co / А.И. Гусев [и др.] // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4. – № 2. – С. 113-119.
11. Наплавка порошковыми проволоками C-Si-Mn-Mo-V-B и C-Si-Mn-Cr-Mo-V деталей горнорудного оборудования / А.И. Гусев [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60. – № 4. – С. 318-323.
12. Гмурман В.Е. Теория вероятности и математическая статистика : учеб. пособие для вузов. – 9-е изд., стер. – Москва : Высшая школа, 2003. – 479 с.
13. Пат. 2641590 МПК⁸ В23 К35/36 В 23 К35/36 Порошковая проволока / Н.А. Козырев [и др.] ; ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет». – Оpubл. 18.01.2018 г., Бюл. №2.

**ОЦЕНКА ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТА ПОЕЗДА «САПСАН»
НА ТВЕРДОПОЛИМЕРНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ
ПЛАТИНО-НИКЕЛЕВЫЙ КАТАЛИЗАТОР**

О.В. Шугаев, Т.П. Воскресенская, М.Г. Дружинина

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В данной статье рассматривается экономическая эффективность внедрения твердополимерных топливных элементов, использующий в качестве основного катализатора, менее дорогостоящий платино-никелевый аналог ускорителя протекания реакции в электрохимических генераторах, в качестве основного автономного источника питания системы электроснабжения поезда. Для этого представлен сравнительный анализ затрат на потребление электрической энергии и водородного топлива, для питания топливных элементов, питающих высокоскоростной поезд, с учетом инфляции на длительный период времени, охватывающий период окупаемости проекта внедрения элементов питания. Составлена модель срока окупаемости проекта высокоскоростного поезда, с учетом действия посторонних экономических факторов, использующего топливные электрохимические автономные системы выработки энергии, питающей состав. Выявлен период окупаемости, графически проиллюстрирована экономическая эффективность проекта, а также возможные сэкономленные экономические ресурсы, приобретаемые от отказа использования электроэнергии.

Ключевые слова: топливный элемент, высокоскоростной транспорт, электрохимические генераторы, тяговая система, метод обобщенного приведенного градиента, платино-никелевый катализатор.

Введение. Высокоскоростное движение на территории России, позволит перевести на абсолютно новый уровень отношения между грузоотправителем, перевозчиком и грузополучателем. Рассматриваемый инновационный подход к перевозкам груза и пассажиров значительно снижает суммарное время доставки, повышая при этом пропускную способность, а главное привлекательность железнодорожного транспорта, способного стать основным конкурентом авиаперевозок. Несмотря на все перечисленные ранее достоинства и перспективы, развитие проекта высокоскоростной доставки грузов и пассажиров, используя железнодорожную сеть по всей территории Российской Федерации, требует значительных капитальных вложений на строительство необходимой инфраструктуры и содержание рассматриваемого вида транспорта. Данное обстоятельство способно привести к удорожанию транспортных услуг, оказываемых железнодорожным транспортом скоростного сообщения.

Снижение затрат может быть осуществлено, за счет применения твердополимерных топливных элементов с протонообменной мембраной.

Учитывая изложенное выше, предлагается провести сравнение расходов на потребляемую энергию высокоскоростным железнодорожным подвижным составом, с аналогичным поездом, оснащенным твердополимерными топливными элементами с протонообменной мембраной.

Предлагается провести исследования по

– сравнению затрат на использование электроэнергии и водорода в качестве топлива в скоростном поезде;

– составленной модели срока окупаемости проекта высокоскоростного поезда, использующего топливные элементы.

Объектом исследования был выбран один из основных и наиболее эффективных подвижных единиц железнодорожного транспорта, способных развивать скорость, превышающую 300 км/ч, которым является высокоскоростной поезд «Сапсан».

Материалы. Для реконструкции двигателя данного типа поезда были выбраны твердополимерные топливные элементы марки NuPM HD, отличающиеся сравнительно компактными размерами и высокой выходной мощностью. Рассматриваемые топливные элементы используют в качестве рабочего органа протонообменную мембрану, включающую относительно дешёвый платино-никелевый сплав для ускорения процесса реакции объединения кислорода и водорода с выделением электроэнергии. Характеристики наиболее мощного вида топливных элементов рассматриваемой марки приведены в таблице 1 [1, 2].

Для сравнения затрат на использование энергоресурсов, являющихся основным и возможным источником питания высокоскоростного железнодорожного поезда «Сапсан», получаемых от контактной сети и от электрохимической реакции слияния водорода и кислорода, на основании

данных приведенных в [3-5] и расчета стоимости потребленного водорода используя уравнение Менделеева – Клапейрона и цены на баллон 40 л водорода ГОСТ 9909-81 [4, 6-8] (не рассматривая расходы на емкость), составлена таблица потребления энергоресурсов (табл. 2). В расчетах используется усредненное значение потребляемой мощности, составляющей 75% от полной [3, 5].

Таблица 1

Эксплуатационные характеристики топливных элементов марки НуРМ HD-180

Характеристики	Значение
Удельный расход топлива (0 градусов °С, 760 мм рт.ст.), нм ³ /кВт·ч (кг/кВт·ч)	0,648(0,0583)
Расход топлива (учитывая мощность ТЭ), нм ³ /ч (кг/ч)	128,3 (11,54)
Рабочее давление, кПа	101,3
Напряжение, В	360-720
Допустимая сила тока, А	500
Номинальная мощность, кВт	198
КПД, %	55
Рабочая температура, °С	от -40 до +65
Степень чистоты водорода, требуемая для работы ТЭ, %	99,98

Таким образом, анализируя полученные данные можно сделать вывод, что применение высокоскоростного железнодорожного поезда «Сапсан», оборудованного топливными элементами, использующими в качестве рабочего органа протонообменную мембрану, включающую сравнительно дешёвый платино-никелевый катализатор, позволит сократить затраты на электроэнергию практически в 6,85 раз.

Таблица 2

Потребление различных видов энергоресурсов высокоскоростным поездом «Сапсан»

Общая усредненная мощность необходимая для работы, кВт	Вид топлива	Требуемое усредненное количество топлива 75% общей мощности		Стоимость, руб./ч
		ед. измерения	значение	
8000	Водород газообразный технический марка А ГОСТ 3022-80 степень чистоты водорода 99,99%	нм ³ /ч (кг/ч)	3888 (349,8)	4788,9
8000	Эл.энергия (по среднесуточному тарифу)	кВт·ч	6000	32820

Для переоборудования системы питания высокоскоростного железнодорожного поезда «Сапсан», используя топливные элементы марки НуРМ HD, учитывая усредненную мощность подвижного состава 8000 кВт и курс доллара на 18 ноября 2020 года (76,25), финансовые затраты составят 30,500 млн. рублей [9,10].

Методы исследования. С целью получения более достоверных данных использована модель экспоненциального сглаживания [11-13], способствующая прогнозированию изменения затрат на водородное топливо от действия инфляции. С целью составления прогнозов использовалась стоимость на водородное топливо на апрель 2020 года [3], и значения инфляции выраженные в % с апреля по октябрь 2020 года [14]. Вышеперечисленные данные сведены в таблицу информационной среды Microsoft Excel, в которой произведено прогнозирование затрат на использование водородного топлива для одного часа работы высокоскоростного поезда «Сапсан» от действия инфляции, с использованием модели Брауна. Результаты произведенного прогнозирования отображены в табл. 3.

С целью прогнозирования средней стоимости электроэнергии используем модель Брауна, исходными данными для построения модели служат средние показатели стоимости электроэнергии предприятий 1 кВт/ч для периода 2017-2020 года [4,15-18].

Таблица 3

Результаты прогнозирования затрат на использование водородного топлива от действия инфляции

Шаг	Год	Средняя ставка (параметр А)	Прогнозирование (параметр В)	Линейная регрес- сия (параметр С)	В+С	А-(В+С)	Настройка пара- метров модели		месяц	год
							$B+C+(1-0,3^{1/2})*(A-(B+C))$	$C+(1-0,3^{1/2})*(A-(B+C))$		
0			4807,07	2,00						
1	0,33	4788,90	4843,51	-6,10	4809,07	-20,17	4790,72	-16,36	04	20
2	0,37	4806,62	4874,85	-11,06	4837,41	-30,79	4809,39	-34,12	05	20
3	0,61	4835,94	4858,50	-7,83	4863,80	-27,86	4838,45	-36,40	06	20
4	0,07	4839,32	4807,28	-0,76	4850,67	-11,35	4840,35	-18,16	07	20
5	-0,54	4813,19	4777,26	2,74	4806,53	6,67	4812,59	5,31	08	20
6	-0,15	4805,97	4742,02	6,33	4779,99	25,98	4803,63	26,38	09	20
7	0,2	4815,58	4643,85	15,48	4748,35	67,23	4809,53	67,51	10	20
8		4774,36	4622,16	17,30	4659,33	115,03	4764,00	120,16	11	20
9		4775,27	4621,25	17,46	4639,46	135,81	4763,05	140,89	12	20
10		4802,04	4559,83	22,14	4638,71	163,34	4787,34	166,09	01	21
11		4822,19	4395,43	33,71	4581,97	240,22	4800,57	240,74	02	21
12		4817,90	4336,88	37,30	4429,14	388,76	4782,91	387,48	03	21
13		4830,01	4295,51	39,78	4374,17	455,84	4788,99	452,11	04	21
14		4877,05	4086,18	52,09	4335,29	541,75	4828,29	532,78	05	21
15		4884,16	3798,61	68,68	4138,27	745,89	4817,03	730,85	06	21
16		4903,94							07	21
17		4953,43							08	21

Для прогнозирования тарифов на электроэнергию, использовалась информационная среда Microsoft Excel, в которой произведено прогнозирование средней стоимости 1 кВт/ч для предприятий за период 2020-2023 годов. Результаты моделирования представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты прогнозирования затрат на использование водородного топлива от действия инфляции

Номер	Год	Средняя ставка (параметр А)	Прогнозирование (параметр В)	Линейная регрессия (параметр С)	В+С	А-(В+С)	Настройка параметров модели	
							$B+C+(1-0,3^{1/2})*(A-(B+C))$	$C+(1-0,3^{1/2})*(A-(B+C))$
0			3,28	0,03				
1	2017	3,31	0,90	1,22	3,31	0,00	3,31	0,03
2	2018	3,34	1,83	0,91	2,12	1,22	3,23	2,33
3	2019	4,56	-0,50	1,49	2,74	1,82	4,40	2,57
4	2020	5,47	-11,39	3,67	0,99	4,48	5,07	5,57
5	2021	6,96	-61,62	12,04	-7,72	14,69	5,64	17,03
6	2022	10,63	106,97	-12,04	-49,58	60,21	5,21	66,83

С целью определения срока окупаемости проекта высокоскоростного поезда, использующего топливные элементы с платино-никелевым катализатором, составлена имитационная модель в форме блок-схемы и представлена на рис. 1. Ежедневная нагрузка одного поезда составляет 7,5

часов [19]. Моделирование срока окупаемости проекта высокоскоростного поезда охватывает период, начинающийся с 1 декабря 2020 года.

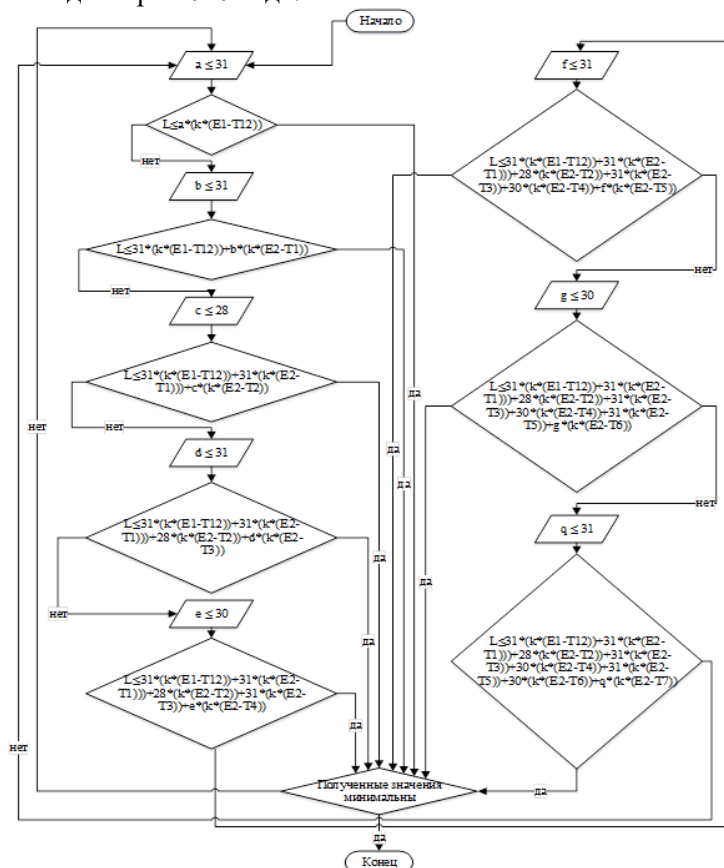


Рис. 1. Блок-схема определения срока окупаемости проекта автономного водородного поезда «Сапсан» на период 8 месяцев

Для определения срока окупаемости затрат, выделенных на переоборудование поезда «Сапсан» топливными элементами требуется найти минимальное количество дней, за которое высокоскоростной подвижной состав окупит финансовые вложения, затраченные на топливные элементы. Экономические ресурсы, возмещающие затраты на переоборудование поезда, будут исходить из разности отчислений на электроэнергию и топлива водородных элементов. Не использованные экономические ресурсы, предназначенные для работы транспорта на электрической тяге, будут являться средствами, возмещающими затраты на переоборудование.

С целью определения срока окупаемости проекта автономного водородного поезда «Сапсан» составлена целевая функция, представленная в уравнениях:

$$F = a + b + c + d + e + f + g + q \rightarrow \min \quad (1)$$

$$L \leq a \cdot (k \cdot (E1 - T12)) + b \cdot (k \cdot (E2 - T1)) + c \cdot (k \cdot (E2 - T2)) + d \cdot (k \cdot (E2 - T3)) + e \cdot (k \cdot (E2 - T4)) + f \cdot (k \cdot (E2 - T5)) + g \cdot (k \cdot (E2 - T6)) + q \cdot (k \cdot (E2 - T7)) \quad (2)$$

где a, b, c, d, e, f, g, q – количество дней расчетного месяца; $T()$ – затраты на водородное топливо от действия инфляции для расчетного месяца; $E()$ – затраты на электроэнергию от действия инфляции для расчетного года; k – суточная норма работы 1 поезда «Сапсан»; L – затраты на переоборудование поезда «Сапсан» топливными элементами (30,5 млн руб.).

Ограничения модели: $a \leq 31$; $b \leq 31$; $c \leq 28$; $d \leq 31$; $e \leq 30$; $f \leq 31$; $g \leq 30$; $q \leq 31$.

Поиск решения данной целевой функции выполнен при использовании метода обобщенного приведенного градиента [20] представленный в табл. 5.

Результаты и всестороннее рассмотрение вопроса. С целью более наглядного отображения экономического эффекта от использования водородных топливных элементов составлены 2 диаграммы, одна из которых приведена на рис. 2 а и отображает доходы за каждый месяц с учетом инфляции от неиспользованных средств фонда электроснабжения, другая приведена на рис. 2 б с целью отображения накопления общего остатка неиспользованных средств фонда электроснабжения.

Решения целевой функции определения срока окупаемости проекта автономного водородного поезда «Сапсан» на период 8 месяцев

Год	Месяц	Т, руб.	тарифы на электроэнергию, руб./кВт	Е, руб.	Количество дней, в которые используется поезд	Накопленная сумма, руб.	Количество дней	Доход за каждый месяц с учетом инфляции от неиспользованных средств фонда электроснабжения, руб.	Накопление общего остатка неиспользованных средств фонда электроснабжения, руб.
2020	декабрь	4775,27	5,47	32820	31	6520399	31	6520399,127	6520399,127
2021	январь	4802,04	6,96	41760	31	8592725	31	8592725,253	15113124,38
2021	февраль	4822,18	6,96	41760	28	7756941	28	7756940,513	22870064,89
2021	март	4817,90	6,96	41760	27,6	7629935	31	8589037,843	31459102,74
2021	апрель	4830,01	6,96	41760	0	0	30	8309247,024	39768349,76
2021	май	4877,04	6,96	41760	0	0	31	8575286,394	48343636,16
2021	июнь	4884,16	6,96	41760	0	0	30	8297063,8	56640699,95
2021	июль	4903,93	6,96	41760	0	0	31	8569034,077	65209734,03
Итого						30500000			
Количество дней	117,53836								
Сумма проекта	30500000								

Использование водородных топливных элементов с твердополимерной мембраной и платино-никелевым катализатором позволяет за месяц среднеинтенсивной работы экономить на электроэнергии в среднем 8 млн. руб., а за 8 месяцев эта сумма возрастает линейно и может достигнуть 65 млн. руб.

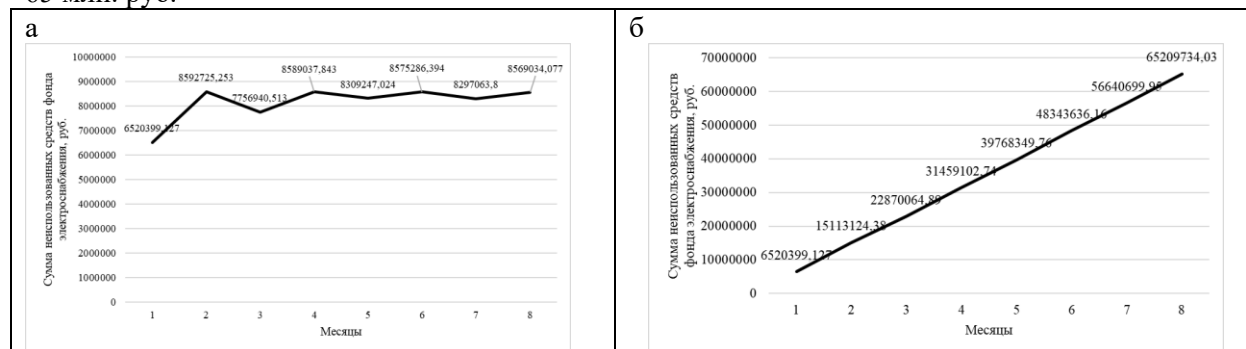


Рис. 2. Доходы за каждый месяц с учетом инфляции от неиспользованных средств фонда электроснабжения (а); диаграмма накопления общего остатка неиспользованных средств фонда электроснабжения (б)

При моделировании срока окупаемости проекта поезда «Сапсан» на топливных элементах с использованием метода обобщенного приведенного градиента, достигнута основная цель – выявлен минимальный срок окупаемости проекта автономного высокоскоростного подвижного состава, использующего водород в качестве топлива. Также в рамках работы достигнута второстепенная цель – сравнение затрат на использование электроэнергии и водорода в качестве топлива в скоростном поезде.

Выводы. Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы: финансовые затраты, направленные на переоборудование системы питания высокоскоростного поезда «Сапсан», учитывая воздействие инфляции, окупятся в течении 118 дней. Рассматриваемый проект да-

ет возможность сократить затраты на эксплуатацию подвижного состава практически в 6 раз, а также позволит не использовать инфраструктуру, связанную с контактной сетью. Водородный «Сапсан» не будет выделять вредных выбросов используя возобновляемый источник энергии. Комбинирование последовательного и параллельного способов соединения между водородными кластерами позволит плавно изменять скоростные характеристики поезда без снижения мощности и использования дополнительного оборудования инверторного типа внушительных размеров способного регулировать обороты двигателя.

Список литературы

1. Краснораменский В.И. Топливные элементы для повышения эффективности ТЭС и НПП // Энерго-совет. – 2013. – № 5(30). – С. 43-47.
2. HyPM HD180: [Электронный ресурс] // Hydrogenics. – URL: <http://pdf.directindustry.com/pdf/hydro-gen-systems/hypm-hd180/14703-316895.html/>.
3. Водород газообразный технический марки А: [Электронный ресурс] // НИИ КМ.URL. –Режим доступа: http://www.niikm.ru/products/hydrogen/hydrogen_40/.
4. Каких тарифов на электроэнергию ожидать предприятиям России в 2020 году?: [Электронный ресурс] // Энергоэффективные решения для дома и бизнеса. – URL: <http://energylogia.com/business/jekonomija-jelektroenergii/tarify-na-jelektroenergiju-dlja-predpriyatij-rossii-2020.html/>.
5. Сырбаков А.П., Корчуганова М.А. Топливо и смазочные материалы. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 159 с.
6. Водородный баллон 40л: [Электронный ресурс] // Промышленная компания Волга. Технические газы, газовые баллоны, газосварочное оборудование. – Режим доступа: <http://pkvolga.ru/vodorodni-ballon-40l/>.
7. Краснораменский В.И. Топливные элементы для повышения эффективности ТЭС и НПП // Энерго-совет. – 2013. – № 5(30). – С. 43-47.
8. Rashidi R. Generalized uncertainty principle and the maximum mass of ideal white dwarfs // Annals of Physics. – 2016. – № 374. – С. 434–443.
9. Fuel cells: [Электронный ресурс] // IOP Institute of Physics. – URL:<http://www.iop.org/resources/topic/archive/fuel/index.html/>.
10. Fuel Cell Technologies Office Accomplishments and Progress: [Электронный ресурс] // energy.gov. – URL: <https://energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-technologies-office-accomplishments-and-progress/>.
11. Федосеев В.В., Гармаш А.Н., Орлова И.В. Экономико-математические методы и прикладные модели. – М.: Юрайт, 2012. – 328 с.
12. Brown R.G. Smoothing, Forecasting and Prediction of Discrete Time Series. – New Jersey: Prentice-Hall, 1962.
13. Chang K., Chen R., Fomby T.B. Prediction-based adaptive compositional model for seasonal time series analysis // Journal of Forecasting. – 2017. – № 36(7). – С. 842–853.
14. Таблица инфляции: [Электронный ресурс] // Уровень инфляции в Российской Федерации . – URL: <http://уровень-инфляции.рф/%D1%82%D0%B0%D0%B1%D0%BB%D0%B8%D1%86%D0%B0%D0%B8%D0%BD%D1%84%D0%BB%D1%8F%D1%86%D0%B8%D0%B8.aspx/>.
15. Тарифы на электроэнергию, поставляемую Мосэнергосбыт для предприятий и прочих потребителей Московской области, действующие с 1 июля 2017 года: [Электронный ресурс] // Народная служба тарифов: новые тарифы на электроэнергию, цены на газ, тепло, Россия - Украина. URL: <https://newtariffs.ru/tariff/tarify-na-elektroenergiyu-postavlyaemuyu-mosenergosbyt-dlya-predpriyatii-i-prochikh-potrebitel-6/>.
16. Тарифы на электроэнергию, поставляемую Мосэнергосбыт для предприятий и прочих потребителей Москвы, действующие с 1 июля 2018 года: [Электронный ресурс] // Народная служба тарифов: новые тарифы на электроэнергию, цены на газ, тепло, Россия - Украина. URL: <https://newtariffs.ru/tariff/tarify-na-elektroenergiyu-postavlyaemuyu-mosenergosbyt-dlya-predpriyatii-i-prochih/>.
17. Тарифы на электроэнергию, поставляемую Мосэнергосбыт для предприятий Москвы с максимальной мощностью ЭПУ от 670 кВт до 10 МВт, действующие в 2019 году: [Электронный ресурс] // Народная служба тарифов: новые тарифы на электроэнергию, цены на газ, тепло, Россия - Украина. URL: <https://newtariffs.ru/tariff/tarify-na-elektroenergiyu-postavlyaemuyu-mosenergosbyt-dlya-predpriyatii-moskvy-s-0/>.
18. Тарифы на электроэнергию для населения Москвы, действующие с 1 января 2020 года: [Электронный ресурс] // Народная служба тарифов: новые тарифы на электроэнергию, цены на газ, тепло, Россия - Украина. URL: <https://newtariffs.ru/tariff/tarify-na-elektroenergiyu-dlya-naseleniya-moskvy-deystvuyushchie-s-1-yanvarya-2020-goda/>.
19. Расписание поездов «Сапсан»: [Электронный ресурс] // Точное расписание самолётов, поездов, электричек и автобусов. – URL: <https://rasp.yandex.ru/threads/?train=yes&from=wrasproute&number=%D0%A1%D0%B0%D0%BF%D1%81%D0%B0%D0%BD/>.
20. A generalized reduced gradient method for the optimal control of very-large-scale robotic systems / K. Rudd [et al.] // IEEE Transactions on Robotics. – 2017. – № 33(5). – С. 1226–1232.

РОБОТИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНОМ ГЕОМАССИВЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ПАРАМЕТРОВ БЕЗОПАСНОЙ ПОДЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ****Павлова Л.Д., Фрянов В.Н.****Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия**

Аннотация. Разработана цифровая модель геомеханических процессов в структурно неоднородном геомассиве с учетом влияния природных и техногенных сил. По результатам численного моделирования выявлены закономерности изменения напряжений, конвергенции пород кровли и почвы, устойчивости угольных целиков между очистными и подготовительными выработками при увеличении глубины разработки и мощности пород междупластья в пределах выемочного столба угольной шахты.

Ключевые слова: геомассив, глубина разработки, моделирование, напряжения, остаточная прочность, разрушение пород, угольный целик, цифровая модель.

Введение. Одним из ключевых приоритетов в производственной деятельности угледобывающих предприятий является обеспечение безопасных условий труда работников при минимизации рисков, связанных с процессом подземной угледобычи.

Основными рисками при подземной угледобыче являются возникновение потенциально взрывоопасной концентрации метана, непрогнозируемые сейсмические события и геодинамические явления, возникающие вследствие увеличения глубины разработки и усложнения горно-геологических условий.

Сложность горно-геологических условий характеризуется следующими признаками: навесная техногенная сейсмичность в пределах сейсмогеодинамического полигона группы горнодобывающих предприятий; интенсивные проявления динамических явлений в виде горных ударов, внезапных выбросов угля, породы и газа при увеличении глубины разработки до 800 м, а природной метаносности до 30 м³/т; негативное влияние на эксплуатационную устойчивость горных выработок структурной неоднородности массива горных пород в виде пликтивных и дизъюнктивных геологических нарушений, замещений породных слоёв и угольных пластов.

Целью исследований является установление по результатам численного моделирования закономерностей геомеханических процессов в структурно неоднородном геомассиве при изменении глубины разработки в пределах выемочного столба и мощности пород междупластья.

Объект и методы исследований. В качестве объекта исследований рассмотрены геомеханические процессы в окрестности системы взаимовлияющих отработанных выемочных столбов и подготовительных выработок при подземной разработке свиты сближенных пластов Ерунаковского месторождения каменного угля Кузбасса.

Особенностью объекта исследований является нетрадиционная пространственная ориентировка выемочных столбов относительно элементов залегания угольных пластов. Как правило, для отработки пологих газоносных пластов длинными комплексно-механизированными очистными забоями продольные оси выемочных столбов в панелях располагаются по линии, близкой к простиранию пластов [1, 2]. Однако, по результатам геодинамического и морфологического районирования установлено [3-5], что Ерунаковский геолого-экономический район характеризуется сложным тектоническим строением, отличающимся структурной неоднородностью и наличием системы тектонических блоков, ограниченных региональными зонами разломов. В этой связи, с целью исключения количества перемонтажей очистного оборудования и простоев очистного забоя при встрече геологических нарушений разрывного типа на практике ориентируют выемочные столбы вдоль нарушений.

В работе рассмотрен вариант расположения выемочных столбов по падению пласта почти параллельно простиранию линий сместителей дизъюнктивов (рис. 1). При реализации этого варианта по длине столба глубина разработки изменяется в пределах 380-665 м. Согласно Методическому руководству ВНИМИ [6-7] ширина устойчивых угольных целиков существенно зависит от глубины разработки, длины лавы в отработываемом столбе, свойств угля и вмещающих отработываемый пласт пород, а также пространственного расположения дизъюнктивных нарушений.

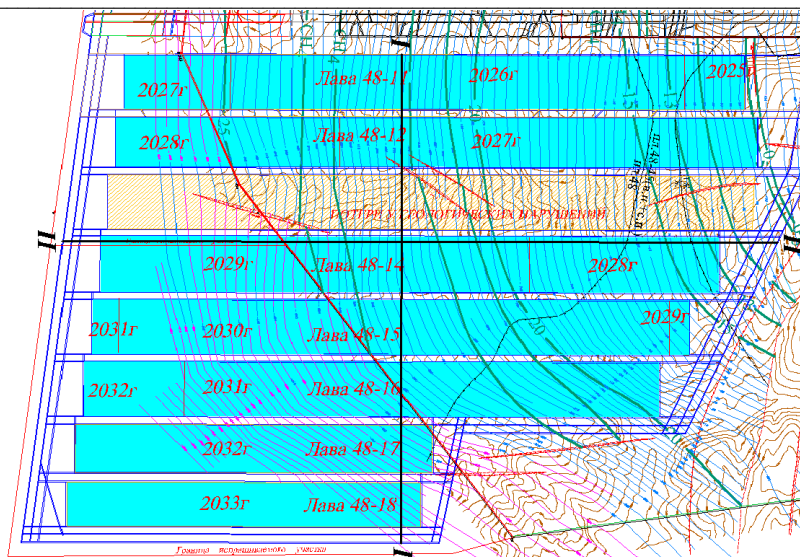


Рис. 1. Вариант пространственного расположения выемочных столбов на лицензионном участке угольной шахты

Для исследования геомеханических процессов в структурно неоднородном геомассиве при техногенном воздействии системы подземных выработок принята трансверсально-изотропная нелинейная упругая математическая модель среды, в которой массив горных пород идеализируется следующим образом:

- для аппроксимации непрерывной функции перемещения, математическая модель идеализируется дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе элементов;
- дискретная модель принимается слоистой с трансверсально-изотропным распределением прочностных и деформационных характеристик слоев; также учитываются наклонное расположение слоев, форма и размеры подземных выработок;
- слои считаются вязкоупругими; учитываются упругие мгновенные деформации, которые возникают при нагружении в начальный момент, и деформации ползучести, развивающиеся во времени;
- область исследования считается ограниченной: сверху земной поверхностью, снизу высотой зоны надработки нижнего пласта свиты, по простиранию и падению пластов – максимальными размерами горных выработок; на всех ограничивающих поверхностях модели задаются граничные условия в виде нагрузок или смещений;
- силовые воздействия, распределенные по всему объему модели, рассматриваются как статические нагрузки, прикладываемые на внешних и внутренних границах.

Математическая модель строится на основе уравнений механики сплошных сред (равновесия, неразрывности деформаций, геометрических и физических уравнений, связывающие компоненты напряжений и деформаций). Для приведения дифференциальных уравнений к системе линейных алгебраических уравнений, порядок которой определяется числом степеней свободы идеализированной модели, используется метод конечных элементов [8, 9].

Устойчивость выработок, внезапные выбросы пород, угля и газа связаны с процессом деформирования и разрушения пород горного массива. Поэтому для прогнозирования устойчивости угля и пород в окрестности выработанного пространства необходимо дополнительное использование критерия, базирующегося на одной из теорий прочности. Критерии прочности не следуют из уравнений равновесия и движения, они являются дополнительными условиями при решении задач о предельном равновесии.

Для определения остаточной прочности пород и прогноза границ зоны поврежденных пород используется критерий Кулона-Мора с учетом изменения напряженного состояния горного массива под влиянием системы подземных выработок, положение которых изменяется во времени и пространстве.

При численном моделировании используется авторский комплекс программ [10], который предназначен для двух- и трехмерного решения задач нелинейной теории упругости методом конечных элементов.

Результаты и их обсуждение. Для проведения вычислительных экспериментов задавались следующие горно-геологические и горнотехнические параметры и условия отработки верхнего пласта 48 (рис. 1): мощность и угол падения отрабатываемого пласта соответственно 2,1 м и 11°; глубина разработки 200-750 м. ширина угольных целиков 30-40 м; мощность пород между сближенными пластами 0,5-10,5 м; расстояние между очистным забоем и передовой разрезной печью 2-10 м; коэффициент бокового давления в нетронутом геомассиве $\lambda=0,4-1,0$.

По результатам численного моделирования проводился анализ следующих геомеханических параметров: ширины зоны разрушения угля в пласте и вмещающих породах по отношению остаточной прочности угля и пород к исходной, вертикальные и горизонтальные напряжения (МПа), вертикальные и горизонтальные смещения пласта и пород (мм).

В качестве примера на рис. 2 представлены изолинии отношения остаточной прочности угля и пород к исходной прочности в плоскости вертикального разреза поперечного сечения угольного целика при глубинах разработки (H) 380, 590 и 665 м. Мощность пород междупластья (h) принята согласно по геологическому отчёту равной 0,5, 10,5 и 5,5 м соответственно [19].

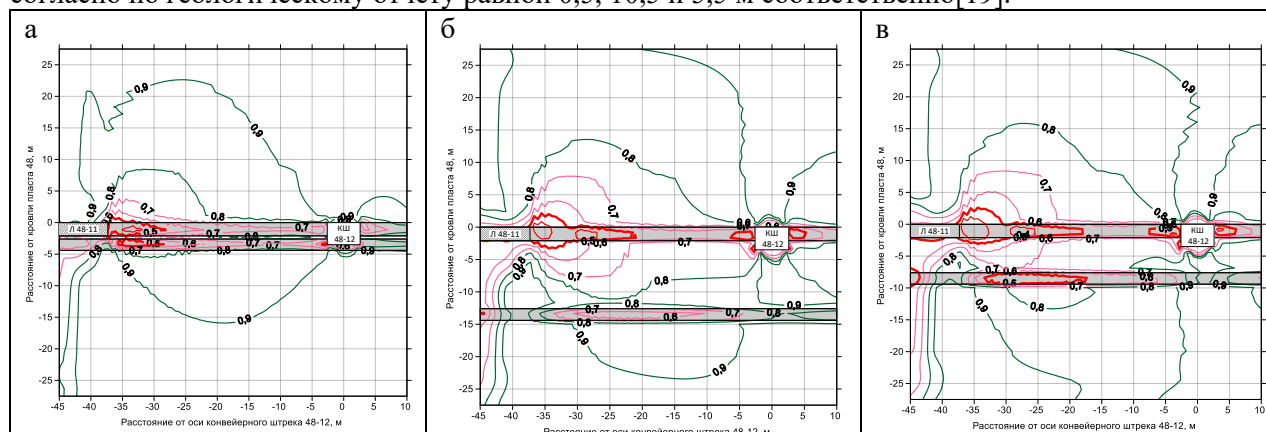


Рис. 2. Изолинии отношения остаточной прочности угля и пород к исходной прочности при в окрестности угольного целика: а - $H=380$ м, $h=0,5$ м; б - $H=590$ м, $h=10,5$ м; в - $H=665$ м, $h=5,5$ м

Из анализа результатов моделирования установлено, что при увеличении глубины разработки происходит почти пропорциональное расширение зоны разрушения угольного пласта со стороны отработанного столба 48-11. В окрестности конвейерного штрека 48-12, несущая часть целика сокращается до 10 м при глубине 665 м.

На рис. 3 представлены графики распределения вертикальных и горизонтальных напряжений для разных глубин разработки: 380, 590 и 665 м.

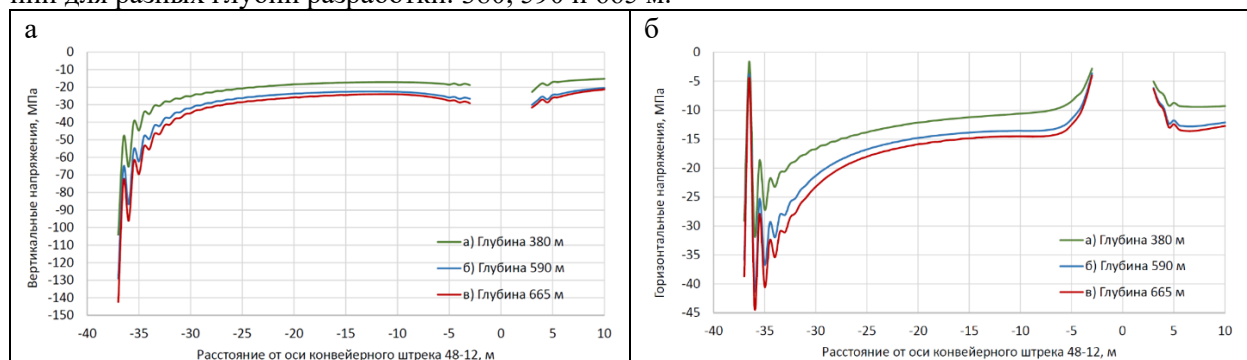


Рис. 3. Эпюры распределения вертикальных (а) и горизонтальных (б) напряжений (МПа) в угольном целике шириной 35 м и в окрестности конвейерного штрека 48-12 при разных глубинах разработки пласта 48 и постоянном коэффициенте бокового давления $\lambda=0,5$

На основе анализа эпюр распределения вертикальных и горизонтальных напряжений в угольном пласте установлено, что максимальная концентрация вертикальных напряжений возникает в краевых участках пласта на границе с выработанным пространством и в боках конвейерного штрека 48-12 (рис. 3 а). В почве и кровле конвейерного штрека 48-12 происходит разгрузка пород и переход напряжений от сжимающих к растягивающим на расстоянии 1-2 м от контура выработки, что необходимо учитывать при выборе параметров крепи штреков.

Горизонтальные напряжения в боках подготовительных выработок близки к нулю, что соответствует граничным условиям расчётной модели при плосконапряжённом состоянии боков выработки (рис. 3 б). В средней части угольный целик находится в условиях объёмного сжатия, однако, на краевых участках угольного целика горизонтальные напряжения стремятся к нулю, поэтому под влиянием только сжимающих напряжений на этих участках происходит разрушение угля, что подтверждается графиками отношения остаточной прочности угля к исходной, указанным на рис. 2.

Выводы. Разработанная цифровая модель геомеханических процессов в структурно неоднородном геомассиве позволяет по результатам численного моделирования прогнозировать параметры напряженно-деформированного состояния массива горных пород при техногенном воздействии на него в сложных горно-геологических условиях.

Учёт прогнозируемых геомеханических параметров на стадии разработки проектной документации позволит снизить в процессе отработки пласта риски опасных проявлений горного давления в виде обрушений пород кровли, отжима угля с краевых участков угольных пластов, пучения пород почвы.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-41-420004.

Список литературы

1. Рубан А.Д. Подготовка и разработка высокогазоносных угольных пластов: справ. пособие. – М.: Горная книга, 2010. – 500 с.
2. Коровкин Ю.А., Савченко П.Ф. Теория и практика длиннолавных систем. – М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2012. – 808 с.
3. Геодинамическое районирование Южного Кузбасса: монография / Т.И. Лазаревич [и др.]. – Кемерово: Редакционно-издательская фирма «Весть», 2006. – 184 с.
4. Черкас О.В. Морфоструктурное районирование Кузнецкой впадины как основа при создании прикладных карт: дисс. канд. техн наук : спец.25.00.25. – Новосибирск, 2015. – 120с .
5. Шик В.М. Геомеханические принципы подготовки горного производства на угольных шахтах: пер. с англ. – М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2015. – 256 с.
6. Методическое руководство по выбору геомеханических параметров технологии разработки угольных пластов короткими забоями / Кол. авторов. – СПб.: ВНИМИ, 2003. – 55 с.
7. Охрана подготовительных выработок целиками на угольных шахтах / В.Б. Артемьев [и др.]. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 204 с.
8. Цветков А.Б., Павлова Л.Д., Фрянов В.Н. Нелинейная математическая модель геомеханического состояния углепородного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 1. – С. 365–370.
9. Eremin M.O., Pavlova L.D., Fryanov V.N. Features of the roof and floor fracture during mining of near coal beds of the Erunakovsky deposit // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2167. - P. 1-4 (020086). – Режим доступа: <https://doi.org/10.1063/1.5131953>
10. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 17997. Комплекс проблемно-ориентированных программ для моделирования геомеханических процессов в горном массиве при подземной разработке угольных пластов / Е.С. Корнев, Л.Д. Павлова, В.Н. Фрянов, ФГБОУ ВПО Сиб. гос. индустр. ун-т. – Гос. акад. наук, ИНИПИ РАО, ОФЭРНиО; дата регистр. 01.03.2012.

УДК 622.831.232:004.94

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

Фрянов В.Н., Исаченко А.А., Петрова О.А.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Выявлены закономерности изменения геомеханических параметров углепородного массива в окрестности очистного забоя и пересекаемой им передовой выработки при наклонном залегании угольного пласта на разных глубинах и переменной мощности пород между сближенными пластами в свите.

Ключевые слова: глубина разработки, очистной забой, передовая выработка, механические напряжения, массив горных пород, угол падения пласта, мощность пород между пластами.

При разработке вариантов цифровой модели основного элемента угольной шахты – очистного забоя необходимы знания о фактической изменчивости горно-геологических факторов. Как правило, знания пространственного количественного распределения этих факторов по результатам геологической разведки недостаточные для принятия оптимальных решений как на стадии разработки документации для ведения горных работ, так и в процессе отработки запасов угля в пределах выемочного столба. Анализ объёмов суточной добычи показал, что коэффициент вариации её достигает 0,5, а в отдельные периоды простои очистного забоя могут достигать 1-6 суток из-за воздействия одного или сочетания группы негативных факторов в виде включений породных прослоек в пласт, изменения угла падения, внезапных вывалов пород кровли и пучения пород почвы, загазирования и др. В этой связи возникает актуальная научно-практическая задача предварительного проведения вычислительных экспериментов для прогнозирования и выявления предвестников предаварийных ситуаций с целью принятия управляющих решений и проведения профилактики аварий и инцидентов в выемочном столбе.

В горной науке ещё в прошлом веке неоднократно предпринимались попытки прогноза изменчивости горно-геологических условий в пределах выемочного столба [1-4 и др.]. Однако, проблема повышения ритмичности очистных забоев в тот период не была решена, что подтверждается высоким неснижаемым уровнем травматизма [5]. Например, уровень смертельного травмирования в 2000 году в горнодобывающей промышленности увеличился на 7% по сравнению с предыдущим годом. В настоящее время на выемочных участках, оснащённых современным дорогостоящим оборудованием, с увеличением нагрузки на очистной забой в лавах длиной до 400 м, финансовые потери при неплановых простоях очистных забоев существенно возросли. Повысилась вероятность групповых несчастных случаев при возникновении ситуаций, связанных с природными и техногенными явлениями, например, замещением в породных слоях аргиллитов песчаниками, расщеплением угольных пластов, изменениями мощности и прочности угля и пород.

Изменчивость указанных параметров в массиве горных пород приводит к микросейсмическим событиям с интенсивностью 3-4 балла в окрестности горнодобывающих предприятий при разрушении труднообрушаемых пород кровли отрабатываемых пластов, прорывах газов в зонах геологических нарушений, обрушении пород в бортах разрезов. Методики прогноза указанных явлений пока не обеспечивают снижение риска возникновения аварий и инцидентов. Поэтому предварительный прогноз геомеханической ситуации по результатам вычислительного эксперимента позволит снизить вероятность возникновения предаварийных ситуаций.

В качестве объекта исследований влияния изменчивости глубины залегания и мощности пород между весьма сближенными пластами на геомеханические процессы в окрестности очистного забоя рассмотрена технология отработки свиты угольных пластов Ерунаковского месторождения каменного угля Кузбасса.

На одной из шахт Ерунаковского геолого-экономического района принят вариант погоризонтной подготовки панели [6] с расположения выемочных столбов по падению пласта. При реализации этого варианта по длине столба глубина разработки изменяется в интервале 200-700 м, а мощность между отрабатываемым пластом 48 и надрабатываемым пластом 45 в пределах 0,5-10,5 м. В качестве других осложняющих геомеханическую ситуацию факторов рассмотрено влияние передовых выработок в виде разрезных печей, которые пересекаются очистным забоем при его движении.

В соответствии с программой исследований решена актуальная научно-практическая задача выявления закономерностей воздействия изменчивости глубины разработки и мощности пород между сближенными пластами на геомеханические параметры массива горных пород в окрестности очистного забоя и передовой выработки. Методика исследования включала численное моделирование методом конечных элементов с использованием комплекса авторских проблемно-ориентированных программ [7]. Решена двумерная задача механики горных пород. В качестве геометрической модели рассмотрены вертикальные разрезы по падению свиты угольных пластов с включением в модель очистного выработанного пространства, очистного забоя и передовой выработки.

Основные горно-геологические и горнотехнические параметры и условия отработки верхнего пласта 48 следующие: мощность и угол падения отрабатываемого пласта соответственно 2,1 м и 11°; глубина разработки $H=200-750$ м, мощность пород между сближенными пластами $h=0,5-10,5$

м; расстояние между очистным забоем и передовой разрезной печью $b=2-10$ м; коэффициент бокового давления в нетронутым геомассиве $\lambda=0,4-1,0$. Всего было рассмотрено 12 вариантов моделей с различным сочетанием указанных горно-геологических и горнотехнических параметров. Движение очистного забоя принято по падению пласта. По результатам вычислительных экспериментов в каждом варианте проводился анализ представленных на рисунках следующих геомеханических параметров: отношение остаточной прочности угля и пород к исходной R ; вертикальные σ_v и горизонтальные напряжения σ_x , МПа; вертикальные η и горизонтальные ξ смещения пласта и пород (мм). Принято следующее правило знаков: сжимающие вертикальные напряжения $\sigma_v < 0$; сжимающие горизонтальные напряжения $\sigma_x < 0$; оседания пород $\eta < 0$; пучение пород $\eta > 0$; горизонтальные смещения по падению пласта $\xi > 0$.

Изменения отношения остаточной прочности к исходной при разной мощности междупластья и расстояния между очистным забоем и разрезной печью показаны на рис. 1, где красные изолинии с величиной $R=0,5$ соответствуют границе зоны предразрушения угля и пород. В этих зонах происходит формирование трещин, блоков, отжима угля, вывалов пород кровли и пучения пород почвы пласта.

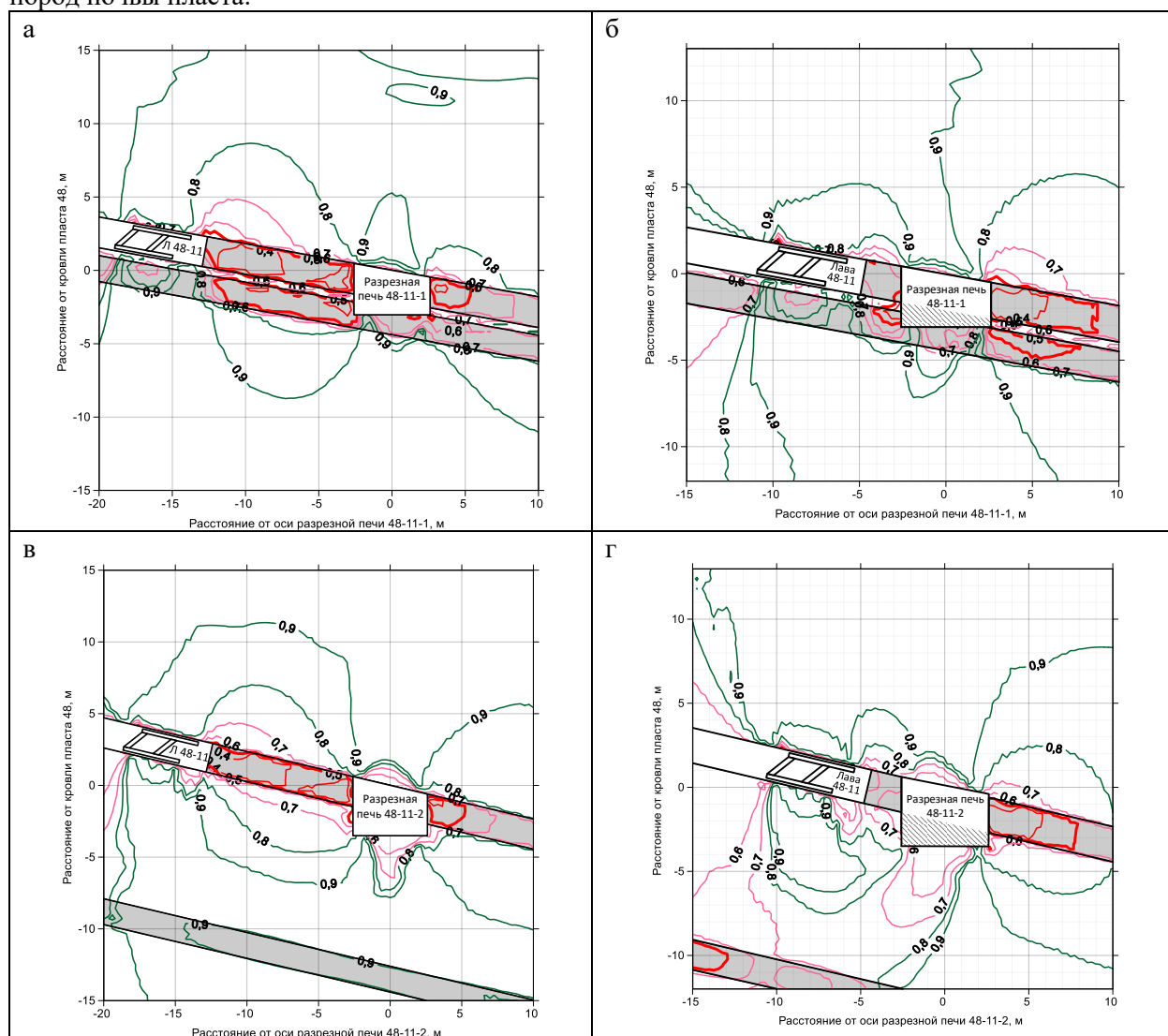


Рис.1. Изолинии отношения остаточной прочности угля и пород к исходной прочности R в окрестности очистного забоя и разрезной печи при следующих расстояниях от забоя до печи и глубинах разработки: а - 10м, 380 м; б - 2м, 380 м; в - 10м, 590 м; г - 2м, 590 м

Согласно рис. 1 весьма сближенные пласты 45 и 48 следует рассматривать как один пласт сложного строения. Сокращаемый угольный целик разрушается, и отработка его без дополнительных мероприятий по упрочнению угля и боковых пород приведёт к обрушениям пород кровли, отжиму угля и интенсивному пучению пород почвы с выделением метана из пласта 45 в зоне расположения забойного конвейера.

В качестве одной из мер предотвращения указанных негативных явлений предлагается полная предварительная закладка разрезной печи материалом с прочностью не ниже природной прочности угля пластов 48 и 45.

Изменчивость глубины разработки и мощности пород между весьма сближенными пластами существенно влияет на величины и интенсивность распределения вертикальных напряжений (рис. 2). Вследствие зависания подработанных пород кровли и перераспределении её веса на краевом участке пласта в лаве и в сокращаемом угольном целике между лавой и передовой выработкой согласно графикам рис. 2 максимальные вертикальные напряжения в пласте 48 на линии очистного забоя достигают 38 МПа на глубине 380 м при ширине сокращаемого угольного целика 10 м (рис. 2а), а при глубине 590 м, при тех же условиях, - 46 МПа (рис. 2в). Максимальные вертикальные напряжения увеличиваются почти пропорционально глубине разработки.

В окрестности разрезной печи при ширине сокращаемого целика 2 м (рис. 2 б, г) вертикальные напряжения достигают 50 МПа, то есть являются запредельными для угля. При переходе угля от упругого состояния к упруго-пластичному и запредельному в сокращаемом угольном целике возможны динамические формы проявления горного давления, что может привести к аварийной ситуации в очистном забое.

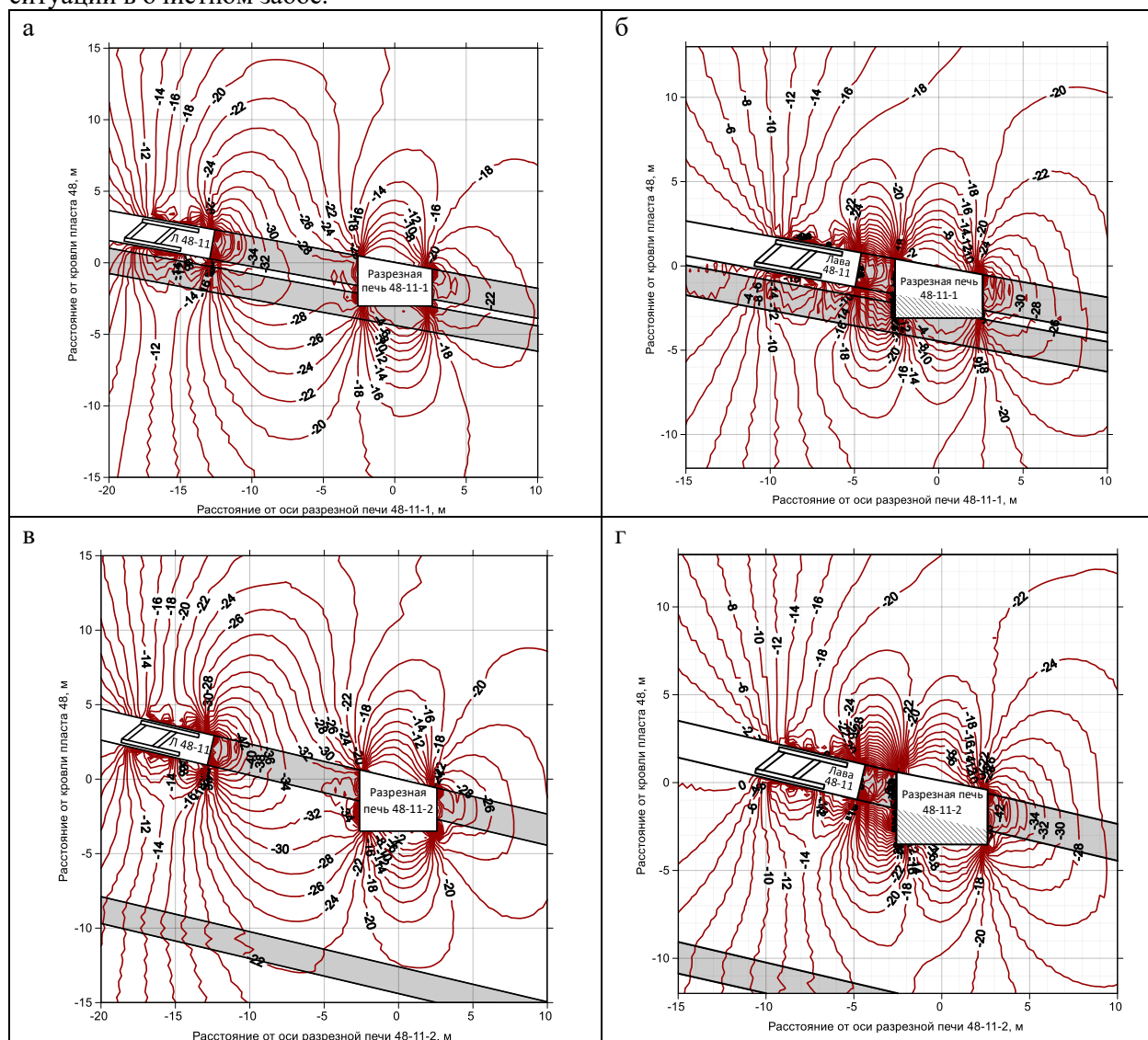


Рис. 2. Изолинии вертикальных напряжений (МПа, $\sigma_v < 0$ сжатие) в массиве горных пород в окрестности очистного забоя и разрезной печи при следующих расстояниях от забоя до печи и глубинах разработки: а - 10м, 380 м; б - 2м, 380 м; в - 10м, 590 м; г - 2м, 590 м

Установлено, что неравномерное природное поле горизонтальных напряжений в нетронутом массиве также оказывает существенное влияние на устойчивость краевой части пласта и сокращаемого угольного целика в виде техногенных сжимающих горизонтальных напряжений (рис. 3).

Наиболее интенсивно горизонтальные напряжения проявляются в краевой части пласта, где напряжения переходят из зоны сжатия в зону растяжения. Эти зоны располагаются в незакреплённых участках кровли и почвы впереди секций механизированной крепи. Эффект сжатия породной плиты приведёт к её прогибу и разрушению в форме заколов, вывалов в кровле или пучения в почве пласта. Наличие запредельных сжимающих вертикальных напряжений в краевой части пласта, разрушений пород кровли и почвы впереди секций крепи под влиянием сжимающих горизонтальных напряжений также может привести к аварийным ситуациям в очистном забое.

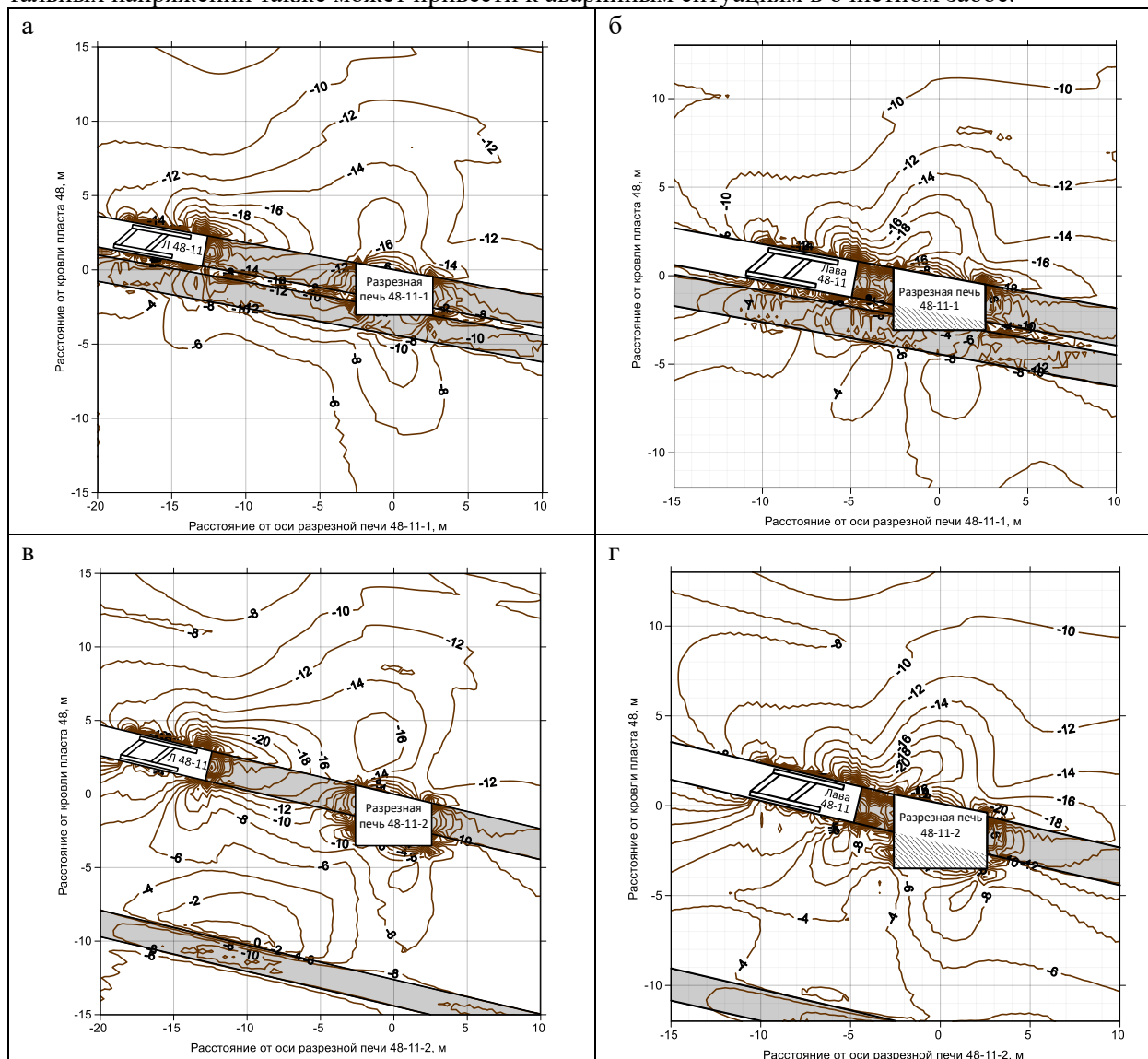


Рис. 3. Изолинии горизонтальных напряжений (МПа, $\sigma_g < 0$ сжатие) в массиве горных пород в окрестности очистного забоя и разрезной печи при следующих расстояниях от забоя до печи и глубинах разработки: а - 10м, 380 м; б - 2м, 380 м; в - 10м, 590 м; г - 2м, 590 м

Для оценки влияния глубины разработки и сближенности угольных пластов 45 и 48 на устойчивость выработок проведён анализ распределения вертикальных и горизонтальных смещений угольного пласта, вмещающих пород и горных выработок. В качестве критерия устойчивости выработок принята конвергенция кровли и почвы пласта в следующих характерных точках: в краевой части пласта на линии очистного забоя и по вертикальной и горизонтальной осям разрезной печи.

Так как одним из показателей устойчивости пород кровли в очистном забое и в передовой выработке являются смещения пород на контуре, то для выбора типа и конструкции секций механизированной крепи, а также их распора, в табл. 1 представлены величины конвергенции кровли-почвы и боков выработки. По результатам анализа величин конвергенции установлено, что она почти линейно увеличивается при изменении глубины разработки в пределах 380-590 м и сокращении ширины целика от 10 до 2 м.

Таблица 1

Конвергенция кровля-почва, бок-бок выработок в окрестности очистного забоя в вертикальном сечении по падению пласта

Наименование параметра	Условия эксперимента	Ширина сокращаемого целика, м	
		10	2
Конвергенция кровля-почва в очистном забое, мм	$H=380$ м; $h=0,5$ м	190	260
Конвергенция кровля-почва в разрезной печи, мм	$H=380$ м; $h=0,5$ м	180	230
Конвергенция бок-бок в разрезной печи, мм	$H=380$ м; $h=0,5$ м	90	130
Конвергенция кровля-почва в очистном забое, мм	$H=590$ м; $h=10,5$ м	130	270
Конвергенция кровля-почва в разрезной печи, мм	$H=590$ м; $h=10,5$ м	120	210
Конвергенция бок-бок в разрезной печи, мм	$H=590$ м; $h=10,5$ м	55	95

Выводы. По результатам исследования численным методом конечных элементов влияния глубины разработки и мощности пород между сближенными пластами установлено, что при переходе угля от упругого состояния к упруго-пластичному и запредельному в сокращаемом угольном целике возможны динамические формы проявления горного давления, что может привести к аварийной ситуации в очистном забое.

Список литературы

1. Способы вскрытия, подготовки и системы разработки шахтных полей / Б.Ф. Братченко [и др.]. – М.: Недра, 1985. – 494 с.
2. Глазов Д.Д. Системный подход к применению механизированных комплексов. – Кемерово: Кемеровское книжное издательство, 1980. – 112 с.
3. Рогов Е.И., Грицко Г.И., Вылегжанин В.Н. Математические модели адаптации процессов и подсистем угольной. – Алма-Ата: Наука КазССР, 1979. – 240 с.
4. Колмагоров В.М. Управление геомеханическими и физическими процессами при подземной разработке угольных пластов. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2002. – 133 с.
5. О состоянии промышленной безопасности опасных производственных объектов, рационального использования и охраны недр Российской Федерации в 1999 году: госуд. доклад; под ред. В.Д. Лозового. – М.: ГП НТЦ по безопасности и промышленности Госгортехнадзора России, 2000. – 224 с.
6. Пучков Л.А., Жежелевский Ю.А. Подземная разработка месторождений полезных ископаемых. – М.: Изд-во МГГУ, 2008 – 562 с.
7. Свидетельство о регистрации электронного ресурса. Комплекс проблемно-ориентированных программ для моделирования формирования и распределения опасных зон в газонасыщенном геомассиве / В.Н. Фрянов, О.А. Петрова, Т.В. Петрова; СибГИУ. – № 21123.

УДК 681.51

ОСОБЕННОСТИ ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОКОМПЛЕКСНОГО РАСПРЕДЕЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

¹Макаров Г.В., ¹Мышляев Л.П., ¹Саламатин А.С., ¹Грачев В.В., ²Вдовиченко В.М.

1 – ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия

2 – ООО «Омрон Электроникс», г. Москва, Россия

Аннотация. Рассматриваются варианты структуры АСУ ТП на примере обогатительной фабрики на основе единой платформы автоматизации Omron Sysmac, а также с применением разнородных устройств, объединяемых промышленными сетями Ethernet/IP на нескольких уровнях с физическим разделением. Предложена общая структура АСУ ТП, подходящая для сквозного управления объектами с переменной структурой, построенных из различных технологических комплексов углеобогатительных фабрик.

Ключевые слова: АСУ ТП, системы управления, обогатительные фабрики, сквозное управление.

Современное производство характеризуется протеканием технологических процессов в комплексах, которые работают не как жестко установленные последовательные ступени, но и могут комбинироваться для достижения поставленной цели. В области углеобогащения часто встречаются параллельные независимые производственные ветки, обводные пути для определенных комплексов, комплексы выделения и обработки определенных классов угля, управляемое складирование и шихтовка, и др. Такая управляемая структура позволяет динамически перестраивать производство под различное исходное сырье, заданные планом объемы и характеристики готового продукта, или же вывод в плановый ремонт каких-либо единиц оборудования для получения наибольшей эффективности. Системы управления этими производственными объектами необходимо рассматривать как системы с переменной структурой [1] и учитывать возникающие различного рода прямые и обратные связи [2].

Управление такими системами должно учитывать отмеченные выше особенности, прогнозировать эффекты принимаемых решений на уровне управления производством, операторов технологических процессов, изменений в работе оборудования или сырья – для этого разрабатываются специализированные модели, составляющие основу цифровых двойников производства. Это позволяет говорить о «сквозном управлении», когда изменения в любой части системы позволяют оценить изменения в других и принять соответствующие решения. Например, при изменении общего производственного плана необходимо ввести в действие (или вывести) определенные производственные комплексы и выставить нужные согласованные базовые уровни производительности каждой технологической единицы в цепочке. Такого рода решения активно развиваются во многих отраслях промышленности, таких, как нефтехимическая, машиностроительная, горнодобывающая и горноперерабатывающая. На данный момент цифровая трансформация активно идет и в металлургии, например, в [3] изложены основные направления применения концепции «Индустрии 4.0» в ПАО «ММК», которые позволяют создать единую информационную основу для реализации комплекса мер по оптимизации и повышению эффективности работы как отдельных агрегатов, цехов, производств, так и предприятия в целом.

Для реализации принципов такого сквозного управления необходима интеграция всех действовавших средств автоматизации в единую систему. Компания Omron предлагает использовать средства платформы Sysmac для решения этих задач (рис. 1), которая объединяет функции управления движением, программно-логического управления, обеспечения безопасности, управления сетями и визуальный контроль. Сеть EtherCAT – самая быстродействующая из сетей оборудования позволяет объединять контроллеры, корзины ввода/вывода и устройства в единой среде. IO-Link – это сетевой коммуникационный протокол типа «точка-точка» для связи датчиков и приводов с контроллером. Ethernet/IP – распространенный сетевой протокол, который позволяет объединять интерфейсы визуализации, серверы и другие контроллеры.

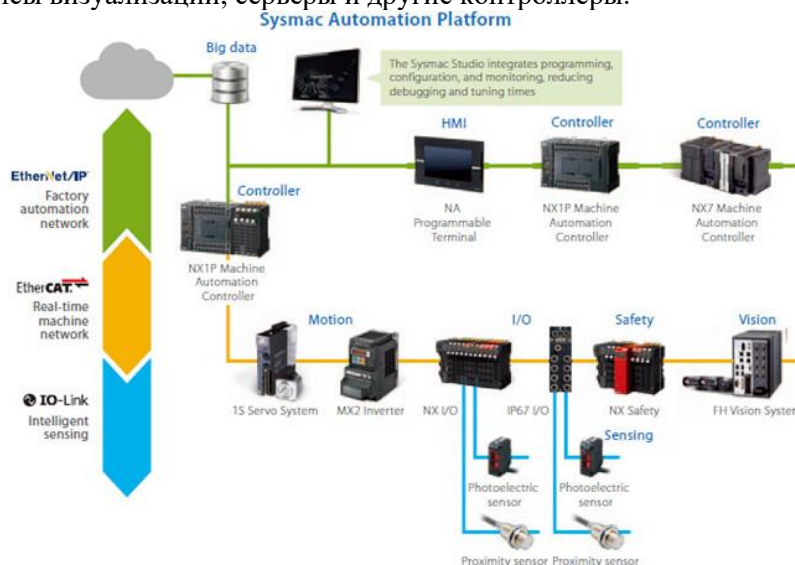


Рис. 1. Платформа автоматизации Sysmac

Использование технологий Big data и предиктивной диагностики, реализующиеся в интеллектуальных модулях, встроенным в сами устройства [4] позволяют существенно повысить уровень прозрачности процессов и доступа к данным. К таким устройствам относится как сам уни-

версальный машинный контроллер с искусственным интеллектом Omron серии NX и NY, так и отдельные устройства, например, устройства мониторинга K6CM для оценки состояния асинхронных двигателей, K6PM-TN для мониторинга и анализа температурного статуса панельных устройств для оптимизации энергоэффективности и значительного снижения риска аварийного останова. Кроме встроенных аппаратных средств мониторинга и диагностики необходимо отметить также необходимость разработки встроенных программных модулей и блоков, которые могут применяться для оперативной диагностики и оценивания предаварийных состояний технологического оборудования и контрольно-измерительных приборов [5].

Однако при проектировании такого большого и сложного объекта как углеобогащительная фабрика чаще всего невозможно реализовать всю систему на базе одной платформы. Часть устройств поставляется комплектно с технологическим оборудованием, что-то было приобретено в результате технической ошибки, и т.д. В таком случае приходится говорить об интеграции различного рода устройств, различных производителей, на различных протоколах, отдельных локальных систем управления со своими особенностями работы.

Для этого структура главной АСУ ТП должна иметь возможность подключения такого разнообразия, но без ущерба собственной производительности и безопасности. При проектировании АСУ ТП обогатительной фабрики «Шахта №12» [6] главная АСУ ТП реализована на контроллерах серии CJ2 корпорации Omron и удаленном вводе/выводе серии NX. Сети АСУ ТП имеют несколько уровней и физически разделены с помощью отдельных оптических жил и управляемых коммутаторов:

- FINS для связи контроллеров с HMI и SCADA;
- Ethernet/IP для связи контроллеров друг с другом и вводом/выводом;
- Modbus для связи с пусковой аппаратурой и др.

Однако не все локальные системы были оснащены возможностью физического разделения сетей, а требовалась интеграция на обоих уровнях – оперативно-диспетчерского контроля и управления и уровне программируемых логических контроллеров. Контроллеры некоторых локальных систем также не поддерживали возможность обмена данными по протоколу FINS. Отмеченные особенности требуют от проектируемых АСУ ТП большой гибкости и широкого спектра возможностей.

Значительное влияние при разработке структуры АСУ ТП также оказывает разбиение производства на комплексы и линии, когда необходимо принимать решение о распределенной реализации информационных и управляющих функций, т.е. распределенном вводе/выводе или управлении [7]. Крупные комплексы, такие, как сушильно-топочное отделение или отделение флотации могут иметь малое количество смежных агрегатов и сигналов с остальными технологическими комплексами. При этом могут работать раздельно, «дорабатывая» имеющиеся объемы продукции вне зависимости от работы остальных. В этом случае целесообразно говорить об отдельном управляющем контроллере и систему управления для них.

Преимущества отдельной системы управления повышает надежность системы, дает возможность проводить какие-либо работы по комплексам не прерывая работу остальных, уменьшить объем информации, непрерывно запрашиваемой системой диспетчеризации из контроллера.

В свою очередь, если комплексы имеют большое количество смежных, но распределенных по распредпунктам, отметкам и зданиям (или частям здания) агрегатов, а запуск и блокировки технологической цепочки осуществляется не последовательно в каждом комплексе, а по сложным схемам и зависимостям более рационально объединить их единой системой управления с помощью контроллера с удаленным вводом/выводом.

Применение данного подхода имеет следующие достоинства:

- позволяет повысить надежность системы;
- снижает стоимость системы;
- процессорный модуль не привязан к управляемым объектам, данные об их состоянии могут передаваться на большие расстояния;
- реализация алгоритма управления всего промышленного объекта в едином процессорном модуле приводит к снижению простоя фабрики в процессе ее эксплуатации.

Система удаленного ввода/вывода Omron NX, построенная на сети EtherCAT имеет высокую скорость обмена данными и применима для процессов, когда требуется оперативное реагирование на самые малые и быстрые изменения в параметрах их протекания, а малейшие изменения по точности ведут к браку продукции. Однако, недостатком данной системы можно отметить невозможность вывести отдельный узел (корзину ввода/вывода) из работы без остановки работы всех

остальных узлов. Но в действующей обогатительной фабрике часто возникает такая необходимость, поскольку оборудование может выходить из строя и требует оперативной замены и ремонта, добавляются новые устройства и, часто, в условиях действующего производства. Для этого требуется гибкость управляющей системы и объекта, которая предусматривает возможность оперативного переключения и обходных маршрутов.

Для того, чтобы обеспечить независимую работу всех узлов – локальных систем, корзин ввода/вывода необходима интеграция их через сети, позволяющие реализовывать как кольцевые структуры, так и структуру «звезда». В линейке продуктов Omron NX возможна интеграция по промышленной сети Ethernet/IP как корзин ввода/вывода, так и контроллеров между собой. Однако в этом случае возникает задача разграничения доступа и физического разделения сетей на несколько уровней. Возможная конфигурация структуры управляющей части АСУ ТП обогатительной фабрики для такого случая представлена на рис. 2.

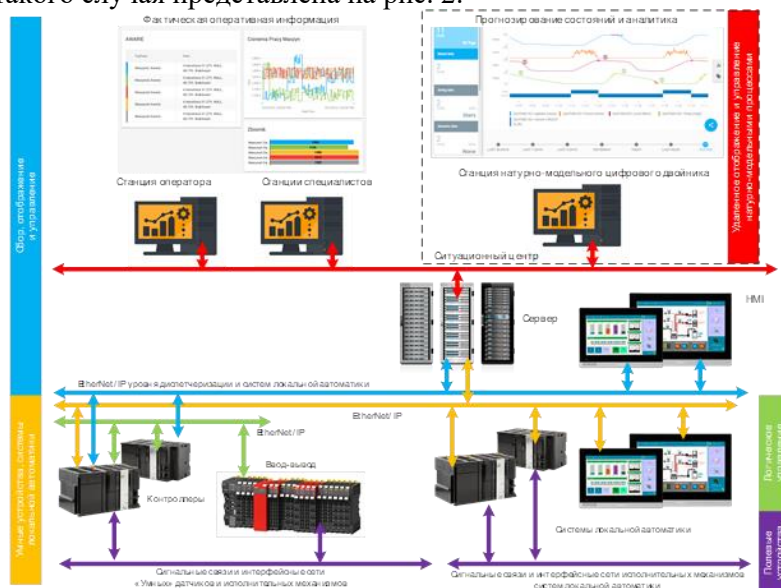


Рис. 2. Пример структуры управляющей части АСУ ТП

Эта структура позволяет добиться модульности, расширяемости системы и оптимально организовать функции распределенного ввода/вывода и управления. Подобная техническая структура должна лежать в основе АСУ ТП современной обогатительной фабрики, разбитой на комплексы и линии, которые характеризуют производство как объект с переменной структурой. Объекты с переменной структурой требуют, в свою очередь, специальных систем управления и регулирующих контуров, предназначенных не только для координатно-параметрического управления, но также и управления структурой объекта и самой системы [2].

При проектировании и настройке этих систем необходимо учитывать также и эффекты, возникающие при различных типах управляющих связей. Это актуально как для локальных контуров регулирования, так и для всего объекта в целом. Запускаемые «вручную» поточно-транспортные системы ограничены последовательностью действий одного оператора, или аппаратчиков «по месту». Система автоматического управления запуском при этом может вводить в работу несвязанные комплексы и агрегаты параллельно, учитывать необходимые последовательности запуска и значения технологических параметров, и самостоятельно переходить к следующему шагу сразу по исчезновению технологических блокировок. Это позволяет в разы сократить время запуска обогатительной фабрики. Например, если оператору фабрики требуется на запуск «с нуля» от 40 до 60 минут, то система автоматического управления запуском позволяет осуществить запуск за 15 минут, что существенно меняет динамику комплексов фабрики как объектов управления.

Для отдельных же агрегатов и контуров задачи создания и настройки систем управления можно решать различными способами, для каждого из которых есть своя область эффективного применения. Типизация технологических агрегатов с точки зрения управления [8] позволяет реализовать как типовые системы автоматического регулирования, так и системы логического управления. Контроллеры Omron начиная с серии CJ2 поддерживают не только типовые функциональные блоки, но и организацию вход-выходных переменных и переменных состояния в виде структур данных. Пример такой типизации на базе контроллера Omron CJ2N запатентован как програм-

ма ЭВМ [9]. Для создания и настройки систем управления более сложными контурами, или не имеющими действующих примеров процессами создают экспериментальные физические модели или полупромышленные установки. Адекватный перенос результатов исследований систем управления на таких моделях возможен только при использовании методов теории подобия систем управления [10].

Вывод. Применение отмеченных в статье подходов и инструментов позволяет эффективно создавать и внедрять как новые системы автоматизации управления, так и модернизировать существующие, поэтапно внедряя элементы сквозного управления, натурно-модельных цифровых двойников и Индустрии 4.0.

Список литературы

1. Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой. – М.: Наука, 1967. – 336 с.
2. Емельянов С.В., Коровин С.К. Новые типы обратной связи: Управление при неопределенности. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 352 с.
3. Концепция «Индустрия 4.0». Научные проблемы создания интеллектуальных систем управления технологическими процессами в пирометаллургии / Н.А. Спирин [и др.] // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве : тр. XII всерос. науч.-практ. конф. – Новокузнецк, 2019. – С. 25-29.
4. Романовский С.П., Ахмаров В.А. Практические аспекты внедрения элементов цифровых машин в рамках концепции «Индустрия 4.0» // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве : тр. XII всерос. науч.-практ. конф. – Новокузнецк, 2019. – С. 118-121.
5. Оценивание предаварийных состояний технологического оборудования и контрольно-измерительных приборов / М.В. Ляховец [и др.] // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2020. – № 3. – С. 16-24.
6. Система автоматизации управления обогатительной фабрикой ООО «Шахта №12» / М.В. Шипунов [и др.] // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве : тр. XII всерос. науч.-практ. конф. – Новокузнецк, 2019. – С. 186-192.
7. Саламатин А.С., Макаров Г.В., Раскин М.В. Особенности распределенного управления промышленными объектами // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : тр. всерос. науч. конф. студ., аспирантов и мол. учен. – Новокузнецк, 2019. – С. 45-48.
8. Типовые решения по автоматизации технологических объектов на примере углеобогатительных фабрик / А.С. Саламатин [и др.] // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2018. – № 4. – С. 330-333.
9. Свидетельство 2021614553. Типовой функциональный блок управления задвижками, клапанами с дискретным управлением : программа для ЭВМ / Л.П. Мышляев [и др.] (RU) ; правообладатель ООО «НИЦ СУ» (RU). № 2021613515; заявл. 18.03.2021; опубл. 25.03.2021, Бюл. № 4. 320 Кб.
10. Исследование систем управления с применением физических моделей / В.Ф. Евтушенко [и др.] // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве : тр. X всерос. науч.-практ. конф. – Новокузнецк, 2015. – С. 159-165.

УДК 681.518

ЦИФРОВИЗАЦИЯ – ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ

¹д.т.н. Мышляев Л.П., ²к.т.н. Венгер К.Г., ³к.т.н. Грачев В.В.

1 – ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия

2 – ООО «РТ-СтройИнжиниринг», г. Москва, Россия

3 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Статья посвящена рассмотрению понятия «цифровизация» как инструментария для решения задач управления. Приведены проблемы формирования цифровых двойников, выделены два направления создания цифровых моделей. Отмечена необходимость использования натурно-модельного подхода, методов натурно-математического моделирования, теории подобия для построения цифровых моделей.

Ключевые слова: цифровизация, цифровой двойник, моделирование, математическая модель, теория подобия, натурно-математическое моделирование.

Большинство публикаций в средствах массовой информации, да и в научной литературе, широко разрекламирована цифровизация как панацея решения многих научно-технических и со-

циально-экономических проблем. И только в ограниченном числе работ отмечается, что цифровизация только инструментарий, средство для достижения цели, чрезмерное увлечение которыми может далеко увести от стратегических целевых задач.

Особенно ярко это отражено в работе В.И. Данилова-Данильян «Экология, гидрология, цифровизация, цифровые двойники и азбучные истины методологии моделирования» [1]. В статье автор рассматривает часть вопросов цифровизации, которая связана с получением данных о функционировании уже *существующих* объектов (систем) и построении их математических моделей (аналитические выражения, таблицы, графики и т.д., реализованные, как правило, в виде компьютерных программ), которые стали называть цифровыми двойниками. Совершенно верно автор указывает, что

– получение данных, неважно какого объема и в каком виде, есть только средство для решения целевых задач;

– построение математических моделей – это уже в течение многих десятилетий решаемая проблема, не достигшая своего завершения, и ничего нового цифровизация здесь не привносит.

Проблемы формирования данных и построения математических моделей следует рассматривать не как отдельные направления, а как составные *неотъемлемые части* общей проблемы управления [2]. Отсюда вытекают требования к формируемым данным по точности, своевременности и т.д., а также требования к математическим моделям, адекватности, сложности и т.д. [4]. Несоблюдение этих требований нарушает «системность» подхода и может привести не только к малоэффективным, но и негативным последствиям.

Не следует забывать, что первая волна цифровизации экономики семидесятых-восемидесятых годов прошлого века в основном на промышленных предприятиях показала как положительные результаты, так и проблемы эффективной реализации и пути их возможного решения [5]. К числу положительных результатов следует отнести в первую очередь освобождение от рутинной работы по составлению отчетной документации практически всех служб предприятия. Формируемый большой объем исходных данных, представляемый руководителями различного уровня, не дал ожидаемого эффекта при выработке управленческих решений. Поэтому встал вопрос о разработке новых форм представления информации и, главное, построение автоматизированных систем именно управления, а не только информационных систем. Для этого потребовалась разработка алгоритмов управления, эффективных для реальных условий функционирования предприятий, и подготовка соответствующих квалифицированных кадров, способных разрабатывать и эксплуатировать системы управления.

Говоря о цифровых двойниках, необходимо выделить два направления.

Первое. Построение цифровой модели имеющегося объекта (системы) для последующей оптимизации. Здесь имеются принципиальные ограничения, на которые указывают

а) Л. Льюнг [6] «Реальная система отличается от построенной нами математической модели. Можно сказать, что *мир математических описаний отделен от реального мира непреодолимым, но прозрачным экраном*. Глядя на этот экран-окно, мы можем сравнивать некоторые особенности физических систем и соответствующих им математических моделей, но никогда не сможем гарантировать их точного совпадения».

б) В. Я. Ротач [7] «Более пристальное изучение проблемы управления показывает, однако, принципиальную ограниченность методов синтеза, основанных на априорно заданных математических моделях объектов. Дело в том, что синтез системы регулирования по заранее заданной модели объекта был бы логически безупречным, если бы свойства модели точно отражали свойства реального объекта. В действительности же всякая модель отражает эти свойства лишь с некоторой степенью приближения. Соответственно при построении модели объекта необходимо прежде всего выбрать критерий, характеризующий погрешность такого приближения, а также указать допустимую величину этой погрешности. Но сделать это в отрыве от конечной цели построения модели, то есть в отрыве от свойств будущей системы регулирования, принципиально невозможно. Иначе говоря, выбор критерия приближения при построении модели объекта в равной мере зависит как от свойств объекта, так и от свойств будущего регулятора, который будет осуществлять регулирование режима работы этого объекта, а также от выбора показателя цели управления».

С утверждением автора, что построить модель технических объектов можно, нельзя согласиться, так как многие технологические процессы обладают свойством самоорганизации [8], а также технические объекты, как правило, являются элементами системы управления, а управляю-

щей подсистемой является человек-оператор. Поэтому рассматривать приходится человеко-машинную, а не чисто техническую систему.

Но и адекватной математической модели недостаточно, так как необходимы правила переноса результатов математического моделирования на объект-двойник, а это натурный объект. И здесь нужна уже теория подобия. И если теория подобия достаточно хорошо развита для объектов управления, то для систем управления она находится в настоящее время только в зачаточном состоянии [9].

Второе. Построение цифровой модели еще не существующего объекта (аналитические модели) для целей создания принципиально новых технологий, систем управления и т.д. В этом случае также нужны правила перехода уже цифрового двойника к натурному. О направлении теории подобия такого рода даже и не говорится.

Вывод. При создании новых технологий, агрегатов, систем, как показывает многолетний опыт [10], более правильно ориентироваться на натурно-модельный подход, рационально интегрируя математические и физические модели, а также натурные элементы систем управления.

Список литературы

1. Данилов-Данильян В.И. Экология, гидрология, цифровизация, цифровые двойники и азбучные истины методологии моделирования // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения: сб. научных трудов, 2019. – С. 497 – 502.
2. Методы идентификации промышленных объектов в системах управления // С.В. Емельянов [и др.]. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2007. – 307 с.
3. Емельянов С.В., Наппельбаум Э.Л. Основные принципы системного анализа // Проблемы научной организации управления социалистической промышленности; под ред. Д.М. Гвишиани, С.Е. Каменицера. – М., Экономика, 1974. – 751 с.
4. Емельянов С.В., Коровин С.К. Новые типы обратной связи. Управление при неопределенности. – М.: Наука, Физматлит, 1997. – 352 с.
5. Мышляев Л.П., Венгер К.Г. Вопросы цифровой экономики: состояние, проблемы. / Наука и профессиональное образование: национальные приоритеты и региональные драйверы развития : труды всерос. науч.-практ. конф. – Кемерово: ГБУ ДПО «ЕРИПО», 2019. – С. 82-83.
6. Лjung Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: пер. с англ. – М.: Наука, Физматлит, 1991. – 432 с.
7. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
8. Колесников А.А. Теория синергетического управления. – Таганрог: ТГРТУ, М.: Энергоатомиздат, 1994. – 334 с.
9. Понятия и условия подобия систем управления / Л.П. Мышляев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2012. – №12. – С. 56-58.
10. Системы автоматизации на основе натурно-модельного подхода: монография. В 3-х т. Т.2: Системы автоматизации производственного назначения / Под ред. Л.П. Мышляева. – Новосибирск: Наука, 2006. – 483 с.

УДК 65.011.56:004.942

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК: ПОНЯТИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

¹Коровин Д.Е., ¹к.т.н. Грачев В.В., ²д.т.н. Мышляев Л.П., ²Иванов Д.В., ²Кулюшин Г.А.,
²Загидулин И.Р., ²Свинцов М.М., ²Макаров Г.В.

1 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия
2 – Научно-исследовательский центр систем управления, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Статья посвящена особенностям применения технологии цифровых двойников в угольной отрасли. Приведены ключевые моменты и нюансы применения технологии в промышленности в целом и в угольной отрасли в частности.

Ключевые слова: цифровой двойник, автоматизация, модель, моделирование, угольная промышленность, натурно-математическое моделирование, подобие систем управления.

Вошедшее в моду словосочетание «цифровые двойники» требует более глубокого осмысления и увязки с многолетними достижениями по построению и применению моделей (моделированию), по комплексным натурно-математическим моделям, сочетающим в себе и математическую, и натурную составляющую, методам и системам управления с физической моделью, системным принципам синтеза систем управления с утверждениями принципиальной невозможности построить универсальную модель, с отражением поведения в человеко-машинных системах. Следует также более пристально изучить опыт применения математических моделей в различных отраслях промышленности. Иначе безудержный оптимизм от «цифровых двойников» приведет к разочарованиям, как уже не раз случалось в других сферах теории и практики. С этих позиций и сформирован представленный материал статьи.

Актуальность. Добыча угля является ведущим видом экономической деятельности Кемеровской области. Уровень развития угледобывающей отрасли в значительной степени предопределяет уровень развития экономики всего региона. Объемы добычи угля имеют долгосрочную положительную динамику, что требует ещё большей динамики развития отрасли переработки и обогащения. Стратегией социально-экономического развития Кемеровской области до 2035 года определено, что одно из перспективных направлений развития отрасли – это увеличение объемов переработки добываемого сырья. Увеличение общих объемов переработки предопределяет необходимость как модернизации существующих углеобогащительных комплексов, так и создание новых предприятий.

На текущий момент степень цифровизации горноперерабатывающей отрасли достаточно высока – внедрены системы автоматизированного управления, предполагающие, в том числе, оперативный контроль и долгосрочное хранение контролируемых параметров технологических процессов и оборудования [1-3]. Это может являться основой для создания цифровых теней предприятий, что, в свою очередь, служит «низким порогом входа» в цифровую экономику региона и страны в целом. Дальнейшим этапом интеграции является повсеместное создание и использование натурно-модельных цифровых двойников производств. Для некоторых отраслей производств разработаны и отлажены цифровые двойники типовых объектов. Необходимо разработать общие структуры и конкретные рекомендации по созданию и внедрению натурно-модельных цифровых двойников предприятий горной промышленности.

Понятие «цифровой двойник». Цифровой двойник (англ. Digital Twin) – это виртуальный, программный аналог физического изделия, группы изделий или процесса, моделирующий внутренние процессы, технические характеристики и поведение реального объекта в условиях воздействий помех и окружающей среды, а также его работа заключается в сборе и повторном использовании цифровой информации [4].

Другая интерпретация цифрового двойника – это виртуальная модель, которая на микро- и макроуровне либо описывает реально существующий объект (выступая как дубль готового конкретного изделия), либо служит прототипом будущего объекта. При этом любая информация, которая может быть получена при тестировании физического объекта, должна быть получена и на базе тестирования его цифрового двойника.

Становление понятия «цифровой двойник». До начала первой промышленной революции, которая началась в XVIII в., различные изделия в основном изготавливались ремесленниками – производство уникальных продуктов по единому шаблону. Однако с введением концепции взаимозаменяемых деталей в XVIII веке способ изготовления продукции быстро изменился, поскольку компании начали стремиться к созданию больших объемов копий своих изделий. В последнее время парадигма массовой персонификации направлена на объединение этих устоявшихся производственных концепций для достижения низких удельных затрат на индивидуальные продукты.

Однако, хотя такие производственные парадигмы допускают изготовление большого количества похожих деталей или изделий, эти экземпляры являются просто несвязанными копиями. В отличие от этого, идея создания двойника относится к созданию копии части или изделия целиком и использованию ее для описания других экземпляров – таким образом, устанавливая связь между несколькими копиями. Данная идея возникла из программы NASA Аполлон, «где были построены по крайней мере два идентичных космических аппарата, чтобы позволить зеркально отражать состояние космического аппарата во время полета» [5-6]. На рис. 1 показана реализация двойника в проекте «Аполлон».

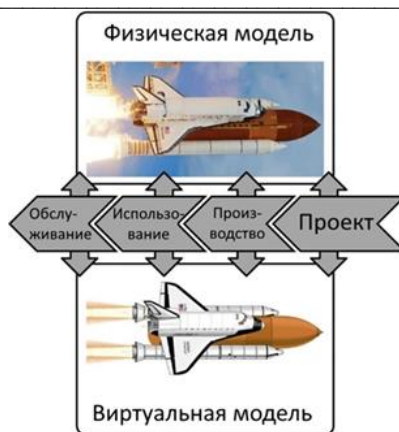


Рис. 1. Видение двойника на протяжении жизненного цикла изделия в проекте «Аполлон»

Кратко проследивая историю развития концепции цифровых двойников, можно сказать, что с того момента, как человек начал создавать материальные изделия, он использовал виртуальные модели-двойники. Сначала он создавал их в своем воображении, потом на бумаге, затем в компьютере, а теперь и в «облаке», используя «умные» датчики, интернет вещей, искусственный интеллект. На каждом новом этапе в концепцию добавлялись новые цифровые технологии и методы моделирования, прогнозирования, анализа, обучения.

За последние десятилетия достижения в области компьютерных технологий позволили создавать все более сложные виртуальные модели физических объектов, а также проводить интеграцию таких моделей для проектирования систем. Эти модели не только служат для проверки и утверждения проекта, но и все чаще используются в качестве эталонной модели изделия. Более того, развитие микрочипов, сенсоров и информационных технологий привело к появлению умных продуктов, которые отслеживают и передают внешние параметры и, таким образом, позволяют «наполнить» модели данными о состоянии изделия, такими как условия окружающей среды и внешние воздействия на изделие [7-8].

Цифровой двойник основывается на реальной модели, а значит все показания двойник должен брать с реальных датчиков. Общая структура технологии «цифровой двойник» представлена на рис. 2.



Рис. 2. Общая структура технологии «цифровой двойник»

Получая показания с датчиков, можно задать входные возмущения на двойника. Учитывая это, можно проводить сравнение показаний реальных датчиков с датчиками цифрового двойника и, основываясь на этих показаниях, можно делать выводы о разногласиях и о причинах их возникновения.

Цифровой двойник содержит цифровую модель, характеристики материала, руководства и данные по проведению технического обслуживания продукта, информацию о влиянии внешних факторов.

Наиболее эффективным применением технологии цифровых двойников является её использование для продукции со следующими критериями:

- сопровождение продукции квалифицированным специализированным сервисом (контроль состояния, мониторинг, техническое сопровождение);
- длительный жизненный цикл изделия (от 5 до 70 лет);
- большое количество экземпляров установленного оборудования;
- широкий диапазон и многообразие условий эксплуатации;

– труднодоступность изделия для проведения обслуживания.

Это весьма обширный список критериев, под которые подпадает продукция из различных отраслей промышленности: технологические агрегаты угольных шахт и обогатительных фабрик, авиационные двигатели и системы, сложное промышленное оборудование, железнодорожные и автомобильные транспортные системы, медицинское оборудование [9-12].

Классификация цифровых двойников. В настоящий момент цифровые двойники находят своё применение во множестве отраслей промышленности, таких как угольная отрасль, энергетика, машиностроение. Основная причина применения цифровых двойников в данных отраслях – это цена ошибки. В каждой из перечисленных отраслей ошибка оператора, диспетчера или инженера может привести как к экономическому ущербу, так и к угрозе жизни и здоровья людей.

Сейчас распространена классификация, включающая три типа двойников: цифровые двойники-прототипы (Digital Twin Prototype, DTP), цифровые двойники-экземпляры (Digital Twin Instance, DTI) и агрегированные двойники (Digital Twin Aggregate, DTA).

DTP-двойник характеризует физический объект, прототипом которого он является, и содержит информацию, необходимую для описания и создания физической версии объекта. Эта информация включает требования к производству, аннотированную трехмерную модель, спецификацию на материалы, процессы, услуги и утилизацию.

DTI-двойники описывают конкретный физический объект, с которым двойник остается связанным на протяжении всего срока службы. Двойники этого типа обычно содержат аннотированную 3D-модель с общими размерами и допусками, спецификацию на материалы, в которой перечислены текущие и прошлые компоненты, спецификацию на процессы с перечислением операций, которые были выполнены при создании этого физического объекта, а также результаты любых тестов на объекте, записи о сервисном обслуживании, включая замену компонентов, операционные показатели, результаты тестов и измерений, полученные от датчиков, текущие и прогнозируемые значения параметров мониторинга.

DTA-двойники определяются как вычислительная система, которая имеет доступ ко всем цифровым двойникам-экземплярам и может посылать им запросы в режиме случайных или проактивных опросов.

Симбиоз с технологиями интернета вещей является драйвером для развития технологий цифровых двойников. Цифровые двойники получают реальные данные с датчиков, осуществляющих мониторинг реальных объектов, в то время как интернет вещей обеспечивает сбор и анализ данных с различного рода сенсоров и позволяет сделать этот процесс экономичным и эффективным.

Методы реализации цифровых двойников. Цифровые двойники производственных предприятий и протекающих в них процессов являются комплексным инструментом для планирования, оптимизации, поиска уязвимых мест и общего повышения эффективности управления. В общем понимании цифровые двойники создаются для уже существующих объектов и опираются на их информационное отображение, различные виды моделей и методы математического анализа. При этом выбор наиболее эффективных из них для каждого нового объекта возможен только по результатам сравнения после многочисленных экспериментов – то есть по факту уже совершенных ошибок.

Для некоторых отраслей производств разработаны и отлажены цифровые двойники типовых объектов. Однако полностью перенести уже готовую отлаженную систему на новый объект невозможно, поскольку даже несущественные на первый взгляд отличия могут стать причиной значительных отклонений и ошибок. Даже для аналогичных производств каждый раз требуется существенная доработка.

В первом случае известно, что обоснованный перенос управляющих решений возможен только в случае подобия систем управления. То есть необходимо развитие теории подобия систем управления от условий функционирования цифровых двойников [13]. Такие решения можно переносить с ранее разработанной системы, или же с физической (лабораторной или полупромышленной) модели. Как правило, для изучения технологии и режимов работы на новых производствах сначала разрабатываются физические или полупромышленные модели. Методы и основания для переноса полученных результатов исследований самих процессов описаны теорией подобия физических процессов, а развитие теории подобия для систем управления, во-первых, позволило обосновать перенос части управляющей системы, связав свойства моделей объектов управления,

внешних воздействий, законов регулирования, во-вторых, учесть системные особенности, обусловленные замыканием прямых и обратных управляющих связей.

Во втором случае целесообразно применять методы натурно-математического моделирования с использованием типопредставительных ситуаций, которые развивают общую концепцию натурно-модельного подхода, выработанного в научной школе в моделировании систем управления. Так как эти методы удовлетворяют жестким ограничениям на объем и качество априорной информации, присущим натурным действующим системам автоматизации управления, в частности, отсутствию адекватных математических моделей «в большом»; ограниченным возможностями проведения активных экспериментов на объектах в режимах их рабочей эксплуатации; минимальным сведениям о свойствах различного рода возмущений; непредвидимым возможным изменениям целей управления; замене компонентов сырых материалов; модернизации самих объектов управления в ходе эксплуатации и т.п.

В общем, видение цифрового двойника описывает видение двунаправленного отношения между физическим объектом и множеством его виртуальных моделей. В этом контексте установление отношений между физическими частями и их виртуальными моделями, позволяет эффективно осуществлять проектирование, производство, обслуживание и другие различные виды деятельности на протяжении всего жизненного цикла изделия (производства). В частности, при проектировании такие цифровые двойники позволяют проверить соответствие технических характеристик изделия общему замыслу и требованиям заказчика [9].

Однако, как сообщалось в научной литературе, так и на практике, нынешними ограничениями реализации цифрового двойника являются недостаточные возможности синхронизации между физическим и цифровым миром для установления замкнутых контуров, отсутствие высокоточных моделей для моделирования и виртуального тестирования в нескольких масштабах, отсутствие количественной оценки неопределенности для таких моделей, трудности прогнозирования сложных систем, а также проблемы сбора и обработки больших массивов данных. Действительно, эти проблемы могут быть решены только на основе прочной концептуальной основы и комплексной эталонной модели цифрового двойника.

Под натурно-модельным цифровым двойником понимается интегрированный в натурную (или физическую) систему управления натурно-модельный комплекс, отображающий ее функционирование в цифровой форме.

Выводы. Создание новых и совершенствование действующих систем автоматизации управления производственными объектами подразумевает, в том числе, повышение уровня цифровизации для их интеграции в современную среду цифровой экономики. Одним из основных инструментов для этого являются цифровые двойники. Однако на данный момент слабо разработаны научно-практические основы создания общих структур как цифровых двойников, так и комплексных натурных систем автоматизации управления, их конкретизации в производственной, образовательной и научной деятельности. При решении этой проблемы целесообразно ориентироваться на натурно-модельный подход, эффективность которого подтверждена многолетней теоретической и практической проверкой при автоматизации управления в горной и металлургической отраслях промышленности.

Практически все исследователи сходятся о назначении цифровых двойников – повышение эффективности бизнеса или производства. Для этого основной акцент делается на материальные потоки всего предприятия, не раскрывая суть происходящих внутри технологических процессов и процессов управления, происходящих в локальных системах и контурах.

Цифровые двойники могут стать полезным инструментом. Они позволяют совершенствовать операции технического обслуживания и упрощают техническую поддержку изделия, экономят деньги, уменьшая число сбоев и продлевают срок службы оборудования. Цифровой двойник может служить источником натурных данных для дальнейшего исследования, без необходимости доступа к реальному объекту, так как доступ к реальному объекту зачастую затруднен по соображениям безопасности объекта, так или его территориальной удаленности.

Список литературы

1. Системы автоматизации на основе натурно-модельного подхода. В 3 томах. Т. 2. Системы автоматизации производственного назначения / под ред. Л.П. Мышляева. – Новосибирск: Наука, 2006. – 483 с.
2. Сазыкин Г.П., Синеев Б.А., Мышляев Л.П. Проектирование и строительство углеобогачительных фабрик нового поколения. – Новокузнецк: СибГИУ. 2003. – 127 с.

3. Использование BIM-технологий при проектировании автоматизированных промышленных комплексов / В.В. Грачев [и др.] // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: тр. третьей всерос. науч.-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2020. – С. 86-94.
4. Прохоров А., Лысачев М., Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.
5. Rosen R, von Wichert G, Lo G, Bettenhausen K.D. About the Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing // IFAC-Papers OnLine. – 2015. – 48(3) – P. 567–572.
6. Glaessgen E.H., Stargel D.S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles // Structural Dynamics and Materials Conference: proceedings of the 53rd AIAA Structures, 2012. – P. 1818.
7. Digital Twin: перспективы использования цифровых двойников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nfp2b.ru/2019/01/09/digital-twin-perspektivy-ispolzovaniya-tsifrovyyh-dvoynikov/>.
8. Мышляев Л.П., Венгер К.Г., Грачев В.В. Цифровизация и управление // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве, AS'2019: тр. XII всерос. науч.-практ. конф. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2019. – С. 29–31.
9. Данилов-Данильян В.И. Экология, гидрология, цифровизация, цифровые двойники и азбучные истины методологии моделирования // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения: сб. науч. трудов. – Москва: Студия Ф1, 2019. – С. 497-502.
10. Применение цифрового двойника в нефтегазовой отрасли / В.Н. Быкова [и др.] // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2020. – Вып. 1 (28). – С. 8..
11. Еремин Н.А., Еремин Ал.Н. Цифровой двойник в нефтегазовом производстве // Нефть. Газ. Новации. – 2018. – № 12. – С. 14–17.
12. Кокорев Д.С. Посмаков Н.П. Применение «цифровых двойников» в производственных процессах // Colloquium-journal. – 2019. – № 26-2 (50). – С. 71–78.
13. Оценивание подобия систем управления / Г.В. Макаров [и др.] // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды седьмой науч.-практ. конф. – Новокузнецк: изд-во СибГИУ, 2016. – С. 170 – 177.

УДК 532.5.013.12

МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КВАДРАТИЧНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДЕГАЗАЦИОННЫХ И ГАЗООТСАСЫВАЮЩИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Колегов Г.А.

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Аннотация. Разработана методология расчёта квадратичных аэродинамических сопротивлений дегазационных и газоотсасывающих трубопроводов, произведена верификация предлагаемой математической модели с использованием средств вычислительной гидродинамики.

Ключевые слова: дегазация, дегазационный трубопровод, аэродинамическое сопротивление, шахтная вентиляционная система, полиномиальная интерполяция, cfd моделирование.

Дегазация является аэродинамическим процессом, расчеты которого до настоящего времени не проводятся, так как ее трубопроводная сеть не включена в действующие модели шахтных вентиляционных сетей (ШВС). Одной из главных причин является отсутствие явной методологии вычисления аэродинамических сопротивлений трубопроводов. В практике прикладной гидродинамики, а также согласно «Инструкции по дегазации» [1] расчёт потерь давления в трубопроводе производится по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta h = \lambda \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2D} \quad (1)$$

где ρ – плотность газа, кг/м³; V – скорость потока, м/с; D – диаметр трубопровода, м; λ – коэффициент сопротивления.

Коэффициент сопротивления представляет собой отношение потерянного полного давления, осреднённого по массовому расходу, к динамическому давлению в условленном сечении [2]. Согласно инструкциям [1, 3] коэффициент сопротивления зависит от скорости потока и диаметра трубопровода, или от числа Рейнольдса, вычисляемого в соответствии:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}, \quad (2)$$

где ν – кинематическая вязкость $\text{м}^2/\text{с}$.

Коэффициент сопротивления λ в выражении (1) есть суммарный коэффициент, определяемый как сумма коэффициента сопротивления трения единицы длины трубопровода и коэффициента местного сопротивления

$$\lambda = \lambda_{\text{тр}} + \lambda_{\text{м}}, \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{тр}}$ – коэффициент сопротивления трения; $\lambda_{\text{м}}$ – коэффициент местного сопротивления.

Согласно инструкции [1] коэффициент сопротивления трения вычисляется по формуле Блазиуса:

$$\lambda_{\text{тр}} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{\text{Re}}} \quad (4)$$

Формула Блазиуса считается применимой для описания переходной области между ламинарным и турбулентным течениями в пределах $\text{Re} = 2000-4000$ [2].

Инструкцией [3] предписывается применение формулы Филоненко-Альштуля для вычисления коэффициента сопротивления трения:

$$\lambda_{\text{тр}} = \frac{1}{(1,8 \lg \text{Re} - 1,64)^2}. \quad (5)$$

Значения местных сопротивлений приведены в виде аэродинамических сопротивлений фиксированных поворотов на $30, 45, 60$ и 90° без описания механизма интерполяции и экстраполяции справочных значений для получения сопротивления поворота на какой-либо другой угол. Формула (5) применима лишь для труб с гладкими стенками [2].

Таким образом, методология расчёта потерь давлений, сформулированная в виде зависимостей (1), (4) и (5), не позволяет использовать её для расчёта сетей дегазационных и газоотсасывающих трубопроводов в средах моделирования шахтных вентиляционных сетей (ШВС), использующих в моделях лишь квадратичный закон сопротивления, не зависящий от скорости и, следовательно, от числа Рейнольдса. Также, уравнения (4) и (5) не позволяют учитывать шероховатость стенок труб и повороты на произвольный угол.

Оценим условия, в которых эксплуатируются системы дегазации на шахтах в настоящее время. Вычислим средневзвешенное число Рейнольдса для дегазационных систем по формуле:

$$\text{Re}_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Re}_i l_i}{\sum_{i=1}^n l_i}, \quad (6)$$

где Re_i – число Рейнольдса для i -го участка; l_i – длина i -го участка; n – число участков.

В табл. 1 приведены данные по средневзвешенным числам Рейнольдса для некоторых шахт юга Кузбасса.

Таблица 1

Средневзвешенные числа Рейнольдса для дегазационных трубопроводов

Название шахты	$\text{Re}_{\text{ср}}$
Распадская-Коксовая	202400
Ерунаковская-VIII	237203
им. В.И. Ленина	139899
Сибиргинская	204400
Увальная	462876

Как видно из табл. 1, все значения чисел Рейнольдса для дегазационных систем, эксплуатируемых в настоящее время на угольных шахтах, превышают 10^5 и, следовательно, подчиняются квадратичному закону сопротивления. Также, часть трубопроводов изготовлена из стеклопластика, а часть – из стали. Материалы обладают различной характерной шероховатостью, что не учитывается существующими методиками расчёта. Таким образом, актуальной является задача формирования методики вычисления квадратичных аэродинамических сопротивлений дегазационных и газоотсасывающих трубопроводов, не зависящих от чисел Рейнольдса, а также учитывающих материал изготовления и произвольные углы поворота трубопровода.

Разделив выражение (1) на квадрат объёмного расхода воздуха, получим квадратичное аэродинамическое сопротивление круглых труб — выраженное в киломюргах оно составляет:

$$R_{\text{гв}} = 0,8 \frac{\lambda \rho}{\pi^2 D^5}. \quad (7)$$

Таким образом, задача определения квадратичных аэродинамических сопротивлений трубопроводов сводится к вычислению коэффициентов сопротивлений трения и коэффициентов местных сопротивлений.

Уравнения (4) и (5) являются одними из простейших аппроксимаций уравнения Коулбрука-Уайта, применяющегося как для гладких, так и для шероховатых труб:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{mp}}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{e}{3,7D} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda_{mp}}} \right), \quad (8)$$

где e – величина шероховатости стенки трубы, м.

Помимо итеративного численного решения уравнения (8), одним из общепринятых способов определения коэффициента сопротивления трения может быть использование диаграммы Муди (рис. 1) [4]. Значения величин шероховатости поверхностей, приведённые в работе [5] отражены в табл. 2.

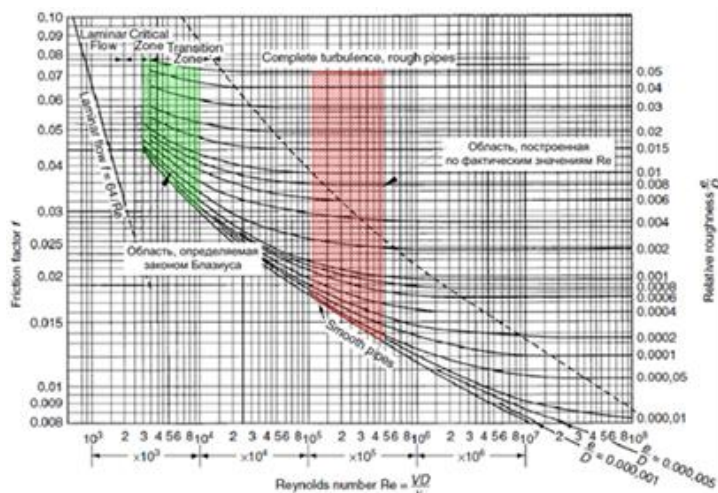


Рис. 1. Диаграмма Муди

Таблица 2

Значения шероховатостей для различных материалов труб

Трубы (материал)/состояние	Шероховатость, мм
Сталь цельнотянутая новая	0,02-0,1
Сталь электросварная новая	0,05-0,1
Сталь оцинкованная новая	0,15
Сталь б/у очищенная	0,15-0,2
Сталь очень ржавая	0,4-3
Сталь ржавая	1-2
Сталь с накипью	1-4
Стеклопластик	0,0001-0,0015

Решим уравнение Коулбрука-Уайта (8) с использованием функции FindRoot в Wolfram Mathematica для интервала скоростей 1-35 м/с и диаметров трубопровода от 0,1 м до 2 м, полагая постоянной концентрацию смеси в трубопроводе. Для каждого значения шероховатости стенок и диаметра трубопровода определим медианные значения (находящиеся посередине выборки, так что половина значений в ней больше неё, а половина — меньше) коэффициента трения для значений $\text{Re} > 10^5$. Произведя аналогичные расчёты для всего массива данных, получим массив медианных коэффициентов трения, зависящих от параметров трубопровода: диаметра и внутренней шероховатости. Среднее медианное отклонение для всей области определения составляет 3,2 %, что меньше 10% ошибки графической интерполяции, возникающей при использовании диаграммы Муди [4].

Используя подбор интерполирующего полинома третьего порядка методом наименьших квадратов в Wolfram Mathematica, получим выражение для определения коэффициента трения:

$$\lambda_{mp} = 0,017 - 0,008D + 0,004D^2 - 0,0008D^3 + 49,212k - 109,03Dk + 100,312D^2k - 27,62D^3k - 29421,8k^2 + 69931,8Dk^2 - 65763D^2k^2 + 18275,2D^3k^2 + 6,991 \times 10^6 k^3 - 1,71 \times 10^7 Dk^3 + 1,62 \times 10^7 D^2k^3 - 4,51 \times 10^6 D^3k^3, \quad (9)$$

где D – диаметр трубопровода, м; k – величина выступа шероховатости, м.

Среднее отклонение значения коэффициента трения от медианных значений составляет 2,1%, что в совокупности со средним отклонением 3,2% самих медианных величин от значений, вычисленных в соответствии с уравнением Коулбрука-Уайта на принятом интервале чисел Рейнольдса, позволяет говорить о достаточно точном описании массива данных аналитическим выражением, исключая зависимость от числа Рейнольдса. Отклонения интерполирующей поверхности от опорных точек медианных значений коэффициента сопротивления проиллюстрированы рис. 2.

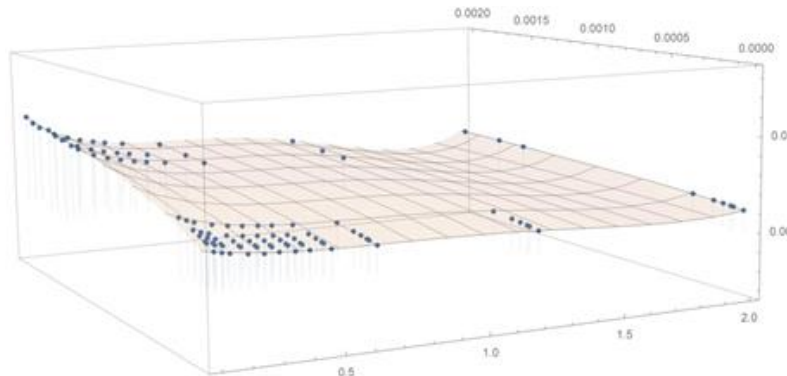


Рис. 2. Интерполирующая поверхность

Коэффициент местного сопротивления определяется в соответствии с выражением [2]:

$$\lambda_m = A_1 B_1 C_1, \quad (10)$$

где A_1 – коэффициент, учитывающий влияние угла δ изогнутости отвода; B_1 – коэффициент, учитывающий влияние относительного радиуса закругления отвода; C_1 – коэффициент, учитывающий влияние относительной вытянутости поперечного сечения отвода.

Для труб круглого сечения коэффициент C_1 принимается равным 1. График зависимости коэффициента B_1 от относительного радиуса скругления описывается зависимостью [2]:

$$\begin{cases} B_1 = 0,21 \left(\frac{R}{D} \right)^{-2,5} & \text{при } \frac{R}{D} \in (0,5-1,0), \\ B_1 = 0,21 \left(\frac{R}{D} \right)^{-0,5} & \text{при } \frac{R}{D} > 1 \end{cases} \quad (11)$$

где R – радиус скругления, м; D – диаметр трубы, м.

При неизвестных параметрах скругления, предполагается принимать радиус скругления равным диаметру трубопровода.

Таким образом, для укрупнённой задачи моделирования сети дегазационного трубопровода, интегрированной в модель ШВС, главным вычисляемым параметром, описывающим местные сопротивления поворотов можно считать коэффициент A_1 , зависящий от угла поворота трубы. Аналитической зависимостью в [2] описывается соотношение коэффициента A_1 и угла поворота до значений угла в 70° . Для полного интервала углов, рекомендуется применять графический метод определения коэффициента. Основываясь на опорных точках, найдём интерполирующую зависимость. Опорные значения приведены в табл. 3.

Таблица 3

Зависимость коэффициента A_1 от угла поворота трубы δ

δ	A_1
0	0,00
20	0,31
30	0,45
45	0,60
60	0,78
75	0,90
90	1,00

δ	A_l
110	1,13
130	1,20
150	1,28
180	1,40

Используя функцию вида

$$A_l = a + b \sin(c\delta + d), \quad (12)$$

определим с помощью метода nonlinear model fit в Wolfram Mathematica коэффициенты a , b , c и d . Полученные значения приведены в табл. 4

Таблица 4

Значения коэффициентов интерполирующей модели

Коэффициенты	Значения
a	-33,6441
b	-35,0272
c	4,4391
d	0,0793138

Отклонения значений, полученных с помощью интерполяционной функции, от опорных значений проиллюстрированы на рис. 3. Среднее отклонение составляет 3%, при этом, если не учитывать не имеющую физического смысла точку 0° , среднее отклонение снижается до 2%, что позволяет говорить о достаточной точности подбора интерполирующей модели.

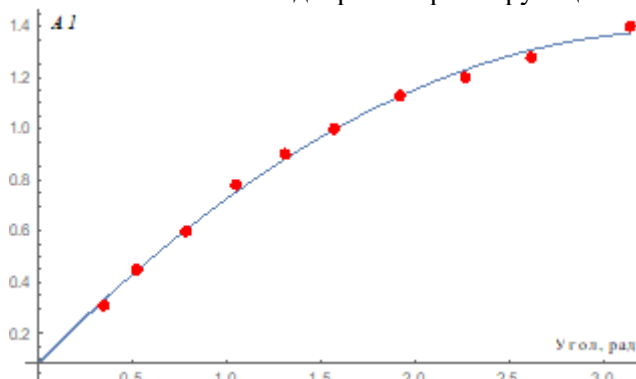


Рис. 3. Интерполяция опорных значений коэффициента A_l

Сопоставим результаты расчётов сопротивлений трубопроводов, вычисленных на основании зависимостей (7), (9), (11) и (12) со значениями, полученными в результате моделирования аэродинамики движения газа в трубопроводах с помощью Ansys Fluent с использованием уравнений Навье-Стокса и модели турбулентности k - ε :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k; \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon, \quad (14)$$

где k – турбулентная кинетическая энергия; ε – диссипация энергии; G_k – генерация турбулентной кинетической энергии скоростными градиентами; G_b – генерация турбулентной кинетической энергии плавучестью. Значения констант, использованных в модели: $C_{1\varepsilon} = 1,44$, $C_{2\varepsilon} = 1,92$, $C_\mu = 0,09$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

Для верификации использовались участки трубопровода длиной 15 м, сопоставлялись при этом как сопротивления прямых участков, так и суммарные сопротивления участков с поворотами. При такой длине трубопровода отсутствуют локальные участки завихрений в зоне оценки среднего статического давления в плоскостях, перпендикулярных осям.

Для различных диаметров трубопроводов и величин шероховатостей сопоставим значения аэродинамических сопротивлений, полученные на основании предлагаемой математической модели, с сопротивлениями, вычисленными на основании моделирования во Fluent на прямых участках, а также на участках с поворотами. Результаты приведены в табл. 5 и 6 соответственно. Приведённые результаты соответствуют интенсивности турбулентности 30%. Для оценки были выбраны граничные точки интервала величин выступов шероховатости.

Таблица 5

Результаты расчётов прямых участков

d, м	k, м	λ	R, кμ	Hfluent, даПа	Qfluent, м ³ /с	Rfluent, кμ	Δ, %
0,23	0,0000015	0,0164	37,3588	5,0808	0,4143	29,6023	20,8
0,23	0,002	0,0372	84,5125	13,6964	0,4143	79,7992	5,6
0,359	0,0000015	0,0151	3,7054	3,0299	1,0110	2,9641	20,0
0,359	0,002	0,0313	7,6821	7,5514	1,0110	7,3873	3,8
0,63	0,0000015	0,0143	0,2105	6,1501	6,2251	0,1587	24,6
0,63	0,002	0,0277	0,4084	16,5621	6,2251	0,4274	4,7

Среднее отклонение для прямых участков составляет 13,25%.

Таблица 6

Результаты расчётов участков с поворотами

d, м	k, м	δ°	A	B	R	Hfluent, даПа	Qfluent, м ³ /с	Rfluent	Δ%
0,23	0,0000015	45	0,6	0,21	50,62	24,55	0,82	36,55	28
0,23	0,0017	45	0,6	0,21	93,57	57,57	0,82	85,68	8
0,23	0,0000015	150	1,31	0,21	69,52	28,07	0,82	41,48	40
0,23	0,0017	150	1,31	0,21	110,17	69,63	0,82	102,92	7
0,359	0,0000015	45	0,6	0,21	5,49	15,13	2,0	3,73	32
0,359	0,0017	45	0,6	0,21	8,74	35,15	2,0	8,71	0,3
0,359	0,0000015	150	1,31	0,21	7,72	87,32	2,0	4,59	41
0,359	0,0017	150	1,31	0,21	11,09	177,02	2,0	10,62	4
0,63	0,0000015	45	0,6	0,21	0,30	8,49	6,22	0,23	26
0,63	0,0017	45	0,6	0,21	0,43	15,33	6,23	0,39	11
0,63	0,0000015	150	1,31	0,21	0,43	11,44	6,23	0,30	31
0,63	0,0017	150	1,31	0,21	0,56	19,95	6,23	0,51	9

Среднее отклонение составляет 19,8%. Учитывая закономерность (3) можно предположить, что среднее отклонение для модели, учитывающей местные сопротивления поворотов, составляет 6,5%.

Вывод. Таким образом, была разработана методология расчёта сопротивлений дегазационных трубопроводов, пригодная для включения в модели ШВС.

Список литературы

1. Инструкция по дегазации угольных шахт. – М.: ЗАО «НТИЦ исследований проблем промышленной безопасности», 2012. – Серия 05. – Вып. 22. – 250 с.
2. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1992. – 627 с.
3. Инструкция по применения схем проветривания выемочных участков шахт с изолированным отводом метана из выработанного пространства с помощью газоотсасывающих установок. Серия 05. Вып. 21. – М.: ЗАО «НТИЦ исследований проблем промышленной безопасности», 2012. – 90 с.
4. Moody L. Friction factors for pipe flow // Transactions of the ASME 66. – 1944. – P. 671-684.
5. Малашкина В.А. Исследование факторов, влияющих на качество метановоздушной смеси, подаваемой от скважин на поверхность угольной шахты по газопроводу из композитного материала // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №8. – С. 234-241

МЕТОДОЛОГИЯ УЧЁТА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫРАБОТАННЫХ ПРОСТРАНСТВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ С ЦЕЛЬЮ ИХ ВКЛЮЧЕНИЯ В МОДЕЛИ ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ**Колегов Г.А.****Томский государственный университет, г. Томск, Россия**

Аннотация. Предложен подход к включению выработанных пространств угольных шахт в математические модели шахтных вентиляционных систем посредством представления пористой среды сетью фиктивных ветвей, учитывающих свойства элементарных репрезентативных объёмов. Обоснован и верифицирован способ расчёта аэродинамического сопротивления ветвей выработанных пространств. Определена практическая значимость полученных результатов, обозначены пути дальнейшего развития методологии.

Ключевые слова: вентиляция, вентиляционная сеть, математическая модель, выработанное пространство, аэродинамическое сопротивление.

Моделирование шахтовой вентиляции решает задачи как организации обеспечения объектов проветривания требуемыми расходами воздуха, так и разработки планов ликвидации аварий. От качества моделей зависит эффективность мероприятий, разрабатываемых на их основе. Качество определяется условиями и объектами, учитываемыми моделями, а также соответствием вводных данных и получаемых результатов фактически наблюдаемой ситуации в шахте. Помимо этого, инструменты и методы моделирования, широко применяемые на горнодобывающих предприятиях, должны обладать достаточной простотой при сохранении определённого уровня точности, и не быть требовательными к вычислительным мощностям. Программный комплекс «Вентиляция 2», наиболее распространённый на Российских предприятиях подземной угледобычи, соответствует этим требованиям, позволяя пользователю решать широкий спектр задач аэродинамики в масштабах шахтной вентиляционной сети (ШВС). В программном обеспечении (ПО) вентиляционные сети представлены связным ориентированным графом, в котором соблюдаются законы сетей (нулевая сумма входящих в узел исходящих из него объёмных расходов и нулевая сумма депрессий замкнутого контура), а также закон сохранения энергии (суммарная потеря энергии в контуре равна поступающей энергии источников) [1]. При этом, депрессия i -й ветви в контуре определяется в соответствии с выражением:

$$h_i = R_i Q_i^2, \quad (1)$$

где Q_i – объёмный расход в ветви i , м³/с; R_i – аэродинамическое сопротивление ветви i , кмюрг; h_i – перепад давления (депрессия) в ветви i , даПа.

Выражение (1) называют квадратичным законом сопротивления, описывающим движение воздушных потоков по горным выработкам при развитом турбулентном режиме [2]. В таком подходе сопротивления определяют геометрические формы каналов, не учитываются вязкое трение слоёв потока. Аэродинамические сопротивления определяются прямыми замерами при проведении воздушно-депресссионных съёмов. Также они могут определяться расчётным путём на основании экстраполяции коэффициентов аэродинамических сопротивлений, полученных эмпирическим путём для характерных типов выработок.

Выработанные пространства угольных шахт, применяющих столбовую систему разработки с полным обрушением, представляют из себя пористые среды, в которых преобладают фильтрационные режимы движения газов [2]. Определение аэродинамических параметров выработанных пространств является задачей, решавшейся с момента возникновения рудничной вентиляции как дисциплины [3]. На современном этапе преобладает подход к их расчёту с использованием средств вычислительной гидродинамики [4-8]. Данный подход учитывает взаимодействие выработанного пространства с ШВС в виде условий, задаваемых на основании одноразовых измерений, и не позволяет оперативно учитывать изменяющиеся условия [6]. Существуют исследования, позволяющие интегрировать выработанные пространства, рассчитываемые методами конечных объёмов, в модели ШВС [9,10]. Однако они требуют значительных вычислительных мощностей. Таким образом, формируется задача разработки применимой методики включения выработанного пространства в вентиляционную модель ШВС.

Для возможности включения выработанного пространства в существующие средства моделирования ШВС, необходимо определить метод описания пористой среды выработанных пространств ветвями связанных графов. Для перехода от трёхмерной задачи фильтрации потоков через каналы переменного сечения и пространственной ориентации, используем подход репрезентативного элементарного объёма, описанного Теруелом и Аддином, представленным на рис. 1 [11]. Предполагается, что зона L формируется из участков D, характеризующихся вариациями размеров структурных элементов выработанного пространства и расстояний между ними p . Предположим, что один элементарный участок D с усреднёнными по нему характеристиками пористости и эквивалентного диаметра структурного элемента может быть представлен ветвью в модели ШВС.

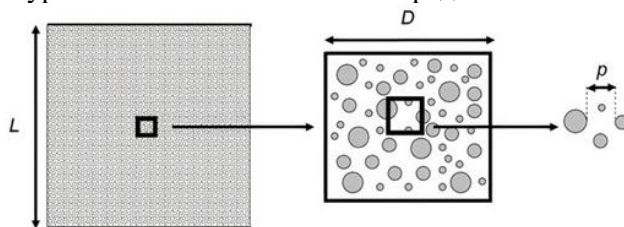


Рис. 1. Формирование зоны выработанного пространства из элементарных объёмов

В работе [4] сопротивление движению потока в остаточных каналах выработанного пространства задано формулой Эргуна:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150\eta u(1-\varepsilon)^2}{d_s^2 \varepsilon^3} + \frac{1,75\rho u^2(1-\varepsilon)}{d_s \varepsilon^3}, \quad (2)$$

где μ – динамическая вязкость, Па·с; ρ – плотность, кг/м³; u – скорость фильтрации, м/с; ε – пористость, дол.ед. d_s – эквивалентный диаметр структурного элемента.

Первое слагаемое в выражении обозначим линейным удельным падением давления, а второе – квадратичным удельным падением давления. Предположим, что выражение (2) возможно использовать для расчёта интегральных аэродинамических сопротивлений фиктивных ветвей выработанного пространства в квазистационарной постановке задачи с целью включения этих ветвей в общую модель вентиляционной сети. Все средства моделирования шахтной вентиляции используют в настоящий момент лишь квадратичные сопротивления, описываемые вторым слагаемым в двучленном законе. Предполагая типичные условия эксплуатации шахт, оценим влияние каждой переменной в уравнении Эргуна на результирующие удельные потери давления при фиксированных значениях всех других переменных. Динамическая вязкость и плотность изменялись в зависимости от температуры при постоянном давлении. Динамическая вязкость определялась в соответствии с выражением:

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (3)$$

где μ_0 – контрольная вязкость при контрольной температуре, Па·с; T – заданная температура, К; T_0 – контрольная температура, для воздуха – 291,15 К; C – постоянная Сазерленда, для воздуха – 120 К.

Плотность изменяется в зависимости от температуры в соответствии с:

$$\rho = \frac{pM}{RT}, \quad (4)$$

где p – давление, Па; M – молярная масса; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

В табл. 1 приведены изменяемые переменные.

Таблица 1

Изменяемые переменные			
Переменная	Начальное значение	Шаг	Конечное значение
t , °С	10	1	29
u , м/с	0,1	0,1	2
ε , дол.ед.	0,05	0,05	0,99
d , м	0,1	0,5	9,5

Принимая скорость фильтрации, пористость и эквивалентный диаметр равными соответственно 0,1 м/с, 0,05 и 0,1 м, получим линейное удельное падение давления 194 Па и квадратичное 1658 Па. В суммарном удельном падении давления для этих условий доля линейного слагаемого составляет 10%. Итерируя по каждой из переменных в таблице 1 при фиксированных других

переменных, обнаружим, что на скоростях фильтрации порядка десятков см/с, предполагаемых преобладающими в выработанных пространствах шахт [13], доля линейного сопротивления в суммарных удельных потерях давления не превышает 10% и сходится к значению 1% на больших скоростях, пористостях и диаметре. Изменение температуры и, следовательно, динамической вязкости и плотности, влияют на изменение удельных перепадов давления в наименьшей степени — имеет смысл предполагать, что принимаемый к учёту в рамках модели всей ШВС изотермический режим позволяет без значительной для конечного результата погрешности рассматривать постоянными эти переменные. Также стоит отметить, что рассматривать определённые значения скорости фильтрации в рамках модели с фиктивными ветвями, задачей которой является определение градиентов давления, не имеет смысла [6]. Следовательно, возможно рассматривать в рамках общей ШВС, в которой вычисляются только квадратичные сопротивления, формулу Эргуна в следующем виде:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{1,75\rho u^2(1-\varepsilon)}{d_s \varepsilon^3}. \quad (5)$$

Предполагая постоянными плотность газовой смеси, а также скорость в фиктивных ветвях, получим удельное падение давления, зависящее от параметров выработанного пространства, приведённых к пористости и эквивалентным диаметрам структурных элементов. На рис. 2 приведена полученная зависимость удельных квадратичных падений давления, обозначенных ΔP_d от эквивалентного диаметра при постоянной пористости, а также падений давления ΔP_ε от пористости при постоянном эквивалентном диаметре.

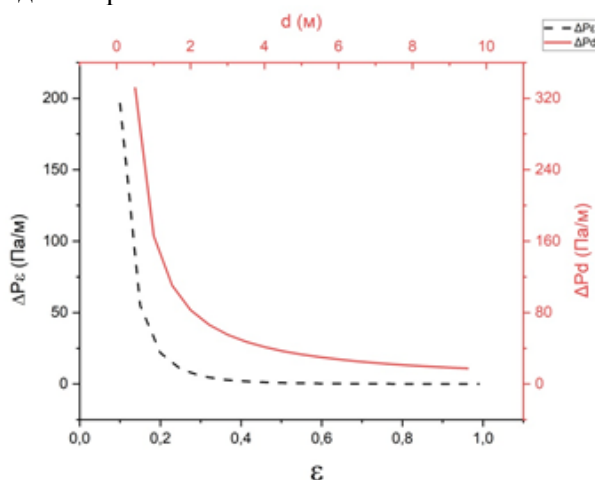


Рис. 2. Изменение квадратичного удельного падения давления

В максимально зажатой среде больший вклад в изменение давления вносит пористость, тогда как при дальнейшем увеличении пористости и эквивалентного диаметра, эквивалентный диаметр вносит более значимый вклад.

Разделив выражение (5) на квадрат расхода воздуха, и переведя перепад давлений в декапаскали, получим формулу для вычисления удельного сопротивления фиктивных ветвей выработанного пространства, зависящую от распределения пористости вдоль выемочного столба:

$$R_{y0} = \frac{2,8\rho(1-\varepsilon)}{\pi^2 d_s^5 \varepsilon^3}. \quad (6)$$

Такая форма выражения сопротивления пригодна для использования в программных продуктах, использующих квадратичный закон перепадов давлений, в частности, в ПО «Вентиляция». Предполагается задание сетки с шагом, эквивалентным полагаемому значимым изменениям пористости вдоль выемочного столба. Пористость возможно вычислять на основании экспорта из специализированного геомеханического ПО наподобие FLAC3D, либо вычислять на основании изменения коэффициента проницаемости, определяемого по соответствующим методикам [5,11,12].

Разработанный алгоритм задания аэродинамического сопротивления выработанного пространства был применён для оценки градиентов давления в выработанных пространствах выемочных столбов, включённых в общую модель ШВС. Для выработанного пространства лавы 5а-7-34 шахты «Распадская» было сделано предположение о равномерном распределении пористости по

ширине столба. Удельные сопротивления рассчитывались для каждого значения пористости, присвоенного фиктивным ветвям расчётной сети на основании (6) и приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения удельных сопротивлений, используемые в расчётной сети выработанного пространства лавы 5а-7-34

Пористость ε	Эквивалентный диаметр d , м	$R_{уд}$, км
0,6	2,5	0,002636
0,5	2,5	0,005694
0,2	2,0	0,543007

Шаг сетки принимался равным около 30 м. Отличительной особенностью ПО «Вентиляция 2», позволяющей быстро создавать подобные модели, является возможность разбития ветвей на произвольное количество узлов, либо на ветви фиксированной длины. На рис. 3 приведено принятое распределение пористости выработанного пространства. Рис. 4 иллюстрирует результирующее распределение избыточного давления в выработанном пространстве. Как видно из результатов, вслед за пористостью, падение давления распределено равномерно вдоль отработанной части выемочного столба. При этом, избыточное давление в действующих выработках варьируется от 2371 Па до 1172 Па, а давление внутри столба падает от 2317,6 Па до 1963,1 Па.

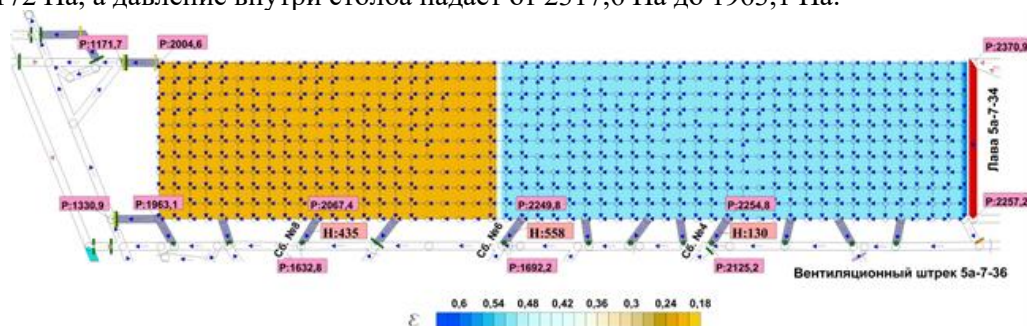


Рис. 3. Моделируемое распределение пористости вдоль выемочного столба 5а-7-34

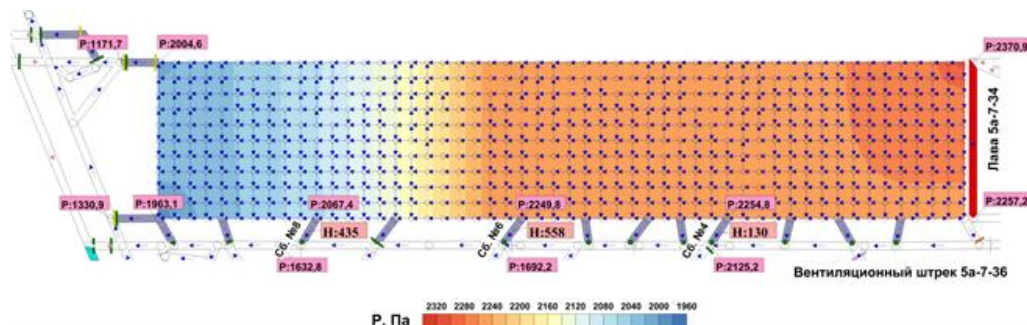


Рис. 4. Распределение избыточных давлений вдоль выемочного столба 5а-7-34

Единственным способом контроля расчётных характеристик выработанного пространства будет являться сопоставление расчётных перепадов давления на изоляционных перемычках в сбойках с фактическими значениями, предполагая, что распределение падений давлений в действующих выработках также соответствует действительности. Изменения перепадов давлений на перемычках также можно использовать для оценки реакции моделируемой изолированной среды на изменения во внешнем контуре, а также для моделирования связей выработанного пространства с атмосферой или выработками, пройденными по пластам-спутникам. Полученные перепады давлений на перемычках и расходы приведены в табл. 3. При этом, расходы служат способом контроля направления утечки — при его изменении расходы станут отрицательными.

Для верификации полученных в модели ШВС значений использовались данные системы станций контроля параметров атмосферы (СКПА), применяющейся на шахте «Распадская». На рис. 5 приведены изменения дифференциального давления на перемычках в сбойках №4, №6 и №8 между вентиляционным штреком 5а-7-36 и конвейерным штреком 5а-7-34. В табл. 3 приведены результаты расчёта депрессий на перемычках в модели и показания датчиков СКПА, усреднённые за неделю.

Распределение перепадов давлений и расходов на изоляционных перемычках, оконтуривающих выемочный столб

Название	Расход, м ³ /с	Депрессия в модели, Па	Депрессия на датчиках СКПА, Па
Сбойка №4	0,24	130	100
Сбойка №6	0,50	558	600
Сбойка №8	0,44	435	400

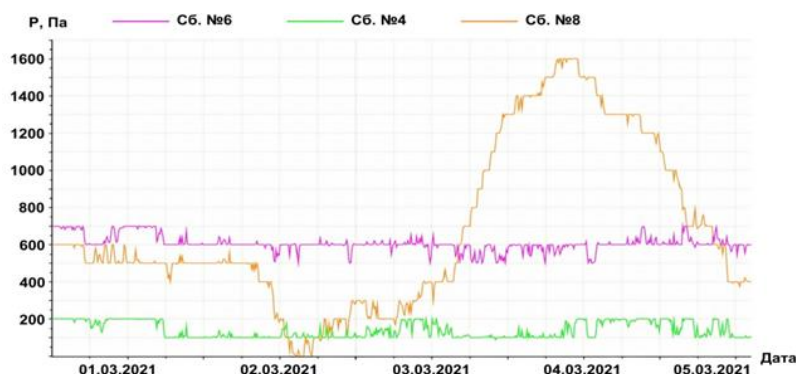


Рис. 5. Перепады давлений на контролируемых СКПА перемычках, Па

В рамках погрешностей датчиков СКПА можно говорить о совпадении модельных значений с усреднёнными по времени данными о фактических перепадах давлений на контролируемых перемычках.

Выводы. Использование подхода разделения пористой среды выработанного пространства на репрезентативные элементарные объёмы позволяет моделировать свойства каждого такого элементарного объёма фиктивными ветвями в ПО «Вентиляция».

Численный анализ формулы Эргуна демонстрирует вклад сил вязкости, не превышающий 10% в суммарные удельные потери давления при порядке скоростей фильтрации, составляющем десятки сантиметров в секунду, что позволяет использовать лишь квадратичное слагаемое для оценки градиентов давлений сети фиктивных ветвей выработанного пространства.

Факторами, определяющими сопротивление выработанного пространства являются распределения пористостей и эквивалентных диаметров структурных элементов.

При включении выработанных пространств в модели шахтных вентиляционных систем, верифицируемыми индикаторами адекватности расчётов будут являться перепады давлений на перемычках, отделяющих пористые сети от действующих выработок.

Для моделирования возможных причин фактического изменения направлений и значений перепадов давлений на перемычках, изолирующих выработанное пространство, возможно использовать расчёт сценариев наподобие образования связи выработанного пространства с атмосферой или с выработками, пройденными по пластам-спутникам;

Определение распределений пористости возможно посредством связи вводных данных «Вентиляции» с геомеханическими ПО, позволяющими определить коэффициенты разрыхления, проницаемости, либо прямую пористость.

Список литературы

1. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю. Программа расчета вентиляционных режимов в шахтах и рудниках // Горная промышленность. – 2007. – №6. – С. 20-23.
2. Ушаков К.З. Аэромеханика вентиляционных потоков в горных выработках. – М.: Недра, 1975. – 167с.
3. Скочинский А.А., Комаров В.Б. Рудничная вентиляция. – М. – Л.: Углетехиздат, 1949. – 442 с.
4. Кобылкин С.С. Обоснование метода расчёта параметров вентиляции шахт на основе объемного моделирования аэрогазодинамических процессов: дисс. ... канд. техн. наук: спец. 05.26.03 : защищена 2011. – М., 2011. – 161 с.
5. Говорухин Ю.М., Фрянов В.Н., Палеев Д.Ю. Численное моделирование взаимодействующих геомеханических и аэродинамических процессов на выемочном участке // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – Вып. 2. – С. 288-299.

6. Gilmore R.C. Computational fluid dynamics modeling of underground coal longwall gob ventilation systems using a developed meshing approach. PhD dissertation (Mechanical Engineering) – Golden, CO, 2015. – 280 p. – URL: <http://hdl.handle.net/11124/20176>.
7. Lolon S. Computational modeling of barometric pressure fluctuation effects on explosible methane-air mixtures in a longwall mine gob. PhD thesis (Mining and Earth Systems Engineering) – Golden, CO, 2017. – 190 p.
8. Jing Shen, Mingran Chang. Effect of nitrogen injection on the variation of oxidation in coal mine gob based on numerical simulation // The Open Fuels and Energy Science Journal. – 2016. – №9. – P. 47-54.
9. Wedding W.C. Multi-scale modeling of mine ventilation system and flow through the gob. PhD. dissertation – Lexington, KY, 2014. – 249 p. – URL: https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1014&context=mng_etds.
10. Wu, F-I, Luo, Y, Chang, X-t. Coupling simulation model between mine ventilation network and gob flow field // The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2019. – URL: https://www.researchgate.net/publication/337580509_Coupling_simulation_model_between_mine_ventilation_network_and_gob_flow_field.
11. Teruel E.F., Uddin R. Macroscopic modeling of turbulence in porous media flows // Mecánica Computacional. – 2008. – Vol XXVII. – P. 265-280.
12. Long Fan, Shimin Liu. A conceptual model to characterize and model compaction behavior and permeability evolution in coal mine gobs // International Journal of Coal Geology. – 2017. – № 172. – P. 60-70.
13. Петушкев Б.Л. Решение трехмерной задачи газовой динамики и переноса метана в угольной шахте с использованием параллельных вычислений. дисс. ...канд.физ.-мат. наук: спец. 01.02.05: защищена 2010. – Томск, 2010. – 150 с.

УДК 536.21

РАЗРАБОТКА ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ СМЕРЗШЕГОСЯ В ВАГОНЕ УГОЛЬНОГО СЫРЬЯ НА УСТАНОВКЕ ДЛЯ ЕГО РАЗМОРОЗКИ

д.т.н. Рыбенко И.А., к.т.н. Сеченов П.А., д.т.н. Калашников С.Н.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В работе представлено решение в двухмерном приближении краевой задачи математической физики нагрева угольного сырья в вагоне на установке для его разморозки с целью оценки длительности процесса нагрева. Задача решается с помощью конечно-разностной аппроксимации уравнения теплопроводности, с использованием которой разработано программное обеспечение с графическим интерфейсом.

Ключевые слова: теплопроводность, аппроксимация, разностная схема, итерационный процесс, нагрев, уголь.

Угольное сырье, доставляемое потребителю в зимнее время, очень часто смерзается и примерзает как к бортам, так и к днищам вагонов [1]. В результате уголь невозможно выгружать из вагонов [2], что приводит к необходимости его дополнительной обработки в установке для разморозки вагонов. В качестве профилактических мер при транспортировке применяют различные смеси солей органического и неорганического происхождения [3], но при транспортировке на дальние расстояния уголь все равно примерзает к стенкам. Процесс продолжительности нагрева вагонов с углем в этой установке в зимний период зависит от возможностей терминала и синхронизации процессов нагрева и переворачивания вагонов. Актуальной задачей при этом является определение степени промерзания угля и оценка времени нагрева, необходимого для обеспечения возможности его разгрузки, которая в работе решается как краевая задача математической физики для уравнения теплопроводности в трехмерном приближении.

В общем случае краевая задача математической физики имеет вид:

$$\begin{cases} c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad}(t)); \\ t(0, x, y, z) = t_0(x, y, z); \\ \left. \lambda \frac{\partial t}{\partial n} \right|_{\partial D} = \alpha(t_{cp} - t). \end{cases} \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C); ρ – плотность, кг/м³; $t = t(\tau, x, y, z)$ – температура, °C; τ – время, с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C); $\vec{v} = \operatorname{grad}(t) = \left(\frac{\partial t}{\partial x}, \frac{\partial t}{\partial y}, \frac{\partial t}{\partial z} \right)$ – вектор

градиента температуры; $\text{div}(v) = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}$ – дивергенция вектора v ; x, y, z – декартовы координаты, м; α – коэффициент теплоотдачи между нагреваемой средой и стенкой вагона, Вт/(м $\cdot$ °C); t_{cp} – температура греющей среды, °C; D – расчетная область для оценки температурного поля; ∂D – граница расчетной области.

Для аппроксимации уравнения теплопроводности применяется четырнадцатиточечный шаблон конечно-разностной схемы Кранка-Николсона [4, 5] (рис. 1).

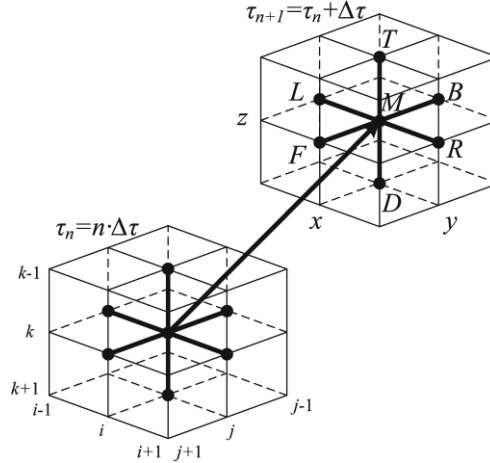


Рис. 1. Четырнадцатиточечный шаблон для аппроксимации уравнения теплопроводности

В результате деления обеих частей уравнения теплопроводности краевой задачи (1) на c_p получим

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c_p} \cdot \Delta t = \frac{\lambda}{c_p} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (2)$$

Заменяя в уравнении (2) $\frac{\lambda}{c_p}$ на коэффициент температуропроводности a

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \Delta t = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

можно записать уравнение (3) в конечно-разностной форме

$$\frac{t_{ijk} - \tilde{t}_{ijk}}{\Delta \tau} - a \left(\frac{t_{i-1,j,k} - 2t_{ijk} + t_{i+1,j,k}}{(\Delta x)^2} + \frac{t_{i,j-1,k} - 2t_{ijk} + t_{i,j+1,k}}{(\Delta y)^2} + \frac{t_{i,j,k-1} - 2t_{ijk} + t_{i,j,k+1}}{(\Delta z)^2} \right) = 0 = h_{ijk}, \quad (4)$$

где $t_{ijk} = t_{ijk}^{n+1}$ – значение температуры в ijk -том узле разностной сетки в последующий $(n+1)$ -й момент времени, в котором искомую температуру предстоит рассчитать; $\tilde{t}_{ijk} = t_{ijk}^n$ – значение температуры в ijk -том узле разностной сетки в предыдущий n -й момент времени, в котором температура известна (рассчитана на предыдущем шаге); a – коэффициент температуропроводности, м ^{2} /с.

В результате умножения уравнения (4) на Δt , и выражения значения температуры в последующий момент времени через предыдущий, получаем уравнение

$$t_{ijk} = \tilde{t}_{ijk} + a \Delta \tau \Lambda, \quad (5)$$

где

$$\Lambda = \left(\frac{t_{i-1,j,k} - 2t_{ijk} + t_{i+1,j,k}}{(\Delta x)^2} + \frac{t_{i,j-1,k} - 2t_{ijk} + t_{i,j+1,k}}{(\Delta y)^2} + \frac{t_{i,j,k-1} - 2t_{ijk} + t_{i,j,k+1}}{(\Delta z)^2} \right).$$

Расчет температурного поля в новый момент времени осуществляется итерационным методом с помощью соотношения

$$t_{ijk}^{(s+1)} = t_{ijk}^{(s)} + \gamma h_{ijk}^{(s)} \quad (6)$$

до момента, пока не выполнится условие

$$|t_{ijk}^{(s+1)} - t_{ijk}^{(s)}| < \varepsilon, \quad (7)$$

где γ – параметр итерационного процесса; ε – заданная точность вычислений.

В расчетах приняты следующие значения теплофизических параметров угля [6]:

- коэффициент теплопроводности $\lambda = 12,5$, Вт/(м $\cdot$ °C);
- удельная теплоемкость $c = 620$, Дж/(кг $\cdot$ °C);
- насыпная плотность $\rho = 2800$, кг/м ^{3} ;
- коэффициент температуропроводности $a = 3,92$ м ^{2} /с.

Коэффициент теплоотдачи между средой и стенкой можно рассчитать по формуле, рекомендуемой М.А. Михеевым [7]:

$$\bar{\alpha} = \frac{\overline{Nu}_{L_{жс}} \lambda_{жс}}{l}, \quad (8)$$

где $\bar{\alpha}$ – усредненный коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; $\overline{Nu}_{L_{жс}}$ – усредненный критерий Нуссельта; $\lambda_{жс}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, равный $0,0259 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; l – длина вагона, м.

Усредненный критерий Нуссельта вычисляется по формуле

$$\overline{Nu}_{L_{жс}} = 0,032 Re_{L_{жс}}^{0,8}; \quad (9)$$

где $Re_{L_{жс}} = \omega_0 l / \nu_{жс}$ – число Рейнольдса; ω_0 – скорость воздуха, $\text{м}/\text{с}$; $\nu_{жс}$ – кинематическая вязкость воздуха, $15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Тогда

$$\bar{\alpha} = 0,032 \frac{\lambda_{жс}}{l^{0,2}} \left(\frac{\omega_0}{\nu_{жс}} \right)^{0,8}, \quad (10)$$

где ν – скорость воздуха, $\text{м}/\text{с}$.

Расчет граничных значений вычисляется с помощью функции $border(t_{\Gamma-1}, t_{\Gamma-2}, \Delta n)$ с помощью соотношения [8]:

$$t_{\Gamma} = \frac{\lambda(4t_{\Gamma-1} - t_{\Gamma-2}) + 2\alpha \cdot \Delta n \cdot t_{cp}}{3\lambda + 2\alpha \cdot \Delta n}, \quad (11)$$

где Γ , $\Gamma-1$, $\Gamma-2$ – соответствующая нумерация узлов сетки внутри расчетной области от границы; Δn – шаг дискретизации по одной из осей Ox , Oy или Oz , м.

Для расчета температуры внутри вагона в ячейках, не являющихся границами, применяется подпрограмма-функция $SH7$ от значений температуры в семи узловых точках шаблона трехмерной конечно-разностной аппроксимации оператора Лапласа в уравнении (1) и от значений шагов дискретизации по координатным осям:

$$\text{div}(\lambda \cdot \text{grad}(t)) \approx SH7(t_L, t_R, t_T, t_D, t_F, t_B, t_M, dx, dy, dz) = \lambda \left(\frac{t_L - 2 \cdot t_M + t_R}{dx^2} + \frac{t_D - 2 \cdot t_M + t_T}{dy^2} + \frac{t_F - 2 \cdot t_M + t_B}{dz^2} \right),$$

где L – левая, M – средняя, R – правая, D – нижняя, T – верхняя, F – передняя, B – задняя точка шаблона, как показано на рис. 1.

Разработанная модель реализована в среде программирования MS Visual Studio 2019 в редакции Visual Studio Community [9, 10] (бесплатная интегрированная среда разработки) на языке программирования C# с графическим интерфейсом, поддерживающим технологию Windows Forms [11].

Пример представления результатов исследования представлен на рис. 2, на котором слева представлено температурное поле как с отображением степени нагрева с помощью оттенков разной яркости, так и с помощью отображения рассчитанных температур.

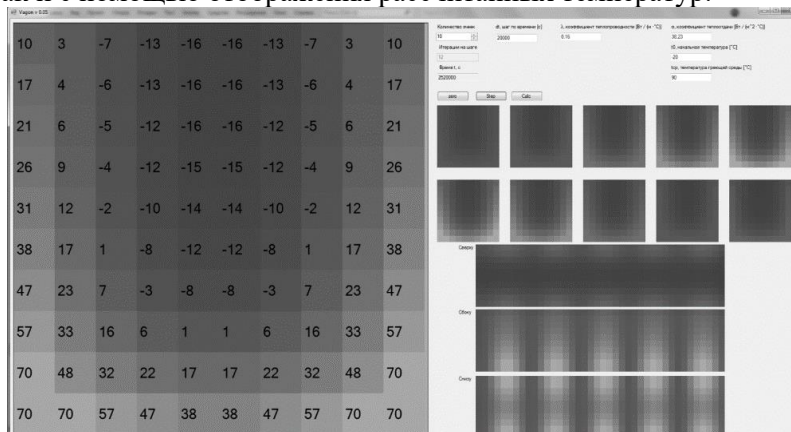


Рис. 2. Интерфейс разработанного программного обеспечения

Справа сверху представлены температурные поля по сечениям вагона: 10 квадратных сечений, параллельных координатной плоскости xOz , под которыми представлены температурные поля на верхней краевой плоскости расчетной трехмерной области (параллельной плоскости xOy), на боковой краевой плоскости расчетной трехмерной области (параллельной плоскости yOz), на нижней краевой плоскости расчетной трехмерной области (параллельной плоскости xOy).

Вывод. Таким образом, разработана и программно реализована детерминированная динамическая математическая модель оценки нестационарного теплового состояния смерзшегося угольного сырья в установке для разморозки вагонов, позволяющая оценить необходимое время нахождения вагона в установке для обеспечения возможности его разгрузки.

Список литературы

1. Парунакян В.Э., Дженчако В.Г. Исследование процесса размораживания железосодержащего сырья в вагонах с использованием компьютерной технологии «DATA MINING» // Вестник Приазовского государственного технического университета. – 2010. – № 20. – С. 267-274.
2. Зырянцев О.А., Гольцев В.А. Исследование теплофизических свойств сыпучих материалов при размораживании // Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее: сборник междунар. науч. – практ. конф. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 42-47.
3. Mixtures of organic and inorganic salts to prevent coal freezing / M.V. Kormer [et al.] // Coke and chemistry. – 2018. – № 2. – Р. 42-48.
4. Sunday F., Edogbanya O. H., Samuel C. Z. Crank Nicolson Method for Solving Parabolic Partial Differential Equations // International Journal of Applied Mathematics and Modeling IJA2M. – 2013. – Vol.1, № 3. – Р. 8-23.
5. Omowo B. J., Longe I. O. Crank-Nicolson and Modified Crank-Nicolson Scheme for One Dimensional Parabolic Equation // International Journal of Applied Mathematics and Theoretical Physics. – 2020. – Vol 6. № 3. – Р. 35-40.
6. Беляев Н.Н., Карпо А.А. Численный расчет процесса размораживания груза в полувагоне // Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Безопасность жизнедеятельности: сборник науч. труд. – Днепропетровск : ГВУЗ ПГАСА, 2015. – № 83. – С. 29-33.
7. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – М.: «Энергия», 1977. – 344 с.
8. Калашников С.Н. Математическое моделирование тепломассообменных процессов в металлургических агрегатах на основе объектно-ориентированной технологии: дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук: спец. 05.13.18 / Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк, 2002. – 330 с.
9. Microsoft Visual Studio [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://visualstudio.microsoft.com/ru/downloads/>.
10. Шарп Д. Microsoft Visual C#. Подробное руководство. – 8-е изд. – СПб.: Питер, 2017. – 848 с.
11. Лаврентьев Д.О., Белаш В.Ю. Использование технологии Windows Forms для разработки информационных систем (на примере электронного журнала) // Вестник Калужского университета. – 2020. – № 4 (49). – С. 82-85.

УДК 004.942

РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ

д.т.н. Рыбенко И.А., к.т.н. Буинцев В.Н., к.т.н. Ермакова Л.А.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены принципы построения динамической математической модели процесса горения отходов углеобогащения в топочной камере на основе методики описания материального и теплового балансов в многофазных реагирующих средах.

Ключевые слова: отходы углеобогащения, процесс горения, топочная камера, скорости химических реакций, материальный и тепловой баланс.

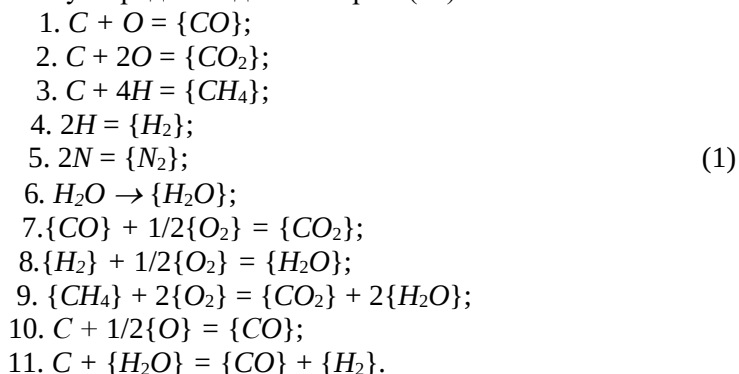
В настоящее время реализация технологий обогащения углей приводит к повсеместному накоплению отходов углеобогащения в Кузбассе. В связи с этим, актуальным является проведение комплексных исследований для разработки технологий утилизации угольных отходов. В работах [1–5] были рассмотрены вопросы разработки математической модели сжигания эмульсионного водоугольного топлива, полученного из отходов углеобогащения, в работах [6, 7] – процессов горения метана и угольной пыли.

Для целей исследования разработана динамическая математическая модель физико-химических процессов в реакционной камере для сжигания отходов углеобогащения на основе методики описания материального и теплового балансов в многофазных реагирующих средах.

В этом случае реакционная камера и процесс горения рассматриваются в следующем приближении:

- реакционная камера имеет два входных потока;
- с первым входным потоком в реакционную камеру поступают отходы углеобогащения, состоящие из влаги (W), минеральной части (A), летучих компонентов (L), коксового остатка (C) и серы (S);
- в состав минеральной части входят следующие вещества: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , MnO , TiO_2 , P_2O_5 , K_2O , Na_2O , в состав летучих – C , O , H , N , коксовый остаток состоит из углерода;
- со вторым входным потоком в реакционную камеру подается воздух, состоящий из O_2 и N_2 ;
- элементами, образующими вышеперечисленные вещества, являются: Fe , C , O , Mn , Si , S , P , Al , Ca , Mg , Na , K , H , Ti , N .

Процессы горения отходов углеобогащения можно представить в виде следующих реакций: выделение летучих (реакции № 1-5), испарение влаги (№ 6), горение летучих (№ 7-9), горение органического углерода (№ 10) взаимодействия углерода с водяным паром (11).



При формировании дифференциальных уравнений динамики изменения состава газовой фазы в топочной камере принято, что изменение объемной концентрации i -го вещества внутри топочного пространства определяется скоростью поступления данного вещества в агрегат, изменением концентрации внутри объема в результате протекания химических реакций и скоростью отвода вещества из топки с отходящими газами:

$$\frac{dn_i^{об}}{d\tau} = n_i^{вх}/V - \sum_{j=1}^k W_j - \vartheta_{газа} \cdot \frac{n_i^{об}}{V}, \tag{2}$$

где $dn_i^{об}$ – объемная концентрация i -го вещества внутри топочной камеры, моль/м³; $n_i^{вх}$ – приход i -го вещества с входным потоком, моль/с; V – объем топочной камеры, м³; W_j – суммарная скорость всех химических превращений i -го вещества в единице объема, моль/(м³·с); k – количество химических реакций с участием i -го вещества; ϑ – объемная скорость выходного газового потока, м³/с.

Изменение концентраций веществ в объеме топки в единицу времени в результате химических превращений определяется разностью скоростей образования и расходования этих веществ в результате протекания всех химических реакций (1) – (11):

$$\begin{aligned}
 \frac{dn_{H_2O}}{d\tau} &= -W_6; \\
 \frac{dn_{\{CO\}}}{d\tau} &= W_1 + W_{10} - W_7 + W_{11}; \\
 \frac{dn_{\{H_2\}}}{d\tau} &= W_4 - W_8 + W_{11}; \\
 \frac{dn_{\{CH_4\}}}{d\tau} &= -W_9; \\
 \frac{dn_{\{CO_2\}}}{d\tau} &= W_2 + W_7 + W_9; \\
 \frac{dn_{\{H_2O\}}}{d\tau} &= W_6 + W_8 + 2W_9 - W_{11}; \\
 \frac{dn_{\{O_2\}}}{d\tau} &= -0,5W_7 - 0,5W_8 - 2W_9 - 0,5W_{10},
 \end{aligned} \tag{3}$$

где $W_1, \dots, W_{11}$ – скорости химических реакций (1) – (11).

Для произвольной реакции $\nu_A A + \nu_B B = \nu_C C + \nu_D D$ скорость определяется следующим образом:

$$W = k n_A^{\nu_A} n_B^{\nu_B}, \quad (4)$$

где n_A, n_B – объемные концентрации реагирующих веществ, моль/м³·с; k – константа скорости химической реакции, 1/с, определяемая как

$$k = k_0 e^{-\frac{E_0}{RT}} \quad (5)$$

где k_0 – коэффициент, зависящий только от природы реагирующих веществ, 1/с; E – энергия активации для реакции, кДж/моль; R – универсальная газовая постоянная, кДж/моль·К; T – температура, К.

Обозначив константы скоростей реакций (1) – (11) через $k_1, \dots, k_{11}$ соответственно, получаем систему дифференциальных уравнений изменения состава газовой фазы во времени внутри топочной камеры в результате сжигания отходов углеобогащения:

$$\begin{aligned} \frac{dn_{H_2O}^{ob}}{d\tau} &= \dot{n}_{H_2O}^{ex} / V - k_6 \dot{n}_{\{H_2O\}}^{ob} \\ \frac{dn_{\{CO\}}^{ob}}{d\tau} &= \dot{n}_{\{CO\}}^{ex} / V - \nu_{\text{зага}} \dot{n}_{\{CO\}}^{ob} \dot{n}_{\{O_2\}}^{ob} - k_7 \dot{n}_{\{CO\}}^{ob} \dot{n}_{\{O_2\}}^{0,5ob} + k_{10} \dot{n}_C^{ob} \dot{n}_{\{O_2\}}^{0,5ob} + k_{11} \dot{n}_C^{ob} \dot{n}_{\{H_2O\}}^{ob} \\ \frac{dn_{\{CO_2\}}^{ob}}{d\tau} &= \dot{n}_{\{CO_2\}}^{ex} / V - \nu_{\text{зага}} \dot{n}_{\{CO_2\}}^{ob} - k_7 \dot{n}_{\{CO\}}^{ob} \dot{n}_{\{O_2\}}^{0,5ob} + k_9 \dot{n}_{\{CH_4\}}^{ob} \dot{n}_{\{O_2\}}^{2ob} \\ \frac{dn_{\{H_2\}}^{ob}}{d\tau} &= \dot{n}_{\{H_2\}}^{ex} / V - \nu_{\text{зага}} \dot{n}_{\{H_2\}}^{ob} - k_8 \dot{n}_{\{H_2\}}^{ob} \dot{n}_{\{O_2\}}^{0,5ob} + k_{11} \dot{n}_C^{ob} \dot{n}_{\{H_2O\}}^{ob} \\ \frac{dn_{\{H_2O\}}^{ob}}{d\tau} &= 0 - \nu_{\text{зага}} \dot{n}_{\{H_2O\}}^{ob} - k_5 \dot{n}_{H_2O}^{ob} + 2k_9 \dot{n}_{\{CH_4\}}^{ob} \dot{n}_{\{O_2\}}^{2ob} + k_8 \dot{n}_{\{H_2\}}^{ob} \dot{n}_{\{O_2\}}^{0,5ob} - k_{11} \dot{n}_C^{ob} \dot{n}_{\{H_2O\}}^{ob} \\ \frac{dn_{\{CH_4\}}^{ob}}{d\tau} &= \dot{n}_{\{CH_4\}}^{ex} / V - k_9 \dot{n}_{\{CH_4\}}^{ob} \dot{n}_{\{O_2\}}^{2ob} \\ \frac{dn_C^{ob}}{d\tau} &= \dot{n}_C^{ex} / V - k_{10} \dot{n}_C^{ob} \dot{n}_{\{O_2\}}^{0,5ob} - k_{11} \dot{n}_C^{ob} \dot{n}_{\{H_2O\}}^{ob} \\ \frac{dn_{\{O_2\}}^{ob}}{d\tau} &= \dot{n}_{\{O_2\}}^{ex} / V - \nu_{\text{зага}} \dot{n}_{\{O_2\}}^{ob} - 0,5k_6 \dot{n}_{\{CO\}}^{ob} \dot{n}_{\{O_2\}}^{0,5ob} - 0,5k_7 \dot{n}_{\{H_2\}}^{ob} \dot{n}_{\{O_2\}}^{0,5ob} - \\ &- 2k_9 \dot{n}_{\{CH_4\}}^{ob} \dot{n}_{\{O_2\}}^{2ob} - 0,5k_{10} \dot{n}_C^{ob} \dot{n}_{\{O_2\}}^{0,5ob} \\ \frac{dn_{\{N_2\}}^{ob}}{d\tau} &= \dot{n}_{\{N_2\}}^{ex} / V - \nu_{\text{зага}} \dot{n}_{\{N_2\}}^{ob} \\ \frac{dG_{\text{зола}}}{d\tau} &= \dot{G}_{\text{зола}}^{ex} / V - \nu_{\text{зага}} m \dot{G}_{\text{зола}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение теплового баланса процесса горения отходов углеобогащения имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{d\tau} &= -\Delta H_6 k_6 n_{H_2O}^{ob} - \Delta H_7 k_7 n_{\{CO\}}^{ob} - \Delta H_8 k_8 n_{\{H_2\}}^{ob} - \Delta H_9 k_9 n_{\{CH_4\}}^{ob} - \\ &- \Delta H_{10} k_{10} n_C^{ob} - \Delta H_{11} k_{11} n_C^{ob} - \dot{Q}_{\text{пот}} - \dot{Q}_{\text{зага}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\Delta H_5 - \Delta H_{11}$ – тепловые эффекты химических реакций (5–11), кДж/моль; $\dot{Q}_{\text{пот}}$ – тепловые потери в окружающую среду, кДж/с; $\dot{Q}_{\text{зага}}$ – теплосодержание выходного потока, кДж/с.

Левая часть уравнения теплового баланса представляет собой скорость ассимиляции тепла в топке, правая часть включает суммарное поглощение (выделение) тепла при протекании всех химических реакций, связанных с превращением веществ, скорость тепловых потерь в окружающую среду и скорость уноса тепла с отходящими газами.

Теплосодержание выходного потока определяется следующим образом:

$$\dot{Q}_{газа} = v_{газа} \rho_{газа} C_{Pгаза}^{6_{вых}} (t - t_0). \quad (8)$$

Тогда уравнение теплового баланса имеет вид:

$$\frac{dt}{d\tau} = (-\Delta H_6 k_6 n^{об}_{H_2O} - \Delta H_7 k_7 n^{об}_{CO} - \Delta H_8 k_8 n^{об}_{H_2} - \Delta H_9 k_9 n^{об}_{CH_4} - \Delta H_{10} k_{10} n^{об}_C - \Delta H_{11} k_{11} n^{об}_C - \dot{Q}_{пот} - v_{газа} \rho_{газа} C_{Pгаза} (t - t_0)) / \rho_{вх} V C_{P_{вх}}, \quad (9)$$

где $\rho_{газа}$, $\rho_{вх}$ – плотность отходящего газа и входного потока, кг/м³; $C_{Pгаза}$, $C_{P_{вх}}$ – теплоемкость отходящего газа и входного потока, кДж/моль·град.

С использованием разработанной модели получены зависимости изменения состава газовой фазы процесса горения отходов углеобогащения в топочной камере. Результаты представлены на рис. 1.

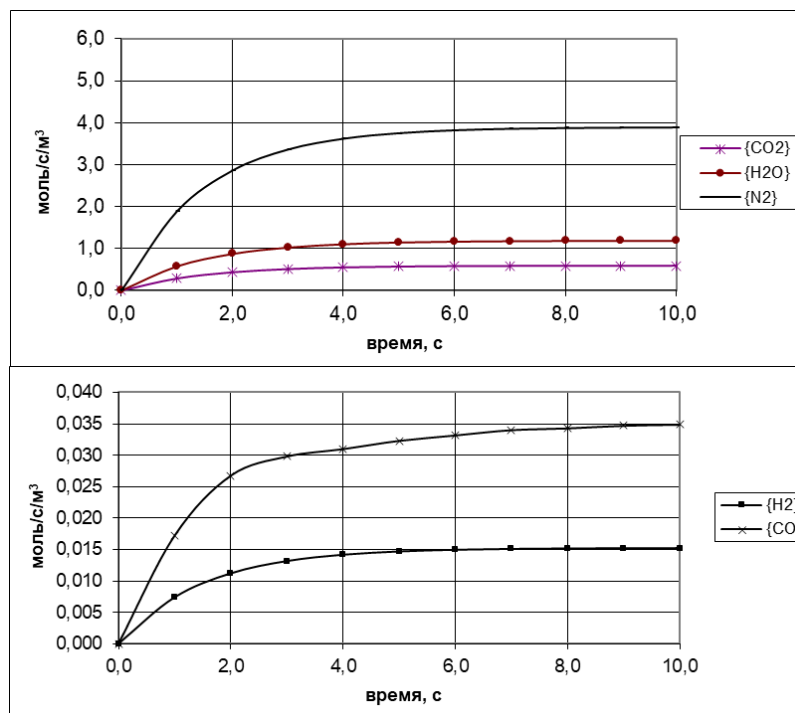


Рис. 1. Изменение состава газовой фазы в топочной камере при сжигании отходов углеобогащения

Вывод. Представленная математическая модель может быть использована при разработке режимов сжигания и создания систем управления автоматизированными энергогенерирующими комплексами.

Список литературы

1. Теоретическое исследование процесса сжигания водоугольного топлива / В.И. Мурко [и др.] // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов : сб. науч. стат. междунар. науч.-практ. конф. – Новокузнецк, 2011. – С. 347 – 352.
2. Мочалов С.П., Рыбенко И.А., Ермакова Л.А. Mechanism and mathematical modeling of coal-water slurry combustion in swirl adiabatic combustion chamber // World Applied Sciences Journal. – 2012. – № 19 (1). – С. 20–25.
3. Исследование реологических и теплофизических характеристик суспензионного угольного топлива на основе тонкодисперсных отходов углеобогащения / Г.Д. Вахрушева [и др.] // Вестник КузГТУ. – 2011. – № 5 – С. 40–47.
4. Разработка мини-ТЭЦ на отходах углеобогащения / А.А. Ивушкин [и др.] // Уголь. – 2010. – №12. – С. 67–68.
5. Rybenko I.A., Ermakova L.A. Modelling of CWS combustion process // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – 45. – 012016.
6. Бойко Е.А., Пачковский С.В. Диффузионно-кинетическая модель горения и тепломассообмена пылеугольных частиц в газовом потоке // ХТТ. – 2008. – № 6. – С. 3–13.
7. Rybenko I.A., Buintsev V.N. Mathematical modeling of the gas phase composition during combustion of a methane-coal mixture // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – 377. – 012056.

**ПРЕДОБРАБОТКА ДАННЫХ С ДАТЧИКОВ АЭРОГАЗОВОГО КОНТРОЛЯ
ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ОТРАБОТКЕ ГАЗОНОСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ
ДЛЯ НЕЙРОСЕТЕВОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ**

Дворянчиков М.В., д.т.н. Павлова Л.Д.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Представлены этапы первичного изучения и предобработки данных, полученных с датчиков аэрогазового контроля для дальнейшего изучения с использованием методов машинного обучения.

Ключевые слова: предобработка данных, анализ данных, нейронная сеть, газовыделение, подземная выработка, прогнозирование.

Метановыделение при разработке газоносных угольных пластов существенно ограничивает возможные нагрузки на очистное и проходческое оборудование, приводит к удорожанию добычи угля вследствие необходимости проведения дополнительных мероприятий по управлению газовыделением [1].

При проведении подземных работ вопрос безопасности стоит на первом месте. Для борьбы с выбросами газа применяется дегазация угольных пластов. Для принятия решения о продолжении или остановки работы важно своевременно распознать и предсказать газодинамическое явление, учесть множество факторов. Когда количество факторов изучаемого явления значительно возрастает, устанавливать какие-либо связи между ними становится весьма затруднительно. Для решения подобных задач предлагается использовать специальный математический аппарат – нейронные сети. После обучения нейронная сеть должна обладать способностью воспроизводить выходные данные по новым входным [2, 3].

Одним из способов обеспечения безопасности горных работ путем непрерывного автоматического контроля параметров метановоздушной смеси являются датчики измерения концентрации метана системы аэрогазового контроля шахты. Датчики позволяют зафиксировать объемную долю метана в воздушной атмосфере и на основе этой информации принять решение по дальнейшему проведению работ. Непрерывное измерение этих и других изменяемых параметров выработки позволяет сформировать базу данных, на основе которой можно применять математические методы анализа влияния факторов друг на друга, построение прогностических моделей.

Таким образом, при прогнозировании концентрации метана в шахте с учётом большого количества измеряемых показателей целесообразно воспользоваться аппаратом нейронных сетей. Важным условием обеспечения эффективного управления газовыделением является корректный прогноз метановыделения на выемочном участке и допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору [4, 5].

Предобработка данных – это важный этап, который включает в себя удаление флуктуаций, нормализацию, трансформацию данных, извлечение полезных характеристик, удаление строк с пустыми значениями или, если возможно, восстановление их значений. От качества предобработки напрямую зависит возможность применения различных методов и их результативность [6].

Данные, зарегистрированные датчиками системы аэрогазодинамического контроля, представляют из себя таблицы с 3 столбцами: статус датчика (работает или нет), исследуемый показатель (концентрация метана в % или скорость метановоздушной смеси), третья позиция – дата и время с точностью до секунд. Датчики располагаются в поступающей вентиляционной струе (*in_lava_C*), струе сопряжения (*kutok_C*) и на исходящей струе (*out_lava_C*). На исходящей струе также находится датчик, измеряющий скорость воздуха (*out_lava_speed*).

На рис. 1 представлено распределение показаний датчика метана на исходящей струе по дням (в промежутке 25 дней) в виде диаграммы размаха.

Прямоугольники на рисунке показывают интерквартильный размах распределения – 25% (Q1) и 75% (Q3) перцентили. Линия внутри прямоугольника показывает медиану распределения. Отрезки отображают весь разброс точек, кроме выбросов, то есть минимальные и максимальные значения, попадающие в промежуток $(Q1 - 1.5 * IQR, Q3 + 1.5 * IQR)$, где $IQR = Q3 - Q1$ – интерквартильный размах. Точками на графике обозначаются выбросы – значения, которые не вписываются в промежуток значений, заданный отрезками.

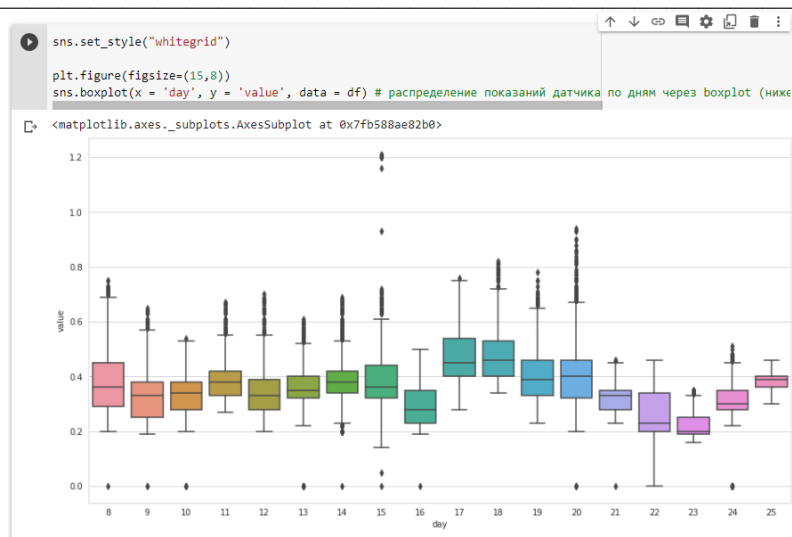


Рис. 1. Диаграмма размаха распределения показаний датчика метана

Для каждого из дней построены графики, показывающие, как изменяются показания по метану в течение суток (рис. 2). На фоне серым цветом представлены показания в другие дни. Жёлтыми прямоугольниками выделяются периоды, когда показания практически не изменяются. Вероятно, в эти периоды очистной забой не работал. В некоторые моменты показания уходят в ноль, датчик в это время неисправен (точки выделены окружностями красного цвета).

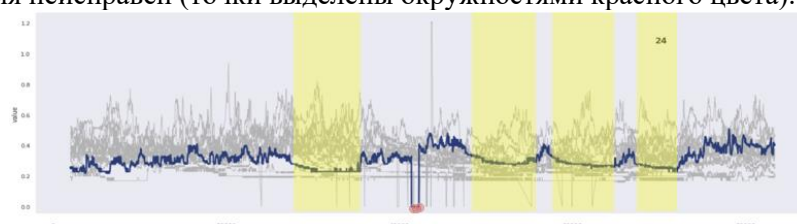


Рис. 2. Показания датчика на исходящей струе за сутки

Один из наборов данных (*out_lava_C*) охватывает меньший интервал времени – 410 часов, чем остальные – 456 часов. Это требует сокращение длины всех наборов до его длины для совместного использования. Кроме того, наборы данных содержат различное количество значений (рис. 3). Датчики срабатывают с разной частотой. Для объединения данных требуется выровнять значения по строкам.

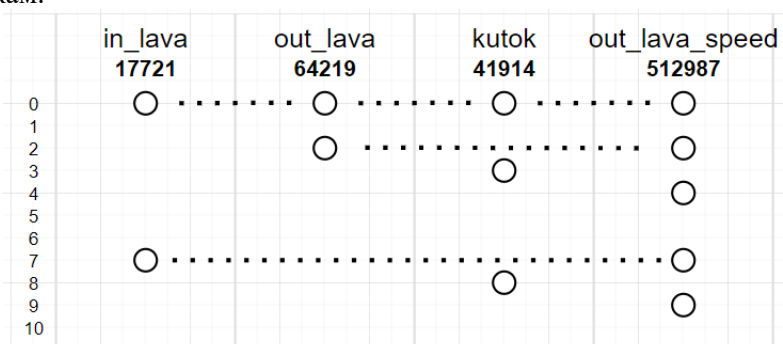


Рис. 3. Иллюстрация поступления информации с датчиков

С учётом того, что параметры изменяются незначительно, если датчик не срабатывает (показания вообще не записываются), для объединения массивов данных можно воспользоваться следующим алгоритмом:

1. Записать в один набор информацию двух наборов.
 2. Отсортировать значения по дате.
 3. Заполнить пропущенные значения предыдущими показаниями по датчику.
 4. Исключить значения, когда датчик уходил в обрыв (статус датчика не равен 0).
- Полученный набор данных представлен на одной шкале на рис. 4.

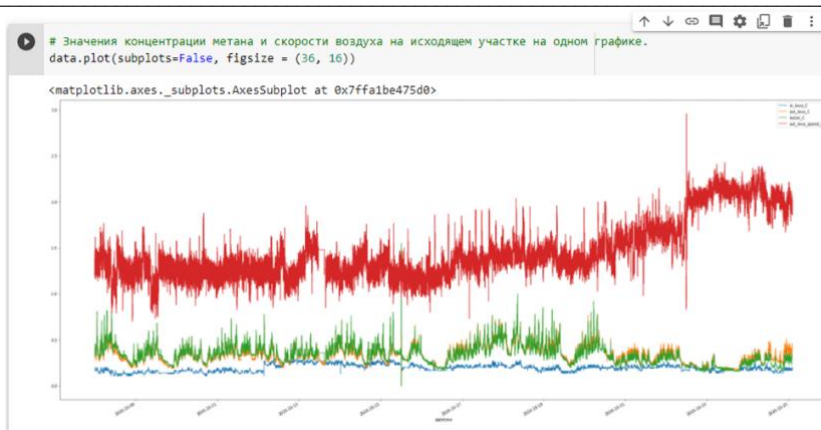


Рис. 4. Объединённые данные на одной шкале

На исходящей струе сопряжения (параметр *out_lava_C*) был зафиксирован выброс, который соответствует превышению допустимой концентрации метана в указанный на рис. 5 период. Значения больше ожидаемых расположены до и после периодов, когда статус был не равен 0 (датчик неисправен), которые были обработаны. Также до возникновения события в какой-то момент времени показания датчика на струе сопряжения были равны нулю. Позже подобная ситуация фиксируется и датчиками, расположенными в поступающей вентиляционной струе и на исходящей, но значения выбросов были обработаны (исключены ранее). Возможно, датчики последовательно были отключены, а затем подключены. И в какой-то настроечный момент дают завышенные показатели.

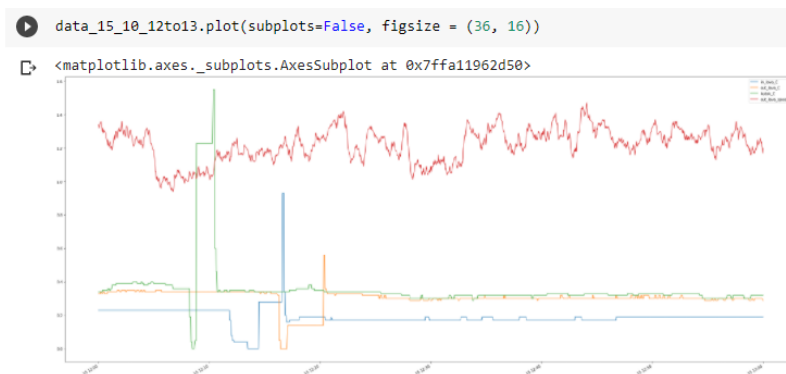


Рис. 5 Флуктуации концентрации метана (промежуток времени с 12:00 до 13:00)

В эти периоды времени датчики переподключались и в связи с возникшими после этого аномалиями (скачками значений в настроечный период) данные значения требуют исключения для дальнейшего анализа.

Остаётся вопрос с неравномерностью интервалов между показаниями датчиков. Если последовательность берется с разными сдвигами между элементами, то нельзя утверждать, что на вход модели подаются вектора данных с одинаковыми параметрами. В связи с этим данные необходимо перенести на равномерную шкалу.

Для обучения, валидации и тестирования выполнено разделение данных на 70% , 20% и 10% соответственно.

Перед обучением нейронной сети важным шагом является масштабирование (шкалирование) данных. После кодирования информации входами и выходами нейронной сети могут быть получены разнородные величины, изменяющиеся в различных диапазонах. Все входные переменные желательно привести к единому диапазону и нормировать (максимальное абсолютное значение входных переменных не должно превышать единицу). В противном случае ошибки, обусловленные переменными, изменяющимися в широком диапазоне, будут сильнее влиять на обучение сети, чем ошибки переменных, изменяющихся в узком диапазоне.

Одним из распространённых способов выполнения масштабирования является стандартизация (standardization), вычисляемая для каждого признака x по формуле:

$$x_{scaled} = \frac{(x - u)}{s},$$

где μ – среднее значение; s – стандартное отклонение.

Среднее и стандартное отклонение следует вычислять только с использованием обучающих данных, чтобы модели не имели доступа к значениям в наборах для проверки и тестирования.

Для визуализации процесса распределения данных до и после применения стандартизации построены графики вида скрипичный сюжет, показывающие плотность вероятности распределения данных, ширина скрипки показывает, как часто встречаются значения с определённой величиной (рис. 6).

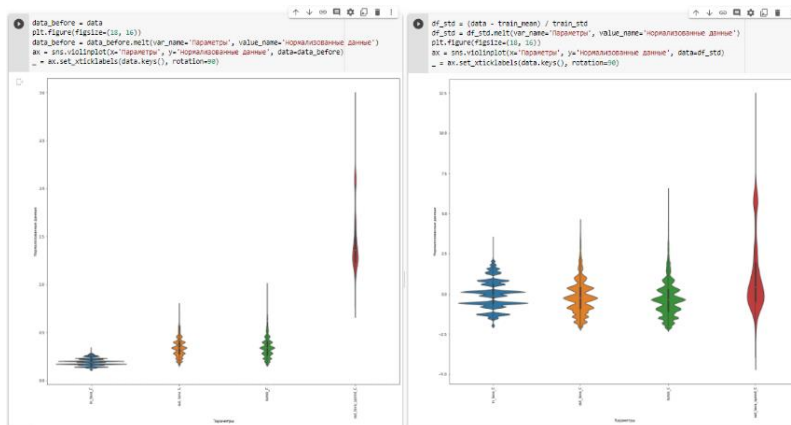


Рис. 6. Скрипичный сюжет. Данные до и после нормализации

В результате приведения к единой безразмерной форме все признаки до начала обучения становятся равны по своему возможному влиянию на объект, что позволяет повысить качество применяемых к ним алгоритмов машинного обучения.

Вывод. Описанные процедуры фильтрации, обработки отсутствующих значений и масштабирования обеспечивают подготовку исходных наборов данных к их применению для методов машинного обучения, таких как нейронные сети.

Список литературы

1. Дворянчиков М.В., Павлова Л.Д. Разработка конвейера исследования данных для определения взаимного влияния подземных горных работ и сейсмических событий // Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах: тр. V междунар. науч.-практ. конф. – Новокузнецк, 2021. – С. 285-290.
2. Дворянчиков М.В., Павлова Л.Д. Обоснование возможности применения нейронной сети для прогнозирования метановыделения при подземной отработке газоносных угольных пластов // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – № 6. – С. 241-244.
3. Нихиль Б., Будума Н., Локашо Н. Основы глубокого обучения. Создание алгоритмов для искусственного интеллекта следующего поколения : пер. с англ. – М. : Манн, Иванов и Фербер, 2020. – 304 с.
4. Шпрехер Д.М., Бабокин Г.И., Колесников Е.Б. Выбор структуры и параметров нейронной сети для прогнозирования концентрации метана в угольном забое // Известия Тульского государственного университета. – 2020. – № 5. – С. 46-57.
5. Tutak Magdalena, Brodny Jarosław. Predicting Methane Concentration in Longwall Regions Using Artificial Neural Networks // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2019. – № 16. – URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph16081406/>
6. García S. Data Preprocessing in Data Mining. – Springer International Publishing, 2015.

УДК 519.876.2

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА СЕТЕВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Ефимов Н.Ю., Завьялов Ю. А., Свинцов М.М., Тишанинов Ю.Ю., к.т.н. А.В. Зимин
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье на основе компьютерного моделирования получены оценки эффективности и производительности метода сетевого программирования в сравнении с соответствующими характеристиками метода полного перебора альтернатив. Оценки получены при решении линейной задачи формирования

плана сервисных улучшений с двумя ограничениями, которая посредством декомпозиции сведена к трем задачам о ранце.

Ключевые слова: метод сетевого программирования, эффективность метода, производительность метода, план сервисных улучшений, линейная задача, декомпозиция, задача о ранце, доминируемое решение.

Введение. Метод сетевого программирования (МСП) разработан для решения сложных задач дискретной оптимизации. В основе метода лежат теоремы академиков Арнольда В.И. и Колмогорова А.Н. о представимости любой непрерывной функции в виде суперпозиции функций меньшего числа переменных. Каждое из таких представлений называется сетевым представлением функции. Условием применения МСП является структурно-подобное сетевое представление функций, описывающих критерий и ограничения задачи. Метод, используя структурное подобие функций, сводит решение сложной задачи к последовательному решению ограниченного числа оценочных задач меньшей размерности, реализуя механизм последовательной композиции решений оценочных подзадач. Оптимальное значение критерия для последней подзадачи является верхней или, соответственно, нижней границей для глобального оптимума исходной задачи максимизации или минимизации [1].

МСП, не гарантируя нахождение глобального оптимума, обладает, в то же время, более высокой производительностью, чем полный перебор (за счет исключения из рассмотрения решений, доминируемых другими решениями). Представляет интерес выполнение исследования, которое позволит получить оценки того, сколько метод теряет в эффективности оптимального решения в сравнении с глобальным оптимумом и насколько выигрывает в производительности в сравнении с методом полного перебора.

Оценки эффективности и производительности МСП получены методом компьютерного моделирования на примере решения задачи формирования плана сервисных улучшений ИТ-провайдера [2].

Содержательная постановка задачи. Динамичная рыночная среда и интенсивное развитие информационных технологий не оставляют выбора ИТ-провайдерам – они вынуждены непрерывно улучшать свою деятельность. В основе эффективного функционирования процесса непрерывных улучшений лежат следующие принципы, сформированные посредством обобщения лучших практик деятельности успешных ИТ-провайдеров:

- понимание бизнес-стратегии клиента и отражения бизнес-стратегии в изменении его бизнес-процессов. Приведение в соответствие бизнес-стратегии клиента стратегии и целям ИТ-провайдера, выражаемое в соответствующем изменении сервисов и ИТ-процессов;
- оценка рыночной зрелости сервисов и процессов ИТ-провайдера путем сравнения состояния финансов, организационной структуры, квалификации персонала, качества процессов и технологий с достижениями рыночной среды;
- определение приоритетов иницируемых оптимизационных проектов, основанное на владении стратегиями клиента и ИТ-провайдера;
- определение метрик и процедур их измерения для оценки качества сервисов и ИТ-процессов в соответствии с бизнес-потребностями;
- поддержка убежденности у персонала ИТ-провайдера, что эффективная ИТ-деятельность в рыночных условиях возможна, если инициация и реализация оптимизационных изменений станут неотъемлемой частью этой деятельности.

Эти принципы применяются для идентификации и устранения проблем в функционировании ИТ-сервисов и процессов. Инициаторами проектов по улучшению ИТ-сервисов и процессов выступает как персонал стадии непрерывных улучшений, для которой эта функция является ключевой обязанностью, так и любой ИТ-специалист других стадий жизненного цикла сервиса. Каждое предложение по улучшению проходит несколько этапов обработки (фильтров). В частности, производится оценка изменений показателей эффективности улучшаемых ИТ-процессов, степени влияния этих изменений на улучшение комплексных показателей эффективности процессов. Оцениваются изменения операционных затрат на функционирование улучшаемого и других ИТ-процессов. В конечном итоге принимается решение по реализации или отклонению проектного предложения. Все принятые предложения попадают в портфель проектов сервисных улучшений. С учетом выделенных инвестиций на очередной плановый период служба сервисных улучшений планирует реализацию наиболее эффективных проектов (формирует текущий план сервисных улучшений).

Формализация задачи формирования оптимального плана сервисных улучшений.

Пусть $P = \{p_i | i = \overline{1, m}\}$ и $\{z(p_i), i = \overline{1, m}\}$ – множество проектов, инициированных персоналом различных стадий жизненного цикла ИТ-сервиса с целью включения в план сервисных улучшений, и соответствующие затраты, необходимые для реализации проектов.

Эффективность $q_i = q(p_i)$ отдельного проекта p_i с точки зрения его вклада в эффективность жизненного цикла в целом определяется значениями $\Delta\mu_{kl}^n(p_i)$ изменений показателей эффективностей процессов стадий жизненного цикла сервиса, которые планируется достичь в результате реализации проекта. Здесь $n = \overline{1, N_{kl}}, l = \overline{1, L_k}, k = \overline{1, K}$, где N_{kl} – количество показателей, эффективности, описывающих процесс l стадии k , L_k – количество процессов на k -ой стадии, p_{ji} – количество стадий жизненного цикла. Принимая весовые коэффициенты $\alpha_{kl}^n(p_i), \sum_{n=1}^{N_{kl}} \alpha_{kl}^n = 1$, для показателей эффективности ИТ-процессов всех стадий, весовые коэффициенты $\beta_{kl}(p_i), \sum_{l=1}^{L_k} \beta_{kl} = 1$ значимости ИТ-процессов для каждой стадии, весовые коэффициенты $\gamma_k(p_i), \sum_{k=1}^K \gamma_k(p_i) = 1$ значимости стадий для жизненного цикла и проводя преобразование шкал измерения локальных показателей $\mu_{kl}^n(p_i)$ к единой дискретной балльной шкале заданного ранга R , определим эффективность $q_i = q(p_i)$ отдельного проекта p_i для жизненного цикла на основе механизма комплексного оценивания следующим образом [3]:

$$q(p_i) = \sum_{k=1}^K \gamma_k(p_i) \sum_{l=1}^{L_k} \beta_{kl}(p_i) \sum_{n=1}^{N_{kl}} \alpha_{kl}^n(p_i) \Delta\mu_{kl}^n(p_i). \quad (1)$$

Обозначим через Δz_{ikl} изменение операционных затрат на функционирование процесса l стадии k , связанные с реализацией проекта p_i . Тогда общее изменение Δz_i эксплуатационных затрат, связанное с реализацией i -го проекта будет

$$\Delta z_i = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_k} \Delta z_{ikl}. \quad (2)$$

Пусть $\Delta z^* > 0$ – изменение операционного бюджета, которое допустимо для поставщика ИТ-услуг в очередном плановом периоде. Пусть также z^* – инвестиции, которые могут быть направлены на реализацию оптимизационных проектов в этом периоде.

Для формализации задачи введем переменную x_i , равную 1, если проект p_i включается в план сервисных улучшений, и 0 – в противном случае. Математическая постановка рассматриваемой задачи формирования плана сервисных улучшений тогда принимает вид:

$$q(x) = \sum_{i=1}^m q(p_i) x_i \rightarrow \max; \quad (3)$$

$$z(x) = \sum_{i=1}^m z(p_i) x_i \leq z^*; \quad (4)$$

$$\Delta z(x) = \sum_{i=1}^m \Delta z_i x_i \leq \Delta z^*. \quad (5)$$

Задача состоит в определении $x_i, i = \overline{1, m}$, доставляющих максимум критерию (3) и при этом удовлетворяющих ограничениям (4) и (5), соответственно, на общий объем инвестиций и на допустимое изменение операционного бюджета в планируемом периоде [4].

Процедура решения задачи. Для решения задачи (3) – (5) применим следующий подход:

1. Сформируем подзадачу (6) - (7) (критерий (3) и первое ограничение (4)) и подзадачу (8) – (9) (критерий (3) и второе ограничение (5)):

$$q(x) = \sum_{i=1}^m q(p_i) x_i \rightarrow \max; \quad (6)$$

$$z(x) = \sum_{i=1}^m z(p_i) x_i \leq z^*; \quad (7)$$

$$q(x) = \sum_{i=1}^m q(p_i) x_i \rightarrow \max; \quad (8)$$

$$\Delta z(x) = \sum_{i=1}^m \Delta z_i x_i \leq \Delta z^*. \quad (9)$$

Задачи (6) - (7) и (8) – (9) являются задачами о ранце и легко решаются методом дихотомического программирования, при применении которого формируются множества Парето-решений, которые удовлетворяют ограничениям, соответственно, на инвестиционные и операционные расходы.

2. Пусть множества $\{\{x_i | i = \overline{1, m}\}^k | k = \overline{1, k_1}\}$ и $\{\{x_i | i = \overline{1, m}\}^k | k = \overline{1, k_2}\}$ описывают множества Парето-решений подзадач (6) - (7) и (8) – (9). Тогда решение задачи (3) – (5) можно получить, решив подзадачу

$$q(x) = \sum_{i=1}^m q(p_i) x_i \xrightarrow{\{\{x_i | i = \overline{1, m}\}^k | k = \overline{1, k_1}\} \cap \{\{x_i | i = \overline{1, m}\}^k | k = \overline{1, k_2}\}} \rightarrow \max, \quad (10)$$

то есть, найдя наилучшее решение на пересечении множеств Парето-решений подзадач (6) - (7) и (8) – (9).

Для исследования эффективности и производительности метода сетевого программирования был разработан специализированный комплекс программ, реализующий описанную процедуру (1) – (2) решения задачи (3) – (5) с формированием множеств $\{\{x_i | i = \overline{1, m}\}^k | k = \overline{1, k_1}\}$ и $\{\{x_i | i =$

$\overline{1, m}^k | k = \overline{1, k_2}$ как на основе дихотомической процедуры, так и посредством перебора допустимых решений соответствующих подзадач (6) - (7) и (8) - (9) [5].

Результаты исследования. В табл. 1 приведены исходные данные для девяти проектов, для которых с помощью программного комплекса решалась задача (3) – (5)

Таблица 1

Исходные данные для решения задачи (3) – (5)

p_i	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9
$q(p_i)$	0,592	0,384	0,420	0,212	0,15	0,576	0,816	1,374	1,334
$\Delta z(p_i)$	5	2	-1	3	-2	0	0	0	0
$z(p_i)$	14	16	19	9	8	10	13	21	7

В табл. 2 приведены результаты 28 решений задачи (3) – (5) с использованием метода дихотомического программирования решения задач (6) - (7) и (8) – (9) для различных комбинаций значений инвестиционных z^* и операционных Δz^* расходов. В верхней строке каждой ячейки приведено число k^{dp} вариантов решений, обработанных методом при поиске оптимума, а в нижней строке - оптимальное значение критерия $q(x)$. Знак $\emptyset$ означает, что не найдено ни одного допустимого решения.

Таблица 2

Результаты решения задачи (3) – (5) с использованием метода дихотомического программирования

$\Delta z^* \backslash z^*$	30	45	60	75	90	105	117
2	197	332	521	593	593	593	593
	$\emptyset$	$\emptyset$	3,792	3,792	3,792	3,792	3,792
4	241	406	637	725	725	725	725
	$\emptyset$	$\emptyset$	3,792	3,792	3,792	3,792	3,792
6	241	406	637	725	725	725	725
	$\emptyset$	$\emptyset$	3,792	3,792	3,792	3,792	3,792
8	329	554	869	989	989	989	989
	$\emptyset$	$\emptyset$	3,792	3,792	3,792	3,792	5,201

В табл. 3 приведены аналогичные результаты 28 решений задачи (3) – (5) с помощью процедуры (1) – (4), на каждом шаге которой выполняется перебор всех допустимых (удовлетворяющих ограничениям) решений задачи.

Таблица 3

Результаты решения задачи (3) – (5) методом перебора допустимых решений

$\Delta z^* \backslash z^*$	30	45	60	75	90	105	117
2	7981	22936	44657	65153	77473	81793	82593
	3,396	4,446	4,842	4,938	5,053	5,053	5,053
4	11117	31960	62321	91009	108257	114305	115425
	3,396	4,552	4,842	4,948	5,053	5,149	5,149
6	15821	45496	88817	129793	154433	163073	228079
	3,396	4,552	4,842	4,99	5,053	5,149	5,149
8	22093	63544	124145	181505	216001	164673	230337
	3,396	4,552	4,842	4,99	5,096	5,201	5,201

Анализ эффективности метода сетевого программирования. Для оценки снижения эффективности решения задачи методом сетевого программирования в сравнении с полным перебором допустимых решений, сформируем, на основе табл. 3 и 2, табл. 4. Каждый элемент таблицы равен отношению разности значений критериев (для соответствующих комбинаций z^* и Δz^*) при решении задачи методом перебора допустимых решений и методом дихотомического программирования, к значению критерия, полученного перебором допустимых решений, выраженному в процентах:

$$\Delta q(x|z^*, \Delta z^*) = \frac{q^{pp}(x|z^*, \Delta z^*) - q^{dp}(x|z^*, \Delta z^*)}{q^{pp}(x|z^*, \Delta z^*)} 100. \quad (11)$$

Таблица 4

Оценка $\Delta q(x)$ потери эффективности метода сетевого программирования в сравнении с методом перебора допустимых решений

Δz \ z	30	45	60	75	90	105	117
2	$\emptyset$ / 3,396	$\emptyset$ / 4,446	0,216853	0,232078	0,249555	0,249555	0,249555
4	$\emptyset$ / 3,396	$\emptyset$ / 4,552	0,216853	0,23363	0,249555	0,263546	0,263546
6	$\emptyset$ / 3,396	$\emptyset$ / 4,552	0,216853	0,24008	0,249555	0,263546	0,263546
8	$\emptyset$ / 3,396	$\emptyset$ / 4,552	0,216853	0,24008	0,255887	0,270909	0

Из табл. 4 следует, что МСП в 8 из 28 случаев (28,57%) не выявил допустимых решений (для всех комбинаций значений $z^* \in \{30, 45\}$ и $\Delta z^* \in \{2, 4, 6, 8\}$ множества решений задачи являются пустыми). В единственном случае МСП нашел глобальный оптимум, во всех остальных 19 случаях МСП теряет в эффективности в сравнении с перебором допустимых решений от 21 до 27 %.

Анализ производительности метода дихотомического программирования. Для оценки производительности метода сетевого программирования в сравнении с методом полного перебора допустимых решений, сформируем, на основе табл. 3 и 2, табл. 5, каждый элемент которой равен отношению количества решений, обработанных при решении задачи методом перебора допустимых решений и количества решений, обрабатываемых методом дихотомического программирования для соответствующих значений z^* и Δz^*

$$k(x|z^*, \Delta z^*) = \frac{k^{pp}(x|z^*, \Delta z^*)}{k^{dp}(x|z^*, \Delta z^*)}. \quad (15)$$

Значение $k(x|z^*, \Delta z^*)$ показывает, во сколько раз производительность метода дихотомического программирования превосходит производительность метода полного перебора допустимых решений для соответствующей комбинации значений z^* и Δz^* .

Таблица 5

Оценка $k(x|z^*, \Delta z^*)$ выигрыша в производительности метода сетевого программирования в сравнении с методом перебора допустимых решений

Δz^* \ z^*	30	45	60	75	90	105	117
2	40,5126	69,0843	85,7140	109,870	130,645	137,930	139,2799
4	46,1286	78,7192	97,8351	125,529	149,32	157,662	159,2068
6	65,6473	112,059	139,430	179,024	213,011	224,928	314,5917
8	67,15198	114,7004	142,8596	183,5238	218,4034	166,5046	232,8988

Из табл. 5 следует, что использование метода сетевого программирования при решении задачи (3) – (5) процедурой (1) – (2) обеспечивает превосходство в производительности в сравнении с методом перебора допустимых решений в 40 – 232 раза.

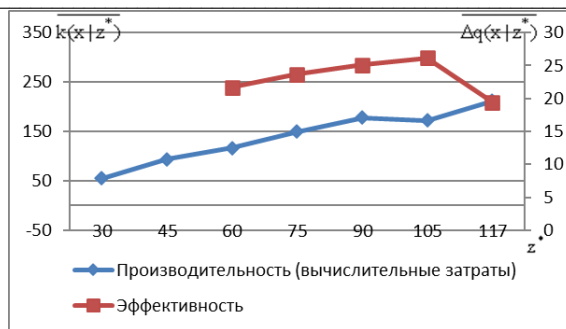
В табл. 6 приведены средние по Δz^* значения потери эффективности МСП и его выигрыша в производительности в сравнении с методом перебора допустимых решений для различных значений z^* .

Таблица 6

Средние значения $\overline{\Delta q(x|z^*)}$ потери эффективности МСП и его выигрыша в производительности

z^*	30	45	60	75	90	105	117
$\overline{\Delta q(x z^*)}$	$\emptyset$	$\emptyset$	21,6852	23,6467	25,1137	26,1889	19,4161
$\overline{k(x z^*)}$	54,86	93,640	116,459	149,487	177,845	171,756	211,494

Рис. 1 отображает данные табл. 6 в виде графиков соответствующих функций.

Рис. 1. Графики функций $\Delta q(x|z^*)$ и $k(x|z^*)$

Для $z^* \in \{30, 45\}$ МСП, обрабатывая от 197 до 554 решений, не находит решения задач. В то же время метод перебора допустимых решений, обрабатывая в 54 – 93 раза больше альтернатив, решения находит. Для других значений z^* эффективность МСП на 19 -26 % ниже глобального оптимума, но его производительность в 116 -211 раз выше производительности метода перебора допустимых решений.

Заключение. Во многих важных, с точки зрения практики, случаях не обязательно искать наилучшее (оптимальное) решение. Иногда достаточно ограничиться нахождением *рационального решения*, которое обеспечивает не наилучшее, но удовлетворительное значение эффективности, в то время как нахождение оптимума требует слишком много времени и/или ресурсов.

Список литературы

1. Бурков В.Н., Буркова И.В. Теория сетевого программирования и ее применение для формирования портфеля проектов // XII всероссийское совещание по проблемам управления, 16–19 июля 2014 г. / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – Москва, 2014. – С. 5265-5275.
2. Механизмы принятия решений в цифровой экономике / С.А. Баркалов [и др.] // Тенденции развития интернет и цифровой экономики : тр. III всерос. науч.-практ. конф. – 2020. – С. 12-16.
3. Комплексный механизм управления развитием организации / В.Н. Бурков [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2019. – Т. 19. – № 3. – С. 79-93.
4. Зимин А.В., Буркова И.В., Зимин В.В. Модели и механизмы управления эффективностью ИТ-процессов // Системы управления и информационные технологии. – 2019. – № 4(78). – С. 37-41.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020618300. Программный комплекс для формирования плана оптимизации ИТ-процессов / Зимин А.В.; правообладатель Зимин А.В. (RU). Заявка № 2020617415; дата поступл. 13.07.2020; дата регистр. 22.07.2020.

УДК 519.876.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА СЕТЕВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ

¹к.т.н. А.В. Зимин, ²д.т.н. И.В. Буркова, ³А.А. Селезнев, ¹д.т.н. В.В. Зимин

1 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

2 – Институт проблем управления РАН, г. Москва, Россия

3 – ООО «ТК-СДН», г. Новосибирск, Россия

Аннотация. В статье приведены, полученные на основе компьютерного моделирования, оценки эффективности метода сетевого программирования. Оценки получены при решении задачи планирования реализации инвестиционных проектов по совершенствованию бизнес-процессов компании.

Ключевые слова: метод сетевого программирования, глобальный и локальный оптимумы, эффективность метода, план оптимизации бизнес-процессов, задача о ранце, доминируемое решение.

Введение. Теория сетевого программирования разработана для решения сложных задач дискретной оптимизации [1-3]. Условием применения метода является структурно-подобное сетевое представление критерия и ограничений задачи. Метод сводит решение сложной задачи к ре-

шению ограниченного числа упорядоченных подзадач меньшей размерности, реализуя механизм последовательной композиции решений подзадач. Оптимальное значение критерия для последней подзадачи является верхней или, соответственно, нижней границей для глобального оптимума исходной задачи максимизации или минимизации. То есть метод, хоть и обладает высокой эффективностью, но не гарантирует нахождение глобального оптимума задачи. Представляет интерес вопрос о получении оценок того, насколько оптимум, найденный методом сетевого программирования, уступает глобальному оптимуму.

Получение таких оценок выполним на примере важной и регулярно решаемой компанией, применяющей методологию непрерывных улучшений, задаче планирования, которая состоит в формировании совокупности проектов совершенствования реализуемых компанией бизнес-процессов. Проекты направлены на достижение целей принятой в компании стратегии развития, обеспечивающей ее конкурентоспособность. Как правило, требуемый размер средств на выполнение всех инициированных службой непрерывных улучшений проектов по совершенствованию бизнес-процессов, превышает возможности текущего бюджета развития. Это предопределяет необходимость отбора из инициированных проектов наиболее эффективного подмножества.

В задаче требуется построить зависимость оптимальной эффективности планируемой совокупности проектов от размеров инвестиционных (затрат на реализацию планируемых проектов) и от изменения операционных расходов (на функционирование усовершенствованных бизнес-процессов). Предполагается также, что каждый реализуемый проект может изменить показатели эффективности нескольких бизнес-процессов.

Для исследования эффективности метода сетевого программирования был разработан специализированный программный комплекс, который реализует два метода решения рассматриваемой задачи: метод сетевого программирования и метод полного перебора ее решений [4, 5].

Формализация задачи. Пусть $P = \{p_i | i = \overline{1, n}\}$ – множество инициированных службой непрерывных улучшений проектов по совершенствованию бизнес-процессов. Обозначим через j номер произвольного бизнес-процесса. Пусть $j = \overline{1, m}$ и α_{ji} – изменение показателя эффективности j -го процесса в результате реализации i -го проекта. Тогда $\alpha_i = \sum_{j=1}^m \beta_j \alpha_{ji}$ – суммарный эффект от i -го проекта. Весовой коэффициент β_j отражает значимость бизнес-процесса j при реализации принятой компанией стратегией развития. Изменение значений β_j отражает обновление стратегического курса компании.

Пусть также c_i – инвестиционные затраты на реализацию проекта p_i , а c_i^o – изменение операционных затрат на функционирование бизнес-процессов, обусловленных реализацией i -го проекта. Введем переменную x_i , равную 1, если проект p_i включается в план для реализации и 0 – в противном случае. Теперь рассматриваемая задача формализуется следующим образом:

$$\alpha(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$c(x) = \sum_{i=1}^n c_i x_i \leq c^*, \quad (2)$$

$$c^o(x) = \sum_{i=1}^n c_i^o x_i \leq c^o. \quad (3)$$

Здесь c^* и c^o – заданные ограничения на инвестиционные и операционные затраты.

Метод решения задачи. Для решения задачи (1) – (3) применим следующий подход:

1. Декомпозируем задачу на подзадачи (4) – (5) и (6) – (7):

$$\alpha(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \rightarrow \max, \quad (4)$$

$$c(x) = \sum_{i=1}^n c_i x_i \leq c^*, \quad (5)$$

$$\alpha(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \rightarrow \max, \quad (6)$$

$$c^o(x) = \sum_{i=1}^n c_i^o x_i \leq c^o. \quad (7)$$

Задачи (4) – (5) и (6) – (7) являются задачами о ранце и легко решаются методом дихотомического программирования.

2. Пусть множества $\{\{x_i | i = \overline{1, n}\}^k | k = \overline{1, k_1}\}$ и $\{\{x_i | i = \overline{1, n}\}^k | k = \overline{1, k_2}\}$ описывают, соответственно, совокупности Парето решений задач ((4) – (5) и (6) – (7), полученные в результате решения задач методом дихотомического программирования. Тогда решение задачи (1) – (3) можно получить, решив задачу

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \xrightarrow{\{\{x_i | i = \overline{1, n}\}^k | k = \overline{1, k_1}\} \cap \{\{x_i | i = \overline{1, n}\}^k | k = \overline{1, k_2}\}} \max. \quad (8)$$

Разработанный комплекс программ, реализующий описанную процедуру, был использован для исследования зависимости планируемого портфеля проектов развития компании и его эффективности от размера инвестиционных и изменения операционных затрат [6].

Пример решения задачи (1) – (3). Пусть табл. 1 описывает исходные данные задачи (1).

Таблица 1

Пример исходных данных задачи

p_i	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9
α_i	0,592	0,384	0,420	0,212	0,15	0,576	0,816	1,374	1,334
c^0	5	2	-1	3	-2	0	0	0	0
c_i	14	16	19	9	8	10	13	21	7

Применение предложенного метода решения задачи (1) – (3) для значений $c^*=90$, $c^0=5$ дает три лучших решения, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Лучшие решения задачи (1) – (3) при $c^*=90$, $c^0=5$

$x = x_1x_2x_3x_4x_5$	1 0 1 0 0	0 1 1 0 0	0 1 0 1 1
$x_6x_7x_8x_9$	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1
α_i	5,112	4,904	4,846
c^0	4	1	3
c_i	84	86	84

Исследование зависимости эффективностей портфеля проектов от размера инвестиционных и операционных затрат. В табл. 3 приведены результаты решения задачи формирования портфеля проектов методом сетевого программирования для различных комбинаций значений c^* и c^0 . Шаг изменения инвестиционных затрат выбран равным 15 единицам, а шаг изменения операционных расходов равен 2 единицам.

Таблица 3

Зависимость эффективности портфеля проектов от размера инвестиционных и изменения операционных затрат (метод сетевого программирования)

$c^0 \backslash c^*$	30	45	60	75	90	105	117
0	2,726	3,524	4,1	4,1	4,67	4,67	4,67
2	2,726	3,524	4,1	4,1	4,67	5,054	5,054
4	2,726	3,524	4,1	4,1	4,67	5,266	5,266
6	2,726	3,524	4,1	4,1	4,67	5,266	5,266
8	2,726	3,524	4,1	4,1	4,67	5,266	5,646
10	2,726	3,524	4,1	4,1	4,67	5,266	5,858

Визуализация данных табл. 3 представлена на рис. 1.

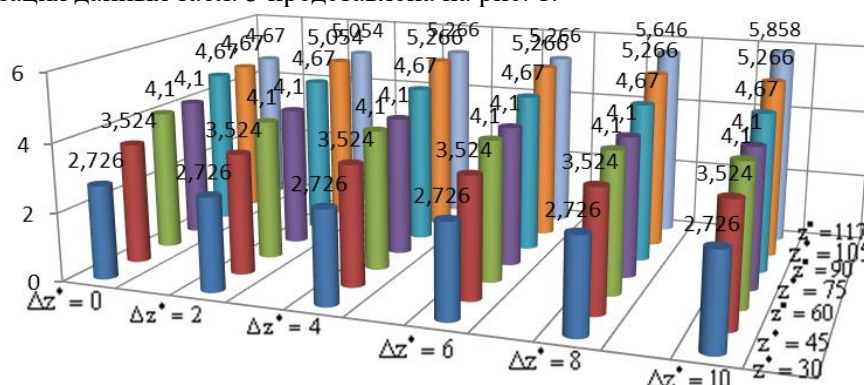


Рис. 1. Диаграмма, описывающая зависимость эффективности портфеля проектов от размера инвестиционных и изменения операционных затрат (метод сетевого программирования - МСП)

В табл. 4 приведены эффективности решений для соответствующих значений инвестиционных и операционных расходов, полученные методом полного перебора.

Таблица 4

Зависимость эффективности портфеля проектов от размера инвестиционных и изменения операционных затрат (метод полного перебора)

$\begin{matrix} c^* \\ c^0 \end{matrix}$	30	45	60	75	90	105	117
0	2,726	3,524	4,25	4,52	4,67	4,67	4,67
2	2,726	3,524	4,25	4,634	4,904	5,054	5,054
4	2,726	3,524	4,312	4,634	4,904	5,266	5,266
6	2,742	3,524	4,312	4,842	5,262	5,266	5,266
8	2,742	3,524	4,328	4,904	5,324	5,646	5,646
10	2,742	3,524	4,328	4,904	5,324	5,708	5,858

Визуализация данных табл. 4 представлена на рис 2.

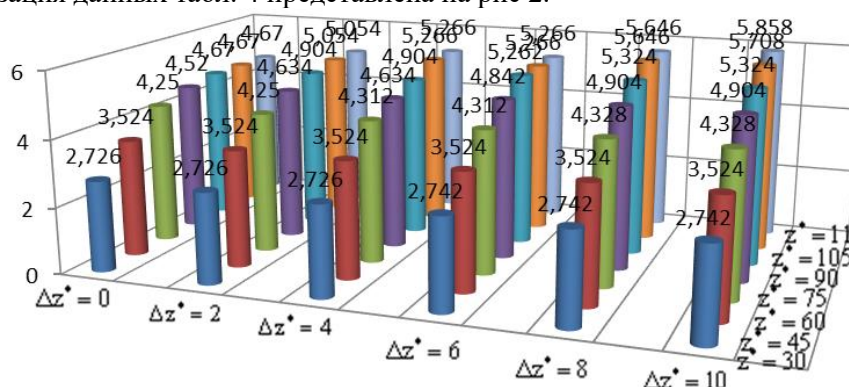


Рис. 2. Диаграмма, описывающая эффективности портфеля проектов от размера инвестиционных и изменения операционных затрат (метод полного перебора)

Оценка эффективности метода сетевого программирования. Построим на базе табл. 4 и 3 табл. 5, в который каждый элемент вычисляется на основе значений соответствующих элементов табл. 4 и 5 по формуле:

$$100(\alpha_{pp}^{opt} - \alpha_{sp}^{opt}) / \alpha_{pp}^{opt}. \quad (9)$$

Таблица 5

Отклонение (в процентах) значения критерия решений, полученного методом сетевого программирования и методом полного перебора

$\begin{matrix} c^* \\ c^0 \end{matrix}$	30	45	60	75	90	105	117
0	0	0	3,5	9,3	0	0	0
2	0	0	3,5	11,5	0,234	0	0
4	0	0	4,9	11,5	0,234	0	0
6	0,5	0	4,9	15,3	0,592	0	0
8	0,5	0	5,3	16,4	0,654	7,1	0
10	0,5	0	5,3	16,4	0,654	7,1	0

Визуализация данных табл. 5 представлена на рис. 3. Обработка полученных данных показывает, что в 20 из 42 случаев (47,6%) метод сетевого программирования обеспечивает нахождение глобального оптимума. Среднее отклонение эффективностей решений метода сетевого программирования от глобального оптимума составляет 2,98%, максимальное отклонение - 16,4%, медиана отклонений равна 2,34%.

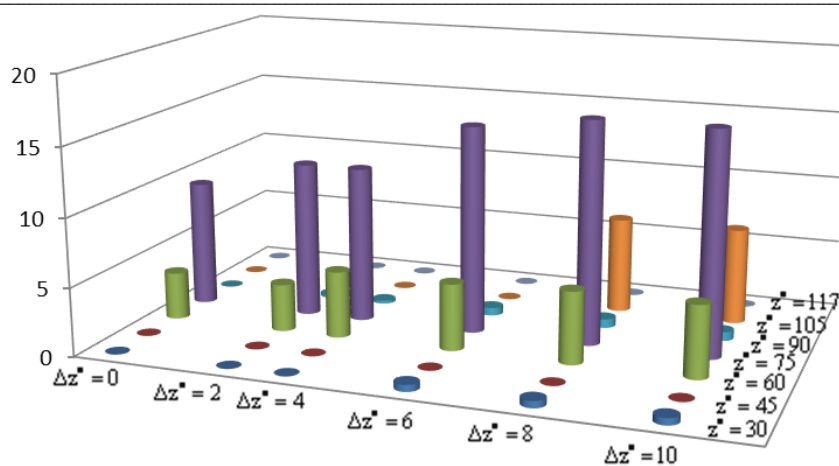


Рис. 3. Диаграмма, описывающая отклонение эффективностей решений, полученных методом сетевого программирования и методом полного перебора

Вывод. Полученные оценки показывают высокую эффективность метода сетевого программирования. Однако представляет значительный практический интерес следующие исследования, выполнение которых позволит лучше оценить свойства метода сетевого программирования:

- величины проигрыша в качестве решений, получаемых методом, с выигрышем в его производительности в сравнении с соответствующими характеристиками метода полного перебора;
- чувствительности/устойчивости метода к качеству исходных данных решаемых задач.

Список литературы

1. Бурков В.Н., Буркова И.В. Теория сетевого программирования и ее применение для формирования портфеля проектов // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014, 16–19 июля 2014 г. / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – Москва, 2014. – С. 5265-5275.
2. Механизмы принятия решений в цифровой экономике / С.А. Баркалов [и др.] // Тенденции развития интернет и цифровой экономики: труды III всерос. науч.-практ. конф. – 2020. – С. 12-16.
3. Россихина Л.В., Егоров Е.Ю. Приближенный алгоритм решения задачи обслуживания заявок на ремонт элементов интегрированной системы безопасности // Вестник Воронежского института ФСИИ Росси. – 2020. – № 2. – С. 129–133.
4. Баркалов С.А., Глушков А.Ю., Моисеев С.И. Решение задачи распределения ресурсов дискретного типа методами линейного программирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2020. – Т. 20. – № 2. – С. 26-35.
5. Зимин А.В., Буркова И.В., Зимин В.В. Применение компьютерного моделирования для исследования решений игровой задачи управления компетенциями // Системы управления и информационные технологии. – 2020. – №4(82) – С. 32–34.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020618300. Программный комплекс для формирования плана оптимизации ИТ-процессов / Зимин А.В.; правообладатель Зимин А.В. (RU). Заявка № 2020617415; дата поступл. 13.07.2020; дата регистр. 22.07.2020.

УДК [621.372.632+621.313.333.1]:622.23.05

РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ В ЦЕПИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНОГО ПОДЪЕМА

Островляничик В.Ю., Поползин И.Ю., Кубарев В.А., Маршев Д.А.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье проводится анализ режимов работы подъемного двигателя в соответствии с различными участками тахограммы установки и связи механических и электрических координат привода. Проведенный в работе анализ позволяет получить и реализовать методики определения параметров преобразователя частоты в цепи ротора и разработки алгоритма управления мостами преобразователя для обеспечения требуемой тахограммы и диаграммы движущих усилий.

Ключевые слова: шахтная подъемная установка, машина асинхронный двигатель с фазным ротором, преобразователь частоты, режимы работы, тахограмма, момент асинхронного двигателя.

Электропривод ШПУ должен обеспечивать формирование требуемой тахограммы движения сосудов в стволе, а также требуемую диаграмму движущих усилий (моментов). Вид тахограммы зависит от типа подъемных сосудов. При построении тахограмм исходные данные, в частности, величины скоростей и ускорений на участках тахограммы, регламентируются требованиями безопасности подъема и технологическими ограничениями. Для электроприводов подъемных установок на основе асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР) возможно применение преобразователя частоты в цепи ротора для регулирования скорости и момента двигателя.

При проектировании преобразователя возникает задача определения режимов работы его мостов и направления тока между ними. Поскольку усилие на валу АДФР определяет ток ротора, целесообразно для анализа режимов работы мостов предлагаемого преобразователя, показанного на рисунке 1, проанализировать режимы работы подъемной установки в соответствии с [1, 2] и сопоставить их с известными режимами работы приводного двигателя [3].

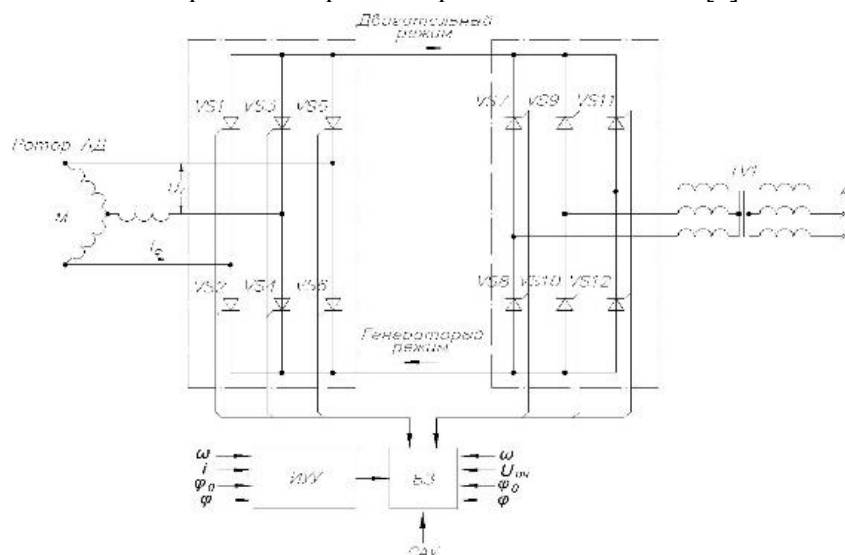


Рис. 1. Схема предлагаемого преобразователя

Анализ режимов работы мостов преобразователя можно произвести на примере фазы А ротора. При этом составляются эквивалентная схема и уравнения Кирхгофа для цепи $i_{ap}-B1-B2c-i_{ac}-i_{bc}-B3c-i_{bp}$ (рис. 1). По приведенной схеме видно, что постоянный ток между мостами имеет одно и то же направление; отсюда возникает задача определения указанного направления в зависимости от режима работы привода. При этом указанное направление сохраняется независимо от направления передачи мощности в роторной цепи. В этой связи необходимо провести исследования реализации технологического процесса. Для подъемной установки возможна работа во всех квадрантах механической характеристики, т.е. основное уравнение движения привода в данном случае имеет вид:

$$\pm M_{дв} \mp M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где $M_{дв}$ – момент, развиваемый двигателем; M_c – статический момент (момент нагрузки) на валу двигателя; J_{Σ} – приведенный к барабану машины суммарный момент инерции всех движущихся частей установки.

При этом для АДФР реализуются механические характеристики, определяемые [6] в соответствии с выражением:

$$M = \frac{3U_1^2 R_2'}{\omega_0 s \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma})^2 \right]} = \frac{3U_1^2 R_2'}{(\omega_0 - \omega) \left[\left(R_1 + \frac{\omega_1 R_2'}{\omega_1 - \omega} \right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma})^2 \right]}, \quad (2)$$

где M – электромагнитный момент двигателя; U_1 – напряжение на статоре; R_1 , R_2' – соответственно активное сопротивление цепи статора и приведенное активное сопротивление цепи ротора соответственно; $X_{1\sigma}$, $X_{2\sigma}$ – индуктивные сопротивления рассеяния цепей статора и ротора соответственно; s – скольжение; ω_1 – синхронная скорость; ω – скорость вращения ротора.

Электромеханическая характеристика АДФР определяется в соответствии с выражением:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma})^2}} = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{\omega_1 R_2'}{\omega_1 - \omega} \right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma})^2}}, \quad (3)$$

где I_2' – приведенный ток ротора.

Соответствующие выражениям (2) и (3) характеристики приведены на рис. 2 [6].

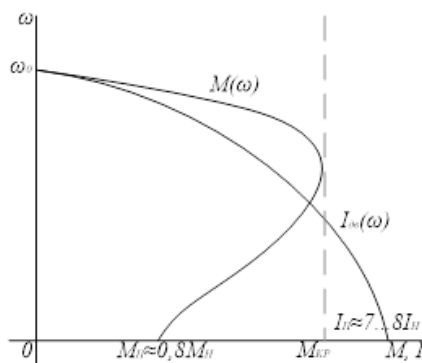


Рис. 2. Механическая $M(\omega)$ и электромеханическая $I(\omega)$ характеристики АДФР

Из приведенных на рис. 2 характеристик следует, что основной задачей управления АДФР является поддержание момента двигателя на уровне, не превышающем $M_{кр}$. В этом случае величина тока двигателя не превышает 2...2,5 номинального значения, что соответствует перегрузочной способности двигателя, определяемой критическим моментом. Для АДФР критический момент определяется как:

$$M_{кр} = 2 \div 2,5 M_H,$$

этому моменту соответствует ток двигателя:

$$I_1 = 2 \div 2,5 I_{1H}.$$

В схеме с роторной станцией соблюдение этого условия обеспечивается введением в цепь ротора добавочных сопротивлений. В рассматриваемом случае исследуется возможность при введении в ротор преобразователя частоты не только получения аналогичного ограничения тока и момента АДФР, но и оптимизации процессов управления и коррекции жесткости механической характеристики АДФР.

Для определения режимов работы приводного двигателя необходимо совместно построить тахограмму подъемной установки и диаграмму движущих усилий или моментов. На рис. 3 показаны типовая тахограмма ω и диаграммы моментов при подъеме груженого M_g и порожнего M_n судов работы подъемной установки для цикла подъема.

Режимы, соответствующие показанным на рис. 3 участкам цикла «Подъем», могут быть осуществлены с помощью двигательного режима АДФР и режима противовключения. При этом двигатель либо отдает энергию в сеть через ротор при растормаживании (участок 1), движении в кривых (участок 2) и разгоне (участок 3), либо потребляет энергию из сети через статор, преобразуя механическую энергию движения в электрическую. В этом случае выход ротора закорочен (участок 4). При торможении (участки 5-7) энергия отдается ротором в сеть.

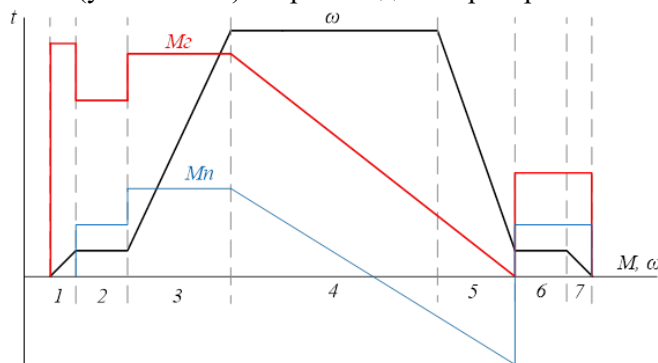


Рис. 3. Типовые диаграммы технологического процесса «Подъем»

Выражения (1) для двигательного режима примут вид:

$$\begin{cases} M_{дв} - M_c = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}; \\ \frac{d\omega}{dt} \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Для режима противовключения выражения (1) запишутся как:

$$\begin{cases} -M_{\text{ДВ}} + M_{\text{С}} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}; \\ \frac{d\omega}{dt} < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Из [4] следует, что действующие значения ЭДС статора и ротора соответственно равны: $E_1 = \omega_1 k_{\text{об1}} \Phi_{\text{в}}$, $E_2 = 4,44 f s \omega_1 k_{\text{об2}} \Phi_{\text{в}}$, где E_1 , E_2 – ЭДС статора и ротора соответственно, f – частота напряжения на статоре; $\Phi_{\text{в}}$ – суммарный магнитный поток в воздушном зазоре; $k_{\text{об}}$ – обмоточный коэффициент соответствующей обмотки; Ψ_1 , Ψ_2 – потокосцепления статора и ротора соответственно; ω_1 , ω_2 – угловые частоты ЭДС статора и ротора; s – скольжение. С учетом этого, имеем:

$$E_2 = \frac{E_1}{k_T} s. \quad (6)$$

Учитывая, что $\frac{E_1}{k_T} = E_{2н}$ и $s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}$, получим:

$$E_2 = E_{2н} \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1}\right) = E_{2н} - k_E \omega_2 = E_{2н} - E_{\omega}, \quad (7)$$

где $k_E = \frac{E_1}{k_T \omega_1}$ – коэффициент внутренней обратной связи машины по ЭДС, $E_{2н}$ – ЭДС неподвижного ротора, E_{ω} – противо-ЭДС ротора.

При включении в ее ротор преобразователя частоты с выходным напряжением $U_{нч}$ суммарная ЭДС ротора определится как:

$$E_{2\Sigma} = E_{2н} - E_{\omega} \pm U_{нч}. \quad (8)$$

С учетом (6-8), выражение для тока ротора I_2 примет вид: $E_{2н} - E_{\omega} \pm U_{нч} = I_2 R (T_2 p + 1)$, или:

$$I_2 = \frac{E_{2н} - E_{\omega} \pm U_{нч}}{R(T_2 p + 1)}, \quad (9)$$

где R_1 , R_2 – активное сопротивление соответственно статора и ротора, T_2 – электромагнитная постоянная времени цепи ротора [5].

Момент машины определится по следующему соотношению:

$$M = I_2 \frac{3Z_{\text{л}} L_{\mu} E_{2н}}{2\omega R_1}, \quad (10)$$

Выражениям (6-10) соответствует структурная схема машины, приведенная на рис. 4.

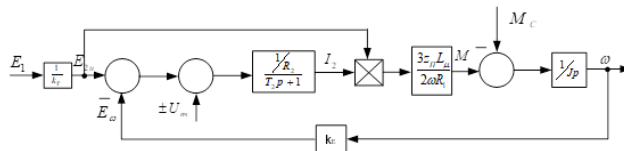


Рис. 4. Структурная схема АДФР с преобразователем частоты в роторе

Выводы. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

Включение в ротор преобразователя частоты с выходным напряжением, направленным встречно ЭДС ротора, обеспечивает возможность непрерывного управления моментом (током) двигателя в заданных ограничениях предела. Этот режим можно рекомендовать при $\omega \leq 0,5\omega_1$.

Включение в ротор преобразователя частоты с выходным напряжением, направленным согласно ЭДС ротора, обеспечит оптимизацию основных характеристик управления. При этом в обоих случаях необходимо равенство частоты и фазы ЭДС и напряжения.

Требуемые режимы работы электропривода обеспечиваются при включении в цепь ротора преобразователя частоты при $\omega = (0,7..0,8)\omega_1$ вследствие малости абсолютных значений амплитуды и частоты E_2 .

Полученные в работе соотношения позволяют получить и реализовать методики определения параметров преобразователя частоты в цепи ротора, а также получить требуемый алгоритм управления мостами преобразователя.

Список литературы

1. Шахтный подъем / В.Р. Бежок [и др.]; под общ. ред. Б.А. Грядущего и В.А. Корсуна. – Донецк : ООО «Юго-Восток ЛТД», 2007. – 624 с.
2. Песвианидзе А.В. Расчет шахтных подъемных установок. – М. : Недра, 1992. – 250 с.

3. Ostrovlyanchik V.Yu., Popolzin I.Yu., Kubarev V.A. Operation algorithm of the hoist electric drive based on a doubly-fed machine with combined control // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 206. – Iss.1. – 012040.

4. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.: Академия, 2005. – 544 с.

5. Ostrovlyanchik V.Yu., Popolzin I.Yu. Equivalent model of a dually-fed machine for electric drive control systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 351. – Iss.1. – 012017.

6. Основы автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин [и др.]. – М.: Энергия, 1974. – 568 с.

УДК 621.313.333.1:622.23.05

АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ В ЦЕПИ РОТОРА

Островляничик В.Ю., Поползин И.Ю., Кубарев В.А., Маршев Д.А.

Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы построения математической модели асинхронного электродвигателя с преобразователем частоты в цепи ротора, а также получения методики построения такой модели.

Ключевые слова: шахтная подъемная установка, машина асинхронный двигатель с фазным ротором, преобразователь частоты, математическая модель.

Асинхронный электропривод с роторной станцией находит широкое применение в существующих шахтных подъемных установках. Использование данных систем электропривода обусловлено их относительной простотой, а также возможностью обеспечения требуемого для подъемных установок диапазона регулирования скорости с сохранением перегрузочной способности на уровне для естественной механической характеристики. При этом существующие электроприводы на основе асинхронных электродвигателей с фазным ротором обладают низкой энергоэффективностью вследствие бесполезного рассеивания энергии скольжения машины на сопротивлениях роторной станции. Кроме того, регулирование скорости машины с помощью ступенчатого переключения сопротивлений роторной станции ведет к броскам тока ротора, что приводит к возникновению излишних динамических нагрузок в канатах и ударах в механических передачах, а также не позволяет плавно регулировать скорость движения сосуда.

Одним из способов решения данной задачи является использование схемы машины двойного питания [1-5], при этом к ротору машины подключается преобразователь частоты с полностью управляемыми вентильными группами [6] и для работы на низких скоростях преобразователь тока ротора с активной нагрузкой. Возможным способом решения указанной задачи также является использование в роторной цепи преобразователя частоты, который изменяет ЭДС ротора так, что обеспечиваются характеристики аналогичные изменению активного сопротивления ротора. При этом реализуется оптимальная система управления, обеспечивающая оптимизацию технологического процесса «Подъем» с электроприводом переменного тока, а также решаются проблемы энергосбережения для данного класса электроприводов.

Рассмотрим схему замещения фазы ротора асинхронного двигателя (АДФР) (рис. 1).

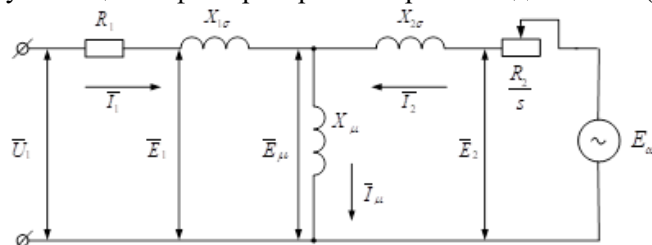


Рис. 1. Т-образная схема замещения фазы асинхронного двигателя

На рис. 1 и далее приняты следующие обозначения: U_1 – напряжение на статоре; R_1, R_2 – активное сопротивление соответственно статора и ротора; $X_{1\sigma}, X_{2\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния соответственно статора и ротора; I_1, I_2 – ток соответственно статора и ротора; E_1, E_2 – ЭДС

соответственно статора и ротора; E_μ, I_μ – ЭДС намагничивающей ветви и ток намагничивания; E_ω – ЭДС, обусловленная вращением ротора в магнитном поле, s – скольжение.

Для анализа взаимодействия полей статора и ротора и электромеханического преобразования энергии в машине в данном случае обычно применяется метод двухфазной обобщенной электрической машины.

Запишем уравнения электрического равновесия обмоток статора и ротора машины в комплексной форме для схемы замещения, показанной на рис. 1, в системе координат, вращающейся с произвольной скоростью ω_κ совместно с уравнением формирования электромагнитного момента:

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} + j\omega_\kappa \bar{\Psi}_2 + R_1; \\ 0 = \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt} + j(\omega_\kappa - \omega) \bar{\Psi}_1 + R_2 \bar{I}; \\ M = -\frac{3}{2} z_\Pi L_\mu [\bar{I}_1 \times \bar{I}_2], \end{cases} \quad (1)$$

Где $\bar{\Psi}_1, \bar{\Psi}_2$ – комплексные значения потокоцепления статора и ротора соответственно; z_Π – число пар полюсов на статоре машины.

Для описания асинхронных двигателей обычно рекомендуется применять систему координат, связанную с обмоткой фазы A статора (система $\alpha\beta$).

При использовании системы координат $\alpha\beta$ ($\omega_\kappa=0$) система уравнений (1), записанная относительно проекций изображающих векторов, примет вид:

$$\begin{cases} u_{1\alpha} = R_2 i_{1\alpha} + L_{1\sigma} \frac{di_{1\alpha}}{dt} + L_\mu \frac{di_{2\alpha}}{dt}; \\ u_{1\beta} = R_1 i_{1\beta} + L_{1\sigma} \frac{di_{1\beta}}{dt} + L_\mu \frac{di_{2\beta}}{dt}; \\ 0 = R_2 i_{2\alpha} + L_{2\sigma} \frac{di_{2\alpha}}{dt} + L_\mu \frac{di_{1\alpha}}{dt} + \omega(L_{2\sigma} i_{2\beta} + L_\mu i_{1\beta}); \\ 0 = R_2 i_{2\beta} + L_{2\sigma} \frac{di_{2\beta}}{dt} + L_\mu \frac{di_{1\beta}}{dt} - \omega(L_{2\sigma} i_{2\alpha} + L_\mu i_{1\alpha}); \\ M = \frac{3}{2} z_\Pi L_\mu (i_{2\alpha} i_{1\beta} - i_{1\alpha} i_{2\beta}). \end{cases} \quad (2)$$

Для построения алгоритмической структуры АДФР осуществим замену $\frac{d}{dt} \rightarrow p$ в системе уравнений (2) и применим операторный метод:

$$\begin{cases} u_{1\alpha} = R_2 i_{1\alpha} + pL_{1\sigma} i_{1\alpha} + pL_\mu i_{2\alpha}; \\ u_{1\beta} = R_1 i_{1\beta} + pL_{1\sigma} i_{1\beta} + pL_\mu i_{2\beta}; \\ 0 = R_2 i_{2\alpha} + pL_{2\sigma} i_{2\alpha} + pL_\mu i_{1\alpha} + \omega(L_{2\sigma} i_{2\beta} + L_\mu i_{1\beta}); \\ 0 = R_2 i_{2\beta} + pL_{2\sigma} i_{2\beta} + pL_\mu i_{1\beta} - \omega(L_{2\sigma} i_{2\alpha} + L_\mu i_{1\alpha}); \\ M = \frac{3}{2} z_\Pi L_\mu (i_{2\alpha} i_{1\beta} - i_{1\alpha} i_{2\beta}). \end{cases} \quad (3)$$

Введем следующие обозначения: $T_1 = \frac{L_{1\sigma}}{R_1}$ – электромагнитная постоянная времени статора; $T_2 = \frac{L_{2\sigma}}{R_2}$ – электромагнитная постоянная времени ротора.

С учетом вновь введенных обозначений преобразуем систему (3) и приведем ее к следующему виду, дополнив основным уравнением движения привода:

$$\begin{cases} i_{1\alpha} = \frac{1/R_1}{T_1 p + 1} (u_{1\alpha} - pL_\mu i_{2\alpha}); \\ i_{1\beta} = \frac{1/R_1}{T_1 p + 1} (u_{1\beta} - pL_\mu i_{2\beta}); \\ i_{2\alpha} = \frac{1/R_2}{T_2 p + 1} [-pL_\mu i_{1\alpha} - \omega(L_{2\sigma} i_{2\beta} + L_\mu i_{1\beta})]; \\ i_{2\beta} = \frac{1/R_2}{T_2 p + 1} [-pL_\mu i_{1\beta} + \omega(L_{2\sigma} i_{2\alpha} + L_\mu i_{1\alpha})]; \\ M = \frac{3}{2} z_\Pi L_\mu (i_{2\alpha} i_{1\beta} - i_{1\alpha} i_{2\beta}); \\ \omega = (M - M_C) \frac{1}{Jp}, \end{cases} \quad (4)$$

где M_c – статический момент на валу двигателя, J – суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции механической части привода.

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} e_{2\alpha} &= pL_\mu i_{2\alpha}, e_{2\beta} = pL_\mu i_{2\beta}, e_{1\alpha} = pL_\mu i_{1\alpha}, e_{1\beta} = pL_\mu i_{1\beta}, e_{2\alpha\omega} = \omega(L_{2\sigma}i_{2\beta} + L_\mu i_{1\beta}); \\ e_{2\beta\omega} &= \omega(L_{2\sigma}i_{2\alpha} + L_\mu i_{1\alpha}), \end{aligned} \quad (5)$$

где $e_{2\alpha}$ – проекция на ось α ЭДС, наводимой в фазе α статора магнитным потоком обмотки фазы α ротора; $e_{2\beta}$ – проекция на ось β ЭДС, наводимой в фазе β статора магнитным потоком обмотки фазы β ротора; $e_{1\alpha}$ – проекция на ось α ЭДС, наводимой в фазе α ротора магнитным потоком обмотки фазы α статора; $e_{1\beta}$ – проекция на ось β ЭДС, наводимой в фазе β ротора магнитным потоком обмотки фазы β статора; $e_{2\alpha\omega}$ – проекция на ось α ЭДС, наводимой в обмотке фазы α ротора обмотками фазы β статора и ротора и обусловленной вращением ротора относительно статора; $e_{2\beta\omega}$ – проекция на ось β ЭДС, наводимой в обмотке фазы β ротора обмотками фазы α статора и ротора и обусловленной вращением ротора относительно статора.

Подставив выражения (5) в (4), получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} i_{1\alpha} = \frac{1/R_1}{T_1 p + 1} (u_{1\alpha} - e_{2\alpha}); \\ i_{1\beta} = \frac{1/R_1}{T_1 p + 1} (u_{1\beta} - e_{2\beta}); \\ i_{2\alpha} = \frac{1/R_2}{T_2 p + 1} [-e_{1\alpha} - e_{2\alpha\omega}]; \\ i_{2\beta} = \frac{1/R_2}{T_2 p + 1} [-e_{1\beta} + e_{2\beta\omega}]; \\ M = \frac{3}{2} z_{II} L_\mu (i_{2\alpha} i_{1\beta} - i_{1\alpha} i_{2\beta}); \\ \omega = (M - M_c) \frac{1}{Jp}. \end{cases} \quad (6)$$

Системе уравнений (6) можно поставить в соответствие структурную схему АДФР в системе координат α - β , приведенную на рис. 2.

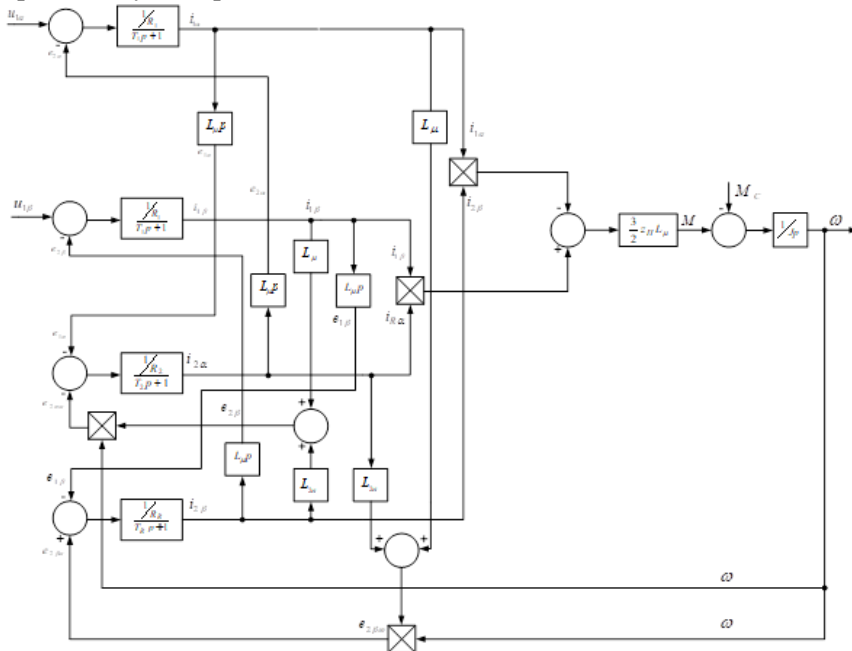


Рис. 2. Структурная схема АДФР в системе неподвижных координат α - β , связанных с осью A статора

Для упрощения приведенной на рис. 2 структурной схемы воспользуемся приведенной в [7] методикой компенсации ЭДС. Применяв данную методику упрощения структурной схемы, с учетом того, что, поскольку ось α сонаправлена с фазой A машины, то $e_{1\beta} \approx 0$, $e_{1\alpha} \approx u_{1\alpha}$, преобразуем (6) к следующему виду (промежуточные преобразования не приводятся):

$$\begin{cases} e_{2\alpha} = -k_E \omega + \frac{e_{1\alpha}}{k_T}; \\ i_{2\alpha} = e_{2\alpha} \cdot \frac{1/R_2}{T_2 p + 1}; \\ M = i_{2\alpha} \frac{3Z_{\Pi L \mu}}{2R_1} \frac{e_{1\alpha}}{k_T}; \\ \omega = \frac{M - M_C}{Jp}, \end{cases} \quad (7)$$

Системе уравнений (7) соответствует структурная схема АДФР, приведенная на рис. 3.

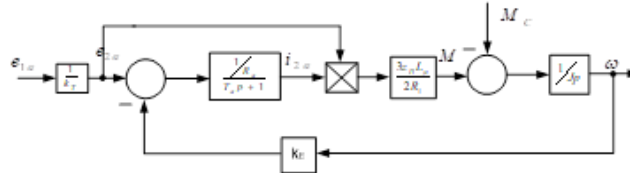


Рис. 3. Упрощенная эквивалентная структурная схема АДФР

Показанная на рис. 3 схема использует проекции изображающих векторов. Для использования в системах управления электроприводом удобнее использование не проекций, а действующих значений переменных. При этом, поскольку роторные и статорные величины изменяются с различной частотой, необходимо приведение роторных величин к статорным. При этом определяющей величиной является ЭДС неподвижного ротора, связанная с ЭДС ротора через величину скольжения. Учтем также, что обобщенные векторы, определяемые своими проекциями в уравнениях (2-7), содержат активную и реактивную составляющие. Как известно, момент двигателя обусловлен только активной составляющей тока ротора. Поэтому в целях управления моментом двигателя и реализации системы управления можно пренебречь реактивной составляющей. В этом случае для ЭДС статора и ротора выполняются следующие соотношения:

$$E_1 = 4,44 f \omega_1 k_{o\delta 1} \Phi_6 = \omega \Psi_1, \Psi_1 = \frac{\omega_1 k_{o\delta 1} \Phi_6}{\sqrt{2}}; E_2 = 4,44 f s \omega_1 k_{o\delta 2} \Phi_6, \quad (8)$$

где Φ_6 – суммарный магнитный поток в воздушном зазоре; $k_{o\delta}$ – обмоточный коэффициент соответствующей обмотки.

Из уравнений (8) следует, что отношение ЭДС статора к ЭДС ротора, определяющее коэффициент приведения вращающегося ротора к статору, определится как:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{s} \frac{\omega_1 k_{o\delta 1}}{\omega_2 k_{o\delta 2}} = \frac{k_T}{s}; \quad (9)$$

$$E_{2n} = \frac{E_1}{k_T} = \frac{E_2}{s}; \quad (10)$$

$$E_2 = \frac{E_1}{k_T} \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1} \right) = \frac{E_1}{k_T} - k_E; , \quad (11)$$

$$E_\omega = k_E \omega_2, \quad (12)$$

где k_T – коэффициент трансформации машины; E_{2n} – ЭДС неподвижного ротора; E_ω – противо-ЭДС ротора; $k_E = \frac{E_1}{k_T \omega_1}$.

Переходя в схеме, показанной на рис. 3, от проекций координат к их действующим значениям, с учетом соотношений (9-12), получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} E_2 = \frac{E_1}{k_T} - k_E \omega; \\ I_2 = E_2 \cdot \frac{1/R_2}{T_2 p + 1}; \\ M = I_2 k_m \frac{E_1}{k_T}; \\ \omega = \frac{M - M_C}{Jp}. \end{cases} \quad (13)$$

Системе уравнений (13) соответствует структурная схема АДФР, показанная на рис. 4. Приведенная схема удобна для использования в системах автоматического управления электроприводом. Из схемы, приведенной на рис. 4, следует, что, изменяя активную составляющую тока ротора, можно добиться изменения электромагнитного момента двигателя, а, следовательно, скорости вращения ротора. При этом если ввести в роторную цепь источник добавочного напряжения так,

чтобы оно имело ту же частоту и фазу, что и ЭДС ротора, то изменение его амплитуды $U_{нчт}$ будет эквивалентно изменению активного сопротивления ротора, поскольку не повлечет изменения фазового сдвига тока ротора относительно ЭДС ротора. В этом случае возможно получить характеристики, аналогичные характеристикам системы АДФР-РС, но без потерь энергии в роторной цепи.

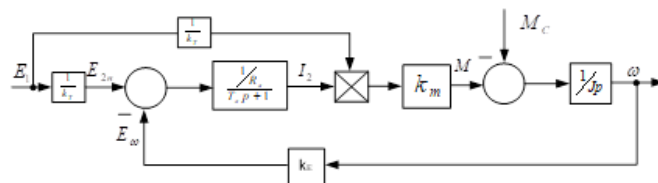
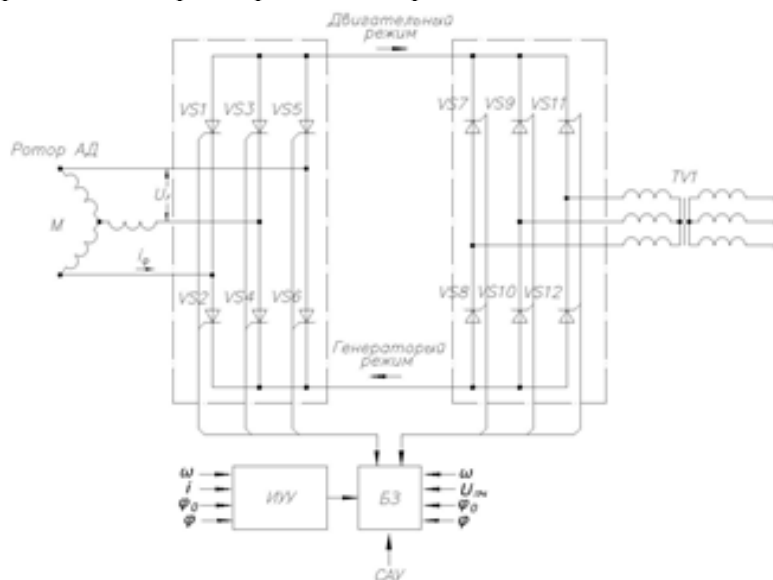


Рис. 4. Структурная схема АДФР

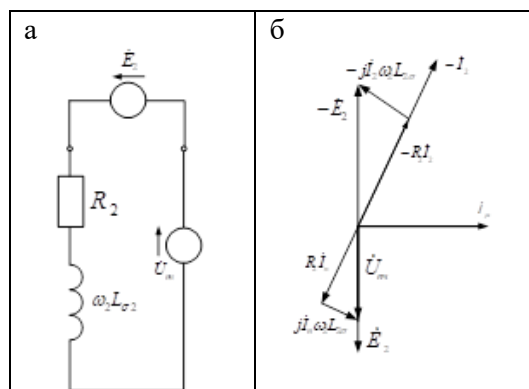
Указанный способ регулирования может быть реализован при помощи преобразователя частоты в цепи ротора, схема которого приведена на рис. 5.



М – двигатель; VS1-VS12 – силовые вентили (тиристоры); TV1 – трансформатор напряжения;
ИУУ – информационно-управляющее устройство; БЗ – блок задания;
САУ – система автоматизированного управления

Рис. 5. Схема подключения преобразователя частоты в цепи ротора

Схема замещения и векторная диаграмма для схемы, приведенной на рис. 5, показаны на рис. 6а и 6б.



I_n – ток фазы преобразователя; $U_{нч}$ – напряжение на выходе преобразователя частоты

Рис. 6. Схема замещения фазы ротора с преобразователем частоты в цепи (а); векторная диаграмма цепи ротора с источником добавочного напряжения (б)

Система уравнений (13) при включении в роторную цепь преобразователя частоты, примет вид:

$$\begin{cases} E_2 = \frac{E_1}{k_T} - k_E \omega \pm U_{нч}; \\ I_2 = E_2 \cdot \frac{1/R_2}{T_2 p + 1}; \\ M = I_2 k_m \frac{E_1}{k_T}; \\ \omega = \frac{M - M_C}{J p}. \end{cases} \quad (14)$$

Системе уравнений (14) соответствует структурная схема АДФР с преобразователем частоты в роторе, показанная на рис. 7.

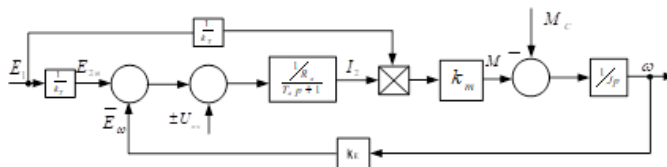


Рис. 7. Структурная схема АДФР с преобразователем частоты в роторе

Коэффициент связи момента и тока ротор определится как:

$$k_m = \frac{3z_{II}L_{\mu}}{2\omega R_1}. \quad (15)$$

Из структурной схемы, представленной на рис. 7, следует, что изменение выходного напряжения преобразователя приводит к изменению тока ротора. Отсюда следует, что при реализации управления напряжения преобразователя, показанного на рис. 5, возможно обеспечить регулирование скорости АДФР подъемной машины в большом диапазоне с сохранением перегрузочной способности двигателя без необходимости изменения активного сопротивления ротора.

Выводы. Таким образом, методика получения структурной схемы двигателя переменного тока может быть сформулирована следующим образом:

Запись уравнений электрического равновесия и уравнения формирования момента в комплексной форме для схемы замещения двигателя.

Выбор ортогональной системы координат и проецирование уравнений на оси этой системы.

Запись уравнений электромеханического преобразования в проекциях координат.

Получение эквивалентной структурной схемы с учётом компенсируемых ЭДС.

На основе методов перехода от проекций координат к их действующим значениям обеспечивается возможность операций с переменными с различными по величине аргументами (частотой и фазой).

Получение эквивалентной структурной схемы с преобразователем частоты в роторе.

Исходя из вышеизложенного, можно сформулировать следующие выводы:

Получена структура АДФР, пригодная для применения в системах автоматического управления электроприводом переменного тока. Данная структура получена на основе математического описания машины в системе координат α - β и применения метода компенсации ЭДС.

Разработана методика реализации структуры АДФР с использованием в качестве переменных их действующих значений, обеспечивающая возможность действий с переменными с различными по величине аргументами показательной формы записи.

Получена эквивалентная структурная схема АДФР с преобразователем частоты в роторе.

Список литературы

1. Ostrovlyanchik V.Yu., Popolzin I.Yu., Kubarev V.A. Operation algorithm of the hoist electric drive based on a doubly-fed machine with combined control // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 206. – Iss.1. – 012040.
2. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. – Минск : ЗАО «Техноперспектива», 2006. – 363 с.
3. Слежановский О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
4. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
5. Онищенко Г.Б. Локтева И.Л. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.
6. Хватов С.В., Титов В.Г. Проектирование и расчет асинхронного вентильного каскада. – Горький : ГГУ им. Н. И. Лобачевского, 1977. – 91 с.

УДК 621.313 - 621.867.2

ПРЕДИКТИВНАЯ ДИАГНОСТИКА ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ¹Аниканов Д.С., ²к.т.н. Кипервассер М.В., ²к.т.н. Симаков В.П.**1 – ООО «СИБШАХТОСТРОЙ», г. Новокузнецк, Россия****2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия**

Аннотация. Описаны основные неисправности механопровода ленточного конвейера и показана возможность функциональной диагностики его технического состояния. Получены результаты моделирования электрических величин привода при возникновении аварийных режимов работы конвейера в среде программирования Matlab Simulink.

Ключевые слова: ленточный конвейер, электропривод, аварийные режимы, контроль тока, функциональная диагностика.

Введение. Значительную часть себестоимости добываемых полезных ископаемых, а также продукции, при производстве которой применяют ленточные конвейеры, составляют расходы на транспортировку, например от очистного забоя к поверхности шахты, что делает актуальным поиск резервов повышения эффективности транспортных средств.

Состояние оборудования считается нормальным, если все его узлы и детали исправны, параметры, по которым определяется их состояние, не приближаются к предельным значениям, а динамика изменения этих параметров в течение определенного срока позволяет прогнозировать достаточно длительный срок безопасной эксплуатации.

Поддержание соответствия конвейеров требованиям промышленной безопасности зависит от рациональной организации обслуживания и ремонта. На практике же межремонтные сроки планируются, исходя из календарного времени эксплуатации, не учитывается фактическая нагрузка, интенсивность нагрузок.

Наблюдается недостаточно совершенная и требующая значительных трудовых и финансовых затрат система: капитальный ремонт производится без достаточных оснований и в большем объеме, чем это требуется, лишь на основании срока службы; либо противоположная тенденция – техническое устройство попадает в ремонт только после потери работоспособности. Несвоевременная замена изношенных деталей увеличивает вероятность аварийных ремонтов.

Изнашиваемые части конвейера – это ролики, футеровка барабанов, очистительные системы, различные уплотнения, барабаны и, конечно, конвейерная лента. Ресурс комплектующих определяется производительностью оборудования, а также абразивностью материала транспортировки, его насыпной плотностью, ударной нагрузкой в местах перегруза и т. д. [1]. Условия ведения горных работ, например, повышенная влажность, способствуют уменьшению продолжительности службы изнашиваемых элементов ленточного конвейера.

Кроме того, способствует снижению рабочего ресурса человеческий фактор. Нарушение условий эксплуатации, неправильная регулировка конвейерного оборудования, несвоевременная замена вышедших из строя комплектующих, игнорирование наступающих предаварийных ситуаций зачастую в несколько раз снижают сроки эксплуатации всей конвейерной системы. Например, при неправильной регулировке ленты она начинает «гулять», и её борта рвутся о металлоконструкции конвейерного става. При неправильной эксплуатации систем очистки возникают просыпи и наросты на конвейерных роликах и барабанах, что приводит к ускоренному выходу из строя футеровок барабанов, подшипниковых узлов и самих барабанов и, как следствие, ускоренному изнашиванию конвейерной ленты.

Перспективной стратегией обслуживания и ремонта транспортного ленточного оборудования представляется обслуживание по фактическому состоянию, поскольку предельные состояния конструкций и механизмов являются результатом постепенного накопления повреждений в деталях, узлах и элементах. Выявить и устранить дефекты на начальной стадии развития, обеспечить

минимизацию ремонтных работ, возможно только при внедрении эффективных методов диагностирования [2].

Методы функциональной диагностики технического состояния ленточного конвейера. Функциональное диагностирование опирается на пассивные методы, которые регистрируют сигналы, возникающие в самом объекте под влиянием внешних факторов (акустическая и электромагнитная эмиссия, вибрация, электрические и электромагнитные шумы, тепловые поля) [3].

При работе ленточного конвейера часть энергии, передаваемой от электродвигателя к инструменту агрегата, теряется на различные виды потерь: трение с последующим нагревом, разрушение с последующим трением. Все виды локальной диагностики работающего ленточного конвейера построены на том, что фиксируют и оценивают величину и характер энергетических потерь в механоприводе ленточного конвейера.

Приведенные в табл. 1 неисправности механопривода ленточного транспорта представляются возможным диагностировать для последующего проведения упреждающих ремонтных работ [4-6].

Таблица 1

Неисправности, места локализации и причины в механоприводе ленточного конвейера

Наименование неисправности, внешнее проявление	Вероятная причина
Не вращается барабан, ролик, каток и т.п.	Разрушен подшипник качения или детали лабиринтных уплотнений.
Лента сбивается в сторону в определенной точке.	Перекус одного или нескольких роликов перед участком сбега.
	Не вращается часть роликов.
	Роликоопоры расположены не горизонтально.
	Перекус концевых и отклоняющих барабанов.
Лента сбивается в разные стороны.	Загрузка ленты не по центру.
	Недостаточная жесткость узлов конвейера.
Повышенный износ рабочей обкладки ленты.	Загрязнение и заклинивание опорных роликов нижней ветви ленты.
	Нижняя часть става заштыбована и лента движется по слою материала.
	Хвостовой барабан или барабан разгрузочной тележки конвейера завалены материалом.
Повышенный износ нерабочей обкладки ленты.	Заклинивание рабочих роликов верхней ветви ленты.
	Слишком велик наклон роликов вперед.
	Пробуксовка ленты на приводном барабане.
Прорезание канавок и порезы рабочей обкладки.	Уплотнения загрузочных лотков очень плотно прижимаются к ленте и слишком тверды.
	Лента трется о металлические части загрузочного лотка.
Пробой резиновой обкладки и незначительные порывы каркаса.	Попадание в транспортируемый материал инородных тел (лом, обрезь металла, и т.д.)
Поперечные порывы у края ленты.	Загибание ленты вверх на барабане или вблизи него.

Для представленных типов неисправностей характерно влияние процесса их развития на изменение энергетических параметров электрической машины, то есть на мониторинг и анализ в

условиях реального времени: темпы нарастания, времени изменения (увеличения, снижения), профиля изменения, периодичность появления изменений энергетических параметров электродвигателя.

В качестве конкретного объекта рассмотрен ленточный конвейер, имеющий в своей механической структуре значительное количество отдельных узлов, объединенных упругой связью, а в качестве приводного элемента асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором [6].

Исследование совместной электромеханической модели механизма ленточного конвейера в среде Matlab Simulink. Особенностью предлагаемого способа функциональной диагностики является рассмотрение механизма как комплекса совокупности механической и электрической частей.

Полученная в процессе составления динамической модели система уравнений была решена в среде программирования Matlab Simulink [7, 8]. Для этого было использована пробная версия Matlab.ru с выходными данными Version: 7.9.0.529 (R2009b), 32-bit (win32). Была составлена функциональная схема (рис. 1) на базе блоков, представленных в библиотеке Matlab Simulink [9-11].

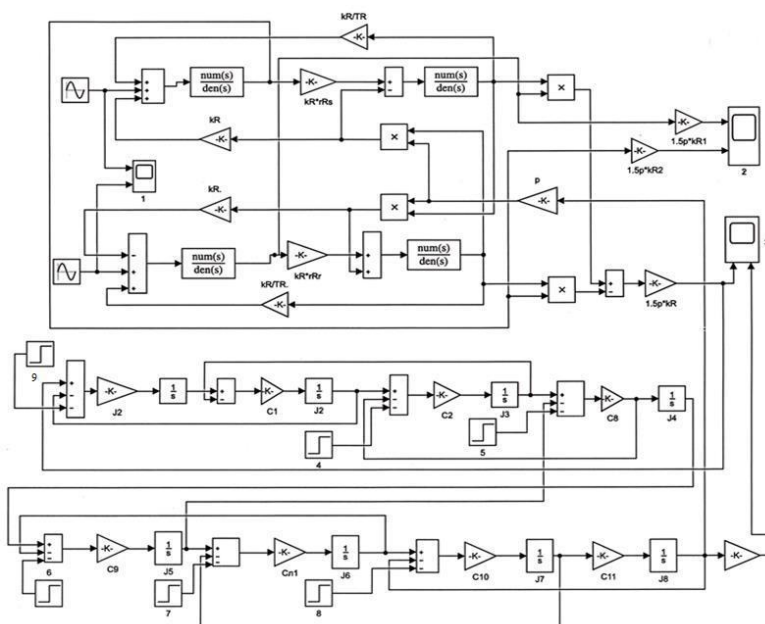


Рис. 1. Блок-схема электромеханической системы ленточного конвейера

Визуальный контроль параметров осуществлялся при помощи блоков Scope.

Блоком Scope № 1 осуществлялся контроль питающего напряжения, блоком Scope № 2 осуществлялся контроль тока, а блоком Scope № 3 контролировался момент электродвигателя и момент нагрузки механической части ленточного конвейера.

Имитирование аварийного режима работы выполнялось при помощи использования блоков Step № 4 – 9 распределенных по восьми массовой механической части имитационной модели ленточного конвейера.

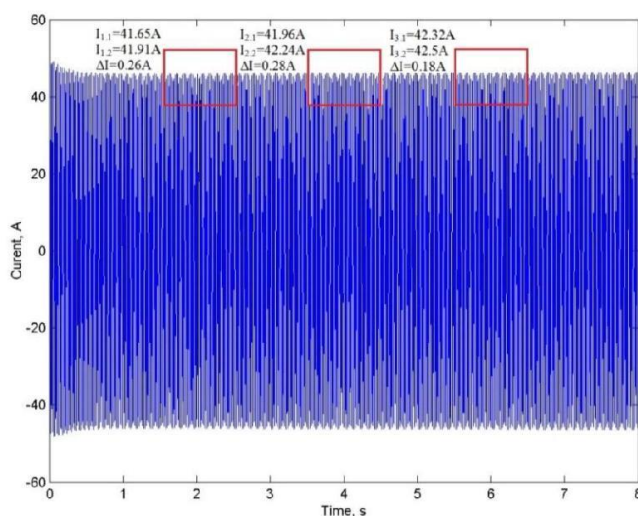
В процессе моделирования режимов выхода из строя элементов конвейера рассматривались следующие случаи.

1) Режим работы механизма с номинальной нагрузкой с последующим заклиниванием одного, двух и трех роликов грузонесущей части ленточного конвейера.

Полученные результаты моделирования исследуемого механизма ленточного конвейера представлены в виде графиков контролируемых параметров во времени: график на рис. 2 показывает величину изменения тока статора. Режим работы ленточного конвейера реализуется путем приложения добавочного момента. Место приложения добавочного момента в рассматриваемой модели блок (Step №4).

Из графиков, представленных на рис. 2 видно, что протекание моделируемого режима заклинивания грузонесущих роликов сопровождается изменением контролируемой величины тока статора. При моделировании режима заклинивания одного опорного ролика грузонесущей части увеличение тока статора происходит на 0,26 А, при заклинивании двух опорных роликов грузонесущей части увеличение тока статора происходит на 0,28 А, при заклинивании трех опорных ро-

ликов грузонесущей части увеличение тока статора происходит на 0,18 А. Время переходного режима составляет 0,2 с для первого моделируемого режима 0,45, с во втором случае и 0,62 с при трех заклиненных роликах.



$I_{1,1}$, $I_{2,1}$, $I_{3,1}$ — ток статора до приложения аварийного момента; $I_{1,2}$, $I_{2,2}$, $I_{3,2}$ — ток статора после приложения аварийного момента

Рис. 2. Характер поведения тока статора асинхронного двигателя при моделировании в среде Matlab Simulink

2) Заштыбовка приемного бункера. Реальный процесс сопровождается избыточным количеством транспортируемого материала в приемном бункере. Полученные результаты моделирования исследуемого механизма ленточного конвейера представлены в виде графиков измеряемых параметров во времени.

График на рис. 3 показывает величину изменения тока статора. Место приложение добавочного момента в рассматриваемой модели блок (Step №8). Оценочное значение величины прикладываемого момента принято 89 Н*м. Из графика видно, что протекание моделируемого режима заштыбовки приемного бункера, сопровождается скачком тока статора, в первом случае на 1,8 А. Время переходного режима составляет 1,69 с.

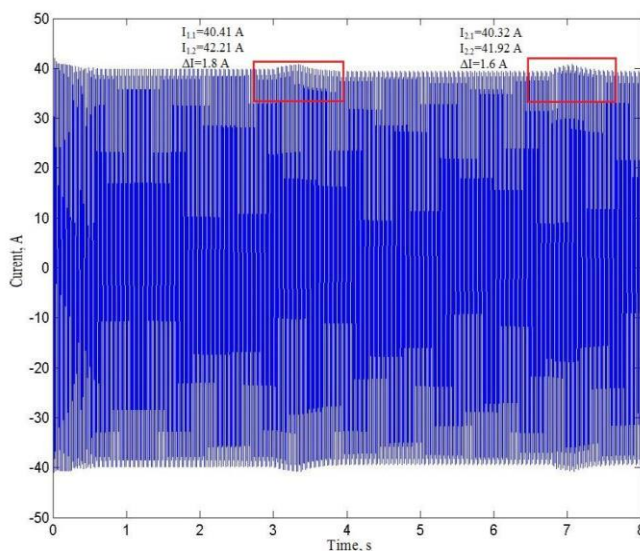


Рис. 3. Характер поведения тока статора асинхронного двигателя при моделировании в среде Matlab Simulink при заштыбовке приемного бункера момента

3) Заклинивание редуктора. Причинами возникновения данного режима служат попадание инородных тел между зубцами передач, критичное нарушение соосности, выкрашивание зубьев шестерней. Полученные результаты моделирования исследуемого механизма ленточного конвейера представлены в виде графиков измеряемых параметров во времени: график на рис. 4 показыва-

ет величину изменения тока статора. Место приложение добавочного момента в рассматриваемой модели блок (Step №9). Оценочное значение величины прилагаемого момента принято 140 Н*м .

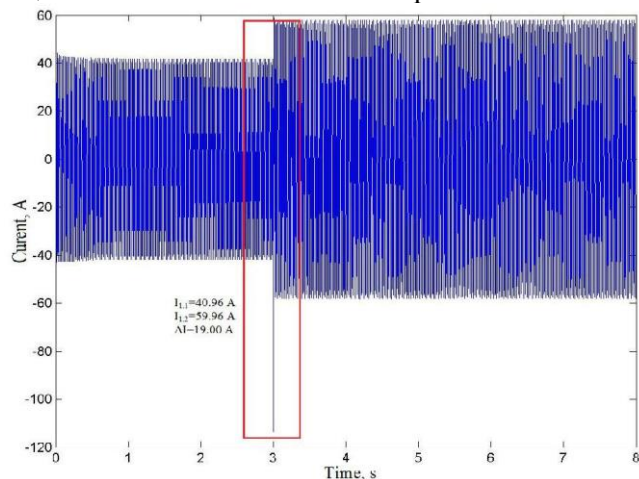


Рис. 4. Характер поведения тока статора асинхронного двигателя при моделировании в среде Matlab Simulink режима глухого заклинивания редуктора

Из графиков, представленных на рис. 4, видно, что протекание моделируемого режима глухого заклинивания редуктора, сопровождается ростом тока статора на 19 А. При этом, происходит снижение угловой скорости до отрицательных значений. Время переходного режима составляет 1,68 с.

4) Срезание «пальцев» соединительной муфты. Подобный результат эксплуатации механизма возникает по ряду причин, некачественные комплектующие, превышение допустимого момента на валу редуктора или барабана, а также неправильный монтаж соединительных пальцев. Полученные результаты моделирования исследуемого механизма ленточного конвейера представлены в виде графика на рис. 5 показывает величину изменения тока статора. Место приложение добавочного момента в рассматриваемой модели блок (Step №9). Оценочное значение величины прилагаемого момента принято 96 Н*м .

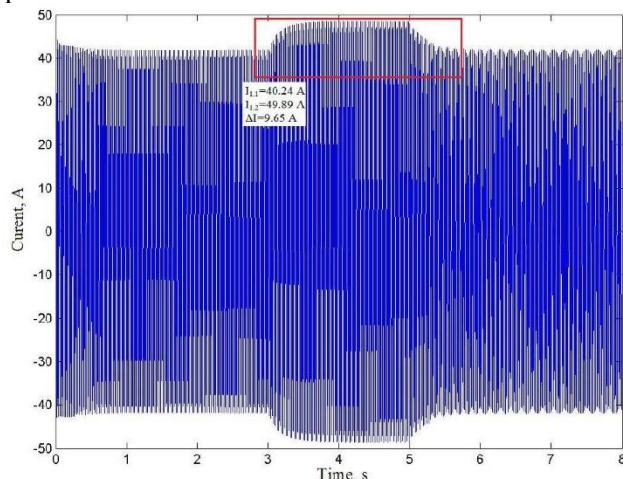


Рис. 5. Характер поведения тока статора асинхронного двигателя при моделировании в среде Matlab Simulink при срезании «пальцев» соединительной муфты

Из графика (рис. 5) видно, что протекание моделируемого режима срезания «пальцев» соединительной муфты, сопровождается ростом тока статора на 9,65 А. При этом, происходит снижение угловой скорости до отрицательных значений. Время переходного режима составляет 1,53 с. И возвратом нормального режима работы асинхронного электродвигателя с 5 с моделирования.

Из графиков на рис. 2-5 видно, что статорные токи АД содержат необходимую информацию для диагностики технического состояния механизма ленточного конвейера. Неисправность, повреждения элементов, агрегатов в механопроводе ленточного конвейера влияет на потребляемую мощность из сети приводным электродвигателем, это приводит к колебанию статорных токов. Пе-

риод, частота и форма колебаний зависит от конкретного вида неисправности, произошедшего в механоприводе ленточного конвейера.

Вывод. Исследование совместной электромеханической модели механизма ленточного конвейера в среде Matlab Simulink показало, что изменения механического момента, вследствие появления механической неисправности в механоприводе, приводят к изменениям электрических параметров приводного асинхронного электродвигателя ленточного конвейера (при диагностировании определяются огибающие мгновенных значений токов по каждой фазе статора.)

Список литературы

1. Конвейеры под землей // Добывающая промышленность. – 2020. – №6 (24). – С. 84-88.
2. Основные причины снижения срока эксплуатации ленточных конвейеров / Ю.И. Кропотов // Молодой учёный. – 2015 – № 23 (103). – С. 172-175.
3. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования: учеб. пос. 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Изд-во «Лань», 2012. – 384 с.
4. Ленточные конвейеры в горной промышленности / В.А. Дьяков [и др.]. – М.: Недра, 1982. – 349 с.
5. Басов А.И. Механическое оборудование обогатительных фабрик и заводов тяжелых цветных металлов. – М.: Металлургия, 2008. – 112 с.
6. Епифанцев Ю.А. Механическое оборудование для обогащения руд. – М.: Машиностроение, 2004. – 52 с.
7. Савельев А.Н., Кипервассер М.В., Аниканов Д.С. Диагностика аварийных режимов ленточных транспортеров горно-металлургической промышленности // Известия вузов Черная металлургия. – 2015. – Т. 58. – №12. – С. 906 - 910.
8. Пугачев Е.В., Кипервассер М.В., Аниканов Д.С. Контроль работоспособности конвейерного транспорта по-средством регистрации параметров электропривода // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – №3 (97). – С. 101-105.
9. Терёхин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink: уч. пос. – Томск: Изд. ТПУ, 2010. – 292 с.
10. Дьяконов, В.П. SIMULINK 4. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 528 с.
11. Дьяконов В.П. MATLAB 6/5 SP1/7+Simulink 5/6. Основы применения. Серия «Библиотека профессионала». – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 800 с.

УДК 621.313 (621.822.1)

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

к.т.н., Кипервассер М.В., к.ф.-м.н. Лактионов С.А.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы диагностики состояния узлов трения горного оборудования. Произведено математическое моделирование ситуации нарушения «масляного клина» в подшипнике скольжения и оценено её влияние на ток статора электродвигателя. Проведен анализ результатов моделирования с использованием элементов нечётких множеств с соответствующими выводами.

Ключевые слова: подшипник скольжения, масляный клин, синхронный двигатель, ток статора, диагностика состояния, нечеткое множество, функция принадлежности.

Подшипники скольжения являются часто используемым элементом в узлах трения тяжело нагруженного горного оборудования. К такому оборудованию относятся шахтные подъёмные машины, комплексы подземного дробления, центробежные компрессоры.

Известен ряд недостатков, присущих подшипникам скольжения:

- значительное тепловыделение, нагрев, износ при недостаточности смазки;
- неравномерность износа втулок и цапф;
- необходимость постоянного надзора в процессе работы из-за высоких требований к смазке и опасности перегрева.

Указанные обстоятельства обуславливают необходимость ведения диагностики работающих узлов трения горного оборудования с использованием подшипников скольжения в режиме реального времени. Для диагностики подшипников скольжения в эксплуатационных условиях замеряют

уровни вибрации, шума, температуры [1]. Однако эти параметры зависят не только от состояния подшипника. Для безразборной диагностики подшипников скольжения используются косвенные методы (рентгеноскопия, электрорезистивный метод для слоя смазки и др.) [2]. Для большинства методов недостатками являются недостаточные точность, быстродействие, необходимость использования комплексов дополнительного измерительного оборудования. В этой связи актуальной задачей является разработка дополнительных методов по диагностированию их состояния. Для диагностики состояния подшипников скольжения горного оборудования в режиме реального времени может быть использован способ контроля электрических параметров приводного электродвигателя [3, 4].

Для подтверждения такой возможности был рассмотрен электромеханический комплекс, имеющий в своём составе воздушный центробежный турбокомпрессор К-1500- 62 – 2 и приводной синхронный электродвигатель СТД – 10000. После составления математического описания было выполнено моделирование аварийной ситуации уменьшения толщины масляного «клина» в подшипнике при осевом сдвиге ротора до аварийных значений.

В математическом описании использовалась модель синхронного электродвигателя в d-q координатах. Были получены значения величин продольной и поперечной составляющих тока статора в реальном масштабе времени для основной гармоники питающего напряжения. Обработка результатов моделирования велась с использованием оконного преобразования Фурье [5, 6]. Для основной гармоники 50Гц величины отклонений значений токов составили 2,64% для продольной и 2,71% для поперечной составляющих соответственно. С момента начала процесса осевого сдвига ротора и уменьшения толщины масляного клина появляются незначительные отклонения значений фазы того и другого сигнала. Момент появления режима «сухого трения» характеризуется колебаниями фаз основных гармоник 0,3 градуса для продольной составляющей и 0,35 градуса для поперечной составляющей соответственно.

Кроме основной гармоники были изучены параметры появляющихся на интервале осевого движения ротора высших гармонических составляющих тока статора. На рис. 1 приведены графики изменения амплитуд высших гармонических продольной и поперечной составляющих тока статора.

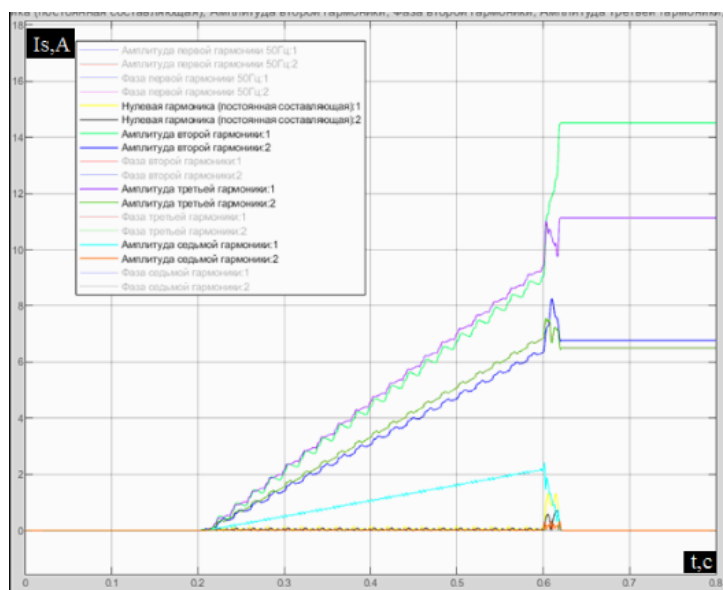


Рис. 1. Графики изменения амплитуд высших гармонических продольной и поперечной составляющих тока статора

На рис. 2 приведены графики изменения фаз высших гармонических продольной и поперечной составляющих тока статора.

Амплитуды высших гармоник, как и амплитуда основной гармоники, растут. Третьи гармоники растут быстрее вторых (до 9,0 и 9,2 А и до 6,2 и 6,8 А). Хотя в установившемся режиме вторая гармоника превышает третью (14,5, 11,0 А и 6,8, 6,4 А). Седьмая гармоника появляется и растет только в сигнале продольной составляющей, но её величина мала (до 1,8А). В установившемся режиме седьмая гармоника обнуляется. Постоянная составляющая у сигналов отсутствует. Колебания фазы гармоник по мере увеличения амплитуды сокращаются с 15-20° до 2°.

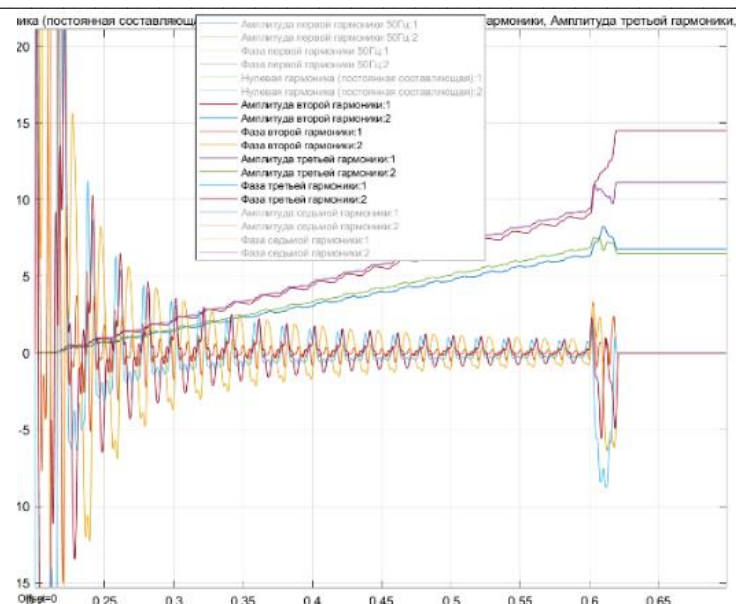


Рис. 2. Графики изменения фаз высших гармонических продольной и поперечной составляющих тока статора

В табл. 1 сведены данные о величинах изменения амплитуды основной гармоники тока статора, изменении фазы основной гармоники тока статора, наличии высших гармонических составляющих и их параметрах.

Таблица 1

Изменение показателей составляющих тока статора при возникновении осевого сдвига ротора

Тип турбокомпрессора	К – 1500- 62 – 2
Увеличение амплитуды первой гармоники для продольной составляющей	да, 2,64%
Колебания фазы первой гармоники для продольной составляющей	да, 0,030°
Увеличение амплитуды первой гармоники для поперечной составляющей	да, 2,71%
Колебания фазы первой гармоники для поперечной составляющей	да, 0,030°
Наличие высших гармоник продольной составляющей	да {2,3,7}
Наличие высших гармоник поперечной составляющей	да {2,3}
Увеличение амплитуды высших гармоник продольной составляющей	да, 2 до 1,07%, 3 до 2,21%
Увеличение амплитуды высших гармоник поперечной составляющей	да, 2 до 2,27% 3 до 2,78%
Колебания фазы высших гармоник	да

По данным, представленным в табл. 1, возможно получение интегрального критерия возникновения аварийной ситуации в зависимости от наблюдаемых параметров отклонений. Построение критерия возникновения аварийной ситуации возможно с использованием параметров, для которых существуют отклонения, не приводящие к аварийной ситуации. Такими событиями являются возникновение аварийной ситуации при увеличении амплитуд продольной составляющей первой гармоники, поперечной составляющей первой гармоники, увеличении амплитуды высших гармоник продольной и поперечной составляющих, колебании фазы продольной и поперечной составляющих первой гармоники. Каждому событию A_i ставится в соответствие изменяющийся параметр X_i . Определение критериев возникновения аварийного события возможно с использованием элементов теории нечётких множеств [7]. Для каждого изменяющегося параметра $x_i, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ при выполнении моделирования определены значения отклонений при максимальном осевом сдвиге ротора. Значения таких отклонений можно считать критическими $x_{i\text{кр}}$. Их появление определяет возникновение и полное развитие аварийной ситуации.

Хотя каждое допустимое отклонение не приводит к возникновению аварийной ситуации, совокупное влияние определенных значений допустимых отклонений может к ней привести. При этом совокупное влияние всех отклонений невозможно заранее точно определить, что приводит к

нечеткости критерия определения аварийной ситуации. Поэтому определение интегрального критерия для учета совокупного влияния отклонений на возникновения аварийного события возможно с использованием элементов теории нечетких множеств [7]. Для этого каждое событие A_i можно рассматривать как нечеткое множество с носителем нечеткости $(0, x_{i, \text{кр}})$. Определение функции принадлежности для этих нечетких множеств возможно по параболическому закону:

$$\mu_i(x) = \begin{cases} \frac{x^2}{(x_{i, \text{кр}})^2}, & 0 \leq x \leq x_{i, \text{кр}}; \\ 1 & x > x_{i, \text{кр}}. \end{cases} \quad (1)$$

Обозначим через A - событие, заключающееся в возникновении аварийной ситуации осевого сдвига ротора компрессора под влиянием совокупных отклонений. Это событие является нечетким множеством, которое можно выразить через A_i : $A = \sum_{i=1}^6 A_i$. Очевидно, что события A_i не являются независимыми, поэтому функцию принадлежности для этого множества выразим с помощью вероятностного закона:

$$\begin{aligned} \mu(\vec{x}) = & \sum_{i=1}^6 \mu_i(x_i) - \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^6 \mu_i(x_i) \mu_j(x_j) + \sum_{\substack{i,j,k=1 \\ i \neq j \neq k}}^6 \mu_i(x_i) \mu_j(x_j) \mu_k(x_k) - \\ & - \sum_{\substack{i,j,k,m=1 \\ i \neq j \neq k \neq m}}^6 \mu_i(x_i) \mu_j(x_j) \mu_k(x_k) \mu_m(x_m) + \\ & + \sum_{\substack{i,j,k,m,n=1 \\ i \neq j \neq k \neq m \neq n}}^6 \mu_i(x_i) \mu_j(x_j) \mu_m(x_m) \mu_n(x_n) - \\ & - \mu_1(x_1) \mu_2(x_2) \mu_3(x_3) \mu_4(x_4) \mu_5(x_5) \mu_6(x_6), \end{aligned} \quad (2)$$

По формуле (2), в зависимости от полученных значений $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$, вычисляем значение функции принадлежности $\mu(\vec{x})$. При этом возможна следующая интерпретация значений этой функции [5]:

$0 \leq \mu(\vec{x}) \leq 0,3$ – вероятность аварии незначительная (уменьшение толщины масляного клина до значений 0,75...0,70 от нормальной);

$0,5 \leq \mu(\vec{x}) \leq 0,8$ – вероятность аварии повышенная (уменьшение толщины масляного клина до значений 0,50...0,20 от нормальной);

$0,8 \leq \mu(\vec{x}) \leq 0,95$ – вероятность аварии высокая (уменьшение толщины масляного клина до значений 0,15...0,05 от нормальной);

$0,95 \leq \mu(\vec{x})$ – ситуация аварийная (режим сухого трения).

Определение текущих значений функции принадлежности $\mu(\vec{x})$ на основании контроля отклонений величин составляющих тока статора позволяет выносить суждение о «близости» состояния турбокомпрессора к аварийной ситуации (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчётов функции принадлежности

Событие	Уменьшение толщины масляного клина до величины			Ситуация аварийная (режим сухого трения)
	70% от нормальной	20% от нормальной	0,05...0,10 от нормальной	
К – 1500- 62 – 2	0,28	0,81	0,94	1,00

Выводы. Таким образом, с использованием анализа сигнала тока статора электродвигателя, представляется практически возможным детектирование аварийной ситуации уменьшение толщины масляного клина при осевом сдвиге ротора компрессора. Получение текущих диагностических оценок состояния подшипника возможна при помощи анализаторов с использованием оконного преобразования Фурье для обработки текущих значений тока статора приводного электродвигателя и параллельной оценки величины интегрального критерия с использованием аппарата нечеткой логики.

Практическая ценность полученных результатов заключается в возможности разработки автоматизированной системы диагностирования узлов трения горного оборудования, которая позволит выявлять возникающие неисправности на ранней стадии и защитить механизмы от аварийных режимов работы.

Список литературы

1. Проблеми експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок: збірник наукових праць. – Донецьк: ВАТ «НДІГМ» ім. М.М. Федорова, 2009. – С. 35-37.
2. Русов В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам: монография. – Пермь, 2012. – 252 с.
3. Kipervasser M.V., Simakov V.P., Anikanov D.S. The control method of ropes slip of a mine winder with friction pulley // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol.377. [012044, 6p.]. – URL: <http://library.sibsiu.ru>. doi:10.1088/1755-1315/377/1/012044.
4. Защита мостовых кранов углеобогатительных фабрик / Д.С. Аниканов [и др.] // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2018. – № 4. – С. 360-364.
5. Хэррис Ф. Дж. Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье // ТИИЭР. – 1978. – Т. 66. – № 1.
6. Рождественский Д.Б. Методические основы цифрового управления // Приборы и системы, управление, контроль, диагностика. – 2011. – №7. – С 9 – 16.
7. Лисицына Л.С. Основы теории нечетких множеств – СПб: Университет ИТМО, 2020. – 74 с.

УДК 621.7+621.9

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
ЛИТЫХ И СВАРНЫХ ИЗДЕЛИЙ ГОРНОШАХТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**
к.т.н. Князев С.В., к.т.н. Усольцев А.А., к.т.н. Куценко А.И., Ознобихина Н.В.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Отдельные приборы и методы неразрушающего контроля, применяющиеся сегодня на предприятиях, не обладают должной информативностью и не гарантируют эффективный контроль дефектов в литых и сварных изделиях горношахтного оборудования. Задача сплошного цифрового неразрушающего контроля сложных литых и сварных изделий может быть решена комплексной системой с применением сканирующего радиационного интроскопа на базе циклического индукционного ускорителя электронов и ультразвуковой (вихретоковой) инфракрасной термографии.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, сварка, дефекты, металл, интроскоп, термография.

Введение. В настоящее время, согласно многочисленным исследованиям, выявлены однотипные дефекты в литых и сварных изделиях. К ним относятся: неспай, горячие трещины, усадочные раковины и пористости, светлые газовые раковины, окисленные газовые раковины, неметаллические включения [1, 2].

Часть дефектов (неспай, некоторые газовые раковины) в основном выявляется при разбраковке изделий методом визуального контроля. Поверхностные трещины выявляются магнитопорошковым методом.

Скрытые подповерхностные дефекты, типа усадочных раковин, микротрещин, часть газовых раковин, неметаллические включения, являющиеся причиной зарождения и развития усталостных трещин, поддаются выявлению только методами неразрушающего контроля (НК), используемыми на предприятии [3-4].

К этому следует добавить то обстоятельство, что отсутствие достоверной информации о дефектности изделий, не позволяет применять методики оценки влияния видов дефектов, их размеров и расположения на работоспособность изделий в течение всего срока их эксплуатации, проводить прогнозирование и диагностику отказов-поломок.

Для неразрушающего контроля наиболее опасных, с точки зрения образования усталостных трещин, дефектов на наш взгляд можно применить рентгеновский томограф.

В настоящее время промышленные радиографические системы и томографы довольно широко распространены на предприятиях, использующих их для отработки технологии производства ответственных изделий.

Среди технических характеристик систем радиационного контроля, особенно важных для НК крупногабаритных ответственных металлоконструкций сложной пространственной геометрии с существенной разнотолщинностью, можно выделить: предельные размеры объекта контроля (ОК), энергию источника излучения, предел пространственного разрешения внутри ОК, контрастную чувствительность, чувствительность к большим перепадам радиационных толщин, надежность, оперативность ремонта.

Описание работы. На рынке существует много предложений промышленных радиографических систем. В Японии: Toshiba IT & Control Systems, Hitachi, Shimadzu, Nikon Metrology; в Европе: немецкая фирма Phoenix; немецкая фирма YXLON International входящая в группу Comet; английская фирма X-Tek Systems; немецкая фирма RayScan Technologies; в США: North Star Imaging и ее подразделение X-View CT, фирма Varian Medical Systems; в России: ИНК ТПУ (Томск), ООО «Промышленная интроскопия» (Москва), МИРЭА (Москва).

Учитывая размеры и вес крупногабаритных ОК, можно сразу отметить, что ни один из вариантов выпускаемых в настоящее время в мире промышленных томографов не подходит для решения задачи НК для этих объектов. Среди существующих промышленных томографов только в томографе ИНК НИ ТПУ использован бетатрон (собственной разработки и производства) МИБ-9 с энергией 4-9 МэВ, позволяющий просвечивать ОК до 450 мм. Одним из важнейших преимуществ бетатрона над другими высокоэнергетическими источниками является размер фокусного пятна - 0.1-1.5 мм, что соответствует минифокусным аппаратам. ТПУ единственный в мире разработчик и производитель малогабаритных циклических ускорителей электронов – бетатронов.

Его основными элементами являются источник излучения с местной защитой и коллиматором, сканер и детекторная линейка. Источником излучения служит бетатрон с максимальной энергией 9 МэВ и мощностью дозы 13 Р/мин на расстоянии 1 м от мишени. Частота импульса излучения равна 400 Гц. Сканер позволяет перемещать детали массой до 150 кг с регулируемой скоростью от 0,3 до 10 см/с. Активная длина сканера составляет 2,5 м.

Линейка состоит из 864 отдельных детекторов, представляющих собой прямоугольный сцинтиллятор с наклеенным на его боковую сторону фотодиодом. Размеры сцинтиллятора в горизонтальном направлении сканирования 6 мм, вертикальном 4 мм, его длина равна 35 мм. Встроенная в модуль линейки электроника обеспечивает преобразование электрического импульса фотодиода, пропорционального поглощенной в сцинтилляторе за импульс энергии излучения в цифровой код с максимальной разрядностью 16 бит. После каждого импульса или с усреднением до 16 импульсов цифровые данные с каждого детектора передаются в пультовую на компьютер, который с помощью программного пакета формирует теневое изображение контролируемого объекта на экране монитора после полного цикла сканирования и имеет широкий набор функций по дополнительной обработке изображений.

Источник излучения и сканер разработаны и изготовлены ИНК ТПУ совместно с ООО «Фотон», программный комплекс написан сотрудниками ИНК, а линейка изготовлена московской фирмой «Диагностика-М».

Контроль сварных элементов с помощью радиационных интроскопов сканирующего типа легче других поддается автоматизации. Получение изображения с помощью интроскопа сканирующего типа в нескольких плоскостях и соответствующая математическая обработка позволяют получить исчерпывающую информацию о внутренней структуре сварных элементов (рис. 1).

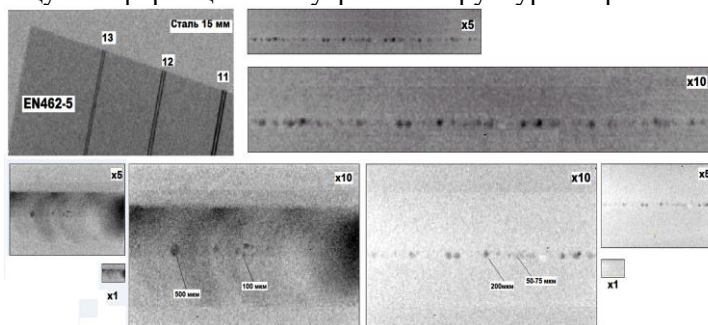


Рис. 1. Результаты, полученные при НК фрагментов сварного шва ответственного изделия и индикатора чувствительности на фоне стальной пластины 15 мм

Для обнаружения трещин в массивных стальных сварных изделиях целесообразно использовать ультразвуковое и вихретоковое возбуждение, а также тепловизионный способ регистрации температуры, что в перспективе должно обеспечить их обнаружение и достоверный цифровой контроль дефектов типа «трещина».

Сущность предлагаемых методов состоит в следующем. Ультразвуковая (УЗ) инфракрасная (ИК) термография предусматривает локальное возбуждение импульсных или непрерывных ультразвуковых колебаний в объекте контроля с регистрацией температурного поля значительной части объекта контроля с помощью ИК тепловизора. Поверхностные и подповерхностные трещи-

ны проявляются в виде локальных аномалий температуры, вызванных эффектом внутреннего трения и механического гистерезиса. Основанием для данного метода явился положительный опыт по контролю композиционных материалов, а также зарубежный опыт по контролю металлов. Вихре-токовая ИК термография использует индукционное возбуждение вихревых токов в металле, причем в зоне трещин температура повышается вследствие сгущения силовых линий электромагнитного поля (рис. 2).

Возможность проведения НК свойств и состояний материалов, например, контроль сварных соединений в процессе сварки, нашел уже достаточно широкое применение при управлении производством. Своевременное обнаружение дефектов в процессе сварки позволяет оперативно проводить их исправление и корректировку процесса. При этом открывается возможность адаптивного управления технологическим процессом, то есть по данным НК можно управлять параметрами технологического процесса, а приборы НК становятся элементами системы управления процессами.

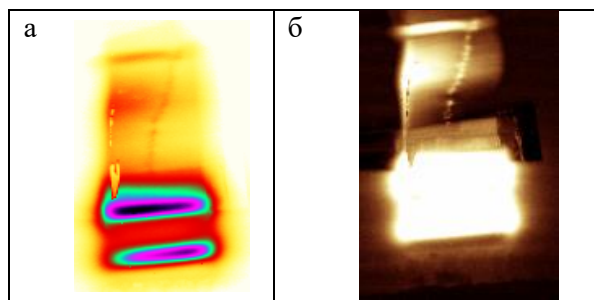


Рис. 2. Исходная термограмма сварного образца (а) и после обработки (б)

Кроме того, контроль методами НК дает возможность судить об изменении напряженно-деформированного состояния материала объекта, о процессах коррозии и других факторах, влияющих на долговечность конструкции, т.к. рассмотренные методы НК позволяют контролировать не только размеры дефектов, но и их местоположение и ориентацию. На основе методик технической диагностики, анализа состояния объекта контроля, данных НК, возможно осуществлять прогнозирование остаточного ресурса сварных изделий.

Вывод. Система НК обеспечивает обнаружение и локализацию внутренних дефектов и трещин, а также позволяет осуществлять диагностику контролируемого сварного или литого изделия и прогнозирование развития дефектов, то есть осуществляет предупреждение возникновения аварийных ситуаций (разрушений) на объектах путём своевременного обнаружения дефектов, их оценке, анализе и рекомендациях о сроках эксплуатации изделий.

Список литературы

1. Antipenko V.I., Knyazev S.V. Diagnostics of steel castings production with the aid of technological pilot samples // Soviet Castings Technology (English Translation of Liteinoe Proizvodstvo). – 1987. – № 7. – P. 34.
2. Алгоритм диагностики дефектности отливок и структура АСУ их качеством / С.В. Князев [и др.] // Литейное производство. – 1992. – № 4. – С. 26-27.
3. Detection of cold cracks in the cast-steels by the methods of ultrasonic and eddy-current infrared thermography / A.I. Cheprasov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 1-5 (012026).
4. Непрерывный контроль крупногабаритных изделий литейного производства / А.М. Штейн [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. – 56. – № 1-2. – С. 267-270.

УДК 621.74.002.6

СОЗДАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ КАСТОМИЗИРОВАННОГО МЕЛКОСЕРИЙНОГО ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

к.т.н. Князев С.В., к.т.н. Купенко А.И., к.т.н. Усольцев А.А., Соколов Б.М.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Рассмотрены перспективы использования в литейном производстве аддитивных и цифровых технологий на всех этапах производства литого изделия на примере создания кастомизированного

мелкосерийного литейного производства, в рамках которого предполагается сформировать коллектив специалистов и ученых, чтобы на практике разрабатывать содержание «основополагающих трансформаций» обычного предприятия в цифровое, которое использует информационные технологии в качестве конкурентного преимущества во всех сферах своей деятельности: производстве, бизнес-процессах, маркетинге и взаимодействии с клиентами.

Ключевые слова: литейное производство, цифровые технологии, аддитивные технологии, композиционные литые заготовки, пористый алюминий, холодное литье.

Введение. Создание нового предприятия должно быть направлено на удовлетворение существующей значимой потребности в обществе, оснащено передовыми технологиями и техникой, обладать значимым заделом для своего развития в будущем. Сделанный Россией выбор на развитие цифровой экономики немыслим без перехода промышленности на «цифровое» производство, включающее в себя комплексную автоматизацию технологических процессов, цифровой контроль параметров технологии, материалов и качественных показателей готовой продукции методами неразрушающего контроля [1-3].

Проблемы литейного производства в нашей стране носят системный характер и являются следствием невнятной промышленной политики в области машиностроения. В литейной отрасли преобладают устаревшие технологии, созданные к середине XX века, наблюдается низкий уровень технологического и инновационного развития данного направления.

Создание литейного предприятия требует:

- значительных капитальных затрат на строительство или реконструкцию производственных помещений;

- приобретения дорогостоящего оборудования для нескольких участков, связанных литейными технологиями: шихтового, модельного, плавильного, формовочного, стержневого, обрубочного, термообработки, механической обработки и литейной лаборатории.

На выставке IT-достижений в Перми Владимир Путин отметил: «... Интернет вещей – это создание вообще новой промышленности. Кто будет владеть этими кластерами информационными, цифровыми в отдельных отраслях, тот будет хозяином этих отраслей в мире. Поэтому вот туда надо забираться». «Тогда [после проникновения интернета вещей в промышленность] у нас будет другая экономика, только в этом случае мы сможем быть независимыми», – сказал президент. «Это не просто интернет вещей, это создание вообще новой промышленности», – добавил он.

Описание работы. Литейное производство является неотъемлемой частью производственного цикла в машиностроении. Более половины предприятий машиностроения, в т.ч. и горнодобывающего и перерабатывающего комплекса России имеют собственные литейные переделы или тесно связаны с ними. Литейное производство как отрасль народного хозяйства, безусловно, требует инноваций.

На большинстве предприятий остаются неосвоенными фундаментальные технологии, без которых невозможен переход к цифровым/умным предприятиям – это отсутствие единого информационного пространства, с помощью которого все автоматизированные системы управления предприятием, а также промышленное оборудование, производственный персонал могут оперативно и своевременно обмениваться информацией; недостаточна автоматизация и роботизация технологических процессов; на базовом уровне освоены технологии виртуального моделирования и инженерного анализа, что не позволяет осуществлять управление цифровым макетом изделия; отсутствует междисциплинарное моделирование на разных уровнях абстракции (от концептуального проекта до детальной единичной модели); только на одиночных предприятиях используется в производстве PDM-система (система управления данными об изделии). Отечественные промышленные гиганты не способны перестроить свою организационную структуру и изменить многолетние традиции, а малого бизнеса, в смысле инжиниринга и инноваций в России все еще нет.

К кастомизированному (кастомизация представляет собой в общепотребительном смысле адаптированные под конкретного потребителя продукты, услуги, цены и каналы поставки) мелкосерийному производству можно отнести литейное производство.

Именно малые компании в Европе и США становятся двигателями прогресса в области новых производственных цифровых технологий. Они формируют спрос на новые технологии, генерируют новые идеи, дают возможность молодым специалистам применить на практике новые методы ведения бизнеса.

В настоящее время наиболее перспективным направлением в литейном производстве является внедрение аддитивных и цифровых технологий на всех этапах производства литого изделия. Быстрый рост рынка аддитивных и цифровых технологий – примерно на четверть ежегодно направлен в сторону большей автоматизации в рамках «Индустрии 4.0».

Данные технологии с успехом работают на предприятиях различных отраслей, таких как автомобильная, авиакосмическая, военная промышленность, приборостроение, медицина (в том числе стоматология), ювелирное дело, искусство и архитектура.

Одной из проблем современного общества является выполнение ремонта, а именно восстановление исправного состояния и продление ресурса работы техники, особенно в горнодобывающей отрасли.

Данную проблему можно разделить на две группы:

- восстановление изношенных сборочных деталей и узлов, ремонт которых существующими технологическими способами невозможен;

- восстановление оригинальных изделий, снятых с производства или производимых в других странах.

В обоих случаях наиболее сложным процессом является восстановление деталей, полученных литьем.

Второй проблемой является разработка новых и инновационных концептуальных подходов для перевода промышленного предприятия на более высокий технологический уровень – уровень цифрового предприятия.

Малое литейное предприятие является наиболее универсальным полигоном для подобного рода фундаментального и прикладного исследования, т.к. объединяет в себя целый комплекс смежных технологий других производств: плавка и разливка, термообработка, формообразование, химические технологии, порошковая металлургия, автоматизация, контроль качества продукции и др. Первым шагом может и должно быть объединение всего вышеперечисленного в единую информационную инфраструктуру. Для этого ключевым условием является использование системы MDC (Machine Data Collection – сбор машинных данных), которая позволяет собирать данные о работе всех производственных объектов (оборудование, рабочие места основных рабочих, сервисные и контролирующие службы и т. д.) в целях управления малым предприятием и для принятия более оптимальных технологических решений в реальном режиме времени.

Для реализации вышеописанной концепции, в СибГИУ г. Новокузнецк создается научно-производственный хозрасчетный инновационный Центр литейных аддитивных и цифровых технологий и производств – кастомизированное мелкосерийное производство. В рамках созданного предприятия предполагается сформировать коллектив специалистов и ученых, который на практике будет разрабатывать содержание «основополагающих трансформаций» обычного предприятия в цифровое, которое использует информационные технологии в качестве конкурентного преимущества во всех сферах своей деятельности: производстве, бизнес-процессах, маркетинге и взаимодействии с клиентами. При этом создаваемое предприятие будет работать в реальном секторе экономики, производить конечную продукцию, оказывать услуги населению, заниматься обучением и подготовкой кадров для различных сфер цифровой экономики.

Основными направлениями деятельности Центра являются следующие:

- производство штучных литых изделий из цветных металлов и чугуна (литье по выплавляемым моделям - ЛВМ);
- производство штучных литых изделий из пластмасс и пластика (холодное литье);
- производство композиционных литых заготовок на основе алюминиевых сплавов (рис. 1 а, в том числе пористых (рис. 1 б, в), методом вакуумного всасывания);
- производство уникальных штучных изделий для ремонта и изготовления оборудования горнодобывающей отрасли;
- обучение и подготовка кадров для реализации цифровых и аддитивных литейных технологий в промышленности;
- разработка и продвижение цифровых, аддитивных и литейных технологий для потребителей;
- разработка и апробация «трансформаций» операционных моделей в новые цифровые модели для концепции цифрового производства.

Для расширения охвата заказчиков будет использован интернет-магазин кастомизированных продуктов, выполняющий функции приема первоначального заказа, его цифровой обработки, согласования и отправки готового изделия заказчику – технология «клиент-сервер».

Почти полное отсутствие подобных предприятий на российском рынке позволит занять пустующую нишу, обеспечить производство стабильными объемами заказов, инновационность предприятия уже на начальном этапе его существования создаст положительный имидж, как на региональном, так и на государственном уровне.

Затраты на создание предприятия с инновационной инфраструктурой сопоставимы с созданием традиционного литейного предприятия, срок окупаемости ниже, а рентабельность выше.

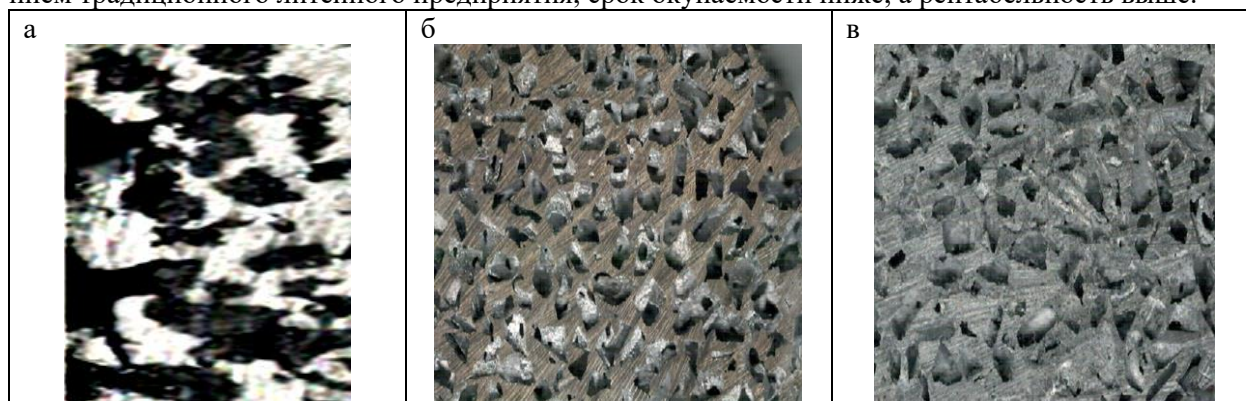


Рис. 1 Al+графит (спель) (а); пористый литой алюминиевый сплав (б, в)

Заключение. В СибГИУ уже создана база для функционирования Центра, работает центр прототипирования «Форма», отработаны технологии «холодного литья», литья композиционных и пористых заготовок на основе алюминиевых сплавов методом вакуумного всасывания, есть печное и вакуумное оборудование, работают специалисты по аддитивным, цифровым и литейным технологиям, организовано взаимодействие с промышленными предприятиями в области информационных и литейных технологий.

Список литературы

1. Detection of cold cracks in the cast-steels by the methods of ultrasonic and eddy-current infrared thermography / A.I. Cheprasov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 150. - P. 1-5 (012026).
2. Automated system of control and diagnostics of cast-steel defects in the mass production / S.V. Knyazev [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 150. - P. 1-5 (012039).
3. Software and hardware automated system of casts defects non-destructive monitoring / S.V. Knyazev [et al.] // Izvestiya Ferrous Metallurgy. – 2019. – 62(2). – С. 134–140.

УДК 681.518.54

ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ОБОРУДОВАНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ И ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

к.т.н. Князев С.В., к.т.н. Усольцев А.А., к.т.н. Куценко А.И., к.т.н. Куценко А.А.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Для решения задачи оперативного управления электроприводом необходимо наличие математической модели, связывающей входные и выходные параметры объекта. Предлагается автоматизированная система, которая существенно упрощает процесс контроля и позволяет решать задачи оптимизации параметров процесса управления. В цифровой системе управления применен помехоустойчивый принцип обмена управляющими потоками между его блоками, а также используется система моделирования на основе математико-статистических методов теории распознавания образов.

Ключевые слова: управление, моделирование, электропривод, модернизация, система.

Введение. Предлагается принципиально новая система управления (СУ) главными электроприводами системы «генератор-двигатель» для модернизации горношахтного оборудования. Основными преимуществами новой цифровой СУ приводами являются высокая помехоустойчивость, легкая переналадка, настройка и простая сменяемость функциональных характеристик.

Несомненное достоинство современной СУ – это ее обеспечение средствами диагностики и моделирования.

Описание работы. Для решения задачи оперативного управления необходимо наличие математической модели, связывающей входные и выходные параметры объекта. Информационно-диагностическая модель СУ построена с использованием математико-статистических методов теории распознавания образов по двум группам параметров: электротехнические параметры работы электропривода и эксплуатационные характеристики оборудования. В соответствии с терминологией, используемой при распознавании образов, диагностическая информация складывается из двух составляющих: системы признаков-оценок электротехнических параметров и системы образов-оценок состояния технического объекта при его эксплуатации. Методом статистической классификации из этих составляющих сформирована диагностическая выборка (ДВ), для чего использованы выборочные экспериментальные и эксплуатационные данные [1-3].

ДВ представляет собой таблицу, каждая строка которой содержит составляющие признака и соответствующие ему образа (табл. 1).

Таблица 1

Содержание ДВ

№ п/п	Составляющие образа Электротехнические параметры					Составляющие признака Нормированное состояние объекта				
	1	2	3	...	L	1	2	3	...	K
1	$x_{1,1}$	$x_{1,2}$	$x_{1,3}$	...	$x_{1,L}$	$y_{1,1}$	$y_{1,2}$	$y_{1,3}$	...	$y_{1,K}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
n	$x_{n,1}$	$x_{n,2}$	$x_{n,3}$	...	$x_{n,L}$	$y_{n,1}$	$y_{n,2}$	$y_{n,3}$	...	$y_{n,K}$

В табл. 1 приняты следующие обозначения: $x_{i,L}$ – значение электротехнического параметра; $y_{i,K}$ – нормированное значение состояние объекта при эксплуатации; $i=1 \div n$ – номер строки ДВ; L, K – соответственно количество электротехнических параметров и типов оценочных состояний объекта при эксплуатации в ДВ.

ДВ используется для распознавания образа – вероятной ситуации, обуславливающей появление состояний в предъявляемой контрольной выборке. Контрольная выборка – тип оценочного состояния объекта управления, по совокупности характеристик которых формируется строка составляющих признака, для которой осуществляется диагностика состояния [1-3].

На этапе распознавания технологической ситуации за меру близости контрольной строки к строке ДВ принято расстояние по Хеммингу:

$$d_i = \sum_{k=1}^K |y_{i,k} - y_{j,k}|.$$

При предварительном распознавании, как правило, выявляется подгруппа составляющих образа, т.е. несколько технологических ситуаций, при которых возможно появление отказов, соответствующих контрольной выборке [1-3].

Для повышения уровня достоверности технологической ситуации и её количественной оценки, выявленная подгруппа признаков подвергается повторному распознаванию. В этом случае за меру близости строк принято Евклидово расстояние:

$$d_i^2 = \sum_{k=1}^K |y_{i,k} - y_{j,k}|^2.$$

Строка образов ДВ, имеющая наименьшее значение d^2 , представляет собой вероятную производственно-технологическую ситуацию, обусловившую появление отказов (перегрузки) в контрольной выборке. Результаты диагностики используются для выработки рекомендаций по внесению оптимальных управляющих воздействий на объект.

Достижение более высокого уровня распознаваемости технологической ситуации «электротехнические параметры – состояние электропривода» реализуется изменением характера и содержания ДВ по мере накопления информации. Реализация самообучения заключается в обновлении данных и исключения избыточной информации. При этом происходит образование новой строки образ-признак ДВ по результатам анализа серии контрольных процедур распознавания.

Вывод. Система управления приводами горношахтного оборудования выполняет интеллектуальное управление с целью проверки возможности работы привода в том или ином режиме и подачи соответствующих сигналов разрешения и блокировок для обеспечения безопасной эксплуатации главных приводов и оборудования в целом.

Список литературы

1. Automated system of control and diagnostics of cast-steel defects in the mass production / S.V. Knyazev [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 1 -5 (012039).
2. Antipenko V.I., Knyazev S.V. Diagnostics of steel castings production with the aid of technological pilot samples // Soviet Castings Technology (English Translation of Liteinoe Proizvodstvo). – 1987. – No. 7. – p. 34.
3. Опыт разработки и внедрения автоматизированной системы пооперационного контроля производства отливок / С.В. Князев [и др.] // Современные технологии в машиностроении: сб. статей XVII междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПДЗ, 2013. – С. 111 -117.

УДК 004.514+004.946+331.101.1+613.6

РАЗРАБОТКА ТЕСТОВОГО ТРЕХМЕРНОГО РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА И МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ОПЕРАТОРА ПРИ РАБОТЕ В ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЕ

¹к.т.н. Никитенко М.С., ¹Кизилев С.А., ²д.м.н. Тарасова И.В., ³к.б.н. Игнатова А.Ю.,
¹Натура Е.С.

1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

2 – Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний, г. Кемерово, Россия

3 – Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева.
г. Кемерово, Россия

Аннотация: В статье представлены текущие результаты исследовательского проекта, направленного на разработку программно-технических решений, оптимизирующих работу диспетчерско-операторских служб на основе применения иммерсивных технологий. Представлены результаты создания виртуального рабочего кабинета в виде масштабных объектов, текстур, освещения, их «оживления» в очках виртуальной реальности для последующей программно-протокольной связи отображаемой информации с источниками данных объекта диспетчеризации. Также представлены результаты первичной апробации методики оценки психофизиологического состояния оператора при виртуализации рабочего информационного пространства в рамках многоэтапных исследований влияния виртуальной реальности на пользователя.

Ключевые слова: диспетчеризация, человеко-машинная система, человеко-машинный интерфейс, виртуальная реальность, виртуальное рабочее пространство, мобильное место оператора, когнитивная нагрузка, психометрическое тестирование, ЭЭГ.

Введение. Тенденции развития науки и техники направлены на уменьшение и, желательно, полное исключение применения человеческого труда непосредственно в местах добычи полезных ископаемых в прибойном пространстве. Горное производство – отрасль, в которой широко применяется автоматизация производства. Увеличение объемов автоматизированных и дистанционно выполняемых операций позволит снизить риск травмирования и гибели персонала в случае возникновения аварийных ситуаций, повысить безопасность труда работников горного производства, положительно повлиять на ситуацию с развитием хронических заболеваний.

Общая стратегия развития горнодобывающей отрасли России сегодня направлена на цифровизацию и автоматизацию как основных, так и вспомогательных производственных процессов. С данной позиции, а также с учетом распространения в мире дистанционного режима работы, для части служб, становится актуальной виртуализация рабочего места операторов производств в задачах обучения, диспетчеризации, потокового (стримингового) сопровождения основных технологических, сборочных, пусконаладочных, ремонтных работ.

Для обеспечения безопасности персонала, работающего со средствами отображения иммерсивной реальности повышается актуальность исследований, направленных на изучение воздействия виртуальной реальности (ВР) на психофизиологические показатели состояния операторов-пользователей.

Виртуальная среда является яркой, интерактивной, способствует концентрации внимания. В ВР маловероятно отвлечение внимания на стимулы реального окружения [1]. Данный аспект имеет большое значение при создании ВР для управления технологическими процессами, однако не является основополагающим. С точки зрения ряда ученых, нахождение человека в виртуальной среде в определенных условиях, не только не ухудшает способности человека к эффективному

функционированию, а, наоборот, способно активизировать возможности его организма [2]. Зарубежные ученые, работающие с большими массивами данных, публикуют результаты исследований по сопоставлению производительности человека при обработке таких массивов в виртуальной реальности и обычном двухмерном пространстве [3, 4]. Результаты этих исследований показывают, что производительность человека при работе с данными в виртуальной реальности не хуже, а зачастую даже лучше, чем при работе за привычным монитором. Некоторые западные ученые считают, что геймификация (превращение в компьютерную игру) многих рутинных задач может положительно повлиять на производительность за счет большей вовлеченности в процесс [5]. Кроме того, иммерсионная реальность повышает удобство работы с уже обработанными данными, подготовленными для работы в VR (графики, диаграммы, объемные таблицы) [6], особенно в части сравнения графической информации перед привычным нам монитором. Все перечисленные преимущества, в сочетании с возможностью изменить сам способ обращения с данными, которые нам дает виртуальная среда, подтолкнули команду авторов к разработке полноценного виртуального окружения, находясь в котором, оператор сможет полноценно решать поставленные перед ним задачи.

Восприятие во многом зависит от качества картинки, частоты и разрешения матрицы, точности и скорости работы системы отслеживания положения головы оператора. К тому же технологии VR постоянно развиваются в плане содержания и качества контента, совершенствуются устройства и программное обеспечение, увеличиваются производительность обработки графических данных, сокращается время отклика на обратную связь.

Постановка задачи. Исследования предлагают отличный от используемых способ повышения информационной ёмкости интерфейсов промышленных пунктов и систем управления оборудованием на предприятиях, основанный на трехмерной графике и средствах её объемного отображения.

Первая подзадача исследований – программно-техническая, интерфейсная. Задача разработки окружения VR состояла в анализе и выборе аппаратных средств отображения, программной графической среды разработки и последующем создании тестового виртуального рабочего пространства диспетчера-оператора, позволяющего максимально эффективно реализовать интерфейсное взаимодействие с данными.

Вторая подзадача исследований – психофизиологическая – разработка и апробация методики оценки влияния когнитивной нагрузки при погружении и работе в VR на психофизиологическое состояние оператора.

Реализация и обсуждение.

Разработка тестового виртуального пространства. Результаты анализа сред разработки, аппаратных средств отображения иммерсионных сред, их функциональности, опубликованы авторами ранее [7]. На текущем этапе проекта проведен аналитический обзор мировой практики по теоретическим аспектам проектирования виртуального окружения (пространства оператора) с учетом требований эргономики, в том числе, подходов к переносу объектов в виртуальное пространство, научно обоснованы подходы к оформлению и размещению объектов из физического мира в трехмерной виртуальной среде с учетом требований психической и физиологической эргономики. В результате чего разработан специализированный программно-аппаратный комплекс с интегрированным тестовым виртуальным пространством для будущего исследования параметров элементов виртуального кокпита. В состав комплекса входит персональный компьютер со средой разработки виртуального окружения Unity, программным обеспечением Oculus Link, очки виртуальной реальности Oculus Quest и Quest 2.

Тестовое виртуальное пространство было создано с применением методов графического конструирования виртуальной среды с использования лицензионной подписки на ПО UNITY версии 2019.4.1.f1 Personal. Тестовое виртуальное пространство создано в виде трехмерной комнаты эквивалентной по размерам помещению с габаритами Д×Ш×В 15×15×4 метра. Помещение тестового виртуального пространства собрано из примитивов типа «куб», пол выполнен из примитива типа «плоскость», при попытке использовать для потолка примитива типа «плоскость», что более удобно в плане трехмерного конструирования, происходило «просвечивание» потолка внешним встроенным источником света, с образованием паразитных теней от объектов внутри помещения. Применение приемов контрсветового воздействия дополнительными источниками света решали проблему, но частично. Применение примитива типа «куб» для потолка отрезало внешний световой поток от виртуального источника света и позволило создать рассеянное локальное освещение внутри тестового пространства. По рекомендации нейропсихолога текстуры для стен были выбра-

ны матового бирюзового оттенка. Для создания более комфортной внутренней среды реализована привычная (ожидаемая) для мозга цветовая окраска потолка и пола, на пол была наложена текстура, имитирующая ламинатное покрытие, а потолок окрашен в светло-голубой, приближенный к белому цвет, так как абсолютно белый потолок не выглядит натуральным при рейдренге сцены с использованием точечной подсветки. Для создания помещения с мягким рассеянным светом не пересвечивающим объекты внутри помещения, но достаточным для «освещения» виртуального помещения, использован один виртуальный источник направленного освещения, а также распределено 73 виртуальных точечных источника света разной интенсивности.

После создания виртуального помещения разработана концепция размещения информационных панелей. Для этого был проведен опрос диспетчерско-операторского состава крупнейших добывающих и промышленных предприятий региона. По данным опроса обобщено, что диспетчера для наблюдения и контроля используют широкоформатные интерактивные информационные панели, также используют электронные таблицы для ведения отчетов, пользуются текстовыми редакторами, используют мессенджеры и электронную почту для коммуникации с удаленными пунктами производства. Таким образом, все эти элементы должны будут находиться в виртуальном тестовом пространстве. Кроме того, важным аспектом для обеспечения психической эргономики – создание привычного окружения для восприятия мозгом – с наличием привязок, обеспечивающих однозначное положение тела в пространстве в корректном масштабе.

Текущая версия тестового виртуального рабочего пространства имеет три больших и три малых информационных панели, закрепленных на противоположной от оператора стене на эквивалентном расстоянии 8,4 метра от глаз оператора. Предусмотрена возможность изменения наполнения, как по размеру инфопанелей, так и по их количеству (рис. 1 а).

Для работы с текстовыми документами и электронными таблицами предусмотрены две отдельные инфопанели, расположенные ближе к оператору с углом наклона 30 градусов к горизонтальной плоскости, при необходимости возможно изменение размера панелей и их количества. Непосредственно перед оператором расположен «пульт управления», состоящий из клавиатуры, инфопанели мессенджеров в левой части, телефонного модуля и кнопок активации мессенджеров и дополнительных приложений в правой его части. Также в левой верхней части расположена имитация кнопочного пульта управления (рис. 1 б).

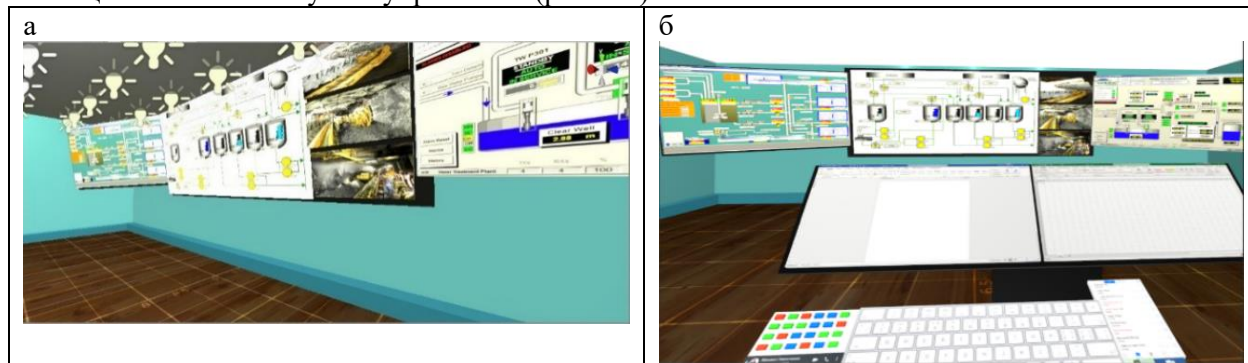


Рис. 2. Общий вид: а – инфопанелей тестового виртуального пространства с элементами интерьера и источниками освещения; б – тестового виртуального пространства с пультом управления

Имитация пульта управления сделана таким образом, чтобы с ней было удобно взаимодействовать с использованием штатных контроллеров Oculus Quest, а в дальнейшем управлять руками по технологии Quest Hand-tracking

В тестовом виртуальном пространстве реализовано два режима взаимодействия оператора с виртуальным тестовым пространством:

1. «Режим обзора» – оператор может осматривать помещение поворачивая и наклоняя голову, управление направлением взгляда происходит с помощью внутренних сенсоров очков виртуальной реальности.

2. «Режим действия» – оператор может свободно перемещаться внутри виртуального тестового пространства, взаимодействуя с преградами на его пути (стены, пульт управления, информационные панели). Вектор и скорость движения оператор задает клавишами WASD или стрелками на клавиатуре. Направление взгляда изменяется согласно движения компьютерной мыши.

Оценка состояния оператора при виртуализации рабочего пространства. Отдельным блоком исследований являлась подзадача разработки и апробации методики оценки психофизио-

логического состояния оператора при виртуализации рабочего информационного пространства. Ситуация осложняется тем, что исследователи влияния ВР на психику человека в настоящее время преимущественно изучают влияние компьютерных игр, где виртуальная среда отличается высокой динамичностью. Влияние ВР на человека в статических условиях практически не исследовано.

Для решения поставленной задачи была разработана экспериментальная методика работы испытуемых в ВР-очках, включающая оценку их психофизиологического состояния до, в процессе работы и по ее завершении (рис. 2).



Рис. 2. Последовательность и временные рамки проведения исследований

Апробации методики проводилась на базе ФГБНУ НИИ КПССЗ, в частности проведен эксперимент, в котором приняли участие 10 диспетчеров мужчин-правшей в возрасте от 25 до 45 лет без опыта использования средств ВР. У них оценивалось психофизиологическое состояние до, в процессе и по завершении работы в ВР. Для его оценки испытуемых проводился ряд исследований.

Первым этапом – осмотр невролога с проведением вестибулярных проб, далее производилось исходное электроэнцефалографическое (ЭЭГ) исследование.

Следующим этапом проводилась исходная оценка психоэмоционального и когнитивного статуса, включающая оценку сложной зрительно-моторной реакции (время реакции, частота ошибок), работоспособность головного мозга, оценку функций внимания, кратковременной памяти и пространственного восприятия. После чего испытуемые надевали очки ВР и в течение 3-х сессий по 20 минут выполняли задачи на устный счет, чтение и анализ текста, анализ голосового задания с составлением и отправкой ответа в качестве когнитивной нагрузки.

Тип заданий выбран, исходя из специфики работы диспетчерского состава, а способ и порядок предъявления обусловлен необходимостью обеспечить многозадачность работы с высокой степенью переключаемости. Для выполнения заданий использовалось предустановленное (мануальное) интерфейсное программное обеспечение используемой ВР-гарнитуры Oculus Quest и интернет-браузер. Из сторонних приложений использовались бесплатное программное обеспечение для просмотра PDF файлов, VLC медиаплеер для воспроизведения аудио задач и Polaris Office для чтения и анализа некоторых текстовых документов. Промежуточная запись ЭЭГ проводилась без снятия очков ВР. После ВР сессий производился осмотр невролога, выходное ЭЭГ, повторная оценка психофизиологического состояния.

Результаты успешность выполнения заданий в рамках когнитивной нагрузки представлены в табл. 1, где УС – устный счет, ПИ – поиск информации, ПТ – поиск в тексте, АЗ – аудио задача.

По результатам апробации методики на выборке из десяти испытуемых после когнитивной нагрузки в условиях ВР с помощью методов психометрического тестирования и регистрации ЭЭГ выявлены как положительные, так и отрицательные изменения психофизиологического статуса. Показатель пространственного восприятия после пребывания в виртуальной среде улучшается, а ухудшение психометрических показателей наблюдается только в наиболее сложных для выполнения заданий (работоспособность головного мозга и распределение внимания). Численные показатели результатов исследований в данной работе авторами не приведены по причине малой выборки и важности корректной интерпретации результатов.

Указанные результаты не следует считать окончательными данными о влиянии виртуальной среды на состояние оператора, а стоит рассматривать их в качестве подтверждения качества разработанной парадигмы исследования. Согласно полученным результатам, методика исследования с определением психофизиологического состояния человека до и после когнитивной нагрузки (решения испытуемыми задач на устный счет, чтение и анализ текста, прослушивание и анализ голосового задания) в очках ВР показала приемлемую субъективную трудность и переносимость виртуальной среды.

Таблица 1

Успешность выполнения заданий												
Параметр	Значения											
Количество выполненных заданий за три сессии, шт. (от÷до) всего	(4÷13) 82											
в т.ч. отдельно по сессиям	1 сессия				2 сессия				3 сессия			
	15				31				36			
в т.ч. по типам задач	УС	ПИ	ПТ	АЗ	УС	ПИ	ПТ	АЗ	УС	ПИ	ПТ	АЗ
	10	1	1	3	4	9	10	8	12	10	5	9
Максимальный возможный результат за выполненные задания, балл (от÷до) всего	(7÷23) 138											
Фактически полученные результаты за выполненные задания, балл (от÷до) всего	(5÷19) 104											
Относительная результативность выполнения заданий, % (от÷до) среднее	(60÷86) 74											

При рассмотрении изменений ЭЭГ показателей до и после проведения эксперимента по виртуализации рабочего информационного пространства установлено, что наблюдаемые в процессе эксперимента ЭЭГ-изменения у испытуемых после погружения в ВР соответствуют паттернам активации коры головного мозга, связанным с выполнением когнитивной нагрузки и возникающим утомлением. Определить степень влияния виртуальной среды и когнитивной нагрузки в качестве источников утомления возможно будет после создания условий для сравнения деятельности операторов в условиях ВР и без нее. Для этого дальнейшее применение разработанной методики с оценкой психофизиологического состояния операторов до, в процессе работы и по ее завершении подразумевает формирование контрольной группы, условия работы которой будут идентичными, за исключением погружения в ВР.

Заключение. При реализации изучены фундаментальные и прикладные аспекты трехмерной виртуализации рабочего окружения. Обоснованы с учетом психической эргономики оператора, а также эффективности его взаимодействия с виртуальными объектами принципы переноса объектов управления из привычного окружения в трехмерный интерфейс. На основе этих принципов разработано тестовое виртуальное пространство для исследования параметров элементов виртуального кокпита, что в перспективе поможет усовершенствовать процессы управления промышленными технологическими процессами, в том числе процессами выемки угольных месторождений и обеспечить переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям. Результаты по апробации методики впоследствии помогут определить степени влияния виртуальной среды на психофизиологическое состояние оператора, а также сформулировать рекомендации по психической эргономике виртуального рабочего пространства.

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-48-420017.

Список литературы

1. Технологии виртуальной реальности: методологические аспекты, достижения и перспективы / Ю.П. Зинченко [и др.] // Национальный психологический журнал. – № 1. – 2010. – С. 54-62.
2. Содержание профессиональной деятельности как фактор успешности применения технологий виртуальной реальности / А.И. Ковалев [и др.] // Экспериментальная психология. – 2015. – Т. 8. – № 2. – С. 45-59.
3. Millais P., Jones S.L., Kelly R. Exploring Data in Virtual Reality: Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. doi:10.1145/3170427.3188537.
4. Nite S. VR / AR Enterprise Insider: Guidebook for Virtual Reality and XR. – Modu XR, 2020.
5. Jesse Glover, Jonathan Linowes. Complete Virtual Reality and Augmented Reality Development with Unity. – Birmingham: Packt Publishing Ltd., 2019. – 637 с.

6. Cavallo M., Dolakia M., Havlena M. Immersive Insights: A Hybrid Analytics System for Collaborative Exploratory Data Analysis: 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. –2019. – No 9. – Pages 1–12. – <https://doi.org/10.1145/3359996.3364242>.

7. Виртуализация рабочего места оператора и решение текущих задач её интерфейсной реализации / М.С. Никитенко [и др.] // Научноёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – №6. – С. 232-235.

УДК 622.85:622.271.45

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСТАВОК ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СТРАНАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ВОСТОЧНОЙ ЕВРОПЫ С ИЗБЫТОЧНОЙ УГОЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ

^{1,2}Д.Т.Н. Зеньков И.В.

1 - Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия

2 - Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты исследования мест расположения объектов топливно-энергетического комплекса стран Восточной Европы, производящих добычу бурого угля открытым способом. Объемы вырабатываемой электроэнергии на тепловых станциях позволяют реализовывать ее излишки на восточноевропейском рынке электроэнергии.

Ключевые слова: страны Восточной Европы, угольные разрезы, тепловые станции, внешнеэкономическое взаимодействие, дистанционное зондирование Земли, угольная генерация, рынок электроэнергии.

Введение. В последние годы, несмотря на мировые, в т.ч. и европейские тенденции к призыву к сокращению количества вырабатываемой электрической энергии на основе сжигания угля, доля последней в структуре вырабатываемой энергии останется на неизменном уровне. Подобные трактовки развития глобальной энергетики вполне очевидно игнорируют ситуацию, в которой при тотальном переходе на «зеленую энергетику» с использованием кремниевых батарей и «ветряков», без необходимых мощностей остаются крупные металлургические, машиностроительные и химические концерны. Последнее по понятным причинам отрицательно скажется на резком снижении доли этих предприятий в ВВП экономически развитых европейских стран. Поэтому в ближайшее время в странах Восточной Европы объем добычи бурого угля открытым способом и угольная генерация электроэнергии будет оставаться на достигнутом уровне. В целом же между европейскими странами наблюдается резкий дисбаланс в выработке электрической энергии и ее потреблении. Ряд государств (Польша, Чехия, Болгария), имеющих на своей территории крупные месторождения бурого угля, интенсивно производят их разработку открытым способом в целях генерации электроэнергии на тепловых станциях, причем часть выработанной энергии поставляется в соседние страны.

Направления поставок электрической энергии с территорий стран, имеющих избыточные мощности угольной генерации на тепловых станциях. В границах десяти европейских государств производится масштабная добыча угля открытым способом для его сжигания на тепловых станциях с установленными генерирующими мощностями в диапазоне 600-5500 МВт [1]. Максимальный объем поставок электроэнергии на Европейском рынке осуществляет республика Польша путем ее передачи по высоковольтной линии ВЛ-500 в Федеративную республику Германия. Отметим важнейшую особенность функционирования энергосистемы республики Польша. В ее восточном секторе выработка электроэнергии производится путем сжигания каменного угля, поступающего по железной дороге из России. Здесь работает более 20 тепловых электростанций, установочные мощности которых находятся в диапазоне 250-600 МВт на одной станции. Тепловые станции, работающие на собственном буром угле, добытом на угольных разрезах, находятся в западном и центральном секторе республики.

В республике Польша находятся три сектора с предприятиями ТЭК, работающими по схеме «добыча угля – транспортировка на тепловую станцию – сжигание – выработка электроэнергии». Расстояние транспортировки угля в основном составляет 10-20 км и не превышает 300 км. Расположенный в центральной части республики сектор ТЭК (на рис. 1 обозначен цифрой 1), включает

четыре угольных разреза: Гоголина, Богужицки, Жарлатов и Джозефина с координатами центров карьеров соответственно в точках $52^{\circ} 24' 32''$ с. и $18^{\circ} 11' 10''$ в., $52^{\circ} 27' 37''$ с. и $18^{\circ} 31' 17''$ в., $52^{\circ} 16' 24''$ с. и $18^{\circ} 31' 25''$ в., $52^{\circ} 02' 40''$ с. и $18^{\circ} 38' 04''$ в. Уголь добывают с использованием роторных экскаваторов (аналоги российских ЭРП-2500), весь объем горной массы (вскрышные породы и уголь) перемещают по конвейерам. Примерно половину объема добытого угля сжигают на трех тепловых станциях (Гославице, Езиоро Гославски, станция восточнее г. Турек) с суммарной мощностью 2500 МВт. С этих же разрезов уголь по железной дороге транспортируют на тепловую станцию Козинице (2 на рис. 1) с установленными мощностями 2800 МВт. На юго-восток в 81 км находится второй сектор ТЭК (3) Польши. В него входят два угольных разреза Пархлини и Александров с координатами центров карьеров $51^{\circ} 14' 20''$ с. и $19^{\circ} 07' 02''$ в., $51^{\circ} 14' 27''$ с. и $19^{\circ} 14' 47''$ в. На этих разрезах добывают бурый уголь для тепловой станции Роговик (находится на одном из первых мест в Европе), мощность которой составляет 5500 МВт. Еще один сектор ТЭК (4) расположен в западной части республики. В нем находится угольный разрез Туров и тепловая станция с установленной мощностью на уровне 2000 МВт. Горный отвод разреза располагается в 130 м от западной границы с Федеративной республикой Германией.

От повышающих трансформаторов тепловых станций электроэнергия поступает на высоковольтные передающие линии ВЛ-500. Схема линий электропередач, по которым энергия подается в Германию, показана на рисунке линиями желтого цвета. Со стороны республики Польша ввод высоковольтных линий на территорию восточных районов Германии осуществлен через два погранперехода в точках с координатами $51^{\circ} 03' 10.44''$ с. и $14^{\circ} 57' 48.98''$ в., $50^{\circ} 56' 45.77''$ с. и $14^{\circ} 53' 43.46''$ в. Территория Германии, запитанная электроэнергией со стороны Польши, обведена на рисунке линией синего цвета.

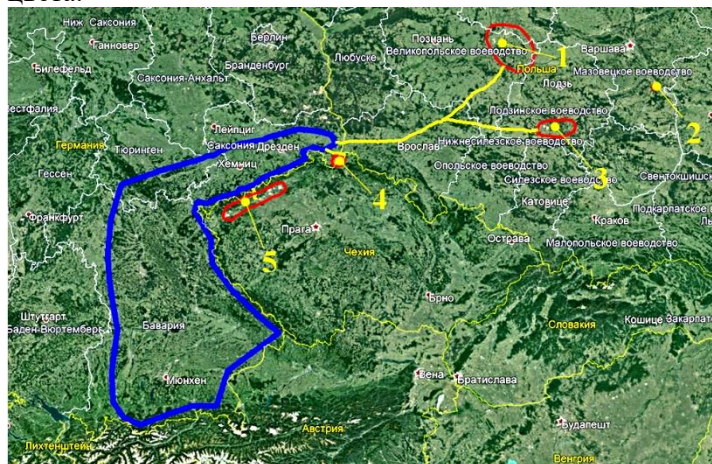


Рис. 1. Фрагмент космоснимка с нанесением схемы поставок электроэнергии в Федеративную республику Германия из Республик Польша и Чехия

В северо-западной части республики Чехия уголь добывают на пяти угольных разрезах, расположенных в полосе с размерами 12×90 км, длинная ось которой ориентирована в направлении юго-запад – северо-восток. Сектор, в котором концентрированно расположены предприятия ТЭК Чехии – угольные разрезы и тепловые станции – показан на рис. 1 цифрой 5. Весь объем добытого угля сжигается на семи тепловых станциях. Тепловая станция Прунеров мощностью 1500 МВт работает во взаимодействии с угольным разрезом Брежно, находящемся в 8 км на восток от нее. От станции отходят две линии, передающие электроэнергию, – ВЛ-220 для внутреннего потребления и ВЛ-500 для передачи энергии в восточный сектор Германии. Эта линия заведена через погранпереход в точке с координатами $50^{\circ} 31' 47.47''$ с. и $13^{\circ} 12' 34.09''$ в. Расстояние между погранпереходами ВЛ-500 в республике Чехия и в районе г. Богатыня в республике Польша составляет 124 км по прямой.

В республике Болгария также производится масштабная добыча угля открытым способом на угольном разрезе Трояново [2]. Ежегодный объем бурого угля, извлекаемого из недр, находится на уровне 26 млн.т. Весь объем сжигается на трех тепловых станциях, суммарная мощность которых составляет 5000 МВт. Исследование многофакторной модели потребления электроэнергии показывает, что при относительно небольшой численности населения страны, работающей АЭС на Дунае (Козлодуй), отсутствии энергоемких производств, в электроэнергетике Болгарии имеются существенные излишки для реализации электрической энергии в соседние страны.

В соседних Греции, Македонии, Сербии, Румынии также имеются крупные предприятия собственного ТЭК (угольные разрезы и тепловые станции) с излишними мощностями по выработке электроэнергии, и поэтому поставки ее с территории Болгарии в этих направлениях именно с тепловых станций, работающих на угле с разреза Трояново, экономически нецелесообразны и неэффективны [1]. Одна из трех тепловых станций, находящаяся в 1,4 км на север от п. Медникарово, вырабатывает электроэнергию для поставки на территорию Турецкой республики. От станции отходят две линии ВЛ-500 в южном направлении в сторону турецкой границы через пограничные переходы в точках с координатами 41° 44' 10.99" с. и 26° 19' 44.90" в., 41° 44' 10.79" с. и 26° 19' 44.89" в. Протяженность линии от станции до границы составляет 60 км. От точки ввода линий электропередач на территорию Турции расстояние до западного берега пролива Босфор составляет 238 км, поэтому территориальный сектор Турецкой республики, расположенный западнее от пролива, электрифицирован с использованием энергии, вырабатываемой в Болгарии.

Вывод. В настоящее время в странах Восточной Европы (страны из бывшего СЭВ) производится масштабная добыча бурого угля открытым способом и выработка на основе его сжигания электрической энергии. Страны с угольной генерацией имеют возможность реализовывать излишки произведенной электроэнергии в соседние государства с развитой и развивающейся экономикой. По информации, полученной с комоснимков, находящихся в свободном доступе, выявлены внешнеэкономические связи на Восточноевропейском рынке электроэнергии между республиками Польша, Чехия и Федеративной республикой Германией, а также между республикой Болгария и Турецкой республикой.

Список литературы

1. Зеньков И.В. Организация и экономика горного производства на угольных разрезах в странах Восточной Европы // Уголь. – 2017. – № 4. – С. 70-71.
2. Remote monitoring of ecological state of disturbed lands in the area of Trojanovo open pit coal mine in Bulgaria / I.V. Zenkov [et al.] // Eurasian mining. – 2017. – № 1. – С. Р. 38-41.
3. <https://www.google.com.earth>

ПРОМЫШЛЕННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВЫБРОСООПАСНЫХ ЗОНАХ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ ПРОХОДКЕ ВЫРАБОТОК

^{1,3}Разумов Е.Е., ¹д.т.н. Простов С.М., ²Рахматуллаев Р.Р., ³Панин С.Ф.

1 – Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия

2 – АО «АрселорМиттал Темиртау», г. Караганда, Республика Казахстан

3 – Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Приведено описание методики исследования геодинамических проявлений при проходке подготовительных выработок на шахтах АО «АрселорМиттал Темиртау». Установлено, что при проходке выработок по угольным пластам основные параметры естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) относительно стабильны. Изменения этих параметров зафиксированы на участках пересечения с разрывными тектоническими нарушениями. На выбросоопасных участках, выявленных базовым комплексным методом по выходу бурового штыба и начальной скорости газоотдачи, наблюдается определенная взаимосвязь параметров ИЭМИ с показателем выбросоопасности R.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, выход бурового штыба, начальная скорость газоотдачи, прогноз выбросоопасности

Введение. Одной из проблем отработки Карагандинского угольного бассейна является предотвращение внезапных выбросов угля и газа [1, 2]. Базовыми методами текущего прогноза выбросоопасности является определение скорости газовыделения из контрольного шпура и выхода буровой мелочи. Метод характеризуется высокой достоверностью получаемых результатов при оценке напряженного-деформированного состояния массива горных пород и степени его выбросоопасности, но является весьма трудоемким при его применении. В качестве альтернативы базовому методу прогноза в настоящее время на шахтах АО «АрселорМиттал Темиртау» используется геофизический метод прогноза выбросоопасности – метод по регистрации естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) горных пород [3, 4]. Использование данного метода позволяет следить за изменением напряжённого состояния участков горного массива, определять категорию выбросоопасности в рабочих забоях.

Методика исследований. В период с декабря 2019 г. по ноябрь 2020 г. в горных выработках шахт АО «АрселорМиттал Темиртау» проводились комплексные исследования динамики формирования параметров импульсного естественного электромагнитного излучения в выбросоопасных зонах угольного пласта при проходке выработок. Ниже приведены наиболее существенные результаты, полученные по шахтам им. Кузембаева и им. Ленина.

На шахте им. Кузембаева замеры проводились в забое конвейерного бремсберга 45 К10-В пласта К10. Схема опытного участка представлена на рис.1.



Рис.1. Выкопировка с плана горных выработок, конвейерный бремсберг 45К10-В ш. им. Кузембаева

В процессе проходки выработки проводился периодический комплексный прогноз степени выбросоопасности базовым методом, включающим измерение начальной скорости газовыделения и выхода буровой мелочи, параллельно проводилась регистрация уровня ЕЭМИ.

Комбинированный базовый метод прогноза получил наибольшее распространение при ведении горных работ на выбросоопасных участках, он включает измерение выхода бурового штыба и начальной скорости газоотдачи скважины. По пласту угля бурят шпур глубиной 2–3 м в стандарт-

ном режиме (среднее время бурения 2 мин). В процессе бурения определяют максимальный объем $V_{\max}$ выхода буровой мелочи (штыба) с одного метра шпура. Не позднее чем через 2 мин после окончания бурения устье шпура герметизируют специальным устройством и по графику газоотдачи $q(t)$ определяют ее максимальное значение $q_{\max}$.

По измеренным параметрам $V_{\max}$ и $q_{\max}$ определяют комплексный показатель

$$R = (V_{\max} - 1,8) \cdot (q_{\max} - 4) - 6,$$

где $V_{\max}$ – в л/м; $q_{\max}$ – в л/мин.

При $R > 0$ участок признают выбросоопасным.

Прогноз методом регистрации ИЭМИ проводился комплексом ANGEL-M в двух или трех точках на забое проводимой выработки [5]. В каждой точке выполнялась серия из пяти замеров. Обработка результатов измерений проводилась прибором автоматически и включала определение двух основных параметров:

- параметр А – средняя амплитуда импульсов в цикле измерения, косвенно характеризующая концентрацию механических напряжений в зоне опорного давления;
- параметр В – угол наклона прямой распределения амплитуд по регистрируемым частотам, взаимосвязанный с расстоянием от обнажения до точки максимума опорного давления.

На шахте им. Ленина замеры по описанной методике проводились в подвигающемся забое конвейерного бремсберга 4.04 Д6-1-В пласта Д₆.

Интерес представляют результаты, полученные в периоды пересечения строящимися подготовительными выработками разрывного тектонического нарушения. На рис.2 представлены выкопировки с геологического прогноза расположения нарушений в сечениях выработок.

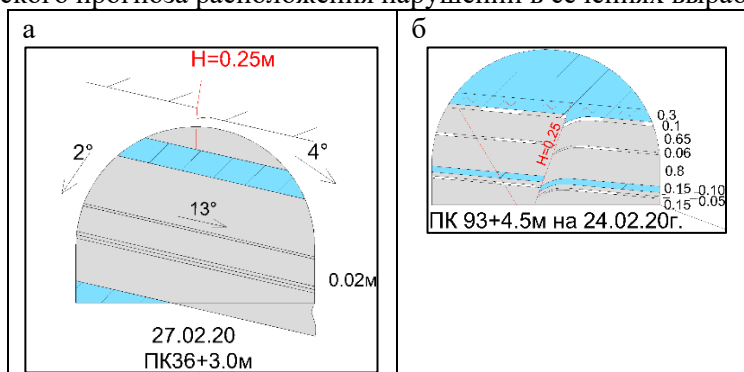


Рис. 2. Выкопировки с геологического прогноза на конвейерный бремсберг 45K10-В шахты им. Кузмбаева, ПК 36+3,0 м (а), и конвейерный бремсберг 4.04 Д6-1-В шахты им. Ленина, ПК 93+4,5 м (б)

Результаты исследований и их обсуждение. На шахте им. Кузмбаева 26.02.20 г. при подходе к тектоническому нарушению зарегистрирован рост ЕЭМИ горных пород с увеличением амплитуды регистрируемого сигнала и наличием высокоамплитудных импульсов (рис. 3).

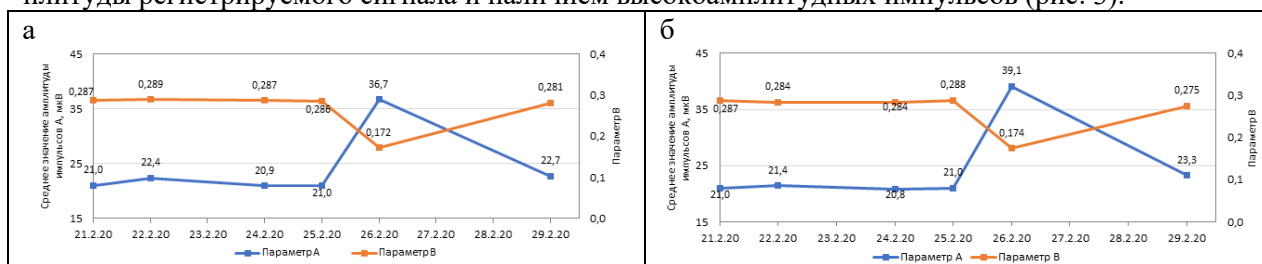


Рис. 3. Совмещенный график параметров А и В при выполнении измерений в точке №1 (а) и №2 (б) в феврале 2020 г.

Прогноз категории выбросоопасности по скорости газовыделения и выхода бурового штыба по одному из прогнозных шпуров показал категорию «опасно» (рис.4).

Проведение выработки было приостановлено. Были проведены мероприятия по разгрузке массива – пробурены разгрузочные скважины. К 29.02.20 г. значения прогностических параметров вернулись к фоновым показателям, как и текущий прогноз базовым методом показал категорию «неопасно». После приведения забоя в невыбросоопасное состояние и продолжения проведения горной выработки, в кровле было визуально подтверждено разрывное геологическое нарушение

пласта (рис. 2а), геомеханическое влияние которого способствовала увеличению ЕЭМИ при приближении к нему проходческого забоя.

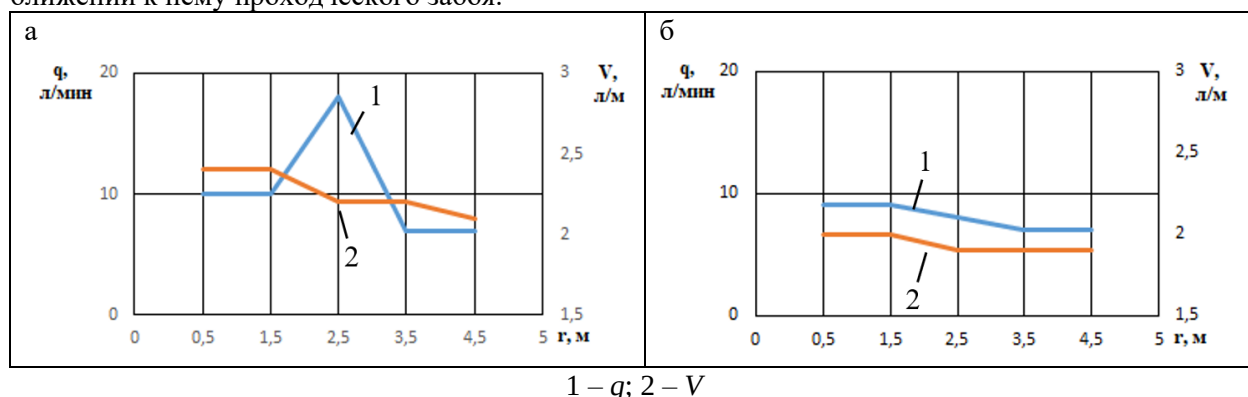


Рис. 4. Результаты прогноза выбросоопасности базовым методом 26.02.20 г. в скв. №1, $R = 0,65$ – опасно (а) и №2, $R = -5,88$ – неопасно (б)

С 23.03.20 по 30.03.20 при продолжении горнопроходческих работ было отмечено увеличение ЕЭМИ массива горных пород (рис. 5).

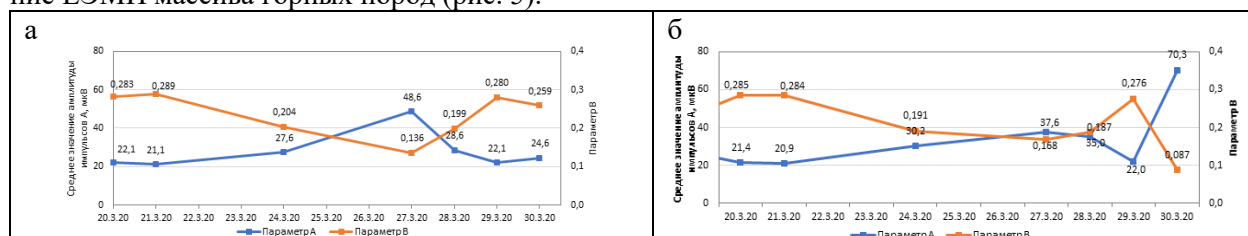


Рис.5. Совмещенный график параметров А и В при выполнении измерений в точке №1, (а) и №2 (б) в марте 2020 г.

29.03.20 при прогнозе базовым методом выявлена категория выбросоопасности «опасно» (рис. 6).

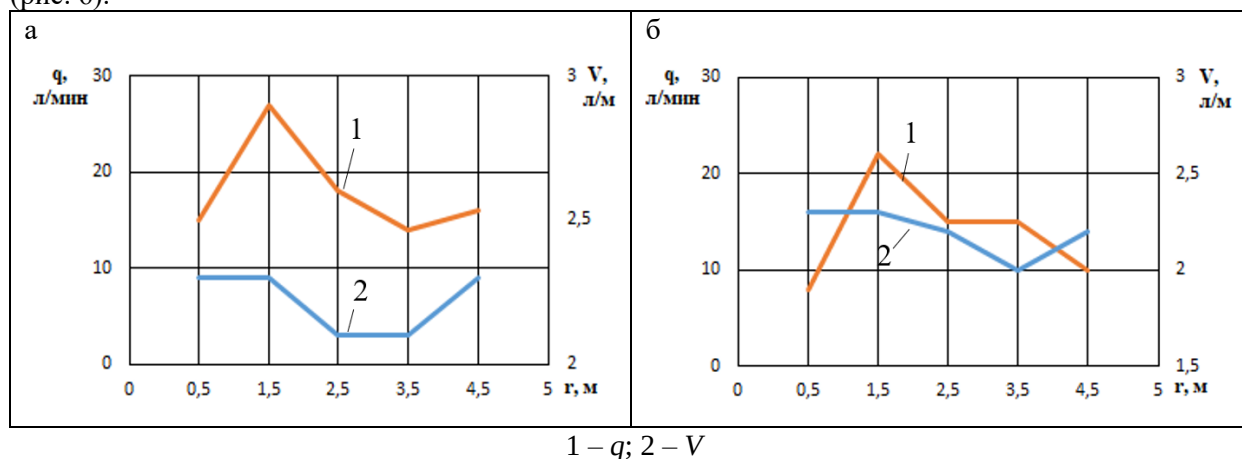


Рис. 6. Результаты прогноза выбросоопасности базовым методом 29.03.20 г. в скв. №1, $R = 6,6$ – опасно (а) и №2, $R = 2,2$ – опасно (б)

На шахте им. Ленина 12, 14, 17, 21, 24 и 27 февраля при проведении прогноза выбросоопасности базовым методом была получена категория «опасно» хотя бы по одному из прогнозных шпуров. На интервале с 14.02 по 21.02 этим методом зарегистрирована разгрузка массива, затем снова произошло повышение степени выбросоопасности, $R > 0$ (рис. 7 а).

На графиках параметров ЕЭМИ интервал разгруженного состояния массива характеризуется резким снижением амплитуды A регистрируемого сигнала до уровня $A = 0,1$ мВ и относительным увеличением спектрального параметра B в диапазоне $B = 0,344-0,377$. На остальных интервалах параметры A и B имеют стабильные значения (рис. 7б).

24 февраля было вскрыто разрывное нарушение пласта (рис. 2б).

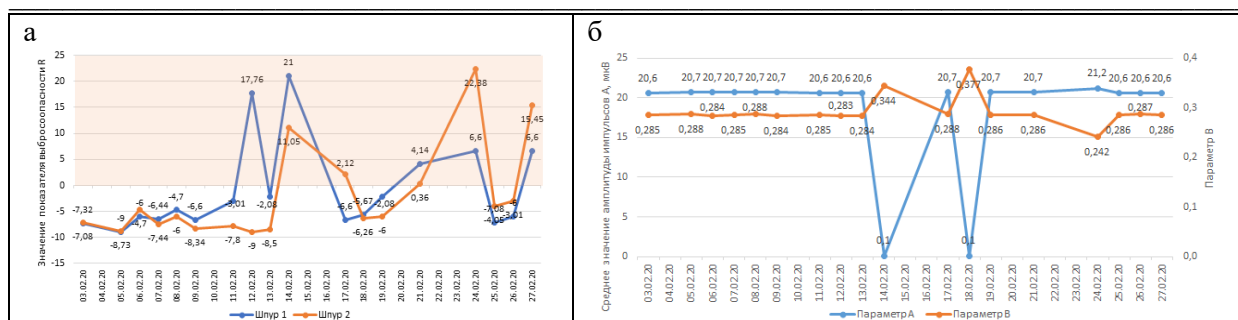


Рис. 7. Прогноз выбросоопасности базовым методом по газовыделению и выходу бурового штыба в конвейерном бремсберге 4.04 Дб-1-В (а); совмещенный график параметров А и В при выполнении измерений в точке №1 в конвейерном бремсберге 4.04 Дб-1-В (шахта им. Ленина, февраль 2020)

Выводы. В большинстве случаев при проходке подготовительных выработок по угольным пластам основные параметры ИЭМИ A (средняя амплитуда импульсов в цикле измерения) и B (угол наклона прямой распределения амплитуд по регистрируемым частотам), относительно стабильны. Характерные изменения этих параметров зафиксированы на участках пересечения строящихся подготовительных выработок с разрывными тектоническими нарушениями.

На выбросоопасных участках проходки выработок, выявленных базовым комплексным методом по выходу бурового штыба и начальной скорости газоотдачи, наблюдается определенная взаимосвязь параметров ИЭМИ с показателем выбросоопасности R : при $R > 0$ параметр A возрастает относительно установившегося значения, а параметр B – уменьшается. В неопасном состоянии (при $R < 0$) и после проведения противовыбросных мероприятий приращенения обоих параметров обратные.

Установление критических значений параметров ИЭМИ для прогноза категории выбросоопасности возможно на основе статистической обработки экспериментальных данных с учетом особенностей горно-геологических и горнотехнических условий.

Список литературы

1. Проблемы газоносности и выбросоопасности пласта db в Карагандинском угольном бассейне / С.К. Баймухаметов [и др.] // ГИАБ. – 2004. – №8.
2. Сиволобцев К.С. Проблемы внезапных выбросов угля и газа при разработке угольных пластов Карагандинского угольного бассейна [Электронный ресурс] // Интернаука. – 2019. – № 43(125). – Часть 1. – С. 30-32.
3. Яковлев Д.В., Мулёв С.Н. Опыт применения многофункциональной аппаратуры АНГЕЛ-М в угольной и рудной промышленности // Уголь. – 2014. – № 10 (1063). – С. 14-19.
4. Панин С.Ф., Мулев С.Н., Штирц В.А. Совершенствование технологии прогноза удароопасного состояния массива с использованием аппаратного прибора «ANGEL-М» в условиях Таштагольского и Шерегешского рудников // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2014. – № 1. – С. 368-375.
5. Пат. №2535329. Способ определения удароопасности массива горных пород по электромагнитной эмиссии и устройство для его осуществления. – ВНИМИ, 2013 г.

УДК 551.583; 504.05

ЭМИССИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В СЕКТОРЕ «ЭНЕРГЕТИКА»

д.т.н. Тайлаков О.В., к.т.н. Застрелов Д.Н, Лукина Е.В., Снетова Е.С.

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

Аннотация. Представлены объемы выбросов парниковых газов в секторе «Энергетика» на территории Российской Федерации. Рассмотрена оценка потенциала сокращения выбросов парниковых газов в энергетическом секторе. Приведены рекомендации для снижения объемов выбросов парниковых газов в энергетической отрасли.

Ключевые слова: изменение климата, парниковый газ, энергетика.

Увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере представляет собой глобальную экологическую угрозу для окружающей среды и экономического развития в общемировом масштабе. Мировым сообществом принимаются усилия по снижению антропогенных выбросов парниковых газов. В основе разрабатываемых, реализуемых и уже действующих способов ограничения содержания парниковых газов в атмосфере Земли лежит количественное определение, мониторинг, отчетность и верификация выбросов парниковых газов [1].

Наиболее значимым сектором кадастра выбросов парниковых газов является энергетический сектор. На данный сектор в Российской Федерации приходится около 80 % от общего объема выбросов парниковых газов [1].

Присутствие парниковых газов в атмосфере планеты ведет к удержанию части теплового излучения от земной поверхности в приземных воздушных слоях. Следствием повышения концентрации парниковых газов является постепенный нагрев поверхности планеты, в дальнейшем ведущий к климатическим изменениям. Изменения климата, в свою очередь, могут характеризоваться негативными последствиями в ресурсопотреблении и производстве [2, 3]. Поэтому растущая концентрация парниковых газов – глобальная угроза для окружающей среды и экономического развития.

С целью реализации сокращения объемов антропогенных выбросов парниковых газов от уровня выбросов в 1990 году было принято Парижское соглашение в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Данное соглашение было подписано в 2016 году почти 200 странами-участницами, в том числе и Россией. Для выполнения обязательств, принятых в соответствии с подписанным соглашением, был издан Указ Президента Российской Федерации №666 от 04.11.2020 г. «О сокращении выбросов парниковых газов», согласно которому необходимо обеспечить к 2030 году сокращение выбросов парниковых газов до 70 % относительно уровня 1990 года [4]. Наибольшая доля от общего объема выбросов парниковых газов присуща сектору «Энергетика». Обычно на энергетический сектор приходится более 90 % выбросов CO₂ и 75 % от общего объема выбросов парниковых газов в развитых странах. Внутри сектора на стационарное сжигание обычно приходится около 70 % выбросов парниковых газов, на мобильное сжигание приходится около четверти выбросов [5]. Энергетические системы в большинстве экономик в значительной степени определяются сжиганием ископаемого топлива. При этом углерод и водород из ископаемого топлива, главным образом преобразуется в углекислый газ (CO₂) и воду (H₂O), высвобождая химическую энергию топлива и превращая ее в тепло. Это тепло используется либо непосредственно, либо для получения механической энергии, чаще всего для получения электричества или для транспортировки [5].

Доля сектора «Энергетика» на территории Российской Федерации в 1990-2015 гг. доминирует в общем объеме выбросов парниковых газов. В рассматриваемый период выбросы от энергетического сектора составили в среднем 81-83%, выбросы от промышленности составили 7-8%, доля сектора «Сельское хозяйство» – 5-8%, «Отходы» – 2-4% [6].

На территории Кемеровской области в соответствии с «Методическими рекомендациями по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации, утвержденными распоряжением Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации» от 16.04.2015 № 15-р» выполнена оценка выбросов парниковых газов за период 1990 г., 2014-2018 гг. Выбросы в секторе «Энергетика» на территории Кемеровской области за рассматриваемый период составляют 65-70% от общего количества региональных выбросов.

Выбросы парниковых газов в секторе «Энергетика» представлены выбросами CO₂, CH₄, N₂O при сжигании топливных ресурсов для выработки тепло- и электроэнергии (стационарное сжигание), выбросами CO₂ при сжигании моторного топлива транспортом, CO₂ и CH₄ при фугитивных выбросах.

Совокупные выбросы парниковых газов по сектору «Энергетика» в Кемеровской области в период 1990 г., 2014-2018 гг. представлены в табл. 1. Из представленной таблицы можно сделать вывод, что основная доля выбросов приходится на категории «Стационарное сжигание топлива» – 48-55 % и «Фугитивные выбросы» – 40-45%.

Исходя из необходимости сокращения объемов выбросов парниковых газов и представленных результатов следует, что мероприятия по сокращению объемов выбросов парниковых газов целесообразно проводить в первую очередь в секторе «Энергетика». Данный сектор обладает наибольшим потенциалом сокращения парниковых газов поскольку продукция сектора «Энергетика» используется во всех остальных отраслях экономики, что косвенно повлияет на сокращение

в них выбросов парниковых газов. Необходимость реализации потенциала сокращения объема выбросов стоит рассматривать не только исходя из положений Указа Президента Российской Федерации №666 от 04.11.2020 г., но также в свете реализации регламентирующих правительственных документов, таких как Энергетическая стратегия России на период до 2035 г.

Таблица 1

Совокупные выбросы парниковых газов по сектору «Энергетика» в Кемеровской области

Категория	Выбросы ПГ, тыс.т CO ₂ э					
	1990 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
Стационарное сжигание топлива	0	54 002,10	62 685,29	52 983,53	50 953,76	47 820,12
Выбросы от транспорта	0	4 228,95	4 527,35	4 654,14	5 180,99	5 882,08
Фугитивные выбросы	31 023,69	37 084,94	36 747,19	38 862,20	41 977,70	44 282,51
Всего, тыс.т CO₂э	31 023,691	95 315,99	103 959,84	96 499,87	98 112,46	97 984,72

Мероприятия, направленные на снижение выбросов парниковых газов в энергетическом секторе, могут быть выполнены по четырем направлениям:

- повышение энергоэффективности промышленных предприятий и жилищно-коммунального хозяйства в результате проведения мероприятий по снижению уровня потребления энергоресурсов [2];
- модернизация систем транспортировки и распределения тепловой энергии;
- внедрение технологий получения тепловой и электрической энергии с использованием альтернативных источников энергии [3];
- повышение топливной эффективности транспортных средств и использование альтернативных видов топлива.

Наибольший вклад в категорию «Фугитивные выбросы» на территории Кемеровской области вносит эмиссия шахтного метана в процессе добычи угля подземным способом. В связи с этим, сокращение негативного влияния угледобычи возможно достигнуть путем рационализации процессов рекультивации земель, нарушенных в результате выполнения технологических мероприятий по выемке угля. Рекультивация предполагает два основных этапа: технический и биологический. Одним из направлений биологической рекультивации является лесная рекультивация, целью которой является создание новых лесов на нарушенных промышленностью землях. Таким образом, эффективное применение мер пассивной и активной лесной рекультивации, для повышения площадей лесопосадок – потенциальный инструмент повышения объема поглощения парниковых газов.

Шахтный метан обладает наибольшим потенциалом для сокращения выбросов парниковых газов путем его использования в энергетических установках. Для этого необходимо:

- увеличивать долю извлечения метана средствами дегазации с его кондиционной концентрацией в МВС;
- предусмотреть размещение утилизационных установок в непосредственной близости к возможному потребителю тепло- и/или электроэнергии;
- увеличивать количество энергетических установок, вырабатывающих тепло- и/или электроэнергию на шахтном метане.

Список литературы

1. Методические рекомендации по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации [Электронный ресурс] : утв. распоряж. Минприроды России от 16 апреля 2015 г., № 15-р. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_256422/e223a74aba21265dfc5770abb00457ecbc27ca85/.
2. Виды, источники парниковых газов и их влияние на климат Земли [Электронный ресурс]: Проект по выводу ГХФУ в Российской Федерации. – URL: http://www.ozoneprogram.ru/biblioteka/slovar/parnikovye_gazy/.
3. Парниковый эффект. [Электронный ресурс]: Глобальные экологические проблемы. – URL: <http://www.grandars.ru/shkola/geografiya/parnikovyy-effekt.html>.
4. О сокращении выбросов парниковых газов [Электронный ресурс] : Указ Президента РФ от 04.11.2020, № 666. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45990>.

5. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 [Электронный ресурс] : The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). – URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/index.html>.

6. Седьмое национальное сообщение Российской Федерации, представленное в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата и статьей 7 Киотского протокола [Электронный ресурс]. – URL: https://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_natcom/application/pdf/20394615_russian_federation-nc7-1-7nc.pdf.

7. Тайлаков О.В., Застрелов Д.Н. Инвентаризация выбросов парниковых газов угледобывающего региона // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – № 6. – С. 358 – 363.

УДК 550.837.31

ИЗУЧЕНИЕ ПОРОД КРОВЛИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА СРЕДСТВАМИ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

д.т.н. Тайлаков О.В., к.т.н. Застрелов Д.Н., Салтымаков Е.А., Соколов С.В.
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

Аннотация. Выполнен сопоставительный анализ границ, определенных по исходному и интегрированному геоэлектрическому разрезу с результатами бурения инженерно-геологических скважин с отбором проб. С учетом уточненных границ, электропроводящих свойств и горно-геологической информации построены геолого-геофизические разрезы и определено состояние кровли на исследуемом участке.

Ключевые слова: кровля угольного пласта, геофизика, электротомография, эффективная глубина исследований, интегрированный геоэлектрический разрез.

Эффективное использование инновационных технологий для достижения высоких показателей добычи при разработке месторождений подземным способом зависит от выбора технологического режима выемки угля, который в свою очередь определяется горно-геологическими условиями [1]. При отработке пологих угольных пластов существенное влияние на производительность оказывает эффективность процесса управления кровлей. Большая часть выемочных участков имеет весьма неоднородное строение кровли. Устойчивость, активность и нагрузочные свойства кровли зависят от ее мощности, минерального состава, прочностных характеристик, горно- и гидро-геологических условий залегания. В связи с тем, что изменение этих параметров имеет широкий диапазон в пределах выемочного участка, возрастают трудоемкость на проведение дополнительных мероприятий по управлению кровлей, а также издержки в результате полной остановки забоя. На сегодняшний день мероприятия по управлению кровлей угольных пластов разрабатываются на основе горно-геологического прогноза, который формируется по результатам геологоразведочных работ. Для качественного информационного сопровождения в пределах всего выемочного участка необходимо увеличивать объем буровых работ, что экономически нецелесообразно для угледобывающих предприятий.

Для доразведки участков кровли угольных пластов эффективно применение геофизических методов [2], в частности, электроразведки. При ведении наземных глубинных исследований пород кровли угольного пласта за счет значительной дифференцированности электрических свойств на границе «порода-уголь» наиболее рационально использование электротомографии на низкочастотном токе. Также это связано с тем, что данный подход слабочувствителен к помехам, генерируемым горно-шахтным оборудованием. Однако для детального исследования состояния пород кровли с поверхности, характеризующихся слабой дифференциацией электрических свойств породных слоев, необходимо достичь значение разрешающей способности, которое позволит регистрировать такие границы. Разрешающая способность электротомографии зависит от используемой аппаратуры и, следовательно, параметров электрического тока, методики проведения измерений, в частности применения различных электроразведочных установок электродов, а также модельной базы процесса обработки. Даже незначительные изменения значений удельного электрического сопротивления является усреднением этих значений для еще более тонких слоев или элементов углепородного массива. Учет этих особенностей при проведении полевого этапа наземных исследований пород кровли угольного пласта средствами электротомографии, для последующей камеральной обработки данных и интерпретации результатов измерений является актуальной задачей.

Формирование демонтажной камеры под наносами в зоне выветривания горных пород может негативно сказаться на устойчивости кровли и вызвать дополнительные издержки по демонтажу очистного комплекса. В рамках разработки комплекса мер по обеспечению процесса горных работ в районе демонтажной камеры выемочного столба одной из угольных шахт, относящейся к Ерунаковскому геолого-экономическому району выполнено средствами электротомографии с целью выявления наличия и площадного распространения ослабленных зон кровли угольного пласта. Службы предприятия планировали работы по обеспечению устойчивости кровли в районе демонтажной камеры. В связи с этим сформулированы следующие задачи исследования:

- инженерно-гидрогеологическое картирование кровли угольного пласта в районе демонтажной камеры;
- уточнение структуры участка;
- регистрация областей с измененными физическими характеристиками горных пород.

Изыскания проводились на участке с установленной на поверхности исследований дегазационной установкой, что способствовало наведению помех. Для инженерно-геологического картирования участка горного отвода шахты и выявления наличия и площадного распространения ослабленных зон кровли угольного пласта проведены исследования по 3 геофизическим профилям общей протяженностью 1410 м (рис. 1 а). В ходе проведенных электроразведочных работ средствами многоэлектродной электроразведочной станции «Скала-48» зафиксировано более 1587 геофизических наблюдений. Непосредственно перед началом измерений выполнена проверка заземления электродов и уровня генерируемого сигнала.

По результатам анализа уровня сигнала для измерений по профилям №№ 1-3 выбрана мощность питающего электроды электрогенератора – 120 Вт. Профиль №1 и №2 проведены с северо-востока на юго-запад на удалении от демонтажной камеры 20 м и 50 м соответственно. Профиль №1 пересекает вентиляционный штрек на отметке 50 м, а конвейерный на отметке 350 м. Профиль №2 пересекает вентиляционный штрек на отметке 30 м, а конвейерный на отметке – 330 м. Оба профиля пересекли технологическую дорогу (рис. 1 б). Линия профилей ориентирована вдоль оси демонтажной камеры. Протяженность профилей №1 и №2 составила 470 м каждый. Профиль №3 проведен вкрест простиранию профилей №1 и №2 для привязки и более детальной оценки физико-механического состояния горных пород в пределах исследуемого участка. Это позволит получить дополнительную информацию с целью повышения точности при локализации ослабленных зон и интерпретации полученных данных на основе совместного анализа точек пересечения с профилями №1 и №2. Протяженность профиля №3 составила 470 м.

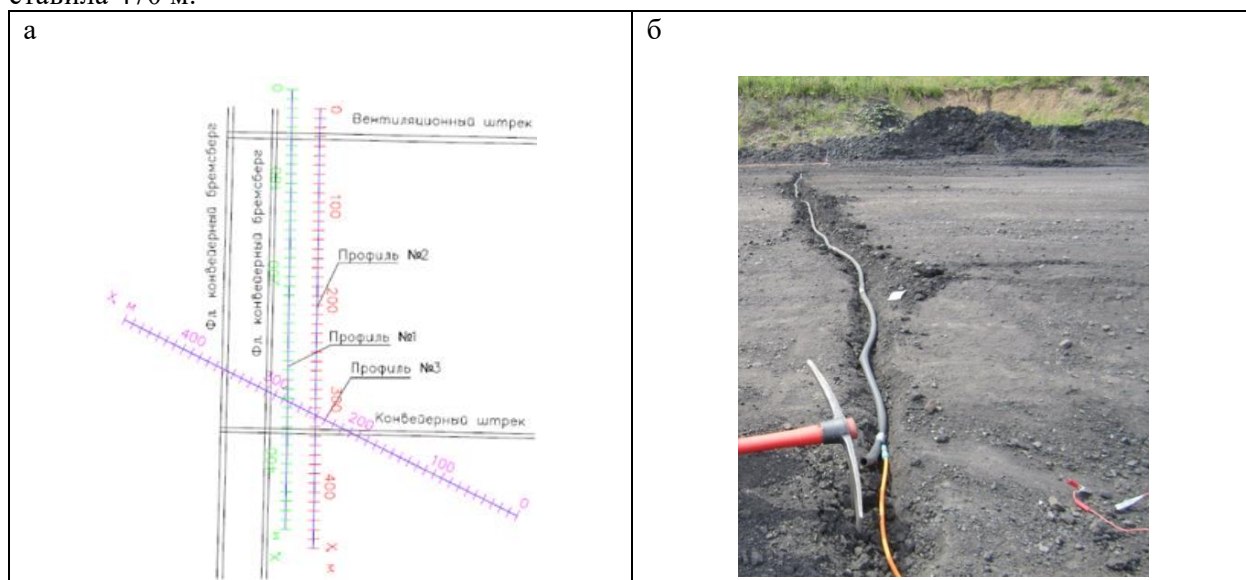


Рис. 1. Расположение геофизических профилей (а); прокладка электроразведочной косы через технологическую дорогу (б)

Обработка зарегистрированного сигнала в результате полевого этапа исследований выполнена в два основных этапа: подготовка данных (фильтрация) и построение геоэлектрического разреза. В ходе подготовки зарегистрированной информации осуществлен анализ и оценка полученного массива данных на предмет наведенных шумов и помех. На сегодняшний день процесс филь-

трации основан на работе в интерактивном режиме, в результате чего зачастую теряется часть полезной информации (рис. 2).



Рис. 2. График анализа процесса фильтрации геофизических наблюдений

Учитывая наибольшее влияние на эффективную глубину исследований геометрических параметров измерительной системы (типа электроразведочной установки, расстояния между электродами), при изменениях глубины количество геофизических наблюдений, характерных для определенного типа электроразведочной установки, величина постоянная. Таким образом, при увеличении глубины исследования геологического разреза уменьшается плотность геофизических наблюдений на единицу площади области изучения (рис. 3 а). С учетом вышеизложенного при стандартных подходах обработки геофизических данных задача регистрации объектов, геометрические размеры которых меньше расстояния между геофизическими наблюдениями, и локализации четких границ слоев геологической среды, на сегодняшний день не решена.

Современные программные комплексы основаны на решении прямой задачи электроразведки для расчета значений удельного электрического сопротивления. В результате построении геоэлектрического разреза, путем инверсии, основанной на методе наименьших квадратов, получается массив значений удельного электрического сопротивления, намного превышающий количество геофизических наблюдений, визуализированный в виде цветной модели породного массива.

Разработанный подход построения геоэлектрического разреза по данным электротомографии позволяет локализовать границы слоев породного массива и объектов, несвязанных с геологической средой, и основан на алгоритме, включающем разбиение области исходного геоэлектрического разреза на области с задаваемыми геометрическими размерами (рис. 3 б).

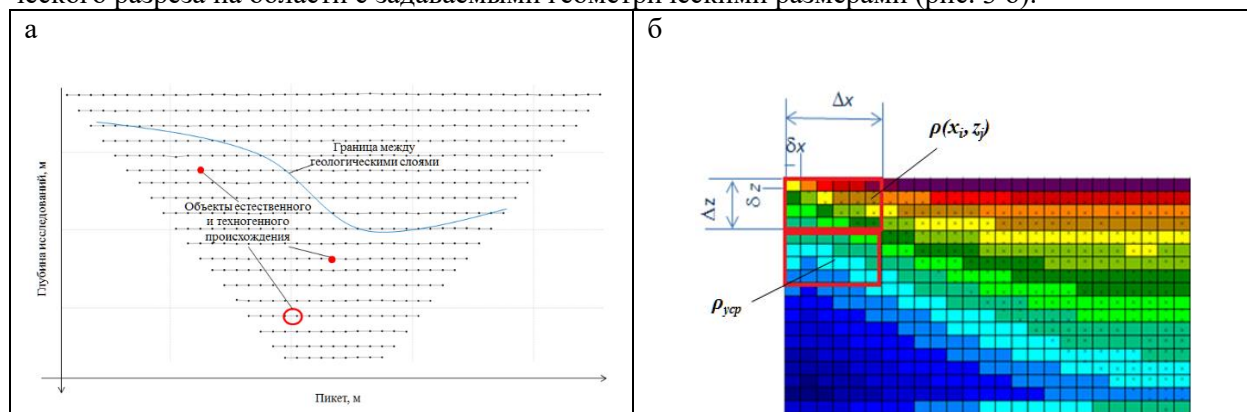


Рис. 3. Схематичное изображение геоэлектрического разреза (а); схема реализации алгоритма построения интегрированного геоэлектрического разреза (б)

В пределах этих границ производится интегрирование значений удельного электрического сопротивления, которые соответствуют наименьшему элементу (в графическом виде – пикселю), и определение его среднего значения в границах области по формуле:

$$\rho_{\text{уср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{\Delta x} \sum_{j=1}^{\Delta z} \rho(x_i, z_j),$$

где Δx , Δz – размеры элементов геоэлектрического разреза; δx , δh – размеры пикселей; x , h – координаты, ρ – удельное электрическое сопротивление; $\rho_{\text{уср}}$ – интегрированное значение ρ ; n – количество элементов разреза.

По результатам измерений (рис. 4 а) с применением разработанного подхода построен фрагмент интегрированного геоэлектрического разреза (рис. 4 в). Из полученного массива данных найдена линия максимального изменения удельного электрического сопротивления, характеризующая границу «породы четвертичного возраста – коренные горные породы» (рис. 4 б).

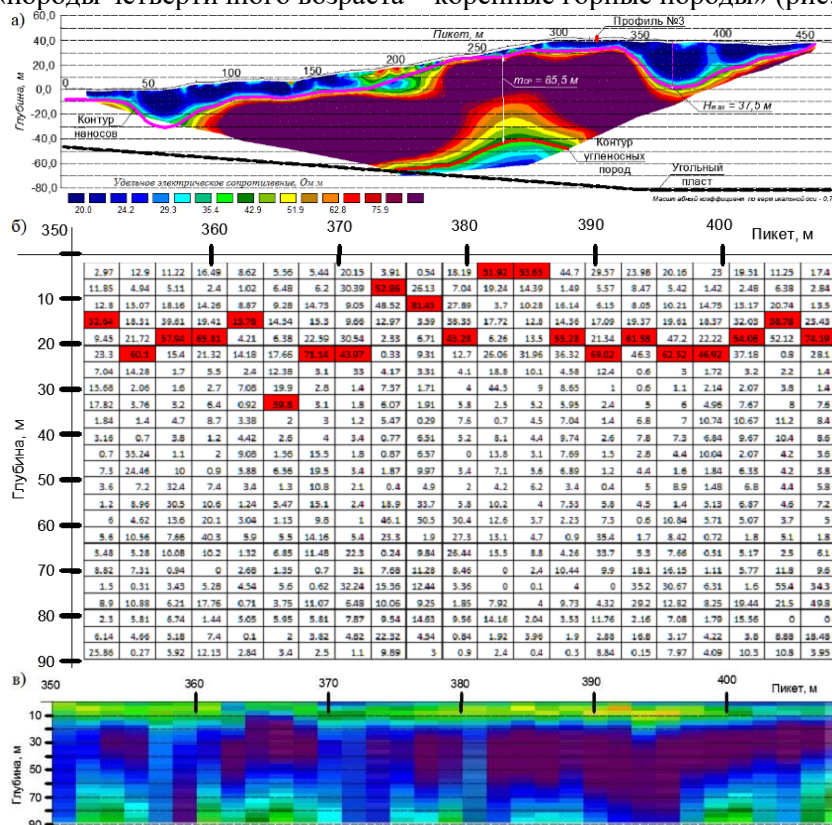


Рис. 4. Определение границы «породы четвертичного возраста – коренные горные породы» средствами разработанного алгоритма построения интегрированного геоэлектрического разреза: а – исходный геоэлектрический разрез; б – таблица определения границы «породы четвертичного возраста – коренные горные породы»; в – фрагмент интегрированного геоэлектрического разреза

Проведен сопоставительный анализ данных инженерных изысканий с отбором проб и результатов интерпретации исходного геоэлектрического разреза и построенного разреза с применением разработанного подхода, с учетом горно-геологической информации. В результате анализа с применением разработанного подхода установлено, что граница «породы четвертичного возраста – коренные горные породы» локализована более близко к границе, установленной в ходе разведочного бурения (рис. 5). Однако незначительная расхожимость результатов, предположительно, обусловлена тем, что бурение и электротомография выполнялись в различные промежутки времени, в период между которыми массив горных пород деформировался под действием естественных сил и вследствие ведения горных работ. Также не исключаются ошибки, связанные с построением геологического разреза на межскваженном интервале. Аналогичным образом определен контур угленосных пород.

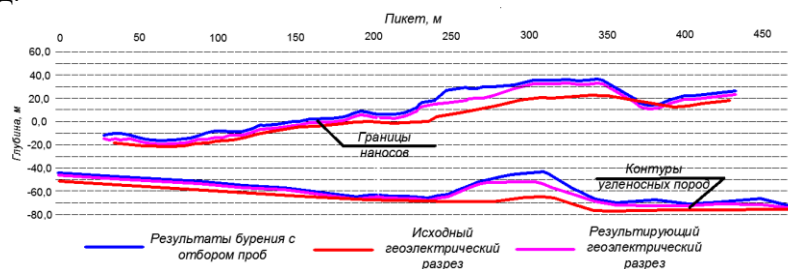


Рис. 5. Сопоставление результатов, полученных при интерпретации интегрированного геоэлектрического разреза с исходным и данными бурения с отбором проб

В ходе анализа горно-графической документации и результатов электроразведочных работ установлено, что демонтажная камера сформирована в опасной зоне повышенного горного давле-

ния от краевых частей целика вышележащего и отработанного пласта. В опасной зоне резко снижается устойчивость пород кровли, возможно образование вывалов, куполение, «стреляние» из груди забоя. По данным, полученным методом электротомографии вдоль линий геофизических профилей №1-3, оценены особенности строения и физико-механического состояния активной кровли в районе демонтажной камеры, определяющих ее устойчивость, в том числе: литологический состав, наличие ослабленных зон, обводненность и т.д. (рис. 6) и вынесены на план поверхности.

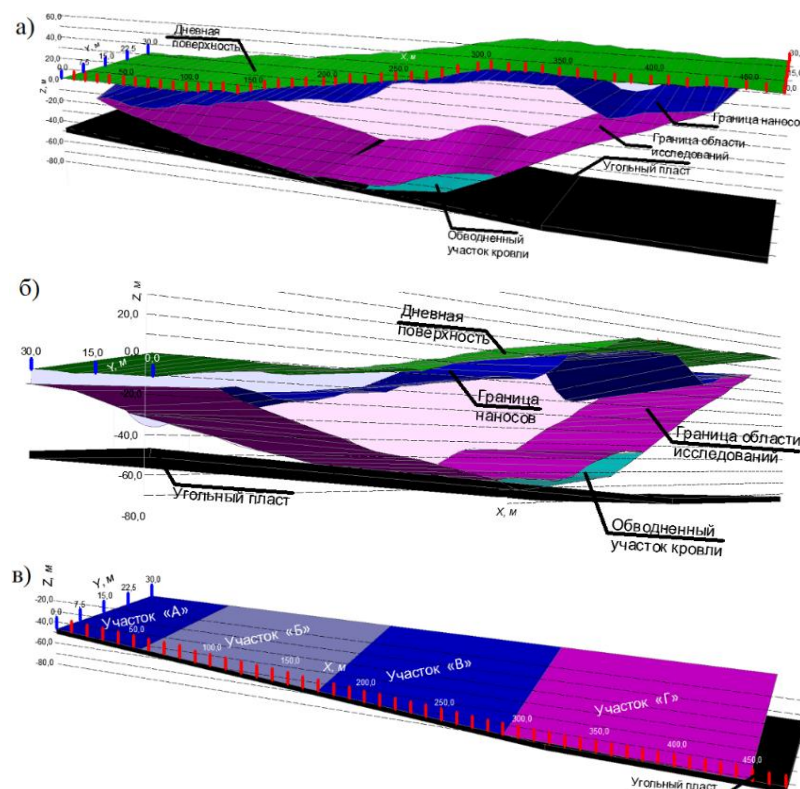


Рис. 6. Результаты электротомографии по двум параллельным и одному поперечному профилям: а, б – визуализация геолого-геофизического разреза в 3D; в – участки кровли угольного пласта

Участок «А»: Удельное сопротивление в кровле пласта изменяется от 0 до 40 Ом·м, что характеризует наличие обводненной кровли. Непосредственная кровля, предположительно, представлена обводнённым среднеустойчивым или совершенно неустойчивым алевролитом (среднее значение удельного сопротивления – 30 Ом·м). Возможно наличие ложной кровли, сложенной низкоомным алевролитом (мелкозернистый алевролит, обладающий низким удельным электрическим сопротивлением – менее 30 Ом·м).

Участок «Б»: Удельное сопротивление кровли изменяется от 30 до 200 Ом·м, это обусловлено отсутствием обводненных участков. Основная кровля сложена песчаником (среднее значение удельного сопротивления – 110 Ом·м) и алевролитом (среднее значение удельного сопротивления – 70 Ом·м). Непосредственная кровля представлена среднеустойчивым или совершенно неустойчивым алевролитом (среднее значение удельного сопротивления – 50 Ом·м). Возможно наличие ложной кровли, сложенной углистым неустойчивым алевролитом (среднее значение удельного сопротивления – 30 Ом·м).

Участок «В»: Удельное сопротивление кровли изменяется от 10 до 40 Ом·м, что характеризует наличие обводненной кровли. Непосредственная кровля, предположительно, представлена обводнённым среднеустойчивым или совершенно неустойчивым алевролитом (среднее значение удельного сопротивления – 30 Ом·м). Возможно наличие ложной кровли, сложенной низкоомным алевролитом.

Участок «Г»: Удельное сопротивление кровли изменяется от 40 до 220 Ом·м. Основная кровля сложена песчаником (среднее значение удельного сопротивления – 130 Ом·м) и алевролитом (среднее значение удельного сопротивления – 90 Ом·м). Непосредственная кровля представлена среднеустойчивым или совершенно неустойчивым алевролитом (среднее значение удельного сопротивления – 50 Ом·м).

Выводы. Основная цель Долгосрочной программы развития угольной промышленности России на период до 2030 г. – увеличение объемов добычи полезного ископаемого. Для достижения цели с усовершенствованием системы безопасности ведения горных работ необходимо внедрение современных технологий разведки, проходки, подготовки выемочного столба, добычи, транспортировки, геоконтроля. В частности, формирование монтажной и демонтажной камеры на участках естественного и техногенного массива, требует не только специфический подход к разработке проектных решений, но и достоверную информацию о составе и состоянии массива горных пород, который является контуром для горных выработок.

Анализ опыта практического применения основных геофизических методов показал, что наиболее эффективным инструментом решения широкого круга инженерных задач за счет значительной дифференцированности электромагнитных свойств массива горных пород, являются методы электромагнитного контроля. При изучении основных методов электромагнитного контроля с учетом цели исследования, места проведения полевого этапа, видом источника и характера генерируемого им сигнала, особенностями объекта исследований, искомыми параметрами, регистрируемыми компонентами и детальностью исследований применительно к определению физико-механического состояния пород кровли угольного пласта установлено, что целесообразно использование метода сопротивлений на постоянном токе в современной модификации электротомографии.

Установлено, что при выбранных параметрах измерительной системы с учетом глубины залегания аномальной зоны и сложности рельефа поверхности исследований, которые не всегда позволяют достичь достаточной плотности точек геофизических наблюдений для достоверной оценки физико-механических свойств, в данном случае, зоны пород кровли угольного пласта в районе планируемой демонтажной камеры, нужно проводить серию измерений с уменьшением расстояния между электродами для повышения значения плотности точек записи.

Разработанный подход модификации исходного геоэлектрического разреза в интегрированный позволяет локализовать границы слоев породного массива и объектов, несвязанных с геологической средой, и основан на алгоритме, включающем разбиение области исходного геоэлектрического разреза на области с задаваемыми геометрическими размерами и интегрировании значений удельного электрического сопротивления, которые соответствуют наименьшему элементу, и определение его среднего значения в границах области. Эффективность подхода доказана в ходе сравнительного анализа данных инженерных изысканий с отбором проб и построенного интегрированного разреза.

Разработанный подход обработки данных позволил совместно со специалистами угледобывающего предприятия разработать комплекс мероприятий по демонтажу механизированного комплекса, в том числе использование при демонтаже костры и дополнительные гидравлические стойки. Для повышения устойчивости демонтажной камеры в области повышенного горного давления в кровле междукамерного целика рекомендовано установить проколоты, концы которых прикрепляются к породам кровли с помощью анкеров. По результатам выполненных электроразведочных исследований подтверждена целесообразность применения электротомографии и разработанного подхода для оценки параметров участков кровли угольного пласта с поверхности в сложных условиях действующего угледобывающего предприятия.

Список литературы

1. Опыт использования вентиляционного метана в качестве дополнительного топлива для двигателей внутреннего сгорания / А.П. Садов [и др.] // Уголь. – 2015. – №12 – С. 61-67.
2. Тайлаков О.В., Соколов С.В., Салтымаков Е.А. Определение свойств кровли в пределах выемочного столба на основе применения автономных сейсмических регистраторов в шахтных геофизических измерениях // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2018г. – № 4. – С. 437-441.
3. Szalai S., Novak A. and Szarka L. Depth of Investigation and Vertical Resolution of Surface Geoelectric Arrays // JEEG. – 2009. – Vol. 14. – № 1. – P. 15–23.
4. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации / А.А. Бобачев А.А. [и др.] // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – № 2. – С. 14–17.
5. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting. – 1996. – № 44(1). – P.131–152.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД**д.т.н. Тайлаков О.В., Смыслов А.И., Таюрский М.А., Колесниченко С.Е.****Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия**

Аннотация. Для определения фильтрационных свойств горных пород используются различные физико-химические методы, среди которых можно выделить лабораторные исследования [1, 2]. Определение проницаемости в лабораторных условиях – это основное физико-техническое исследование фильтрационных свойств горных пород.

Ключевые слова: проницаемость, горные породы, газопроницаемость, коэффициент абсолютной проницаемости.

Газопроницаемость – свойство пористой среды, характеризующее ее способность пропускать через себя газ под действием градиента газового давления. Газопроницаемость – показатель, характеризующий проводимость пористой среды по отношению к газу определенной вязкости [4, 5]. За единицу измерения газопроницаемости (м^2) принята газопроницаемость образца пористой среды длиной 1 м и площадью 1 м^2 , через который при падении давления на 1 Па протекает 1 $\text{м}^3/\text{с}$ газа вязкостью 1 Па·с. Определение газопроницаемости углей, которые в отличие от пористых сред на месторождениях природного газа (пористые песчаники, пески и т.п.) обладают способностью сорбционного взаимодействия с газами (сорбатами), осложнено процессами сорбции-десорбции пористой среды и поэтому требует специального подхода. Проницаемость пород может изменяться в диапазоне от 0,1 до 1000 или более миллиардов. Качество пород, определяемое его проницаемостью, делится на 5 классов:

- 1 – очень хорошо проницаемые, коэффициент проницаемости более 1000 мД;
- 2 – хорошо проницаемые, коэффициент проницаемости изменяется от 100 до 1000 мД;
- 3 – среднепроницаемые, коэффициент проницаемости изменяется от 10 до 100 мД;
- 4 – слабопроницаемые: от 1 до 10 мД;
- 5 – непроницаемые, менее 1 мД.

Так на месторождениях Техаса проницаемость может достигать до 4600 мД. При этом на месторождении округа Ли, штат Вирджиния проницаемость коллекторов составляет 0,9 мД. Проницаемость разрабатываемых пластов, по результатам разных исследователей, на месторождениях Карагандинского угольного бассейна изменяется от 0,0005 до 0,05 мД, для углей Донецкого угольного бассейна проницаемость изменяется от 0,01 до 58 мД (при этом газопроницаемость угля марки К, Лисичанского района, колеблется в пределах 1113 – 1330 мД), газопроницаемость для углей Кузнецкого угольного бассейна изменяется от 0,005 – 66,4 мД (при этом проницаемость пластов Полысаевский и Надбайкаимский колеблется в пределах 0,036 – 0,038 мД, а для пластов Бреевский и Толмачевский колеблется в пределах 0,005 – 0,0013 мД).

Для проведения исследований подготовка образцов проведена согласно требованиям ГОСТ 26450.0-85 и ГОСТ 26450.2-85[5, 6].

Требования к отбору проб:

- пробы горных пород для определения коллекторских свойств отбирают при помощи керноотборника, либо в виде кусков произвольной формы;
- при определении абсолютной газопроницаемости используют образцы горных пород правильной (цилиндрической, кубической) формы;
- для определения проницаемости при линейной фильтрации используют образцы цилиндрической формы с диаметром 31 мм и высотой 30 мм.

Для приготовления образцов правильной геометрической формы используют твердосплавные или алмазные коронки и алмазные круги. После изготовления на образец

наносят лабораторный номер черной тушью и ориентировку условными знаками. В случае нарушения боковой поверхности керна, происшедшего в процессе бурения и выноса керна, удаляют внешний слой, либо изготавливают цилиндрический образец максимального размера из средней части керна.

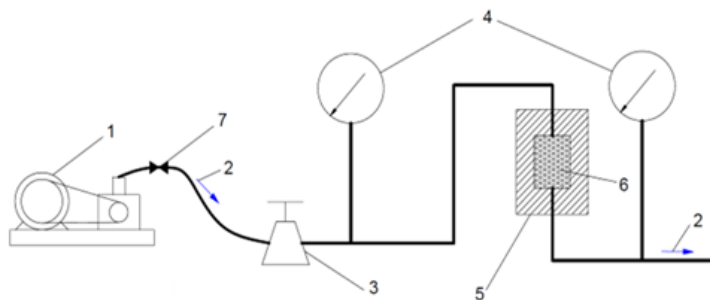
Определение коллекторских свойств проводят на образцах, высушенных до постоянной массы при температуре $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ в сушильном шкафу. Основные технические характеристики сушильного шкафа (ШС-80-01-СПУ) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики сушильного шкафа (ШС-80-01-СПУ)

Наименование параметра	Значение параметра для шкафа
Объем рабочей камеры, л, не менее	80
Диапазон рабочих температур, $^\circ\text{C}$	от 50 до 200
Предельное отклонение температуры в контрольной точке рабочей камеры от заданной температуры, $^\circ\text{C}$, не более	± 6
Точность поддержания температуры в рабочей камере в установившемся режиме, не хуже, $^\circ\text{C}$	± 3
Время нагрева до максимальной температуры, мин, не более	30
Время непрерывной работы, ч, не менее	16
Установленная мощность, кВт, не более	1,6
Габаритные размеры шкафа, мм, не более: глубина ширина высота	626 680 603
Размеры рабочей камеры, мм, не менее: ширина глубина высота	560 390 370
Масса, кг, не более	27
Средний срок службы, лет, не менее	10

Оборудование и инструменты для определения коллекторских свойств – установка для определения абсолютной газопроницаемости при стационарной фильтрации приведено на рис. 1.



1 – источник давления (компрессор); 2 – направление движения воздуха; 3 – расходомер;
4 – манометр; 5 – кернадержатель; 6 – образец горной породы; 7 – вентиль

Рис. 1. Схематичное изображение установки для определения коэффициента абсолютной газопроницаемости

Конструкция установки предусматривает наличие источника давления, регулятора давления, кернодержателя и измерителей давления удовлетворяет следующим требованиям:

- при стационарной фильтрации источником давления служит компрессор сжатого воздуха. Газ очищают от паров воды и загрязняющей пыли с помощью фильтра;
- измерителями давления служат пружинные манометры точных измерений;
- в качестве измерителя расхода используется мерная колба и секундомер;
- в кернодержателе для линейной фильтрации боковая поверхность образца зачехляется в тонкостенную термоусадочную трубку.

Определение коэффициента абсолютной проницаемости проведено на 8 образцах горных пород с применением специализированного стенда.

Петрофизические образцы изготавливались путем выбуривания из кусков горных пород кернов. Горные породы имели слоистую и наклонно слоистую структуру, хрупкие, что увеличивало риск расколов образцов на тонкие пластины.

Изготовление петрофизических образцов цилиндрической формы размером 31×30 мм проводилось путем выбуривания цилиндра из куска образца горных пород и последующего торцевания торцов при помощи алмазного круга. Выбуривание осуществлялось при помощи вертикально-сверлильного станка с применением алмазных коронок с внутренним диаметром 31 мм (табл. 2).

Таблица 2

Реестр проб полученных проб горных пород		
№	Глубина отбора пробы, м	Состав
1	23	песч
2	49	АКЗ
3	51	АКЗ
4	52	АКЗ
5	68	пере алв
6	103	песч
7	137	пере алв
8	143	пере алв

Определение коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной фильтрации проводилось при линейном направлении потока воздуха (рис. 2). Порядок проведения измерений:

1. При линейном потоке образец цилиндрической формы устанавливают в кернодержатель (8). Для этого в специально подготовленное цилиндрическое железное кольцо устанавливают образец по центру и заливают пустое пространство герметичным (бытовым) клеем с целью устранения утечек; на кольцо с двух сторон устанавливается прокладка и стягивают металлическими пластинами и дают высохнуть не менее 5 суток. В случае утечек между прокладками и кольцом, необходимо разобрать кернодержатель, установить новые прокладки и затянуть пластины вновь, проверить герметичность.

2. Компрессор (6) подключается к источнику питания (1) и создает в ресивере (6) рабочее давление.

3. Компрессор подсоединяют к установке через шланг (4) и устанавливают перепад давления.

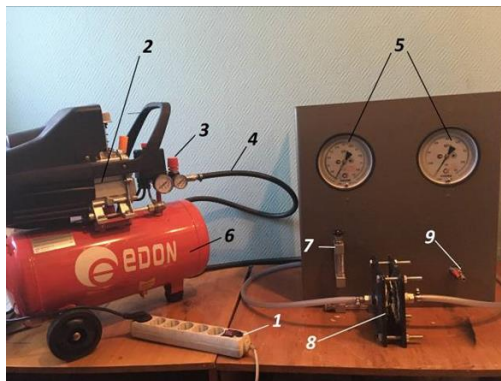
4. Выполняют измерение расхода газа через образец при установлении перепада давления в пределах (0,1-0,4) МПа.

5. При помощи вентиля (3) устанавливают давление, а расход изменяют ротаметром (7).

6. Каждое измерение записывают в журнал для расчета.

7. После проведения испытаний необходимо, при помощи вентиля (3) понижать давление до 0 МПа, ждут пока весь воздух выйдет через выпускной кран (9), затем отсоединяют шланг (4) от компрессора (2) и сбрасывают давление в ресивере (6).

8. По завершению работ отключают питание.



1 – источник питания; 2 – компрессор; 3 – вентиль для подачи давления; 4 – шланги; 5 – манометры; 6 – ресивер; 7 – ротаметр; 8 – кернодержатель; 9 – выпускной кран

Рис. 2. Общий вид установки для определения проницаемости керна горных пород

Полученные результаты по определению коэффициента абсолютной газопроницаемости представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения коэффициента абсолютной газопроницаемости образцов горных пород

№ п\п	Коэффициент абсолютной газопроницаемости, $K_{пр}, 10^{-3} \text{ мкм}^2$
1	0,66
2	0
3	0,463
4	0,387
5	0
6	0,018
7	0
8	0,068

Вывод. В рамках работы по определению коэффициента абсолютной проницаемости проведенные измерения показали, что образцы горных пород характеризуются как непроницаемые (значения проницаемости от 0 до 0,66 мД).

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-45-420022 р_а.

Список литературы

1. Христианович С. А. Об измерение давления газа в угольных пластах // ФТПРПИ. – 1988. – с. 3-23.
2. Назаров Л.А., Назарова Л.А. Определение фильтрационных свойств и напряжений в угольном пласте на основе решения обратной задачи // ФТПРПИ. – 2000. – № 2. – с. 15-22.
3. Улавливание и хранение углекислого газа в угольных пластах Кузбасса / О.В. Тайлаков [и др.] // Газовая промышленность. – 2013. – №12(699). – С. 86-87.
4. Бузинов С. Н., Умрихин И. Д. Гидродинамические методы исследования скважин и пластов. – М.: Недра, 1973. – 248 с.
5. ГОСТ 26450.0-85. Породы горные. Общие требования к отбору и подготовке проб для определения коллекторских свойств. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
6. ГОСТ 26450.2-85. Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации. – М.: Изд-во стандартов, 1985.

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ДЕГАЗАЦИОННЫХ СКВАЖИН В ШАХТНЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ

д.т.н. Тайлаков О.В., к.т.н. Застрелов Д.Н., Салтымаков Е.А., Колесниченко С.Е.

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

Аннотация. Проведены измерения эффективных длин скважин, буримых роторными буровыми станками из горных выработок, на основе применения принципа эхолокации. Обоснованы и сформированы рекомендации по бурению и эффективному использованию геофизической аппаратуры для контроля состояния дегазационных скважин в условиях угольных шахт.

Ключевые слова: эхолокация, дегазационная скважина, метан, параметры акустического сигнала, дегазация угольных пластов, коэффициент усиления, акустический сигнал, угольная шахта, мониторинг, уровень звукового сигнала.

Эффективность дегазации угольных пластов зависит от устойчивости скважин, которые применяются для извлечения метана [1,2]. При этом необходимо обеспечивать контроль их состояния [3-6]. Для этого в шахтных условиях предложено применять метода эхолокации, при котором происходит регистрация интервала времени между инициализацией и приходом акустического сигнала от границы раздела сред (рис. 1).

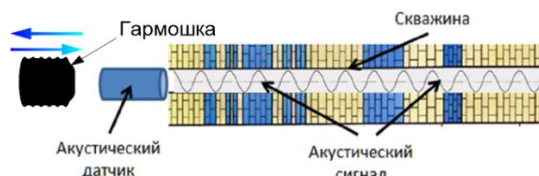


Рис. 1. Схематичное изображение метода эхолокации

В шахтных измерениях применялся комплект оборудования, включающий устройства инициации и приема акустических сигналов УПАС (рис. 2).



Рис. 2. Комплект оборудования для проведения измерений протяженности дегазационных скважин в шахтных условиях

Оборудование устанавливалось на устье скважины, прибор переводился в режим ожидания стартового импульса. Затем осуществлялась генерация акустического сигнала при помощи «Гармошки». После проведения измерений оборудование доставлялось в лабораторию для последующей обработки зарегистрированных акустических сигналов, которая включала последовательное применение процедур фильтрации амплитудно-частотных характеристик, определение первой отметки отраженного акустического сигнала, исключение шумов и помех при приеме акустического сигнала (рис. 3).

Затем определялась протяженность скважин по формуле

$$L = v \cdot t = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \cdot t = \alpha \sqrt{T} \cdot t, \quad (1)$$

где v – скорость акустической волны, м/с; t – время прохождения акустической волны, с; γ – показатель адиабаты; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура, °К; M – молярная масса газовой смеси, г/моль; $\alpha = \sqrt{\gamma R / M}$ [5].

Результаты выполненных измерений протяженности горизонтальных дегазационных скважин, пробуренных из горных выработок одной из угольных шахт в Ленинском геолого-экономическом районе Кузбасса, а также содержания в них метана, обобщены и приведены в табл. 1.

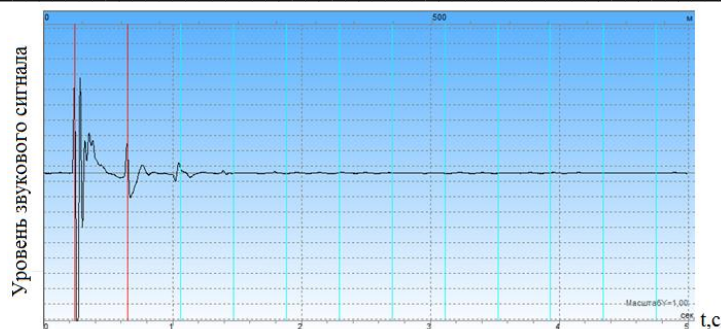


Рис. 3. Результирующая эхограмма скважины с применением фильтрации амплитудно-частотных характеристик и определенной первой отметкой отраженного акустического сигнала

Таблица 1

Результаты мониторинга изменений протяженности и концентрации метана на устье скважин

Номер скважины	Длина скважины на момент окончания бурения, м	Дата окончания бурения скважины	Результаты камеральной обработки			Направление бурения	Рациональный коэффициент усиления
			19.06	22.06	28.06		
Куст 10 скважина №1	70	18.06.19	68	68	61	Кровля	4
Куст 3 скважина №2	93	18.06.19	18	8	7	Почва	6
Куст 2 скважина №1	93	13.06.19	10	9	9	Почва	7
Куст 2 скважина №2	93	14.06.19	9	9	11	Почва	8
Куст 2 скважина №3	93	15.06.19	6	6	6	Почва	7
Куст 2 скважина №4	120	16.06.19	8	7	7	Почва	7
Куст 2 скважина №5	150	17.06.19	6	6	6	Почва	6
Куст 3 скважина №1	93	18.06.19	19	11	12	Почва	7
Куст 6 скважина №1	70	9.06.19	65	63	60	Кровля	3
Куст 8 скважина №1	70	14.06.19	67	67	66	Кровля	4
Куст 8 скважина №2	70	14.06.19	70	69	69	Кровля	3
Куст 8 скважина №3	70	15.06.19	68	68	68	Кровля	4
Куст 9 скважина №1	70	16.06.19	68	64	66	Кровля	4
Куст 9 скважина №2	70	17.06.19	68	68	68	Кровля	6
Куст 9 скважина №3	70	17.06.19	70	69	69	Кровля	4
Скважина №6	450	1.06.19	49	40	38	Пласт	6
Скважина №7	450	3.06.19	119	111	98	Пласт	6

Номер скважины	Длина скважины на момент окончания бурения, м	Дата окончания бурения скважины	Результаты камеральной обработки			Направление бурения	Рациональный коэффициент усиления
			19.06	22.06	28.06		
Скважина №8	450	6.06.19	140	96	86	Пласт	5
Скважина №9	450	9.06.19	157	116	100	Пласт	8
Скважина №10	450	12.06.19	174	123	109	Пласт	7

Установлено, что начальная длина скважин, пробуренных в кровлю угольного пласта по коренным породам, близка к проектной – 70 м. При этом в последовательных измерениях показано, что протяженность скважин снижалась в течение 20 суток на 15% (рис. 4 а), а концентрация метана на их устьях на 3%.

Скважины, пробуренные в почву угольного пласта, были обводнены, что, вероятно, обусловило их зарегистрированную протяженность 6 - 19 м при проектной глубине 93 - 150 м (рис. 4 б). На временном интервале наблюдений регистрируемое удаление границы раздела сред – зеркала воды сокращалось до 80%. При этом концентрация метана на устьях скважин снижалась на 8%.

Зарегистрированная протяженность наклонно-направленных скважин, пробуренных в пласт, составила 38 - 140 м (рис. 4 в). Их протяженность снижалась в течение 20 суток на 75%, а концентрация метана на их устьях на 10%.

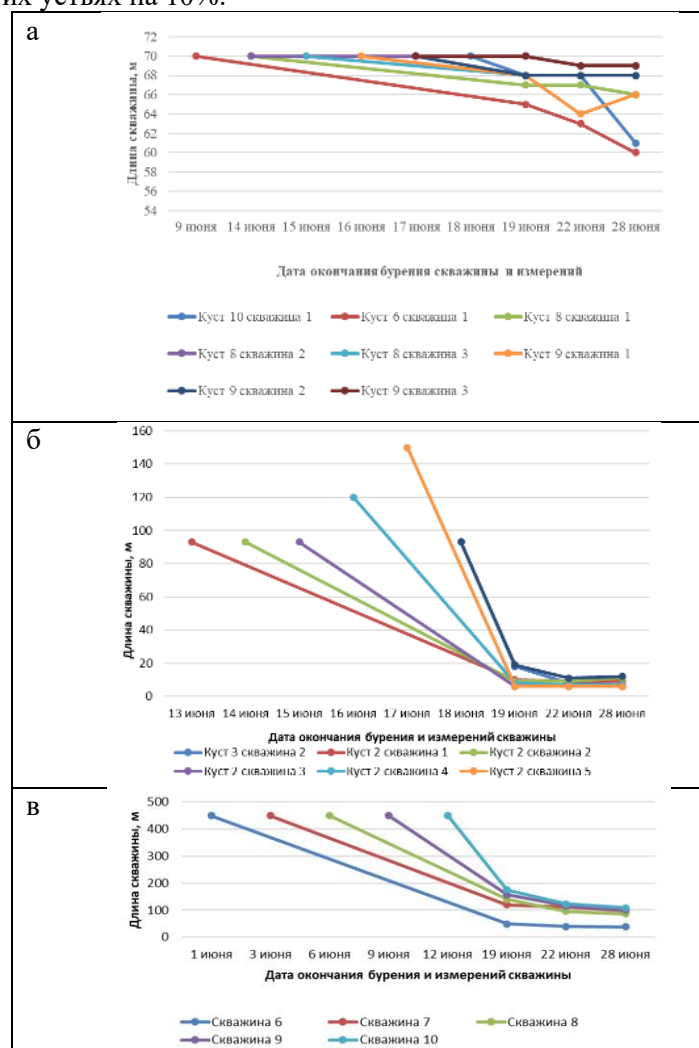


Рис. 4. Изменение длины скважин во времени, пробуренных: а – в кровлю пласта; б – в почву пласта; в – по пласту

Вывод. Анализ полученных результатов также показал, что коэффициент усиления регистрируемых сигналов зависит от геометрии скважины, содержания в ней метана, обводненности и горного давления. Установлено, что рациональные значения коэффициентов усиления для скважин, пробуренных в кровлю пласта – 3-4; в почву пласта – 7-8, в пласт – 5-6.

Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования мероприятий по дегазации угольных пластов и повышения безопасности ведения горных работ.

Список литературы

1. Тайлаков О.В., Смыслов А.И., Уткаев Е.А. Оценка фильтрационных свойств угольных пластов на основе гидроиспытаний // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – №8. – С.291-293.
2. Мониторинг изменения технического состояния пластовых скважин в процессе угледобычи / О.В. Тайлаков [и др.] // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – № 6. – С. 363-366.
3. Комаров С. Г. Геофизические методы исследования скважин. – М.: Недра, 1973. – С. 272-278.
4. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований в скважинах: М.:Недра, 1985. – С. 152-153.
5. Патент №2463564 РФ, МПК G01F23/00. Электроуровнемер. – опубл. 10.10.2012.
6. Патент №2558563 РФ, МПК E21B47/08. Способ определения объема скважины. – опубл. 10.08.2015.

УДК 622.272:516.02

АНАЛИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ПРОТЕКАНИЕМ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ С КОНЕЧНЫМИ СКОРОСТЯМИ

д.т.н. С.В. Черданцев, к.т.н. П.А. Шлапаков, к.т.н. С.И. Голоскоков, Д.Н. Батраков,
В.В. Колыхалов, Е.А. Шлапаков, С.А. Хаймин

АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», г. Кемерово, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются стационарные процессы дефлаграции и детонации в газоздушных смесях при условии, что время и скорость их протекания являются конечными величинами. Получены формулы и построены графики изменения параметров смеси в зависимости от ее концентрации. Выявлен ряд закономерностей протекания дефлаграции. Отмечены условия наступления детонационного процесса.

Ключевые слова: горные выработки, газоздушные смеси, законы сохранения массы, импульсов и энергии, показатель адиабаты Пуассона, числа Маха и Дамкелера.

Введение. Разработка угольных месторождений подземным способом, как правило, сопровождается проявлением негативных факторов, сдерживающих добычу угля подземным способом и снижающих безопасность горняков. Одними из этих факторов являются внезапные выбросы угля, пород и газа [1 - 3], а также суффлярные выделения газа [4, 5].

Не менее опасными факторами являются угольная пыль, как неперенный атрибут горных работ. Взаимодействуя с атмосферой горных выработок, угольная пыль образует пылегазовоздушные смеси (ПГВС), в которых при наличии источников зажигания возникает дефлаграция [6 - 9], нередко переходящая в детонацию [10 - 14].

Основное различие между дефлаграцией и детонацией заключается в том, что неперенным атрибутом детонации является сильный скачок уплотнения, параметры которого инициируют быстропотекающую химическую реакцию, в результате которой выделяется огромная энергия, обеспечивающая стационарное протекание детонационного процесса.

Известно, что в рамках модели идеальной детонации ширина детонационной волны принимается бесконечно малой величиной [11, 12], что имеет место в том случае, если толщина скачка уплотнения соответствует всего нескольким средним длинам свободного пробега молекул. В результате протекания химической реакции теплота выделяется полностью и практически мгновенно за скачком уплотнения.

Такой подход, вообще говоря, некорректный, поскольку приводит к бесконечно большой скорости реакции [8, 11]. Для разработки более адекватной модели детонации необходимо учиты-

вать, что за скачком уплотнения ширина зоны реакции является конечной величиной, в которой скорость химической реакции также конечна. Однако, ширину зоны реакции можно определить только в том случае, если выявить реальную структуру фронта детонации, являющуюся, строго говоря, трехмерной областью, что существенно усложняет построение решения рассматриваемой задачи.

Поэтому здесь мы рассмотрим упрощенную одномерную теплофизическую модель, в которой время и скорость протекания химической реакции будем полагать конечными величинами. Это значит, что химическая реакция, начавшаяся на фронте реакции при относительной концентрации газовой смеси $\omega_B = 1$, будет продолжаться за фронтом до тех пор, пока концентрация ω_B не уменьшится до нуля.

Таким образом, концентрация смеси ω_B в рамках нашей модели является переменной величиной и принадлежит отрезку $\omega_B \in [0,1]$. Исходя из сказанного, нам необходимо учесть, что перед фронтом химическая реакция еще не началась и теплота реакции q_B еще не израсходована, а за фронтом в результате начавшейся реакции смесь уже частично прореагировала и поэтому $\omega_B < 1$ и следовательно, теплота составляет величину $\omega_B q_B$.

К сказанному добавим, что мы будем рассматривать стационарный теплофизический процесс, а газоздушную смесь будем моделировать идеальным газом с постоянной удельной теплоемкостью.

Постановка задачи и ее решение. Для описания теплофизических и газодинамических условий протекания химической реакции в газоздушных смесях воспользуемся фундаментальными законами сохранения [15, 16], из которых следуют уравнение неразрывности

$$\rho u = \rho_1 u_1, \quad (1)$$

уравнение импульсов

$$p + \rho u^2 = p_1 + \rho_1 u_1^2, \quad (2)$$

уравнение энергии

$$\frac{u^2}{2} + i + \omega_B q_B = \frac{u_1^2}{2} + i_1 + q_B. \quad (3)$$

В уравнениях (1) – (3) плотность ρ_1 , скорость u_1 , давление p_1 и энтальпия i_1 – являются параметрами газоздушной смеси перед фронтом реакции. Величины ρ , u , p , i – представляют собой текущие параметры газоздушной смеси за фронтом реакции, при условии, что химическая реакция еще не завершилась; q_B – теплота в единице массы смеси, выделяемая в процессе химической реакции.

Энтальпию i_1 , i в уравнении (3) удобно определить по формулам [17]

$$i_1 = \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1}, \quad i = \frac{k}{k-1} \frac{p}{\rho}, \quad (4)$$

в которых k – показатель адиабаты Пуассона.

В силу формул (4) уравнение энергии (3) перепишем следующим образом

$$\frac{u^2}{2} + \frac{k}{k-1} \frac{p}{\rho} + \omega_B q_B = \frac{u_1^2}{2} + \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} + q_B, \quad (5)$$

откуда найдем следующее соотношение

$$\frac{u^2}{u_1^2} = 1 + \frac{1}{u_1^2} \left[2q_B(1 - \omega_B) - \frac{2k}{k-1} \left(\frac{p}{\rho} - \frac{p_1}{\rho_1} \right) \right]. \quad (6)$$

Далее из уравнений неразрывности и импульсов получим формулу

$$p = p_1 + \rho_1 u_1^2 \left(1 - \frac{u}{u_1} \right), \quad (7)$$

с помощью которой, равенство (6) преобразуется к виду

$$\left(\frac{u}{u_1} \right)^2 = 1 + \frac{2}{u_1^2} \left[q_B(1 - \omega_B) - \frac{a_1^2}{k-1} \left(1 - \frac{u}{u_1} \right) \left(M_1^2 \frac{u}{u_1} - 1 \right) \right], \quad (8)$$

где a_1 – скорость звука a_1 и число Маха в области 1, определяемая по формулам [15, 16]

$$a_1 = \sqrt{k \frac{p_1}{\rho_1}}, \quad M_1 = \frac{u_1}{a_1}. \quad (9)$$

Энтальпию смеси, кроме формул (4), мы можем определить также по формуле [17]

$$i_1 = \frac{a_1^2}{k-1} = c_p T_1, \quad (10)$$

поэтому выражение (8) приведем к квадратному уравнению

$$\left(\frac{u}{u_1} \right)^2 - 2 \frac{k M_1^2 + 1}{M_1^2 (k+1)} \cdot \frac{u}{u_1} + \frac{(k-1) M_1^2 + 2 \bar{q}_B (1 - \omega_B)}{M_1^2 (k+1)} = 0, \quad (11)$$

где $\bar{q}_B = q_B/(c_p T_1)$ – число Дамкелера, представляющее собой безразмерную величину подводимой теплоты.

Корнями уравнения (11) являются выражения

$$\frac{u}{u_1} = 1 - \frac{1}{(k+1)M_1^2} \left[(M_1^2 - 1) \pm \sqrt{(M_1^2 - 1)^2 - 2(k+1)M_1^2 \bar{q}_B (1 - \omega_B)} \right], \quad (12)$$

а учитывая, что

$$\frac{u}{u_1} = \frac{u}{u_1} \frac{a_1}{a_1} = \frac{u}{a_1} \frac{a_1}{u_1} = \frac{u}{a_1} \frac{1}{u_1/a_1} = \frac{u}{a_1} \frac{1}{M_1},$$

представим выражения (12) в другой форме

$$\frac{u}{a_1} = M_1 - \frac{1}{(k+1)M_1} \left[(M_1^2 - 1) \pm \sqrt{(M_1^2 - 1)^2 - 2(k+1)M_1^2 \bar{q}_B (1 - \omega_B)} \right]. \quad (13)$$

Далее из уравнения неразрывности (1) мы получим соотношение

$$\frac{\rho}{\rho_1} = \frac{(k+1)M_1^2}{(k+1)M_1^2 - \left[(M_1^2 - 1) \pm \sqrt{(M_1^2 - 1)^2 - 2(k+1)M_1^2 \bar{q}_B (1 - \omega_B)} \right]}, \quad (14)$$

а преобразовав формулу (7) к виду

$$\frac{p}{p_1} = 1 + kM_1^2 \left(1 - \frac{u}{u_1} \right),$$

и учитывая (12), получим соотношение между давлениями

$$\frac{p}{p_1} = 1 + \frac{k}{k+1} \left[(M_1^2 - 1) \pm \sqrt{(M_1^2 - 1)^2 - 2(k+1)M_1^2 \bar{q}_B (1 - \omega_B)} \right]. \quad (15)$$

Для отыскания относительной температуры T/T_1 , воспользуемся формулами для определения скорости звука a_1 и a в газовой смеси. С одной стороны, эти скорости мы можем определить по формулам [15, 16]

$$a^2 = k \frac{p}{\rho}, \quad a_1^2 = k \frac{p_1}{\rho_1}, \quad (16)$$

с другой стороны, по формулам

$$a^2 = kRT, \quad a_1^2 = kRT_1, \quad (17)$$

в которых R – универсальная газовая постоянная.

Из сравнения формул (16) и (17) находим сначала температуры

$$T = \frac{p}{\rho R}, \quad T_1 = \frac{p_1}{\rho_1 R},$$

а затем их соотношение

$$\frac{T}{T_1} = \frac{p}{p_1} \frac{\rho_1}{\rho}. \quad (18)$$

И, наконец, определим число Маха M за скачком уплотнения. Для этого преобразуем формулу $M = u/a$, определяющую число Маха к виду

$$M = \frac{u}{a} = \frac{u}{a} \cdot \frac{u_1}{u_1} \cdot \frac{a_1}{a_1} = \frac{u}{u_1} \frac{a_1}{a} M_1,$$

и учитывая формулу (9), получим соотношение

$$M = \sqrt{\frac{u}{u_1} \frac{p_1}{p}} \cdot M_1,$$

которое, в силу формул (12) и (15) приводится к виду

$$M = \sqrt{\frac{M_1^2 - \frac{1}{k+1} \left[(M_1^2 - 1) \pm \sqrt{(M_1^2 - 1)^2 - 2(k+1)M_1^2 \bar{q}_B (1 - \omega_B)} \right]}{1 + \frac{k}{k+1} \left[(M_1^2 - 1) \pm \sqrt{(M_1^2 - 1)^2 - 2(k+1)M_1^2 \bar{q}_B (1 - \omega_B)} \right]}}. \quad (19)$$

Формулы (13) – (15), (18) определяют скорости, плотности, давления и температуры в любой точке зоны реакции конечной ширины при заданных условиях. Величина $(1 - \omega_B)q_B$ представляет собой подводимое к потоку количество теплоты всей смеси на единицу массы.

При данном начальном состоянии и известном q_B отдельные термодинамические параметры состояния и скорость являются функцией только концентрации горючего ω_B .

Далее установим связь между давлением и плотностью газовой смеси, для чего приведем формулу (7) с помощью уравнения (1) к виду

$$p - p_1 = \frac{\rho_1}{\rho} u_1^2 (\rho - \rho_1), \quad (20)$$

откуда получим

$$u_1^2 = \frac{p - p_1}{\rho - \rho_1} \cdot \frac{\rho}{\rho_1}, \quad (21)$$

и вновь с помощью уравнения (1) найдем

$$u_2^2 = \frac{p_2 - p_1}{\rho_2 - \rho_1} \cdot \frac{\rho_1}{\rho} \quad (22)$$

Подставив формулы (21) и (22) в уравнение энергии (3), получим равенство

$$i - i_1 = q_B(1 - \omega_B) + \frac{1}{2} \cdot \frac{(\rho + \rho_1)}{\rho_1 \rho} (p - p_1), \quad (23)$$

которое с помощью формул (4) и (10) приведем к виду

$$\frac{2k}{k-1} \left(\frac{p}{p_1} \frac{\rho_1}{\rho} - 1 \right) = \frac{2k q_B (1 - \omega_B)}{c_p T_1 (k-1)} + \left(1 + \frac{\rho_1}{\rho} \right) \left(\frac{p}{p_1} - 1 \right),$$

а после преобразования получим формулу

$$\frac{p}{p_1} = \frac{\frac{k+1}{k-1} \frac{\rho_1}{\rho} + \frac{2k}{k-1} \bar{q}_B (1 - \omega_B)}{\frac{k+1}{k-1} \frac{\rho_1}{\rho} - 1}, \quad (24)$$

выражающую связь между давлениями и плотностями в газовой смеси. Если $\bar{q}_B = 0$, то формула (24) превращается в формулу адиабаты Гюгонио [15, 16].

Анализ результатов. На базе полученных формул (13) – (15), (18) построены графики зависимостей параметров газовой смеси от ее концентрации ω_B (рис. 1 – 4).

Анализ рис. 1 показывает, что в процессе выгорания газовой смеси ее скорость за фронтом реакции нелинейно возрастает, причем тем существеннее, чем больше число Дамкелера. Если, например, число Дамкелера составляет $\bar{q} = 2,5$, то при полном выгорании газовой смеси продукты реакции за фронтом реакции движутся со сверхзвуковой скоростью, поскольку величина $u/a_1 > 1$ (рис. 1).

Наоборот, плотность и давление газовой смеси по мере ее выгорания нелинейно уменьшаются (рис. 2, 3). Причем графики функции $\rho/\rho_1(\omega_B)$ представляют собой вогнутые кривые линии, не имеющие локальных экстремумов (рис. 2), а графики функции $p/p_1(\omega_B)$ являются выпуклыми кривыми и также не имеют экстремальных точек (рис. 3).

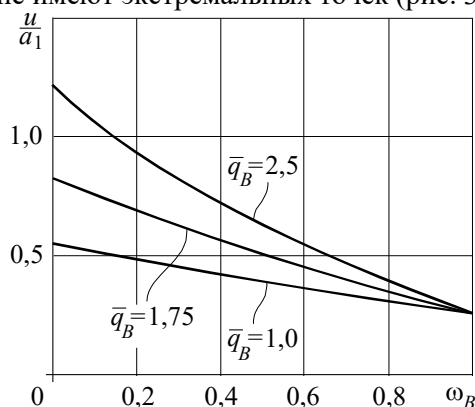


Рис. 1. Графики зависимостей относительной скорости газовой смеси от ее концентрации за фронтом химической реакции

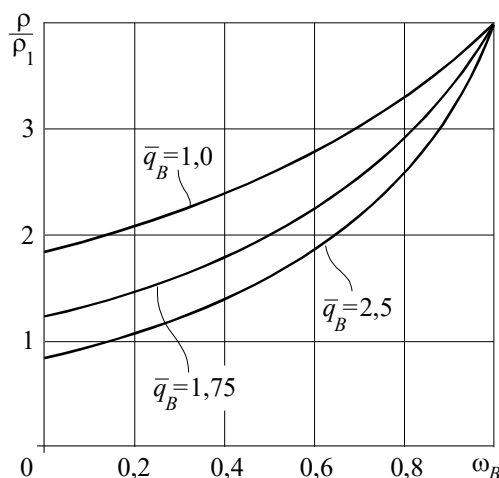


Рис. 2. Графики зависимостей относительной плотности газовой смеси от ее концентрации за фронтом химической реакции

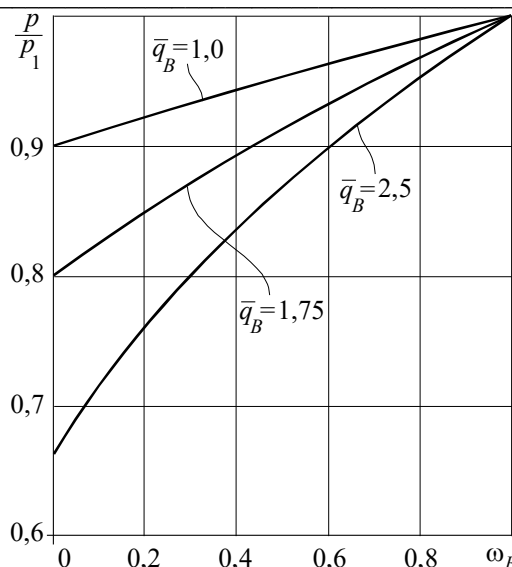


Рис. 3. Графики зависимостей относительного давления газовой смеси от ее концентрации за фронтом химической реакции

Поскольку плотность и давление смеси уменьшаются, а ее скорость увеличивается, то можно сказать, что за фронтом реакции образуется волна разряжения, температура в которой увеличивается по мере выгорания смеси (рис. 4).

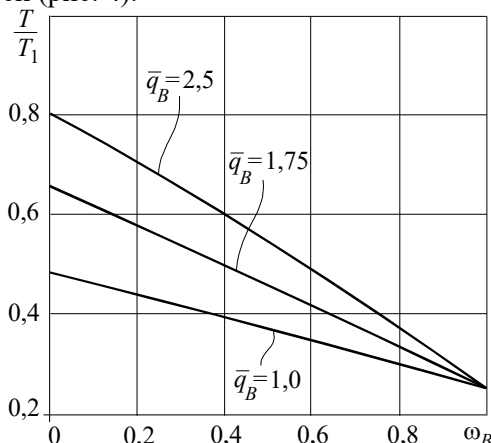


Рис. 4. Графики зависимостей относительной температуры газовой смеси от ее концентрации за фронтом химической реакции

Если число Дамкелера $\bar{q}_B \neq 0$, то формулы (13) – (15) справедливы в том случае, если подкоренное выражение в них неотрицательно. Наименьшее значение $\bar{q}_B$, удовлетворяющее этому условию, назовем критическим $\bar{q}_{B,kr}$ и определим из уравнения

$$(M_1^2 - 1)^2 - 2(k + 1)M_1^2 \bar{q}_{B,kr}(1 - \omega_B) = 0, \quad (25)$$

левая часть которого является подкоренным выражением в формулах (13) – (15).

Из уравнения (25) мы находим критическое значение числа Дамкелера

$$\bar{q}_{B,kr} = \frac{(M_1^2 - 1)^2}{2(k + 1)M_1^2(1 - \omega_B)}, \quad (26)$$

величина которого зависит от числа Маха и показателя адиабаты k .

Из сказанного вытекает, что критическое значение $\bar{q}_{B,kr}$ представляет собой максимальное количество теплоты, которое еще можно подвести к потоку газовой смеси с заданным числом Маха M_1 , чтобы поток был стационарным.

Из формулы (26) следует, что каждому критическому числу Дамкелера соответствует определенное число Маха, являющееся критическим $M_{1,kr}$, отыскать которое мы можем из биквадратного уравнения

$$(M_{1,kr}^2)^2 - 2M_{1,kr}^2[1 + (k + 1)\bar{q}_{B,kr}(1 - \omega_B)] + 1 = 0, \quad (27)$$

вытекающего из уравнения (25).

Искомый корнем уравнения (27) является критическое число Маха

$$M_{1,kp} = \sqrt{1 + \frac{(k+1)\bar{q}_{B,kp}(1-\omega_B)}{2}} + \sqrt{\frac{(k+1)\bar{q}_{B,kp}(1-\omega_B)}{2}}. \quad (28)$$

Графики функции $M_{1,kp}(\omega_B)$, построенные по формуле (28) представляют собой выпуклые кривые, показывающие, что по мере выгорания газовой смеси критические числа Маха $M_{1,kp}$ существенно увеличиваются (рис. 5).

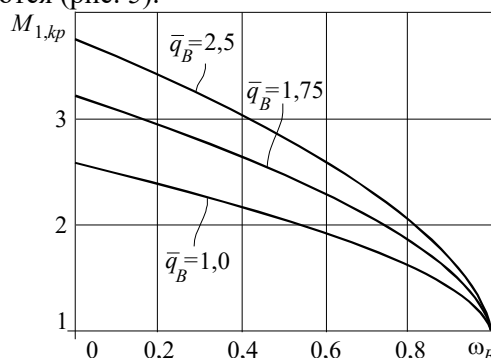


Рис. 5. Графики зависимостей критических чисел Маха от концентрации смеси

Подставляя критическое число Маха $M_{1,kp}$, вычисленное по формуле (28), в выражение (19), получим $M = 1$, что является условием Чепмена – Жуге [11, 12]. Это значит, что фронт химической реакции преобразуется в поверхность Чепмена – Жуге, представляющую собой фронт детонационного процесса. Выделяющаяся при этом теплота обеспечивает стационарность детонационного процесса.

Таким образом, при заданном количестве теплоты q_B , вычисляемое по формуле (28) критическое число Маха определяет начало детонационного процесса. Для определения параметров смеси на поверхности Чепмена – Жуге при условии, что числа Маха M_1 и Дамкелера $\bar{q}_B$ являются критическими значениями, воспользуемся формулами (13) – (15) и (18), из которых вытекают следующие выражения

$$\frac{u_2}{a_1} = \frac{1}{M_{1,kp}} \left[1 + \frac{k}{k+1} (M_{1,kp}^2 - 1) \right], \quad \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1}{M_{1,kp}^2} \left[1 + \frac{k}{k+1} (M_{1,kp}^2 - 1) \right];$$

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{k}{k+1} (M_{1,kp}^2 - 1), \quad \frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2 \rho_1}{p_1 \rho_2},$$

где u_2 , ρ_2 , p_2 , T_2 — параметры газовой смеси на поверхности Чепмена – Жуге.

Выводы. Сформулирована задача о фронте химической реакции в газовой смеси, моделируемой идеальным газом. Решение задачи построено на базе фундаментальных законов сохранения массы, импульсов и энергии.

Приведены формулы для вычисления скорости, плотности, давления и температуры газовой смеси за фронтом химической реакции и на поверхности Чепмена – Жуге.

Построены графики зависимостей параметров газовой смеси от ее концентрации, анализ которых показал, что в процессе выгорания газовой смеси ее скорость за фронтом реакции нелинейно возрастает, причем тем существеннее, чем больше число Дамкелера, а плотность и давление, наоборот, нелинейно уменьшаются.

Список литературы

1. Большинский М.И., Лысков Б.А., Каплюхин А.А. Газодинамические явления в шахтах. — Севастополь: Вебер, 2003. — 284 с.
2. Зыков В.С. О механизме формирования выбросоопасной ситуации в очистном забое угольной шахты // Маркшейдерский вестник. — 2016. — №5. — С. 44-48.
3. Черданцев Н.В. Об одном подходе к расчету выброса угля из газоносного пласта, вмещающего геологические нарушения // Безопасность труда в промышленности. — 2019. — № 8. — С. 13-18.
4. Об одном подходе к описанию суфлярных выделений газа из резервуаров угольного массива в горные выработки / Н.В. Черданцев [и др.] // Безопасность труда в промышленности. — 2017. — № 3. — С. 45-52.
5. Определение параметров суфлярных выделений газа из угольного пласта в горные выработки / С.В. Черданцев [и др.] // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2017. — №1. — С. 26-33.
6. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1987. — 502 с.

7. Канторович Б. В. Основы теории горения и газификации твердого топлива. – М.: Книга по требованию, 2013. – 601 с.
8. Бартльме Ф. Газодинамика горения: пер. с нем. – М.: Энергоиздат, 1981. – 280 с.
9. Combustion of Fine Dispersed Dust-Gas-Air Mixtures in Underground Workings / S.V. Cherdantsev [et al.] // Journal of Mining. – Science March 2018. – Vol. 54. – Iss. 2. – P. 339-346.
10. Левин В.А., Туник Ю.В. Инициирование детонационного горения угольной пыли вметановоздушной смеси // Физика горения и взрыва. – 1987. – № 1. – С. 3-8.
11. Селиванов В.В., Соловьев В.С., Сысоев Н.Н. Ударные и детонационные волны. Методы исследования. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 256 с.
12. Физика взрыва ; под ред. Л.П. Орленко. – 3-е изд., испр. – В 2 т. Т. 1. – М.: Физматлит, 2004. – 832 с.
13. Васильев А.А., Васильев В.А. Расчетные и экспериментальные параметры горения и детонации смесей на основе метана и угольной пыли // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 2. – С. 8 – 39.
14. Теплофизические и газодинамические условия протекания процессов дефлаграции и детонации в пылегазовоздушных потоках горных выработок вблизи очагов самонагревания / С.В. Черданцев [и др.] // Химическая физика и мезоскопия. – 2019. – Том 21, № 2. – С. 179-189.
15. Газовая динамика / Х.А. Рахматуллин Х.А. [и др.] – М.: Высшая школа, 1965. – 723 с.
16. Овсянников Л.В. Лекции по основам газовой динамики. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. – 336 с.
17. Новиков И.И. Термодинамика. – М.: Машиностроение, 1984. – 592 с.

УДК 622.831.322

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЯ ВЫБРОСООПАСНОСТИ СПЕКТРАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ПРОГНОЗА

д.т.н. Шадрин А.В., чл.-корр. РАН Клишин В.И., Дюк Ю.А.

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

Аннотация. Изложена методика оперативного экспериментального определения критерия выбросоопасности спектрально-акустического метода прогноза по параметрам искусственного акустического сигнала для конкретного участка шахтопласта. Определение основано на сравнении результатов одновременно выполняемых спектрально-акустического и инструментального методов прогноза.

Ключевые слова: динамические явления, показатель выбросоопасности, методика определения критерия выбросоопасности, инструментальный и спектрально-акустический метод прогноза.

Введение. В соответствии с Программой развития угольной промышленности России до 2035 года, угольные предприятия поставлены перед необходимостью увеличения темпов ведения горных работ. [1]. Так, например, за последнее десятилетие объем добычи угля увеличился на 30%, производительность труда – в 1,5 раза [2]. Однако, с увеличением темпов ведения горных работ все геомеханические процессы, происходящие в газонасыщенном углепородном массиве, приобретают более сложный характер и, следовательно, увеличивается риск проявления динамических явлений (ДЯ).

Для прогноза выбросоопасности применяются инструментальные и автоматизированные геофизические методы текущего прогноза.

Применяемый традиционный инструментальный метод «по начальной скорости газовыделения и выходу буровой мелочи при бурении контрольных шпуров», имеет высокую достоверность, однако его применение невозможно в современных условиях добычи угля. Это связано с его трудоемкостью и продолжительностью, что сдерживает темпы ведения подготовительных и очистных выработок.

Автоматизированные методы текущего прогноза выбросоопасности, соответствующие высокому темпу ведения горных работ, являются нормативными и применяются в определенных горнотехнических условиях шахт [3]. Однако каждый из этих методов, в основном, контролирует всего один какой-либо фактор выбросоопасности. Поэтому достоверность его оказывается недостаточно высокой.

Примером широко применяемого в настоящее время геофизического метода прогноза выбросоопасности является метод «по параметрам искусственного акустического сигнала». Метод,

наряду с возрастающим объемом применения благодаря наиболее достоверным результатам прогноза по сравнению с другими геофизическими методами, имеет ряд существенных недостатков. Одним из них является отсутствие методики определения критического значения показателя выбросоопасности. Поэтому в руководстве по аппаратуре САКСМ, реализующей данный метод, критическое значение показателя выбросоопасности регламентируется устанавливать на участке пласта, о котором заранее известно, что он неопасен [4]. При этом величина критического значения определяется как сумма среднего значения показателя выбросоопасности, полученного при проведении не менее 30 циклов проходки выработки, и двух - трех значений среднеквадратичного отклонения этой величины от среднего значения. Такой подход к определению критического значения показателя выбросоопасности появился на основе практики применения этого метода прогноза при ведении горных работ. Однако определенное таким образом критическое значение показателя опасности не является действительно критическим, а свидетельствует лишь о том, что при нем выбросы не происходили. Оно может быть существенно меньше реального критического значения показателя выбросоопасности. В результате применение мероприятий по снижению опасности на фактически неопасном участке может привести к неоправданному расходованию средств и потере темпа ведения горных работ. Этим обусловлена необходимость разработки методики определения критерия выбросоопасности для этого метода.

Вторым существенным недостатком метода «по параметрам искусственного акустического сигнала» является неспособность учитывать газовый фактор выбросоопасности, поскольку акустические колебания распространяются по твердому каркасу призабойного пространства и давление газа в пласте на их параметры не влияет. Поэтому необходимо, чтобы методика определения критерия выбросоопасности спектрально-акустического метода учитывала и газовый фактор.

Цель данной статьи: привести описание методики оперативного экспериментального определения критерия выбросоопасности спектрально-акустического метода прогноза по параметрам искусственного акустического сигнала для конкретного участка шахтопласта.

Общие положения. Методика определения критерия выбросоопасности спектрально-акустического метода прогноза (далее Методика) предназначена для разновидностей спектрально-акустического метода текущего прогноза выбросоопасности, основанных на отношении амплитуд высокочастотной и низкочастотной частей спектра «шума» работающего горного оборудования, в том числе при применении метода «текущего прогноза выбросоопасности по параметрам искусственного акустического сигнала» [5-10]. Методика позволяет определить критическое значение показателя выбросоопасности на конкретном участке проведения горной выработки по угольному пласту.

Необходимость Методики обусловлена тем, что, согласно действующим нормативным документам для метода текущего прогноза выбросоопасности «по параметрам искусственного акустического сигнала» регламентируется «первоначально пороговое значение прогностических параметров устанавливать по результатам текущего прогноза выбросоопасности по параметрам искусственного акустического сигнала, полученным на участке проводимой горной выработки или горных выработок, для которых установлена категория «неопасно». Но если критерий установлен равным показателю выбросоопасности, определенному на неопасном участке, то он не может быть критерием опасности внезапного выброса.

«Методика...» основана на одновременном определении показателя выбросоопасности спектрально-акустическим и инструментальным методом в одном и том же забое. При этом инструментальный метод используется в качестве эталонного, зарекомендовавшего достаточно высокую достоверность прогноза для шахт основных угольных бассейнов России, в частности Кузбасса. Это обосновано тем, что метод контролирует (прямо или косвенно) основные факторы выбросоопасности: начальная скорость газовой выделения характеризует газоносность угля и давление газа (газовый фактор выбросоопасности), выход бурового штыба при бурении скважины в угольном массиве определяется горным давлением (второй основной фактор выбросоопасности) и прочностью угля (третий основной фактор выбросоопасности).

В качестве источника акустического излучения (далее «шума») при определении критического значения показателя выбросоопасности для спектрально-акустического метода используется тип проходческого комбайна, применяемый при проведении выработки, для которой определяется критическое значение показателя выбросоопасности.

При определении критического значения показателя выбросоопасности спектрально-акустическим методом применяется оборудование, которое будет использоваться для текущего

прогноза выбросоопасности в данной выработке, например, стационарная аппаратура типа САКСМ.

Данная Методика составлена по результатам выполненных Институтом угля ФИЦ УУХ СО РАН в 2017-2021 гг. исследований по совершенствованию спектрально-акустического метода текущего прогноза выбросоопасности угольного массива, основанного на сопоставлении амплитуд высокочастотной и низкочастотной компонент спектра «шума» проходческого комбайна.

Для определения критического значения показателя выбросоопасности спектрально-акустического метода текущего прогноза необходимо иметь следующие приборы, оборудование и принадлежности:

- комплект оборудования для бурения шпуров (или скважин) на проектную глубину (до 6,5 м);
- комплект оборудования для прогноза выбросоопасности спектрально-акустическим методом (например, САКСМ);
- комплект приборов для прогноза выбросоопасности инструментальным методом КППВ-1, включающий: прибор для замера скорости газовыделения из скважин ПСГ, пневматический герметизатор ГСП-1, предназначенный для изолирования метрового интервала шпура, штыбомер ШМ-1;
- прочностномер П-1;
- прибор для измерения концентрации метана в атмосфере выработки;
- планшет и рабочий журнал;
- порядок работы с указанным оборудованием регламентируется Инструкциями по их эксплуатации.

Понятия текущего и критического значения показателя выбросоопасности спектрально-акустического метода текущего прогноза. Текущее значение показателя выбросоопасности спектрально-акустического метода K_m рассчитывается как отношение амплитуд высокочастотной и низкочастотной частей спектра «шума» работающего проходческого комбайна, которое может быть выражено через отношение предельного и текущего средних напряжений следующим образом [5, 6]:

$$K_T = \frac{A_B}{A_H} = \exp(-C \frac{\sigma_n}{\sigma_T} d), \quad (1)$$

где A_B и A_H – амплитуды акустических шумов работающего «по углю» комбайна, замеренные соответственно на высоких и низких частотах, В; σ_n и σ_m – соответственно средние предельное и текущее напряжение в данном месте в настоящий момент, Па; d – расстояние между рабочим органом комбайна, воздействующим на забой, и приемником (геофоном), установленным в борт выработки, м; C – параметр, характеризующий затухание акустических шумов на данном участке горного массива. Здесь предельным для данного положения забоя выработки называется значение напряжения, при котором может начаться внезапный выброс угля и газа.

Критическое текущее значение показателя выбросоопасности для данного положения забоя $K_{к,т}$ определяется горным давлением, внутрипластовым давлением свободного газа в трещинах и прочностью угля в призабойном пространстве и соответствует условию, когда значения текущего и предельного среднего напряжения близки по величине $\sigma_m \approx \sigma_n$.

Экспериментальное определение критического значения показателя выбросоопасности. Экспериментальное определение критического текущего значения показателя выбросоопасности осуществляется на участке пласта, о котором заранее известно, что он не выбросоопасен. Вначале выполняют инструментальный прогноз. Последовательность действий следующая.

В забое выработки измеряют мощность перемятой пачки - m , ее ширину - a и прочностномером П-1 - прочность q . По этим данным рассчитывают периметр P_B (м), площадь S_B (м²) и коэффициент крепости угля по М.М. Протоdjяконову f_B (б.е.) перемятой пачки по формулам:

$$P_B = 2(a + m); S_B = a \cdot m; f_B = \frac{0,4q}{110-q}. \quad (1)$$

По результатам измерений определяют номер интервала i_m , в котором измерено максимальное значение начальной скорости газовыделения $g_{н,мах}$ (оно обозначено как $G_{н,мах}$), и для него находят:

- выход штыба, он обозначен как $Z_{G,н.мах}$, л/м;
- расстояние $l_{g,мах}$ от забоя до середины интервала скважины, для которого установлено значение $G_{н,мах}$, по формуле $l_{g,мах} = 0,5 + i_m$, м.

Для первого от забоя интервала находят максимальное значение начальной скорости газовыделения $g_{н,мах.з}$ (л/мин·м) и выход штыба Z_3 (л/м).

Далее рассчитывают: приведенное значение начальной скорости газовыделения с интервала скважины, в котором измерено $G_{н.мах}$, и с ближайшего к забою интервала по формулам [11]:

$$G_{н.мах}^* = G_{н.мах} \sqrt{\frac{Z_n}{Z_{G.н.мах}}}, \quad (2)$$

$$g_{н.мах.з}^* = g_{н.мах.з} \sqrt{\frac{Z_n}{Z_3}}, \quad (3)$$

где $Z_n = 2$ л/м – выход бурового штыба, соответствующий проектному диаметру шпура 42 мм.

Затем рассчитывают показатель выбросоопасности в окрестности подготовительной выработки B_n по формуле [11]:

$$B_n = \frac{\eta(G_{н.мах}^* - g_{н.мах.з}^*)S_B}{f_B \Pi_B l_{g.мах}}, \quad (4)$$

где $\eta = 1,25$ мин/л – постоянный коэффициент.

Далее во время прохождения комбайном выработки на расстояние, равное глубине контрольного шпура для инструментального прогноза, выполняют спектрально-акустический прогноз. Для этого соответствующей аппаратурой регистрируют текущие значения показателя выбросоопасности $K_{э,т,i}$ с каждого i -го метрового интервала проходки. По этим данным определяют максимальное по всем интервалам контроля текущее значение показателя выбросоопасности $K_{э,т,мах}$.

По результатам инструментального и геофизического методов прогноза определяют текущее критическое текущее значение показателя выбросоопасности для данного участка пласта по формуле:

$$K_{кр,э} = \frac{K_{э,т,мах}}{B_n}. \quad (5)$$

Во время работы комбайна на каждом метровом интервале выработки переносным газоанализатором метана определяют максимальную концентрацию метана в атмосфере выработки $\Omega_{мах}$, %, на расстоянии 3-4 м от забоя выработки. Эти данные в последующем будут использоваться для определения применимости критического значения показателя выбросоопасности при последующем проведении выработки.

Определенное по формуле (5) текущее критическое значение показателя выбросоопасности принимается для текущего прогноза выбросоопасности спектрально-акустическим методом при последующем ведении подготовительной выработки на расстояние до 300 м при условии, что концентрация метана в атмосфере выработки при работе комбайна и прочность наименее прочной пачки угля мощностью более 0,2 м не изменяются более чем на 10% от максимальных значений, замеренных при осуществлении экспериментального определения критического значения показателя выбросоопасности. В противном случае определение критического значения показателя выбросоопасности повторяют по приведенному выше алгоритму.

Измеряемые и расчетные данные заносятся в рабочий журнал. Пример результатов измерения и расчета (ячейки выделены серым цветом) приведен в таблице.

Таблица

Пример заполнения рабочего журнала при экспериментальном определении критического значения показателя выбросоопасности спектрально-акустического метода

Параметры инструментального метода прогноза						
Измеренные и рассчитанные параметры перемятой пачки угля						
Мощность пачки m , м	Ширина a , м	Прочность q , у.е.	Периметр $P_е = 2(a+m)$, м	Площадь $S_е = a \cdot m$, м ²	Коэффициент крепости $f_е = \frac{0,4q}{110 - q}$, б.е.	
0,5	4	65	9	2	0,6	
Измеренные параметры поинтервального контроля						
Номер интервала, i	1	2	3	4	5	6
Длина шпура, м	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5
$g_{н.мах}$, л/мин·м	0,4	9,2	5,9	4,2	3,8	
Z , л/м	4	9	14	6,5	4	
Параметры, установленные по результатам измерений и расчета						
$G_{н.мах}$	$Z_{G.н.мах}$	$g_{н.мах.з}$	$Z_з$	i_m	$G_{н.мах}^*$	$g_{н.мах.з}^*$
						$l_{g,мах} = 0,5 + i_m$, м

л/мин·м	л/м	л/мин	л/м		л/мин	л/мин	
9,2	9	0,4	4	2	4,3	0,28	2,5
$B_{\Pi} = \frac{1,25(G_{н,мах}^* - g_{н,мах,э}^*)S_B}{f_B \Pi_B l_{g,мах}} = B_{\Pi} = \frac{1,25(4,3-0,3)S_B}{0,58 \cdot 9 \cdot 2,5} = 0,74$							
Параметры спектрально-акустического метода прогноза							
Номер интервала, i	1	2	3	4	5	6	
$K_{э,м,i}$	0,5	0,7	0,8	0,9	0,8		
$\Omega_{мах}, \%$	0,4	0,5	0,7	0,6	0,8		
$K_{э,м,мах} = 0,9$							
$K_{кр,э} = \frac{K_{э,м,мах}}{B_{\Pi}} = \frac{0,9}{0,74} \approx 1,2$							

Определение параметров C и D для экспериментального участка горной выработки.

Для расчета параметров C и D , входящих в выражение (6), для интервала скважины, при прохождении которого комбайном было зарегистрировано максимальное значение начальной скорости газовыделения, выбирают следующие данные: показатель выбросоопасности $K_{G,н,мах}$ и максимальное значение концентрации метана $\Omega_{G,н,мах}, \%$.

Для интервала контроля с максимальным значением начальной скорости газовыделения рассчитывают расстояние от излучателя до геофона d по формуле:

$$d = d_3 + l_{g,мах}, \text{ м}, \quad (7)$$

где d_3 – расстояние от геофона до плоскости забоя выработки.

Рассчитывают экспериментальные значения параметров C и D , входящих в выражение (6), по формулам [12]:

$$C = -\frac{\ln K_{G,н,мах}}{d}, \quad (8)$$

$$D = \frac{P \left[0,1 \left(\frac{q_{min}}{110 - q_{min}} \right) - 1 \right]}{\sqrt{Q \Omega_{G,н,мах}}}. \quad (9)$$

Далее величину критического текущего значения показателя выбросоопасности $K_{к,т}$ рассчитывают автоматически, используя непрерывно рассчитываемые значения параметров C и D и используя текущие значения концентрации метана Ω_m , определенные аппаратурой АГК, по формуле (6).

Выводы. С помощью разработанной методики эпизодического определения критерия выбросоопасности можно в настоящее время оценивать значение $K_{к,т}$ для конкретной выработки, в которой текущий прогноз выбросоопасности осуществляется методом «по параметрам искусственного акустического сигнала».

Приведенные данные для непрерывного прогноза выбросоопасности по трем основным факторам выбросоопасности являются обоснованием для разработки информационной системы непрерывного прогноза выбросоопасности угольных пластов с высокой достоверностью результата в составе многофункциональной системы безопасности угольной шахты.

Список литературы

1. Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/565123539>.
2. Новак А.В. Угольная промышленность России: история на века // Энергетическая политика. – 2020. – №8. – С. 6 – 13.
3. Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений: федер. нормы и правила в обл. пром. безопасности. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2019. – Сер. 05. – Вып. 49. – 148 с.
4. Руководство по применению системы акустического контроля состояния массива горных пород и прогноза динамических явлений (САКСМ). – М.: МНТЛ РИВАС? 2016. – 49 с.
5. Шадрин А.В. Комплексный геофизический прогноз выбросоопасности угольных пластов // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – №1. – С. 42-48.
6. Shadrin A., Diyuk Y. Geophysical criterion of pre-outburst coal outskueezing from the face space into the working // International Journal of Mining Science and Technology. – 2019. – Vol. 29. – Issue 3. – P. 499-506. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.IJMST.2018.11.001>.
7. Бабенко В.С., Ткаченко Е.С., Зеленская Е.И. Сопоставление различных критериев выбросоопасности угольных пластов при проведении подготовительной выработки // Уголь. – №7. – 1991. – С. 60-61.

8. Мирер С.В., Храма О.И., Шадрин А.В. Спектрально-акустический прогноз выбросоопасности угольных пластов. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 1999. – 92 с.
9. Зорин А.Н., Ковтун Е.Д., Качан И.И. Акустический способ контроля выбросоопасности пород при комбайновой проходке // Уголь Украины. – 1987. – №2. – С. 29-30.
10. Король В.И., Скобенко А.В. Акустический способ прогноза газодинамических явлений в угольных шахтах. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2013. – 181 с.
11. Зыков В.С. Обоснование показателя степени выбросоопасности призабойной части угольного пласта/ В.С. Зыков // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2020. – № 2. – С. 32-37.
12. Шадрин А.В., Дюк Ю.А. Определение критерия выбросоопасности для комплексного спектрально-акустического метода прогноза // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – №8. – С. 19-26.

УДК 550.834.05

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УЧАСТКОВ ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОД С ИЗМЕНЕННЫМИ ФИЛЬТРАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ В КРОВЛЕ ВЫЕМОЧНОГО СТОЛБА НА ОСНОВЕ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

¹д.т.н. Тайлаков О.В., ¹к.т.н. Застрелов Д.Н., ¹Колесниченко С.Е., ²Соколов С.В., ²Роут Г.Н.
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН
2 – Кузбасский технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия

Аннотация. В настоящей статье выделены сложности, возникающие в процессе угледобычи при наличии в кровле зон с присутствием трещиноватости с раскрытием до 0,2 - 0,5м, вызывающих ее обрушения. Описан метод сейсмической разведки, используемый авторами для оценки геомеханических характеристик пород выемочного столба. Представлены результаты работ по определению и регистрации неустойчивых участков кровли.

Ключевые слова: выемочный столб, кровля, трещиноватость, сейсмическая разведка, общая глубинная точка, амплитудно-частотные характеристики сигнала.

Горно-геологические условия участка месторождения угля являются одним из основных факторов, влияющих на показатели разработки месторождения. Безопасность и бесперебойность процесса подземной выемки угля во многом определяется технологическими возможностями оборудования и отсутствием либо наличием негативных условий в пределах участка ведения горных работ. В этом случае важную роль приобретает своевременное получение информации о состоянии разрабатываемого углепородного массива. При этом негативным влиянием на процесс угледобычи могут характеризоваться различные геологические объекты [1, 2].

Одними из таких объектов являются включения малосвязных пород, залегающих в области кровли выемочного столба, выявленные в процессе выемки угля на шахте «Владимировская». Шахтное поле угледобывающего предприятия расположено на западном крыле Кедровско-Крохалевской брахисинклинали, в 30км севернее г. Кемерово. Оработка столбов № 3, 5, 9, 10 предусматривалась под бывшим гидроотвалом разреза «Кедровский», на котором отсыпается породный отвал, представляющий собой намывной массив, образованный в результате подачи гидросмеси при производстве вскрышных работ на разрезе «Кедровский» в 1950-60 гг. Оработка пласта Владимировского длинными столбами шахты «Владимировская» предполагалась в интервале глубин 20-50 м от поверхности, в зоне ослабленных, выветрелых пород. При приближении лав к поверхности четвертичные отложения и дно гидроотвала попадали в зону обрушения пород кровли.

С учетом горно-геологических условий в пределах шахтного поля и физико-механических свойств намывной массы (определенных в результате бурения по 3 скважинам, расположенным на границе частично осушенного бывшего гидроотвала), было рекомендовано производить отработку выемочных участков с использованием комплекса КМЮ4У 22/42 с диапазоном вынимаемой мощности непосредственно под гидроотвалом от 2,5 до 2,7 м. Выемка запасов экспериментального участка при наличии весьма неустойчивых пород кровли должна была производиться с оставлением угольной пачки 1,0 – 1,5 м. Рекомендуемая скорость движения очистного забоя была обусловлена необходимостью опережения линии забоя лавы относительно границы распространения трещин в завальной части лавы, и должна была составлять не менее 4 – 5 м/сут. Проходка, поддержание выработок, разработка паспортов и отработка столбов производились согласно «Временным

указаниям по управлению горным давлением в очистных забоях на пластах мощностью до 3,5 м с углом падения до 35°» без допуска «куполений» кровли [3].

Несмотря на выполнение рекомендуемого комплекса мероприятий, в период отработки запасов пласта Владимировский, в лавах №№ 3, 5, 9 и 10 происходили обрушения со значительными вывалами пород кровли. Наибольшими сложностями характеризовались горные работы в выемочном столбе №10 (длина по падению – 92 м, по простиранию – 370 м; глубина ведения горных работ от поверхности от 30 до 70 м). В период отработки выемочного столба № 10, наблюдались периодические обрушения продолжительностью до 5 минут. В результате одного из них более 80% сечения призабойного пространства лавы было перекрыто осыпавшимся туфоконгломератом, а также были частично засыпаны забойный конвейер и комбайн.

Наличие областей неустойчивой кровли снижает уровень безопасности и темпы ведения горных работ, усложняет процессы угледобычи и крепления горных выработок. С учетом происшедших инцидентов, для отработки выемочного столба № 11 с горно-геологическими условиями аналогичными условиям отработки выемочного столба №10 была запланирована мероприятия по доразведке состояния кровли. Учитывая расстояния между геологоразведочными скважинами, вероятность регистрации включений туфоконгломератов средним размером 10 на 10 м в кровле по результатам бурения изначально являлась достаточно низкой. В данном случае, для обеспечения безопасного ведения горных работ следовало выполнить уточняющие измерения, позволяющие скорректировать планы ведения горных работ с учетом областей неустойчивой кровли, чтобы избежать в дальнейшем простоя горно-шахтного оборудования и снизить опасность возникновения аварийных ситуаций, связанных с непредвиденным обрушением кровли. Для этого была выполнена сейсморазведка с поверхности угленосного массива, являющаяся эффективным инструментом инженерного картирования, позволяющим определять физико-механические свойства породных слоев составляющих массив горных пород.

В период с 20 октября 2010 года по 5 декабря 2010 года проведены полевые сейсмические измерения, обработка и интерпретация полученных данных. Сейсморазведочные исследования выполнены в пределах столба № 11 шахты «Владимирская» с целью определения состояния пород ее кровли и регистрации зон с малосвязанными породами. Для выполнения измерений был использован метод общей глубинной точки (МОГТ), основанный на регистрации отраженных упругих волн, искусственно возбуждаемых на поверхности источником колебаний [4]. В 2D – модификации МОГТ регистрация информации осуществляется по линиям геофизических профилей, участков поверхности, вмещающих упорядоченную поинтервально распределенную систему сейсмоприемников [5]. Исследовательский процесс в рамках выполнения сейсмического профилирования включает в себя 2 основных этапа:

1. Полевые работы: привязка профилей к местности, выбор оборудования и параметров измерения, размещение полевого сейсмического оборудования, инициация и регистрация сигналов.

2. Камеральные работы: предобработка и анализ зарегистрированной информации, обработка данных, интерпретация результатов.

Сейсмические исследования были проведены по 5 геофизическим профилям общей протяженностью 1150 м. Расположение сейсмических профилей на поверхности осуществлено на основе привязки к контуру выемочного столба №11 (рис. 1).

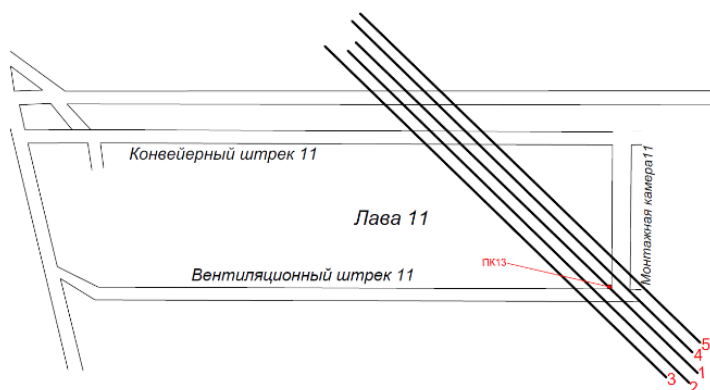


Рис. 1. Схема расположения геофизических профилей при исследовании лавы №11

Для геофизического исследования применен комплект полевого сейсмического оборудования, состоящий из источника и приемников сейсмических колебаний, а также сейсморегириру-

ющих станций. В качестве блоков регистрации данных использованы две сейсмостанции «Лакколит 24-МЗ», позволяющие осуществлять 48-канальную регистрацию данных. В ходе исследования сейсмостанциями регистрировались данные, получаемые с групп геофонов GS-20 DX. Возбуждение колебаний осуществлялось источником упругих волн «сейсморужье» с действующим элементом – холостым патроном 12-го калибра, начиненным бездымным порохом. Для регистрации волн при импульсном воздействии использованы следующие параметры: шаг между пунктами приёма – 5 м; шаг между пикетами возбуждения колебаний – 5 м; количество накоплений – 1. Общие параметры измерения, настраиваемые для измерительной аппаратуры, определены со следующими значениями: шаг дискретизации – 0,5; срез встроенного фильтра -1000 Гц; реальный интервал приёма – 1536 мс. По результатам полевых измерений были зарегистрированы 132 картины сейсмического волнового поля при 48-ми канальной расстановке сейсмических приемников.

С целью формирования результирующего сейсмического разреза, отражающего картину залегания исследуемого геологического горизонта, выполнена камеральная обработка данных. Обработка сейсмической информации по методу отраженных волн проводилась в несколько этапов. Первый этап включал в себя: создание и регистрацию проекта; присвоение геометрии системы наблюдения профиля и ввод ее в базу данных; загрузку сейсмических данных. Второй этап предполагал: анализ волнового поля с целью определения амплитудно-частотного спектра записи, выявление волн-помех; подбор параметров фильтрации, применяемых к исходным записям с целью подавления волн-помех; выбор скоростного закона и ввод его в базу данных; редактирование сейсмических записей с занесением в базу данных файлов редакции; подбор параметров мьютинга; суммирование по ОГТ. На заключительном этапе проведена миграция временного разреза в глубинный.

По результатам камеральных работ получены сейсмические разрезы, на которых зарегистрирована повторяющаяся ось синфазности, с расчетной глубиной 45-50 м, определенная как отражение от пласта Владимирский. В ходе оценки сейсмических разрезов, установлено, что визуально определить положение участков кровли, вмещающих включения конгломератов не представляется возможным. В связи с этим были изучены амплитудно-частотные характеристики регистрируемого сейсмического сигнала [6]. В пределах рассматриваемого волновода, представляющего собой угольный пласт Владимирский, наблюдалась дифференциация различных волновых параметров, где наибольшая контрастность, обеспечивающая достоверность результатов исследования, была зафиксирована при анализе изменения амплитуд сейсмических колебаний (рис. 2).

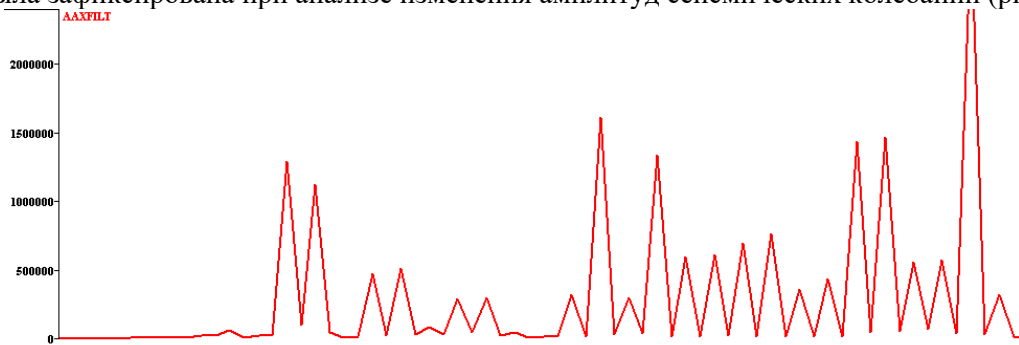


Рис. 2. Амплитудный анализ области активной кровли в пределах геофизического профиля №1

По результатам исследования пространства между зарегистрированными отражениями угольных пластов определены области концентрации пород с наименьшей связностью по геофизическим профилям 1-4. На полученных сейсмических разрезах выделены следующие элементы строения массива (рис. 3): пласт Владимирский со средней глубиной залегания около 50 метров (черный цвет); границы областей, характеризующихся минимальными значениями амплитуд (фиолетовый цвет); границы областей, характеризующиеся малыми значениями амплитуд, которые, при определенных условиях, могут также являться областями неустойчивой кровли (синий цвет).

По итогам сопоставления результатов геофизических измерений с фактическим положением объектов функционирования шахты «Владимировская» зоны, характеризующиеся минимальными значениями амплитуд и малыми значениями амплитуд, были вынесены на план горных работ в контур выемочного столба №11 (рис. 4).

Впоследствии, в пределах, выделенных по результатам сейсмической разведки, областей выполнены мероприятия по смолоинъекционному укреплению непосредственной кровли. В ре-

зультате их осуществления, горные работы в зоне влияния гидроотвала проведены без вынужденных остановок.

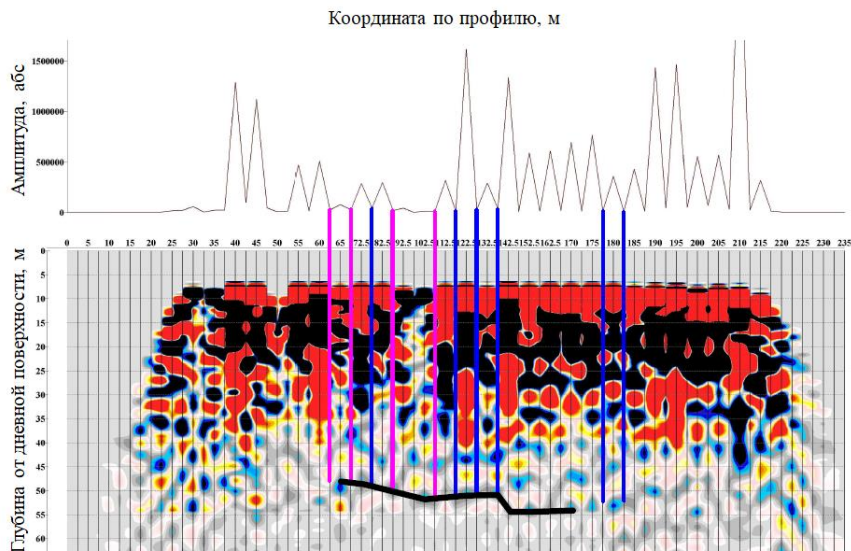


Рис. 3. Результаты геофизических измерений области выемочного столба №11

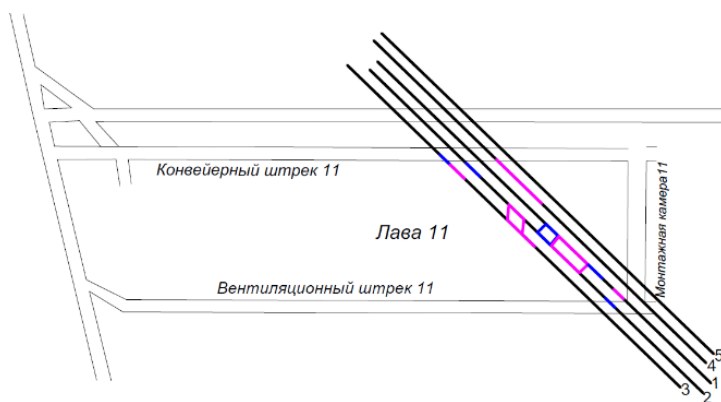


Рис. 4. Результаты геофизических измерений, нанесенные на план горных работ шахты «Владимировская»

Вывод. Успешность отработки исследованного участка столба №11 после смолоинъекционного укрепления свидетельствует о высокой эффективности применения сейсмической разведки в качестве инструмента для регистрации зон трещиноватых пород в области кровли выемочного столба.

Список литературы

1. Шинкевич М.В. Газовыделение из отработываемого пласта с учётом геомеханических процессов во вмещающем массиве // Горный информационно – аналитический бюллетень. – 2013. – Отд. вып. – № 6. – С. 278-285.
2. Козырева Е.Н., Шинкевич М.В., Назаров Н.Ю. Некоторые особенности управления метанообильностью высокопроизводительного выемочного участка // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 9. – С. 322-325.
3. Временные указания по управлению горным давлением в очистных забоях на пластах мощностью до 3,5 м с углом падения до 35°. – Л.: ВНИМИ, 1982.
4. Тайлаков О.В., Овчинников В.И., Соколов С.В. Применение малоглубинной сейсморазведки для уточнения условий залегания угольных пластов и локализации изменений их газоносности // Геотехническая механика. – 2010. – № 88. – С. 22-26.
5. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. «Сейсморазведка». – Тверь: Издательство АИС, 2006.
6. Обоснование критериев регистрации коллекторов угольного метана на основе нейросетевого анализа сейсморазведочных данных / О.В. Тайлаков [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S49. – С. 300-312.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ

д.т.н. Тайлаков О.В., к.т.н. Макеев М.П., Соколов С.В., Колмакова А.А.

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

Аннотация. В статье рассматривается восстановительный процесс образования системы трещин после гидроразрыва угольного пласта, на основе проведенных сейсмических исследований с помощью современных математических комплексов программ. Рассмотрены модельные представления о развитии системы трещин при гидродинамическом воздействии на массив горных пород, позволяющие оценить характер их распространения

Ключевые слова: выемочный столб, кровля, трещиноватость, сейсмическая разведка.

Высокая газоносность угольных пластов требует повышенного внимания при планировании горных работ. Это связано в первую очередь с безопасностью при ведении работ по добыче полезного ископаемого. Одним из основных направлений дегазации является извлечение природного газа через скважины из предполагаемых горных выработок до начала ведения выемки угля [1, 2]. Объем порово-трещинного пространства оказывает значительное влияние на скорость дегазации и полноту извлечения метана. Для воздействия на физико-механические свойства выемочного столба широкое применение находит метод гидроразрыва угольного пласта. Информативным методом оценки такого воздействия является сейсмическое просвечивание из горных выработок.

Для оценки эффективности гидровоздействия на угольный пласт, выполненного для повышения безопасности эксплуатации отрабатываемого выемочного столба и снижения его природной газоносности, на одной из угольных шахт Кузбасса проведены сейсмические исследования непосредственно до и после проведения гидроразрыва пласта [3].

Исследование осуществлено на участке выемочного столба общей протяженностью 400 м на основе метода сейсмического просвечивания углепородного массива на проходящих волнах. Метод сейсмического просвечивания заключается в регистрации проходящих упругих волн в одной из параллельных горных выработок, тогда как их генерация осуществляется в другой. Приемную базу определяет общее количество групп сеймоприемников, которые размещаются с заданным интервалом (для приведенного исследования – 20 м). Положение сеймоприемников привязано к реальным условиям на основе фактического расположения подземной инфраструктуры.

Первоначально была выполнена сейсмическая разведка в области исследуемого участка до гидроразрыва. На момент измерения область выемочного столба не изменена проведением скважин гидроразрыва. По результатам сейсмических измерений выполнен анализ параметров сигнала, распространяющегося по угольному пласту, и получен горизонтальный геофизический разрез (рис. 1 а). По результатам сейсмических измерений по угольному пласту во всей области исследований прослеживается сниженный скоростной фон с тремя контрастными зонами минимальных скоростей, характеризующихся наличием угля в разупрочненном состоянии и с наличием горных выработок, оконтуривающих участок выполнения геофизических работ.

После проведения гидравлического воздействия на скважинах была проведена повторная сейсмическая разведка в области участка выемочного столба. По результатам сейсмических измерений выполнен анализ параметров сигнала, распространяющегося по угольному пласту, и получен горизонтальный геофизический разрез (рис. 1 б).

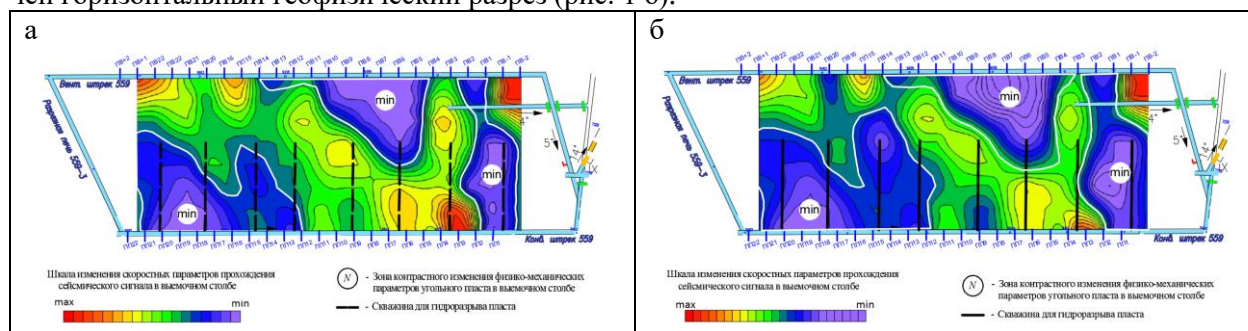


Рис. 1. Горизонтальный геофизический разрез распределения скоростных характеристик:
а – до гидроразрыва; б – после гидроразрыва

По результатам сейсмического просвечивания визуально фиксируется общее снижение фона сейсмических скоростей в пределах исследуемого участка и контрастное увеличение площади зон минимальных скоростей, что является признаком произошедшей вследствие гидроразрыва разгрузки.

Дополнительно, на основе применения программных процедур расчета, сформирован сейсмотомографический разрез, отражающий степень разгрузки угольного пласта, определенную по отношению разницы скоростей, зафиксированных в измерениях до и после гидроразрыва к диапазону их возможного изменения (рис. 2).

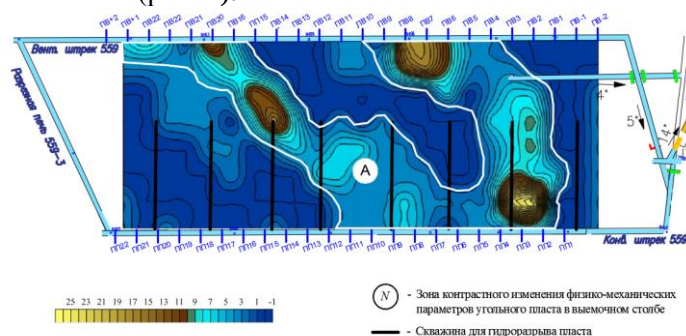


Рис. 2. Сейсмотомографический разрез, отражающий степень разгрузки угольного пласта, зафиксированных в измерениях до и после гидроразрыва

На полученном сейсмотомографическом разрезе минимальные (в пределах 1 %) изменения расчетного отношения, характеризующего разгрузку, фиксируется по всей области исследования. В пределах пласта контрастно выделяется протяженная зона с изменением расчетного отношения 5-25 % - А. Данная зона интерпретирована как область максимальной разгрузки, вызванной совокупностью естественных и техногенных причин, в том числе гидроразрыва.

Изменение общего фона скоростей после выполнения гидроразрыва характеризуется образованием системы трещин, по которым распространяется жидкость в разных направлениях и под разным давлением в зависимости от физико-механических свойств горных пород. Восстановить процесс образования системы трещин, на основе проведенных сейсмических исследований, можно с помощью современных математических комплексов программ. Для визуализации процесса формирования системы трещин был выбран модуль «Subsurface Flow Module» из программного пакета «COMSOL Multiphysics», включающий в себя решения уравнений на основе закона Дарси (1).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \nabla \cdot (\rho u) = Q_m, \quad (1)$$

где $u = -\frac{k}{\mu}(\nabla p + \rho g \nabla D)$, p – давление, Па; k – проницаемость, мД; ρ – плотность горных пород, м³/кг; μ – вязкость жидкости, Па·с; ∇D – единичный вектор в направлении действия гравитации; g – ускорения силы тяжести, м/с².

При заданных граничных условиях для потока жидкости гидроразрыва через массив горных пород перпендикулярного (нормальному) к границе раздела фаз:

$$n \cdot \rho \frac{k}{\mu}(\nabla p + \rho g \nabla D) = \rho U_0, \quad (2)$$

где U_0 – начальное значение скорости по закону Дарси, м/с, n – вектор к нормали при заданных условиях.

Для моделирования процесса гидроразрыва с помощью программно-аналитического комплекса «Comsol 5.4» предложено выделить две основные области (А, В), в границах, ограниченных сверху и снизу горными выработками 200х200 м, с отличающимися физико-механическими свойствами горных пород. Данные области были определены по результатам сейсмического просвечивания, проведенного после гидроразрыва (рис. 3а).

Физико-механические свойства угля при моделировании задавались через модуль упругости Юнга плотность угля и пористость. Пористость из горно-геологических угольного месторождения, а модуль упругости и плотность через скорость прохождения сейсмических волн. Известна зависимость между модулем упругости угля и скоростью прохождения сейсмической волны. Так, например, при скорости распространения продольной волны в 0,95 км/с модуль упругости Юнга, $E = 1600$ МПа.

Предположительно, область давления в системе трещин не должна переходить через границы выделенных областей (рис. 3 а, области А-Д). Таким образом для области А, на основе геофи-

зических данных, заданы начальные значения: проницаемость, $k - 3$ мД, Модуль упругости Юнга, $E - 1600$ МПа, плотность угля, $\rho_A - 1300$ кг/м³; пористость, $p_A - 20\%$. Для области В: проницаемость $k - 3$ мД, Модуль упругости Юнга, $E - 1300$ МПа, плотность угля, $\rho_B - 1400$ кг/м³; пористость, $p_B - 18\%$.

После построения областей исследования и задания начальных условий для расчета была смоделирована развитая система трещин, описывающая геофизический разрез распределения скоростных характеристик в области выемочного столба.

Для моделирования процесса образования трещин в массиве горных пород под воздействием подачи жидкости под давлением, выдвинуто предположение, что жидкость при высоком давлении поступает в массив горных пород через герметизируемый с помощью пакера интервал скважины в соответствии с методикой проведения гидроразрыва. Затем в модели задается постепенное развитие трещин по всему массиву горных пород (рис. 3 а, области С, D).

Для описания распространения трещин в горном массиве в модели поочередно задавали новую систему трещин. Графическое построение трещин проводилось в интерактивном режиме. Далее на границе раздела фаз «трещина-горная порода» с помощью встроенной функции «Fracture flow» задавались начальные условия в соответствии с уравнением (2), соответствующие прохождению жидкости через трещиноватые породы.

Результаты моделирования распределения давления жидкости в массиве горных пород при развитой системе трещин во время проведения гидроразрыва представлены на рис. 3 б.

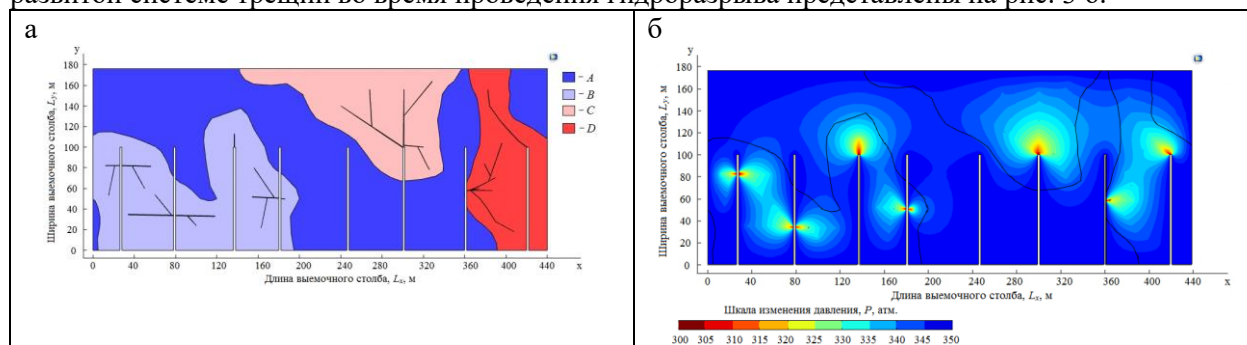


Рис. 3. Границы областей исследования А, В, С и D, включающих скважины гидроразрыва и модель системы трещин (а); распределение давления жидкости в массиве горных пород при подаче в скважину и образовании системы трещин (б)

Модельные представления о развитии системы трещин при гидродинамическом воздействии на массив горных пород позволили оценить характер их распространения. Анализ результатов математического моделирования показал сопоставимость натурного эксперимента с моделью. В дальнейшем планируется адаптировать модель для количественной оценки объема метана, вышедшего из трещин в скважину.

Выводы. Для оценки эффективности мероприятий по разгрузке угольного пласта исследуемой области выемочного столба выполнены геофизические исследования, которые позволили установить снижение общего фона скоростей после выполнения гидроразрыва и заметное увеличение площади зоны пониженных скоростей «min».

Выполненные исследования свидетельствуют о возможности применения метода сейсмического просвечивания для определения влияния гидроразрыва на геомеханическое состояние угольного пласта.

Полученные результаты могут быть использованы для уточнения горно-геологических условий и разработки мероприятий, направленных на повышение эффективности угледобычи и безопасности ведения горных работ.

Список литературы

1. Опыт применения направленного гидроразрыва основной кровли при выводе механизированного комплекса из монтажной камеры / В.И. Клишин [и др.] // Уголь. – 2015. – № 11. – С. 12-16.
2. Хасанова А.И., Альмухаметова Э.М., Габдрахманов Н.Х. Эффективность применения гидроразрыва пласта в условиях Бавлинского месторождения // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – №1. – С 7-13.

3. Определение аномальных тектонических зон, характеристик устойчивости и управляемости кровли методом сейсмического просвечивания на проходящих волнах / О.В. Тайлаков [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S49. – С. 275-282.

УДК 622.453

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА И МЕТАНА В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ

д.т.н. Тайлаков О.В., к.т.н. Застрелов Д.Н., к.т.н. Уткаев Е.А., к.т.н. Макеев М.П.
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

Аннотация. Авторами предлагается закачка CO_2 в угольные пласты малой мощности, которые не будут разрабатываться и не имеют промышленного значения с сопутствующем вытеснением метана с целью его утилизации.

Ключевые слова: закачки и хранения диоксида углерода, затопленная шахта, утилизация метана, численном моделировании процесса секвестрации диоксида углерода.

В связи с подписанием Постановления Правительства РФ в 2019 г. о принятии Парижского соглашения по климату сокращение эмиссии CO_2 в атмосферу является актуальной задачей [1]. Наиболее пригодными условиями для хранения CO_2 являются угольные пласты малой мощности, которые не будут разрабатываться и не имеют промышленного значения с сопутствующем вытеснением метана с целью его утилизации [2]. Для закачки и хранения CO_2 в геологических формациях можно использовать угольные пласты, расположенные на нижележащих горизонтах от затопленных шахт, которые будут являться «водным затвором» для предотвращения миграции CO_2 на поверхность. Согласно действующей отраслевой методике [3] влияние нижележащих угольных пластов спутников, с точки зрения миграции метана на вышележащие пласты, ограничено глубиной 30-60 м, в зависимости от горно-геологических условий залегания. Следуя этим методическим рекомендациям, целесообразно выбрать непродуктивный по углю пласт, расположенный на глубине не менее ~60 м ниже затопленной шахты. Для картирования водоупорных слоев и водоносных горизонтов возможно применение метода электротомографии [4]. В Кузнецком угольном бассейне имеются такие шахты, и некоторые из них расположены вблизи источника CO_2 , которым могут являться теплоэлектростанции, работающие, например, на угле. Технология улавливания, транспортировки и хранения CO_2 в условиях Кузбасса представлена на рис. 1.

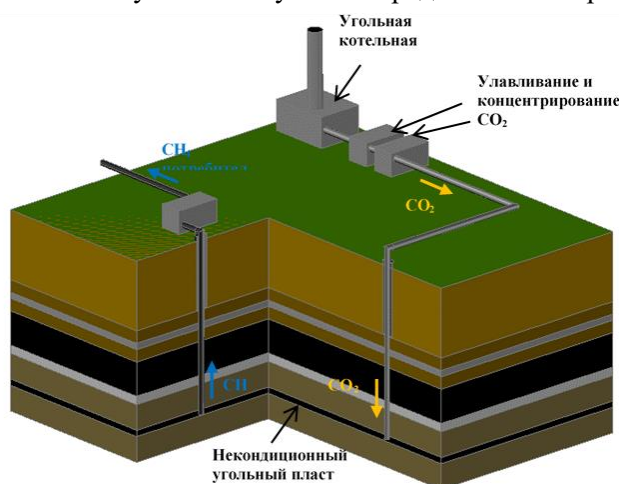


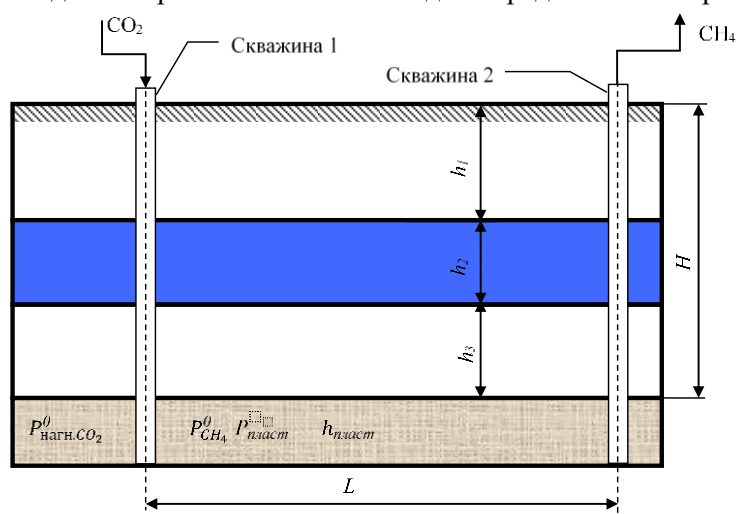
Рис. 1. Технология улавливания, транспортировки и хранения CO_2

Процесс закачки диоксида углерода в угольный пласт к настоящему времени недостаточно апробирован и требует применение современных методов математического моделирования. При этом накоплен обширный опыт в изучении физико-химических процессов, протекающих в угольном пласте при закачке CO_2 [5-7], тем не менее авторы ссылаются на недостаточную изученность практического применения данного вопроса.

При численном моделировании процесса секвестрации CO_2 в угольный пласт с целью вытеснения метана через скважину для последующей утилизации необходимо определить давление P_{CO_2} для повышения метаноотдачи, а также рассчитать давление P_{CO_2} , необходимое для предотвращения утечки CO_2 через скважину, по которой происходит вытеснение метана. При построении численной модели в среде Comsol Multiphysics, описывающей стационарный процесс секвестрации CO_2 в свежесозданную поверхность угольного пласта было принято допущение, что процесс является изотермическим, а область газового дренирования рассматриваемого участка угольного пласта мощностью $h_{\text{пласт}}$ ограничена сверху малопроницаемой горной породой мощностью h_3 (рис. 2). Скважина №1 используется для нагнетания CO_2 в пласт и обсажена на глубину H . Скважина №2 пробурена на расстоянии L от скважины №1 и обсажена на глубину H . В предлагаемой модели давление пласта рассматривается как функция, зависящая от давления CH_4 в углепородном массиве, $P_{\text{CH}_4}^0$, и давления нагнетания CO_2 в угольный пласт $P_{\text{нагн. CO}_2}^0$:

$$P_{\text{пласт}} = f(P_{\text{CH}_4}^0; P_{\text{нагн. CO}_2}^0).$$

Расчетная схема для построения численной модели представлена на рис. 2.



h_1 – расстояние от дневной поверхности до водоносного горизонта, м; h_2 – мощность водоносного горизонта, соответствующая вынудой мощности угольного пласта, м;
 h_3 – мощность вмещающих пород, м; L – расстояние между скважинами, м

Рис. 2. Расчетная схема для численной модели процесса нагнетания диоксида углерода в угольный пласт

В качестве параметров модели использованы данные о проницаемости и модуле упругости Юнга угольного пласта, а также были учтены следующие характеристики: диаметр скважины – 0,25 м; глубина залегания угольного пласта от дневной поверхности, H – 300 м; мощность пласта на участке бурения скважины, $h_{\text{пласт}}$, – 1 м; температура угольного пласта, $t_{\text{пласт}}$, – 30 °С; сорбция угля, 11,2 мл/г ($\text{м}^3/\text{т}$); V^{daf} – 34,2; A^C – 5,7; модуль упругости Юнга, E , – $1,5 \cdot 10^4$ МПа; проницаемость угля, k – 2 мД; плотность угля, ρ , 1210 $\text{кг}/\text{м}^3$.

Для построения численной модели был выбран модуль гидродинамики и теплопередачи в среде Comsol Multiphysics «Darcy's Law (dl)». Результаты моделирования процесса закачки CO_2 в угольный пласт под разными давлениями (5 атм, 15 атм, 30 атм.) с помощью модуля «Darcy's Law (dl)» представлены на рис. 3.

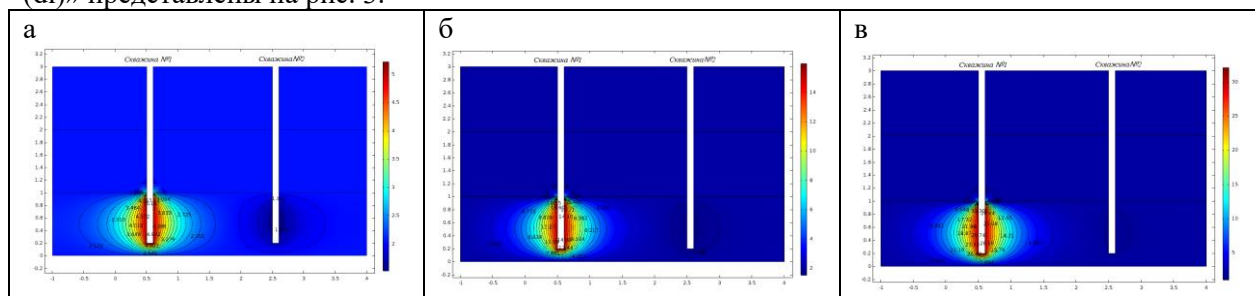


Рис. 3. Модельное представление процесса закачки CO_2 в угольный пласт через скважину №1 с разным давлением: а – $P_{\text{нагн. CO}_2}^0 = 5$ атм.; б – $P_{\text{нагн. CO}_2}^0 = 15$ атм.; в – $P_{\text{нагн. CO}_2}^0 = 30$ атм

Исходя из предположения, что газовый поток диоксида углерода в соответствии с Законом Дарси движется в сторону скважины №2 (рис. 2) через трещинно-поровое пространство угольного пласта, то данный процесс можно описать, используя процедуру «Subsurface Flow Module» в среде Comsol Multiphysics.

Постановка задачи: Мощность угольного пласта – 2 м. Расстояние между скважинами – 19 м. Из скважины № 2 со свежееобнаженной поверхности угольного пласта выходит метан со скоростью $V_{CH_4} = 2 \cdot 10^{-4}$ м/с, а связь между скважинами осуществляется через трещино-поровое пространство, представленную в модели в виде «прямоугольника» размером 0,12 x 18 м. При подаче CO_2 в скважину № 1 под давлением 30 атм. через 20 минут произойдет снижение давления в области скважины № 2, что приведёт к образованию единой системы трещин между скважинами. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

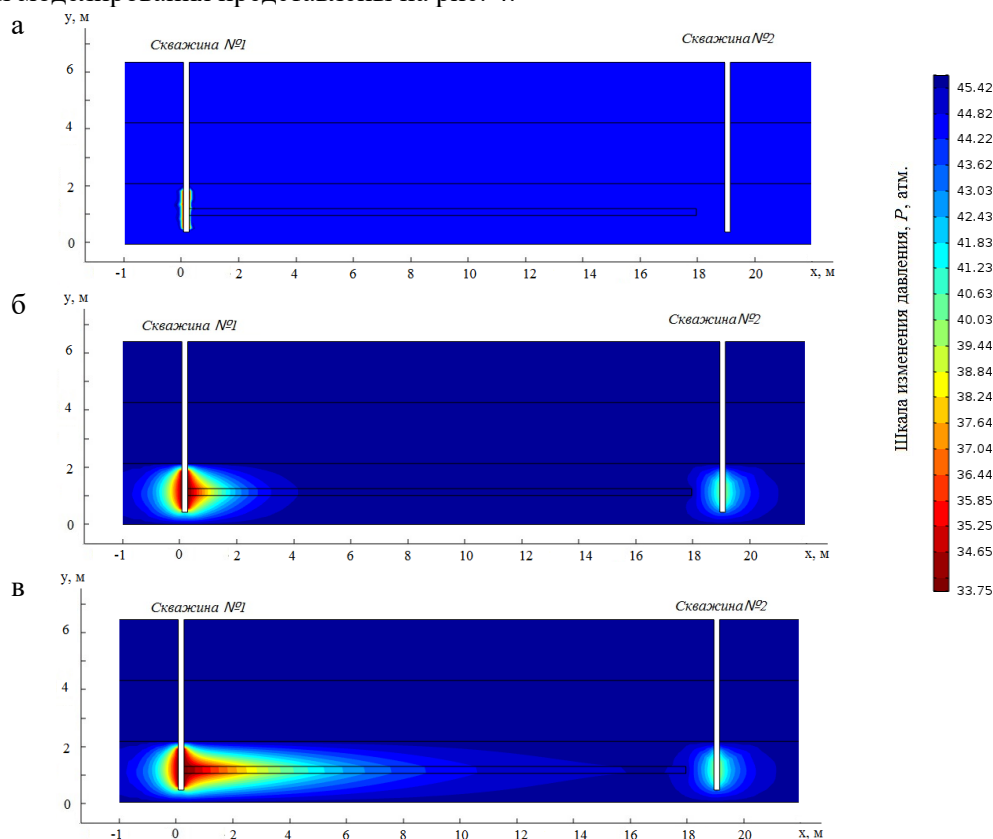


Рис. 4. Модельное представление процесса закачки CO_2 в угольный пласт через скважину №1 с направленной трещиной при $P_{нагн.CO_2}^0 = 30$ атм. в зависимости от времени:
а – $t_{зак} = 0$ мин, б – $t_{зак} = 10$ мин, в – $t_{зак} = 20$ мин

Выводы. Рассмотрены численные модели стационарного процесса секвестрации диоксида углерода в угольный пласт. В результате моделирования установлено, что при расстоянии между скважинами, участвующими в процессе секвестрации диоксида углерода, на расстоянии 19 метров через 20 мин происходит снижение давления в области метановыдающей скважины. Для оценки состояния скважин возможно применять метод эхолокации или гидродинамические методы исследования [4-7].

В дальнейшем возможно разработать технологическую схему проекта секвестрации углекислого газа, утилизации метановоздушной смеси, выполнить подбор основного технологического оборудования и выполнить укрупненную оценку капитальных затрат, необходимых для реализации проекта.

Список литературы

1. О принятии Парижского соглашения : пост. Правительства РФ от 21 сентября 2019 г., № 1228.
2. Улавливание и хранение углекислого газа в угольных пластах Кузбасса / О.В. Тайлаков [и др.] // Газовая промышленность. – 2013. – №12/699. – С. 86-87.
3. Об утверждении Инструкции по дегазации угольных шахт: приказ Ростехнадзора от 01.12.2011, № 679 (ред. от 20.05.2015) : зарег. в Минюсте России 29.12.2011, № 22811.

4. Определение глубин залегания водоносных горизонтов методом электротомографии в условиях Кузбасса / О.В. Тайлаков [и др.] // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – №1. – С. 30-34.
5. <https://www.researchgate.net/publication/249649582>.
6. <https://www.dissercat.com/content/razrabotka-sposobov-razuprochneniya-ugleporodnogo-massiva-dioksedom-ugleroda>.
7. Эттингер И.А. Газоёмкость ископаемых углей. – М.: Недра, 1966.

УДК 551.583, 504.05

ОЦЕНКА ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ НА ПРИМЕРЕ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

д.т.н. Тайлаков О.В., к.т.н. Застрелов Д.Н., Снетова Е.С.

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены категории выбросов парниковых газов, связанных с деятельностью угледобывающих предприятий. Также рассмотрены особенности и количественная оценка выбросов парниковых газов на примере угледобывающего предприятия. Приведены рекомендации для снижения объемов выбросов парниковых газов на угледобывающих предприятиях.

Ключевые слова: парниковые газы, инвентаризация выбросов, эмиссия парниковых газов, угледобывающее предприятие, шахтный метан, углекислый газ.

Антропогенные выбросы парниковых газов являются одной из наиболее значимых экологических проблем современности, способные оказывать воздействие на климатическую систему Земли, приводя к неблагоприятным экологическим последствиям [1-6].

К основным категориям источников выбросов парниковых газов, связанных с деятельностью угледобывающих предприятий, относятся:

выбросы при стационарном сжигании топлива – категория источников выбросов парниковых газов, которая включает выбросы CO_2 в атмосферу, возникающие в результате сжигания всех видов топлива для выработки тепловой и/или электрической энергии;

выбросы при сжигании топлива транспортом – категория источников выбросов парниковых газов, включающая выбросы CO_2 от сжигания бензина и дизельного топлива для осуществления пассажирских и грузовых перевозок транспортом и другими видами транспорта;

фугитивные выбросы – выбросы при технологических операциях, протекающих при добыче угля подземным способом (дегазация сопутствующих газов из угольных пластов и вентиляция воздуха угольных шахт), а также эмиссию метана из угля со складов и при транспортировке, а также при выполнении иных технологических операций.

Величину эмиссии парниковых газов на угледобывающих предприятиях определяют горно-геологические условия ведения горных работ, газоносность разрабатываемых угольных пластов, эффективность использования топливных ресурсов на вспомогательных производствах, а также климатические и метеорологические характеристики региона, в котором расположено предприятие.

Объективная оценка воздействия угледобывающей промышленности и ее вклад в глобальные процессы изменения климата невозможна без объективной и достоверной информации. В соответствии с комплексным планом реализации Климатической доктрины Российской Федерации рекомендовано усилить климатическую деятельность, что подразумевает более активное снижение выбросов парниковых газов, внедрение низкоуглеродных технологий и адаптацию к изменениям климата. В основе разрабатываемых, реализуемых и уже действующих способов ограничения содержания парниковых газов в атмосфере Земли лежит количественное определение, мониторинг, отчетность и верификация выбросов парниковых газов.

Для выполнения положений климатической доктрины и минимизации негативного воздействия в сфере добычи угля необходима разработка оптимальных стратегий корректировки технологических решений, направленных на стабилизацию экологической обстановки в районах промышленных площадок и смежных территорий.

Угольная промышленность является основным источником выбросов метана в атмосферу. Процесс подземной угледобычи сопровождается выделением шахтного метана. Метан – основной

парниковый газ, выделяющийся в процессе угледобычи (около 90%). Снижение эмиссий метана способствует значительному сокращению выбросов парниковых газов. Для определения объема выбросов парниковых газов, в результате производственных процессов на шахте А проведена инвентаризация выбросов парниковых газов. На рис. 1 представлены сведения об изменениях объемов прямых выбросов парниковых газов шахты А по категориям в 2014–2019 гг.

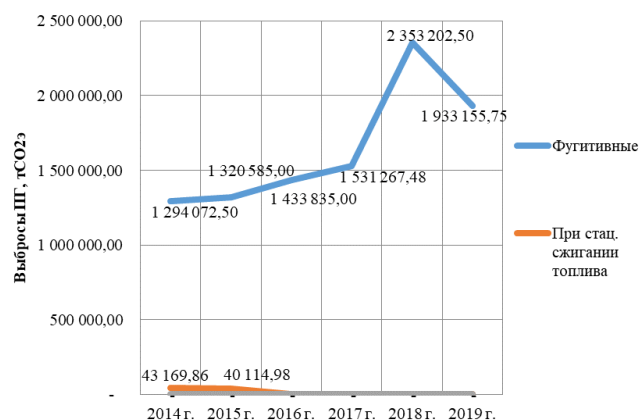


Рис 1. Объемы прямых выбросов парниковых газов шахты А по категориям в 2014 – 2019 гг.

В 2018 году наблюдается резкий скачок показателей фугитивных выбросов парниковых газов. Это связано с тем, что в сравнении с 2017 годом количество добытого угля шахтой А в 2018 году возросло, а к 2019 году снова значительно уменьшилось, что было обусловлено согласованными планами развития горных работ.

Объем выбросов парниковых газов при стационарном сжигании топлива составил 40114,98 т CO₂ в 2015 году, что на 3054,88 т CO₂ меньше в сравнении с 2014 г. (43169,86 т CO₂). С 2016 г. угольное топливо на шахте А потреблялось воздушонагревательной установкой (МТЭУ ВНУ) и двумя котельными для обогрева стволов, которые были выведены с баланса шахты и не относились к шахте А. Следовательно, выбросы CO₂ при стационарном сжигании на шахте А в 2016–2019 гг. для шахты не учитывались.

Собственного транспорта на балансе шахты А нет, следовательно, выбросы ПГ при сжигании топлива транспортом также не рассматривались.

Максимальное значение выбросов парниковых газов на шахте А приходится на категорию фугитивные выбросы – 99,2%, при стационарном сжигании выбросы парниковых газов составляют 0,8%. Можно сделать вывод, что дегазационный метан обладает наибольшим потенциалом для сокращения парниковых газов на угольных шахтах.

Чтобы снизить или стабилизировать выбросы парниковых газов на шахте А предусмотрена частичная утилизация метана. Для этого возможно переоборудовать действующие угольные котельные на использование дегазационного метана. Также возможно рассмотреть утилизацию метана в газогенераторных станциях для выработки тепловой и электрической энергии [7, 8].

Основные рекомендации по развитию производства, способствующие снижению эмиссии парниковых газов для предприятий угледобычи:

1 Исследование возможности утилизации шахтного метана, извлекаемого из угольных пластов:

1.1 Геолого-экологическое исследование угольного массива.

1.2 Разработка системы учета газоносности угольных пластов.

2 Аprobация технологий использования метана угольных пластов в качестве топлива:

– увеличивать количество энергетических установок, вырабатывающих на шахтном метане тепло- и/или электроэнергию;

– использовать шахтный метан как возможный источник топлива для автотранспорта;

3 Разработка и внедрение:

– энергоэффективных технологий добычи, погрузки, транспортировки полезного ископаемого;

– технологий повышения эффективности дегазации;

– технологий использования вторичных энергетических ресурсов.

Предложенные мероприятия для угледобывающих предприятий позволят обеспечить повышение показателя углеродоемкости и снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду.

Рассмотрим оценку экономической эффективности проекта утилизации шахтного метана в блочно-модульной котельной мощностью 3 МВт для выработки тепловой энергии. Стоимость 1 Гкал принята на уровне одноставочного тарифа 1200 руб. /Гкал.

Таким образом, общий размер выручки по проекту за счет выработки теплоэнергии составит 16798 тыс. руб. в год. Экономия на платежах за выбросы метана в атмосферу не учтена, но это только улучшит показатели экономической эффективности проекта. При расчете выручки по проекту и показателей экономической эффективности проекта также не учитывается возможная выручка от продажи единиц сокращенных выбросов. Реализация проектов утилизации шахтного метана позволит снизить выбросы парниковых газов, к которым относится шахтный метан.

Обще ежегодные текущие затраты на содержание котельной составят 10850 тыс. руб., включая заработную плату основного и вспомогательного персонала, материалы и комплектующие, а также амортизационные отчисления. Реализация проекта будет сопровождаться налоговыми платежами в бюджет в размере 17804 тыс. руб. за 5 лет. Размер ежегодной прибыли от реализации проекта утилизации метана в котельной составит 11585 тыс. руб. за период 5 лет. Основные показатели оценки экономической эффективности проекта приведены в таблице.

Таблица

Основные показатели оценки экономической эффективности проекта

Наименование показателя	Значение показателя
Капитальные затраты, тыс. руб.	27500
Срок окупаемости (PBP), лет	3,4
Чистый дисконтированный доход (NPV) за 5 лет, тыс. руб.	11295
Внутренняя норма рентабельности (IRR), %	13,4
Индекс прибыльности инвестиций (PI), коэфф.	1,41

Вывод. В дальнейшем возможно рассмотреть вариант переоборудования действующей угольной котельной на угледобывающем предприятии на использование шахтного метана и выполнить оценку экономической эффективности такого проекта.

Список литературы

1. Виды, источники парниковых газов и их влияние на климат Земли [Электронный ресурс]: Проект по выводу ГХФУ в Российской Федерации. – URL: http://www.ozonprogram.ru/biblioteka/slovar/parnikovye_gazy/.
2. Коробова О.С. Теоретические аспекты использования потенциала снижения парниковых газов в углепромышленных регионах. – М.: РУДН, 2012. – 88 с.
3. Коробова О.С., Михина Т.В. Потенциал снижения эмиссии парниковых газов и безопасность труда углепромышленного региона // Охрана и экономика труда. – Москва: РУДН, 2013. – С. 29-35.
4. Коробова О.С. Эколого-экономическое обоснование использования потенциала снижения парниковых газов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – С.279-283.
5. Проект Методических указаний и руководству по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность на территории Российской Федерации [Электронный ресурс]: «Единый портал». – URL: http://regulation.gov.ru/project/22710.html?point=view_project&stage=2&stage_id=17341.
6. Парниковый эффект [Электронный ресурс]: Глобальные экологические проблемы. – URL: <http://www.grandars.ru/shkola/geografiya /parnikovyy-effekt.html>.
7. Переработка дегазационного метана в энергетических установках на угледобывающих предприятиях / О.В. Тайлаков [и др.] // Горный Информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – Отдельный выпуск № 6. – С. 170-176.
8. Направления утилизации шахтного метана / О.В. Тайлаков [и др.] // Вестник КузГТУ. – 2015. – №6. – С. 62 – 67.

УДК [622.822.225:552.574.6]:001.891.573

КИНЕТИКА АДСОРБЦИИ КИСЛОРОДА ГАЗОНАСЫЩЕННЫМИ УГЛЯМИ

д.т.н. Греков С.П., к.т.н. Орликова В.П.

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор», г. Донецк

Аннотация. Представлена математическая модель процесса адсорбции кислорода поверхностью угля, и получены выражения, позволяющие определить концентрацию адсорбата в подвижной и неподвижной

фазах адсорбента, без учета химической реакции. Исследована динамика этих концентраций и определено общее количество кислорода, диффундировавшего в поры адсорбента. Установлено влияние начальной концентрации кислорода на сорбционный процесс, протекающий в твердой фазе угля.

Ключевые слова: адсорбция кислорода, окисление, подвижная и неподвижная фаза адсорбента, уголь, математическая модель.

Основной причиной самовозгорания углей в шахтах является их химическая активность, характеризующая интенсивностью хемосорбционных процессов. Изучение этих процессов для различных марок углей и температур представляет значительный теоретический и практический интерес.

В работе [1] исследовались теплообменные процессы в самовозгорающихся газоотдающих двухфазных средах, учитывающие нестационарную интенсивность выделения метана из частиц сорбента, полученную теоретическим путем. На практике задача представляется несколько сложнее, в виду метаморфизма угля, их газоносности, наличия примесей, влаги и др.

Исследованиями НИИГД «Респиратор», им. А.Ф. Скочинского, ВостНИИ установлено, что для пластов целого ряда месторождений существует тесная связь между остаточной концентрацией метана в углях и пожароопасностью его скоплений. При этом под остаточной концентрацией метана в угле понимают его концентрацию в частицах угля после напорного выделения из них метана, который может составлять от нескольких часов до нескольких суток и даже более, что вызвано размером частиц, степенью метаморфизма угля и другими параметрами. С увеличением остаточной концентрации метана пожароопасность скопления угля снижается и при содержании метана более 5 м³/т самовозгорание случается крайне редко. Эта закономерность объясняется тем, что метан, содержащийся в углях и выделяющийся из его частиц, препятствует доступу кислорода к реакционной поверхности, тормозя тем самым процесс окисления.

Выделение метана из углей происходит с различной интенсивностью. Экспериментальные исследования, проведенные в НИИГД «Респиратор» [2], показали, что сразу же после сброса давления с предварительно насыщенных метаном углей происходит струйное выделение газа в течение 3 - 5 суток. Этот процесс полностью блокирует поступление кислорода не только в поры угля, но и к внешней поверхности его частиц при низких скоростях прососа воздуха (порядка 10⁻⁵ м/с), что характерно для периода низкотемпературного окисления углей. Со временем струйное выделение метана ослабевает, и диффузия играет решающую роль в этом процессе. Устанавливается более или менее стационарный процесс – навстречу друг другу диффундируют метан и кислород. Тормозящее действие метана проявляется и в разбавлении кислорода в пространстве между зернами, уменьшая его концентрацию.

В настоящей работе исследуется кинетика адсорбции кислорода различной концентрации микропористыми частицами углей, предварительно насыщенных метаном в течение 10 - 15 суток, что характерно для склонных к самовозгоранию шахтных угольных скоплений.

Считаем, что адсорбент (уголь) в виде пористой сферической частицы помещен в поток адсорбтива (кислорода), который диффундирует в сорбент, адсорбируется на его поверхности и вступает в химические реакции [2].

В начальный период времени, когда частица угля изолирована от адсорбтива (например, уголь в ненарушенном пласте), концентрация кислорода и температура вне частицы и внутри ее пор равны. С течением времени концентрация адсорбтива в порах частицы изменяется с одной стороны за счет диффузии, с другой – за счет адсорбции на поверхности пор и химических реакций. Принимаем, что протекают необратимые химические реакции второго порядка, в результате которых образующиеся продукты реакции десорбируют и далее диффундируют от поверхности сорбента в объем, поэтому количество активных центров на его поверхности остается практически постоянным [3]. Равновесная концентрация адсорбированного кислорода a^* связана с его концентрацией в газовой фазе изотермой Генри. Принимаем, что поток адсорбтива, проникающий через границу раздела фаз, пропорционален разности концентраций во внешней газовой фазе и в поверхностном слое адсорбента. При адсорбции кислорода массообмен, подчиняющийся закону Ньютона-Фурье, и генерация теплоты происходят на поверхности раздела фаз [4]. Представим уравнение диффузии кислорода в порах сорбента с учетом уменьшения концентрации вещества за счет его сорбции поверхностью в виде

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} D \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right) - \sum_{i=1}^l \beta_i (\gamma_i C - a_i), \quad i = 1, 2, \dots, l; \quad (1)$$

– уравнение кинетики адсорбции с учетом химических реакций

$$\frac{\partial a_i}{\partial \tau} = \beta_i (\gamma_i C - a_i) - k_{i0} a_i a_i^* \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right); \quad (2)$$

– уравнение химической реакции адсорбента

$$\frac{\partial a_i^*}{\partial \tau} = -k_{i0} a_i a_i^* \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right), \quad (3)$$

где C – концентрация кислорода в порах угля в газовой фазе, моль /м³; τ – время, с; r – радиальная координата, м; D – коэффициент внутренней диффузии, м²/с; β_i – коэффициенты адсорбции, с⁻¹; γ_i – константы Генри; a_i – концентрация сорбата (кислорода) в неподвижной фазе, моль /м³; k_{i0} – константа скорости химической реакции, м³/(моль·с); a_i^* – концентрация адсорбированного кислорода, моль/м³; E – энергия активации, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура, К.

Граничные и начальные условия следующие:

$$-\frac{\partial C}{\partial r}\Big|_{r=R_1} + \frac{\beta}{D} (C_1(\tau) - C)\Big|_{r=R_1} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial r}\Big|_{r=0} = 0; \quad (5)$$

$$a_{i0} = \gamma_i C_0, \quad (6)$$

где $C_1(\tau)$ – текущая концентрация кислорода в газовой фазе на границе с зерном сорбента, моль /м³; C_0 – концентрация кислорода в порах угля в газовой фазе, моль /м³, при $\tau = 0$; β – коэффициент массообмена, м/с.

Введем безразмерные параметры и функции

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{r}{R_1}; \quad \text{Fo}_g = \frac{D\tau}{R_1^2}; \quad \text{Bi}_g = \frac{\beta R_1}{D}; \quad \Gamma_i = \frac{k_i a_{i0}^* R_1^2}{D}; \quad \Gamma_g = \frac{k_i R_1^2}{D}; \quad \Pi_i = \frac{\gamma_i C_c}{a_{i0}^*}; \\ k_i &= k_{i0} \eta_{i1} \exp(-\eta_{i1} E_i / R); \quad \text{Ka}_i = \frac{\beta R_1^2}{D}; \quad \bar{a}_i(\rho, \text{Fo}_g) = \frac{a_i(r, \tau)}{a_{i0}^*}; \\ \bar{C} &= \frac{C}{C_c}, \quad \bar{a}_i = \frac{a_i}{\gamma_i C_c}; \quad \bar{C}_1(\text{Fo}) = \frac{C_1(\tau)}{C_c}; \quad L_\rho(\bar{C}) = \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho^2 \frac{\partial \bar{C}}{\partial \rho} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где Fo_g – диффузионный критерий Фурье, 1; Bi_g – диффузионное число Био; C_c – концентрация адсорбата (кислорода) в газовой фазе, моль /м³; η_{i1} , η_{i1} – размерные коэффициенты, К⁻¹.

В безразмерной форме система (1) – (6) имеет вид

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \text{Fo}_g} = L_\rho(\bar{C}) - \sum_{i=1}^l \gamma_i \text{Ka}_i (\bar{C} - \bar{a}_i); \quad (8)$$

$$\frac{\partial \bar{a}_i}{\partial \text{Fo}_g} = \text{Ka}_i (\bar{C} - \bar{a}_i) - \Gamma_i \bar{a}_i a_i^*; \quad (9)$$

$$\frac{\partial a_i^*}{\partial \text{Fo}_g} = -\Pi_i \Gamma_i \bar{a}_i a_i^*; \quad (10)$$

$$-\frac{\partial \bar{C}}{\partial \rho}\Big|_{\rho=1} + \text{Bi}_g (\bar{C}_0(\text{Fo}_g) - \bar{C}(1, \text{Fo}_g)) = 0; \quad (11)$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \rho}\Big|_{\rho=0} = 0, \quad \bar{a}_i|_{\text{Fo}_g=0} = \frac{a_{i0}}{\gamma_i C_c} = \bar{a}_{i0}, \quad (12)$$

$$\bar{C}|_{\text{Fo}_g=0} = \bar{C}_0, \quad \bar{a}_i^*|_{\text{Fo}_g=0} = 1.$$

Ограничимся в данной работе случаем $\Gamma_i = 0$, тогда адекватная математическая модель процесса хемосорбции в безразмерных параметрах будет описана уравнением (8) и следующим выражением

$$\frac{\partial \bar{a}_i}{\partial \text{Fo}_g} = \text{Ka}_i (\bar{C} - \bar{a}_i) \quad (13)$$

при условиях (11) и (12).

Решение уравнений (1) – (6) для случая усреднённых концентраций адсорбата в подвижной и неподвижной фазах по радиусу сорбента $\bar{C}$ в относительных величинах ($\bar{C} = C/C_c$) имеет вид

$$\bar{C}(\text{Fo}) = -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} B_k \mu_k \sum_{n=1}^3 \frac{\exp(p_{kn} \text{Fo}_g)}{\mu_{kn}} \int_0^{\text{Fo}_g} \bar{C}_0(\text{Fo}) \exp(p_{kn} \text{Fo}_g) d\text{Fo}; \quad (14)$$

$$\bar{a}_i(\text{Fo}) = -\text{Ka} \exp(-\text{Ka} \text{Fo}_g) \int_0^{\text{Fo}_g} \bar{C}(\text{Fo}_g) \exp(\text{Ka} \text{Fo}_g) d, \quad (15)$$

$$\text{где } p_{kn} = -\frac{\mu_k^2 + \text{Ka}(1+\gamma)}{2} \pm \sqrt{\frac{[\mu_k^2 + \text{Ka}(1+\gamma)]^2}{4}} - \mu_n^2 \text{Ka}; \quad (16)$$

$$\mu_{kn} = -\frac{1}{2\mu_k} \left[1 + \frac{\gamma \text{Ka}^2}{(p_{kn} + \text{Ka})^2} \right]; \quad (17)$$

$$\text{Ka} = \beta_1 \frac{R_1^2}{D}; \quad (18)$$

B_k – постоянные коэффициенты, определяемые из соотношения

$$B_k = \frac{6Bi_g^2}{\mu_k^2(\mu_k^2 + Bi_g^2 - Bi_g)}; \quad (19)$$

μ_k – корни уравнения $\operatorname{tg} \mu = -\mu/(Bi_g - 1)$ [3].

В решениях (14) и (15) разобьем интегралы и, принимая $C_0(Fo) = 1$, после интегрирования получим

$$\bar{C} = \frac{C}{C_c} = 1 - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} B_k \mu_k \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(p_{kn} Fo_g)}{\mu_{kn} p_{kn}}; \quad (20)$$

$$\bar{a} = \frac{a}{\gamma C_c} = 1 - \exp(-Ka Fo_g) - \frac{1}{2} \sum_k B_k \mu_k \sum_n \frac{Ka [\exp(p_{kn} Fo_g) - \exp(-Ka Fo_g)]}{\mu_{kn} p_{kn} (Ka + p_{kn})}. \quad (21)$$

Общее количество кислорода, диффундировавшего в поры сорбента в любой момент времени, можно определить из выражения

$$N = \frac{\varepsilon}{\rho} C_c (\bar{C} + \gamma \bar{a} + \gamma), \quad (22)$$

где ε – пористость сорбента; ρ – плотность сорбента, кг/м³.

Анализируя приведенные выше выражения, рассмотрим параметры, определяющие адсорбцию кислорода углем. Кинетика данного процесса зависит от концентрации кислорода в газовой фазе C_c , коэффициента диффузии кислорода внутрь пор угля D , константы фазового равновесия Генри γ и коэффициентов адсорбции кислорода β_1 и массообмена β .

Концентрация кислорода в газовой фазе скопления частиц угля, подверженных самовозгоранию, зависит от метанообильности пласта и вмещающих его пород, наличия, расположения и газоносности спутников, отхода лавы от места скопления в выработанном пространстве угля и прочих трудно учитываемых факторов. Исследования, проведенные автором настоящей статьи и заключающиеся в отборе и анализе проб шахтного воздуха из 9-ой восточной лавы шахты № 1-1 бис и участка № 66 пласта Пугачевка-Запад шахты им. Артема, показали, что концентрация метана в выработанном пространстве может достигать 80 – 90 %. Соответственно, концентрация кислорода в утечках воздуха снижается до 1 – 2 моль/м³, поэтому было установлено выражение, позволяющее рассчитывать концентрацию C_c в зависимости от скорости подвигания очистного забоя и времени протекания процесса, в виде

$$C_c = C_n \exp(-1,34 \cdot 10^{-2} \varphi \tau), \quad (23)$$

где C_n – концентрация кислорода в поступающем шахтном воздухе, моль/м³; φ – скорость подавления линии очистного забоя, м/сут; τ – время, сут.

На основании исследований процесса поглощения кислорода углями, представленных в работе [4], установлено следующее выражение для вычисления коэффициента диффузии

$$D = 3,985 \cdot 10^{-8} C_c^{0,49}. \quad (24)$$

Используя приведённые выше зависимости, рассчитаем значения $\bar{C}$, $\bar{a}$ и общее количество кислорода N , приняв следующие исходные данные: $\varphi = 2$ м/сут, $C_n = 9,3$ моль/м³, $R_1 = 0,005$ м, $\varepsilon = 0,5$, $\gamma = 10$, $\beta_1 = 7,5 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹, $\beta = 2,5 \cdot 10^{-6}$ м/с. Предположим, что для рассматриваемого радиуса частицы угля адсорбция кислорода происходит в течение периода времени, не превышающего 500 с.

Динамика относительной концентрации кислорода в подвижной и неподвижной фазе сорбента представлена на рис. 1 и соответствует физической модели рассматриваемого процесса адсорбции в двухфазных средах.

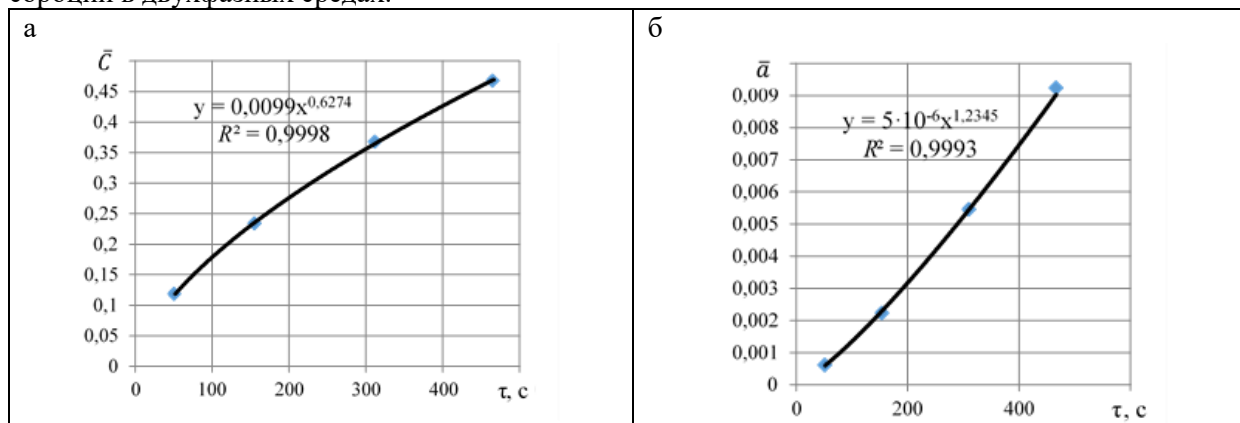


Рис. 1. Зависимость относительной концентрации кислорода в подвижной (а) и неподвижной (б) фазе сорбента от времени протекания адсорбции

Изменение общего количество кислорода, диффундировавшего в поры угля, в период наступления сорбционного равновесия представлено на рис. 2 и описано линейной зависимостью при данных условиях моделирования процесса адсорбции.

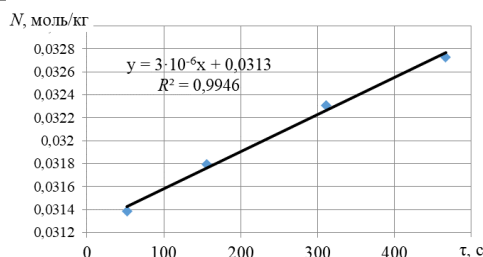


Рис. 2. Динамика общего количество кислорода, диффундировавшего в поры угля

Как отмечалось выше, концентрация кислорода в шахтном воздухе не постоянна, поэтому, используя выражение (20), установим влияние C_n на изменение концентрации адсорбтива в газовой фазе зерна (рис. 3).

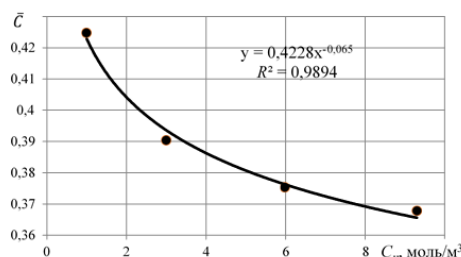


Рис. 3. Зависимость соотношения концентраций кислорода в газовой фазе зерна сорбента от его концентрации в шахтном воздухе

Анализ полученной зависимости показывает неравномерное изменение концентрации кислорода в подвижной фазе сорбента, которое связано с диаметром зерна, коэффициентом адсорбции и массообмена и требует дополнительного изучения.

Вывод. В результате математического моделирования процесса адсорбции кислорода твердой поверхностью угля установлены аналитические зависимости концентрации адсорбтива в подвижной и неподвижной фазе сорбента, которые могут быть использованы для исследования механизма гетерогенного окисления и самовозгорания твердого топлива.

Список литературы

1. Пашковский П.С., Греков С.П., Зинченко И.Н. Актуальные вопросы борьбы с самовозгоранием угля: сб. науч. тр. – Донецк: ЧП «Арпи», 2012. – 656 с.
2. Греков С.П., Всякий А.А. Коэффициенты диффузии метана в углях разных степеней метаморфизма // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Д 2020. – № 3(57). – С. 84-91.
3. Оренбах М.С. Реакционная поверхность при гетерогенном горении; под ред. чл.-кор. АН СССР М. Г. Слинько. – Новосибирск: Наука, 1973. – 200 с.
4. Неизотермическая адсорбция вещества сферическим микропористым зерном, сопровождаемая химическими реакциями второго порядка / С.П. Греков [и др.] // Теоретические основы химической технологии. – 1998. – Т. 32. – № 2. – С. 122-125.

УДК 622.271.333

НОВЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗУ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

¹Караблин М.М., ²д.т.н. Простов С.М.

1 – ОАО «Кузбассгипрошахт», Россия, г. Кемерово

2 – Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия

Аннотация. Достоверность геомеханического прогноза зависит от детальности используемых баз данных о строении массива горных пород. Для повышения точности прогноза устойчивости прибортовых

массивов целесообразно по результатам обобщения баз данных геологического изучения, гидрогеологического мониторинга, геофизических исследований и маркшейдерских съемок выполнять построение объемных геолого-геофизических моделей с последующим поиском наиболее опасного сечения по координате продольного профиля.

Ключевые слова: прибортовой массив, подземные воды, устойчивость откосов, электротомография, объемная геолого-геофизическая модель, коэффициент устойчивости.

Разработка месторождений полезных ископаемых связана с риском развития неблагоприятных геомеханических процессов. В условиях современной экономики, когда растет добыча полезных ископаемых, обеспечение безопасности жизни людей и непрерывности технологического цикла является одним из критериев рентабельности горнодобывающих предприятий. Разрабатываемые противооползневые мероприятия и произошедшие оползни при ведении открытых горных работ свидетельствуют об актуальности решения данной проблемы [1-13]. Согласно классификации ВНИМИ, на устойчивость бортов разрезов отрицательно влияют четыре группы факторов: инженерно-геологические; гидрогеологические; физико-географические; горнотехнические (рис. 1) [14].

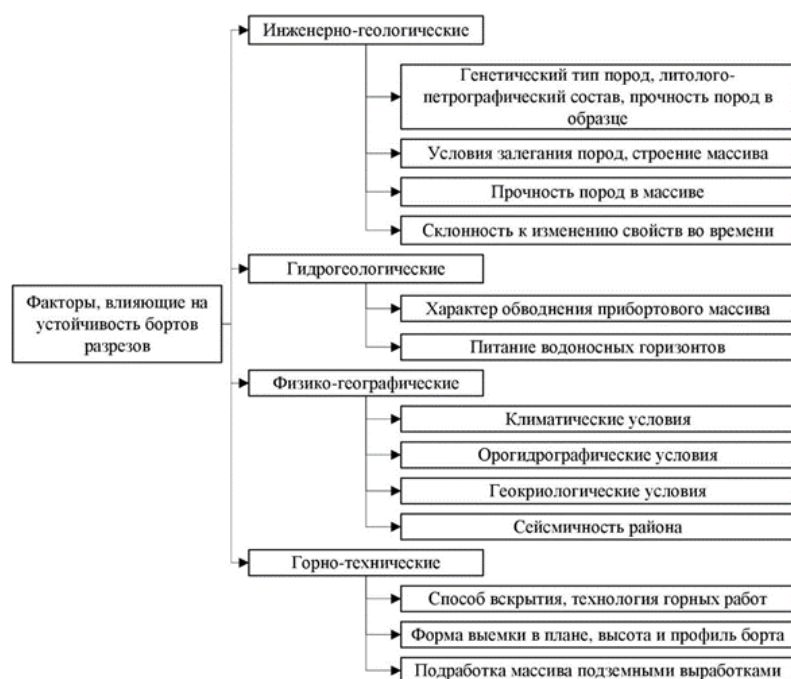


Рис. 1. Классификация групп факторов, отрицательно влияющих на устойчивость бортов разрезов

В большинстве случаев объектом локализации деформаций в геологическом разрезе являются песчаные и глинистые горные породы, показатели сопротивления сдвигу которых (угол внутреннего трения φ и сцепление C) изменяются в пределах, представленных в табл. 1 и 2 соответственно [15].

Таблица 1

Показатели сопротивления сдвигу песчаных пород

Вид песчаных пород	Обозначение	Значения при коэффициенте пористости e			
		0,45	0,55	0,65	0,75
Гравелистые и крупные	C , МПа	0,002	0,001	-	-
	φ , град	43	40	38	-
Средней крупности	C , МПа	0,003	0,002	0,001	-
	φ , град	40	38	35	-
Пылеватые	C , МПа	0,008	0,006	0,004	0,002
	φ , град	36	34	30	26

В последнее время на угольных разрезах Кузбасса и других регионов зафиксирован ряд оползневых явлений, которые нанесли не только экономический и экологический ущерб предприятиям и природной среде, но и являлись причиной смертельных травм.

Таблица 2

Показатели сопротивления сдвигу глинистых пород						
Состояние пород (консистенция)	Глины		Суглинки		Супеси	
	φ, град	C, МПа	φ, град	C, МПа	φ, град	C, МПа
Твердая	22	0,100	25	0,060	28	0,020
Полутвердая	20	0,060	23	0,040	26	0,015
Тугопластичная	18	0,040	21	0,025	24	0,010
Мягкопластичная	14	0,020	17	0,015	20	0,005
Текучепластичная	8	0,010	13	0,010	18	0,002
Текучая	6	0,005	10	0,005	14	0,000

В табл. 3 и на рис. 2 представлены выборочные данные по произошедшим оползням [16-21]. Формирование оползней в плане было приурочено к зонам, имеющим аномальные характеристики влажности. В бортах при естественной влажности глинистые породы способны сохранять устойчивость в течение длительных временных промежутков, однако при увлажнении проявляют набухаемость и пластичность. Песчаные породы подвержены на поверхности откосов воздушной и водной эрозии, а при вскрытии на глубине – механической суффозии. При формировании отвалов эти породы в водонасыщенном состоянии снижают несущую способность: глинистые – за счет избыточного порового давления при консолидации; песчаные приобретают плавунные свойства.

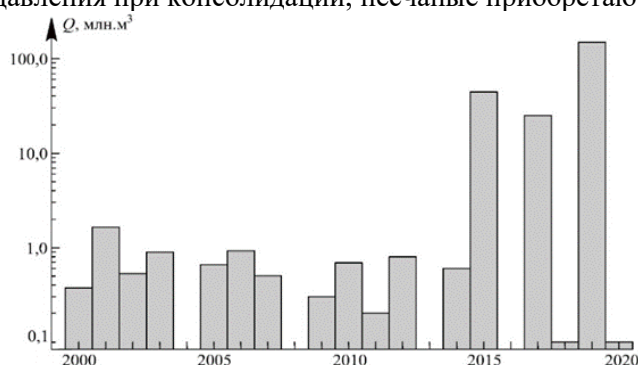


Рис. 2. График формирования оползневых процессов по годам

Таблица 3

Характеристика оползней бортов горных выработок и отвалов на горных предприятиях

Объект (дата)	Объем оползневых масс, тыс. м³	Последствия оползня
Внешний отвал участка №4 Латышевского поля ОАО «Разрез Кедровский» (10-17.08.2001)	700	Повреждены ЛЭП, выведены из строя экскаваторы ЭКГ – 4 и ЭКГ – 8и, законсервированы вскрытые запасы угля объемом 110 тыс. т.
Рабочий борт разреза «Караканский-Южный» филиала ООО «КеНоТЭК» (02.2004-09.2005)	85	Остановлены добычные работы на 7 месяцев
Внешний отвал филиала ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» «Бачатский угольный разрез» (14.06.2005)	450	Повреждены несколько опор ЛЭП, пульпопровод гидроотвала «Бековский», полотна технологических автомобильной и железной дорог. Ущерб составил 7 млн. руб.
Внешний отвал № 1 разреза «Заречный» (01.04.2015)	27500	Разрушены технологическая автодорога, железнодорожный путь, ЛЭП, перекрыто русло р. Кыргай. Общий ущерб – в 8 млрд. рублей
Борт в районе профильных линий 230-270 разреза «Черниговский» (09.12.2015)	500	Погибло 3 человека
Внешний отвал №1 участка «Березовский-Восточный» (31.10.2017)	24600	Разрушен низовой откос дамбы на р. Матюшинская, уничтожен пруд

Объект (дата)	Объем оползневых масс, тыс. м ³	Последствия оползня
Северо-западный борт разреза «Ангренский» - Оползень «Центральный» (апрель 1985 – 2018)	120000	Разрушение автодороги федерального значения А-373 «Ташкент – Коканд», увеличен объем вскрышных работ
Внешний отвал разреза «Кийзасский» (июнь 2019)	2800	Повреждены девять опор линий электропередач и перекрыто русло р. Большой Кийзас протяженностью 800 м
Северный борт разреза «Ангренский» - оползень «Северный» (май 1999 – 08.07.2019)	25000	Разрушен карьер по добыче каолина, увеличен объем вскрышных работ
Северо-западный борт разреза «Виноградовский» (22.12.2020)	60	Погиб 1 человек

В связи с такими особенностями строения прибортовых массивов необходимо совершенствование методики прогноза устойчивости, учитывающей изменчивость физико-механических свойств горных пород. Решение данной задачи возможно на основе подхода, включающего комплексирование баз данных геологического, гидрогеологического, геофизического, маркшейдерского инструментального мониторинга. Полученные данные составляют объемную геолого-геофизическую модель. Аппробация предложенного подхода выполнена в условиях Кедровского угольного разреза. На основе обобщения результатов геологической разведки, геофизических исследований методом электротомографии, замеров уровней воды в гидронаблюдательных скважинах, совмещения фактического положения открытых и подземных горных выработок построена объемная геолого-геофизическая модель участка северного борта (рис. 3).

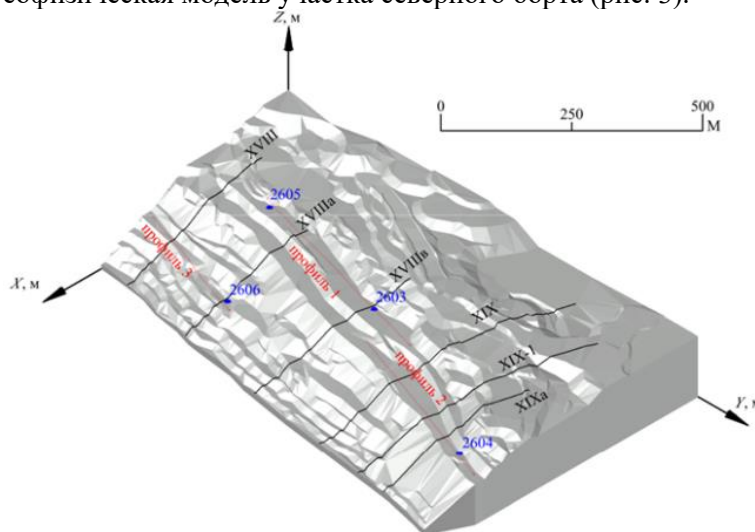


Рис. 3. Объемная геолого-геофизическая модель участка северного борта

Исследуемый прибортовой массив расположен в пределах профильных линий 400-510 с высотными отметками от +120 до +195 м. На рассматриваемом участке в верхней части геологического разреза залегают преимущественно песчаники, подстилаемые алевролитами, которые являются вмещающими для угольного пласта Владимировский. Отметки кровли пласта Владимировский изменяются от +140 м до +67 м, мощность пласта составляет 3-4 м. Также на рассматриваемом участке выявлен пласт Викторковский. Он характеризуется малой мощностью (0,4-0,6 м) и частым выклиниванием. В пределах разведочных линий XVIII (профиль 410) и XX (профиль 530) обнаружены разрывные нарушения I и II. Физико-механические свойства вмещающих горных пород, угля и естественных поверхностей ослабления с учетом структурного ослабления после подработки подземными горными работами представлены в табл. 4.

Гидрогеологические исследования на месторождении показали, что степень обводненности коренных пород хаотично неравномерна, как в плане, так и в разрезе и зависит от тектонической нарушенности отложений, литологического состава и степени их трещиноватости, а также от геоморфологического их положения.

Таблица 4

Физико-механические свойства горных пород и естественных поверхностей ослабления

Наименование	ρ , кН/м ³	C , кПа	ϕ , град
Четвертичные отложения	20,1	54,0	16
Выветрелые коренные породы	22,8	153,0	33
Невыветрелые коренные породы	24,6	274,7	33
Зона тектонически нарушений	20,9	47,1	15
Уголь	13,2	107,9	28
Намывные породы	19,1	24,5	12
Породы сухих отвалов	18,1	14,7	32
Зона обрушений	19,6	0,0	31
Зона трещин	20,6	15,3	32
<i>Естественные поверхности ослабления в виде контактов:</i>			
Песчаники с алевролитом	–	35,3	20
Четвертичных и коренных пород	–	20,6	14
Угля с вмещающими породами	–	25,5	14

ρ – объемный вес; C – сцепление; ϕ – угол внутреннего трения.

Подземные воды относятся к типу весеннего и осеннего питания с явным преобладанием первого. Подъем уровней наблюдается в период интенсивного таяния снега с апреля по июнь. Форма пьезометрической поверхности подземных вод в ненарушенных условиях в общих чертах повторяла гипсометрическую поверхность рельефа, но в настоящее время в результате работы разреза здесь образовалась воронка депрессии. Результаты замеров фактических уровней воды в гидронаблюдательных скважинах представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты замеров фактических уровней воды в гидронаблюдательных скважинах

Абсолютная отметка устья скважины Z , м	Глубина скважины $H_{\text{скв}}$, м	Глубина до уровня воды $H_{\text{в}}$, м	Абсолютная отметка уровня воды $Z_{\text{в}}$, м	Дата замера
Скважина 2603				
186,0	80	56,5	129,5	03.2017
		74,2	111,8	04–05.2017
		вода отсут.	вода отсут.	06.2017
Скважина 2604				
165,0	65	10,7	154,3	04.2017
		30,0	135,0	05.2016
		вода отсут.	вода отсут.	06.2017
Скважина 2605				
195,0	74	53,4	141,6	04.2017
		68,7	126,3	05.2016
		вода отсут.	вода отсут.	06.2017
Скважина 2606				
121,1	67	19,5	101,6	04.2017

Для детализации строения прибортового массива на межскважинных интервалах выполнены геофизические исследования методом электротомографии с использованием аппаратуры «СКА-ЛА-64» по трем профильным линиям общей длиной 1345 м (рис. 4).

По аномалиям удельного электросопротивления установлено расположение разуплотненных и водонасыщенных зон.

В соответствии с методикой, изложенной в «Правилах обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах» [14] выполнена геомеханическая оценка прибортового массива по коэффициенту устойчивости для геологических разрезов XIXа, XIX-1, XIX, XVIIIв, XVIIIа, XVIII. Результаты представлены на рис. 5 и в табл. 6.

По результатам геомеханической оценки прибортового массива установлено, что прибортовой массив на разведочных линиях XIXа, XIX-1, XIX, XVIII находится в устойчивом состоянии, на разведочных линиях XVIIIв и XVIIIа – в деформируемом.

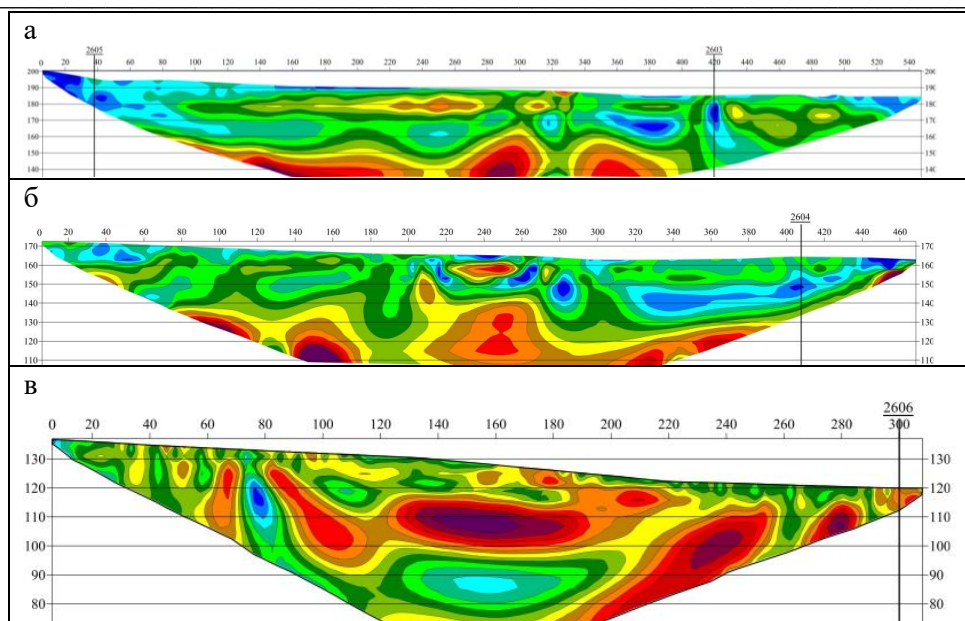
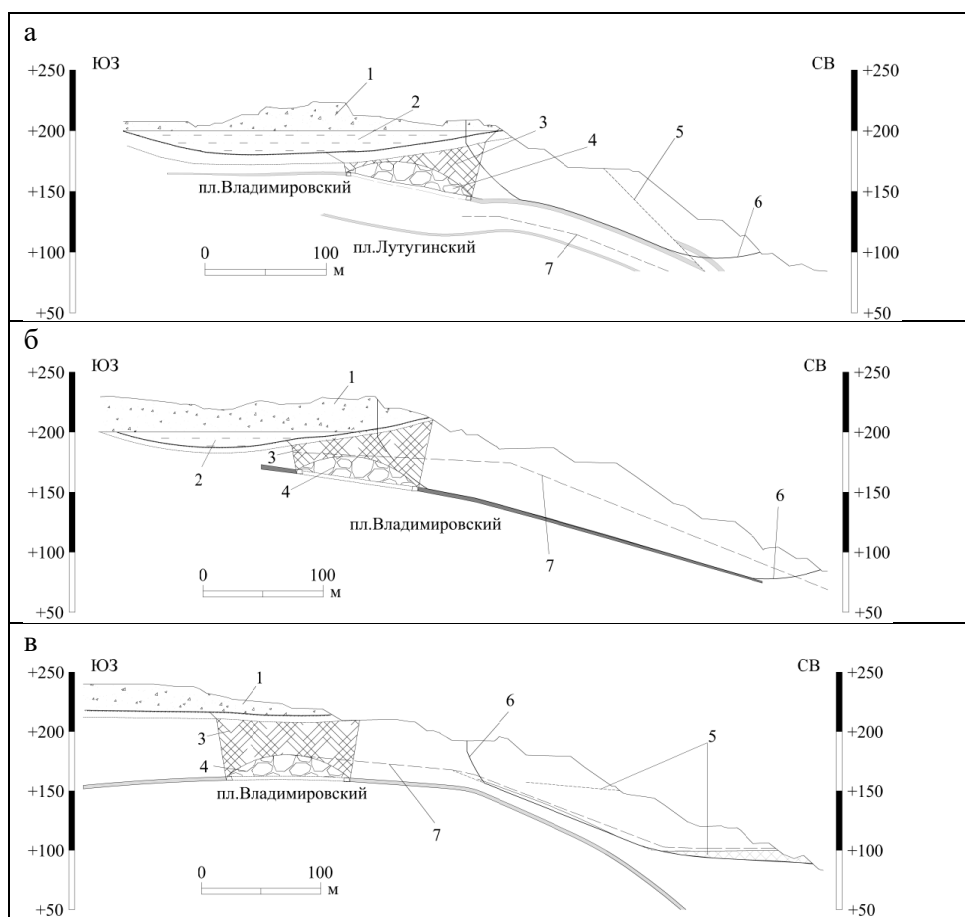


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы по профилям 1 (а); 2 (б); 3 (в)



1 – породы отвала «сухой вскрыши»; 2 – намывные отложения; 3 – зона трещин;
 4 – зона обрушений; 5 – разрывное нарушение; 6 – наиболее напряженная поверхность
 скольжения; 7 – уровень подземных вод

Рис. 5. Геологические разрезы XIX (а), XVIIIв (б), XVIIIа (в)

В следствие пространственно-временных изменений свойств и состояния горных пород, а также различия положений и направлений расчетных сечений в пределах расчетной зоны диапазон изменения значений коэффициента устойчивости n составил 1,06-2,39.

Сочетание природных и техногенных факторов, включающих гидрогеологические условия территории, сезонный климатический режим, тектоническую нарушенность месторождения и

накладываемые на нее зоны сдвижения, связанные с подработкой, приводят к формированию весьма сложной анизотропной геологической структуры прибортового массива, включающей локальные разуплотненные и водонасыщенные зоны, что существенно снижает устойчивость борта.

Таблица 6

Результаты геомеханической оценки прибортового массива

Геологический разрез	z_B , м	z_H , м	h , м	α , град	k_1	k_2	n_1	n_2
XIXa	163,2	84,0	79,2	35	0,4	0,0	1,90	2,39
XIX-1	206,5	88,5	118,0	25	0,5	0,1	1,59	1,88
XIX	209,2	100,1	109,1	25	0,0	0,0	1,46	1,46
XVIIIb	220,0	85,4	134,6	21	0,5	0,1	1,08	1,25
XVIIIa	195,8	89,0	106,8	22	0,1	0,0	1,06	1,10
XVIII	196,1	110,0	86,1	25	0,2	0,1	1,50	1,52

z_B/z_H – отметки верхней и нижней бровок; h – высота прибортового массива; α – результирующий угол; k_1/k_2 – коэффициенты обводнения при максимальном и минимальном уровнях обводнения; n_1/n_2 – коэффициенты устойчивости при обводнении k_1/k_2 соответственно.

Выполненные исследования формируют идею повышения точности прогноза устойчивости откосов горнотехнических сооружений за счет поиска наиболее опасного сечения в плане путем исключения влияния человеческого фактора на выбор положения и направления расчетного сечения. Это возможно в компьютерной реализации с помощью функции поиска оползнеопасных зон, суть которой заключается в анализе множества расчетных сечений, построенных через заданные величины линейного и углового шагов. Реализация данной процедуры позволит принципиально повысить точность прогноза устойчивости откосов горнотехнических сооружений.

Список литературы

1. Бурцев С.В., Рыбак Л.В. Радиолокационные системы контроля устойчивости бортов на разрезе «Черниговец» // Известия Тульского государственного университета. – 2018. – №1. – С. 203 – 210.
2. Макеев М. А. Инновации на службе промышленной безопасности: Опыт использования передовых радарных систем контроля устойчивости бортов карьеров Reutech на предприятиях РФ // Горная промышленность. – 2017. – № 2. – С. 48 – 50.
3. Fleurisson, J.A. Slope design and implementation in open-pit mines: geological and geomechanical approach // Procedia Engineering – 2012. – №46. – P. 27 – 38.
4. Анализ смертельного травматизма при добыче угля открытыми горными работами / Д.Е. Скударнов [и др.] // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2018. – №1. – С. 33 – 39.
5. Верхотуров А.Г., Размахина И.Б. Причины деформирования бортов угольных разрезов Забайкалья // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – №9. – С. 211 – 221.
6. Исследование устойчивости уступов верхних горизонтов стационарного борта разреза «Богатырь» / О.В. Старостина [и др.]. // Уголь. – 2019. – №1. – С. 27 – 32.
7. Сашурин А.Д., Панжин А.А., Мельник В.В. Обеспечение устойчивости бортов карьеров в целях безопасной эксплуатации транспортных берм // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – №7. – С. 28 – 33.
8. Сашурин А.Д., Бермухамбетов В.А., Панжин А.А. Воздействие современных геодинамических движений на устойчивость бортов карьеров // Проблемы недропользования. – 2017. – № 3. – С. 38-43.
9. Якубов С.И., Сидорова И.П., Раимжанов Б.Р. Изучение оползневых явлений – один из проблемных вопросов при добыче угля на разрезе «Ангренский» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – №6. – С. 370 – 375.
10. Пенек А.И., Красников С.Я. Атчинский оползень – уникальный опыт борьбы с опасным явлением // Горный вестник Узбекистана. – 1998. – №1. – С. 18 – 21.
11. Хурсанов Х.П., Колпаков В.Н., Красников С.Я. Оползневые явления на Ангренском месторождении бурового угля // Горный вестник Узбекистана. – 2002. – №2. – С. 19-26.
12. Three-dimensional kinematic analysis of Bingham Canyon mine pit wall sides / Alfred Septian [et al.] // Procedia Engineering. – 2017. – № 175. – P. 86-93.
13. Jacobchik J. Cala M., Stopkowicz A. What where the reasons for the rapid landslide occurrence in «Piasieczno» open-pit? – Analysis of the landslide process // Studia Geotechnica et Mechanica. – 2015. – No.1 – P. 25 – 35.
14. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. – СПб., 1998. – 208 с.
15. Грунтоведение / В.Т. Трофимов [и др.]; под. ред. В.Т. Трофимова. – 6-е изд., переработ. и доп. – М.: Издательство МГУ, 2005. – 1024 с.

16. Бахаева С.П., Простов С.М., Смирнов Н.А. Прогноз устойчивости откосных сооружений угольных разрезов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2015. – 386 с.

17. Нефедов Б.Н., Зеньков И.В. Выявление причин деформации старовозрастных породных отвалов на угольных разрезах // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2016. – № 3. – С. 99–101.

18. Кутепов Ю.И., Васильева А.Д. Инженерно-геологические условия внешнего отвалообразования на разрезах Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 10. – С. 122–131.

19. Якубов С.И., Сидорова И.П., Раимжанов Б.Р. Изучение оползневых явлений – один из проблемных вопросов при добыче угля на разрезе «Ангренский» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 6. – С. 370–375.

20. Хурсанов Х.П., Колпаков В.Н., Красников С.Я. Оползневые явления на Ангренском месторождении бурового угля // Горный вестник Узбекистана. – 2002. – № 2. – С. 19–26.

21. Караблин М.М., Простов С.М., Лесин Ю.В. Оползневые процессы в бортах при ведении горных работ на каменноугольном разрезе «Ангренский» // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – № 8. – С. 47–57.

УДК 622.232.8:622.031.4-16:622.012.2

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ОТРАБОТКИ ВЕСЬМА МОЩНЫХ ПОЛОГИХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ НА ШАХТАХ КУЗБАССА

¹Разумов Е.А., ¹Венгер В.Г., ²к.т.н. Пудов Е.Ю., ¹д.т.н. Калинин С.И.

1 – Филиал СФ АО «ВНИМИ», г. Прокопьевск, Россия

2 – Филиал КузГТУ, г. Прокопьевск, Россия

Аннотация. Представлен анализ опыта отработки мощных пологих угольных пластов мощностью до 12м с углами падения до 20–25° отечественными и зарубежными механизированными комплексами на угольных шахтах Кузбасса. Произведена оценка результатов применения для отработки мощных пологих пластов системы наклонных слоёв. По результатам исследований и обобщения опыта отработки мощных пологих пластов обоснована возможность отработки весьма мощных пологих пластов механизированными комплексами.

Ключевые слова: мощные пласты, выпуск, подкровельная пачка, межслоевая пачка, наклонные слои, механизированный комплекс.

Мощные пологие пласты в Кузбассе сосредоточены, в основном, в Ольжерасском, Томском, Мрасском и Кондомском месторождениях Кузбасса. Мощность пластов превышает 5м и достигает на отдельных участках до 20м.

Обобщён опыт отработки мощных пологих пластов на шахте им. В.И. Ленина, шахтах «Распадская-Коксовая», «Сибиргинская», «Алардинская», «Ольжерасская». Для реализации технологии с выпуском подкровельной или межслоевой пачки угля наиболее предпочтительными являются следующие варианты:

- вариант схемы с выпуском угля подкровельной пачки без предварительной отработки верхнего слоя (рис. 1 а);
- вариант с подработкой верхней пачки угля и магазинированием её с последующим выпуском при отработке подсечного слоя (рис. 1 б);
- вариант выпуска межслоевой пачки угля с надработкой пачки верхним слоем, (рис. 1 в).



Рис. 1. Схемы выпуска угля из подкровельных и межслоевых пачек угля при отработке мощных пологих пластов: а – без предварительной отработки верхнего слоя; б – с подработкой верхнего слоя и магазинированием угля; в – схема выпуска угля из межслоевой пачки

Раскройка пластов на слои производится таким образом, чтобы между слоями оставалась защитная угольная пачка мощностью 0,6–0,65 м, нижележащие слои отрабатываются под защитой угольной пачки (или искусственным перекрытием).

Первым отрабатывается верхний слой, затем, второй, третий.

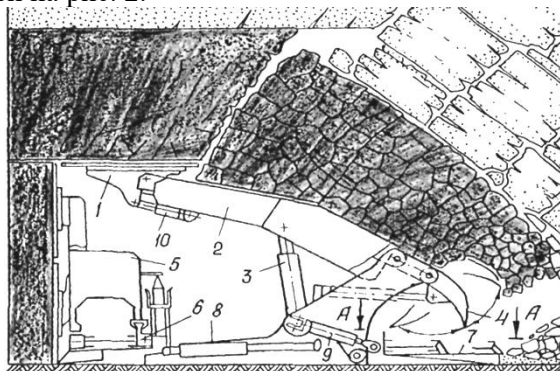
Слои отрабатываются по 3-м схемам:

- по схеме «слой-пласт», когда в пределах выемочного поля отрабатывается полностью верхний слой, затем отрабатывается 2-ой слой и т.д.;
- по схеме одновременной отработки слоёв, когда нижний слой отрабатывается следом за верхним слоем с отставанием 20–30 м;
- по комбинированной схеме, когда верхний слой отрабатывается в 2х–3х выемочных столбах, а затем в этих столбах отрабатывается нижний слой.

Преимущественное применение на шахтах получает система отработки пластов наклонными слоями длинными механизированными забоями. При этом отработка слоёв производится механизированными комплексами типа 2УКП-5, КМ-142, Глиник, Фазос, комплексы с крепями DBT.

Выполненный анализ отработки мощных пологих пластов механизированными комплексами, показывает, что значительный опыт применения на шахтах получила технология отработки мощных пологих пластов с выпуском межслоевой пачки угля, данная технология длительное время применялась на шахте им. В.И. Ленина и на шахте «Распадская-Коксовая». При этой технологии первым отрабатывается верхний слой (монтажный), затем отрабатывается подсечной слой с выпуском межслоевой пачки угля.

Длительный опыт отработки мощных пологих пластов механизированными комплексами КМ-81, КМ-130, ОКП-70, КМ-142, КМ-120 [1–3] показал, что выпуск угля межслоевой пачки целесообразно производить на завальный конвейер. Это было подтверждено испытаниями экспериментального комплекса с выпуском подкровельной пачки на завальный конвейер, изготовленного на базе комплекса ОКП-70. На шахте им. Кузнецова в Карагандинском бассейне был испытан комплекс ОКПВ-70. Испытания показали целесообразность создания механизированных комплексов для отработки пластов с выпуском подкровельных и межслоевых пачек угля в задней части ограждающе-поддерживающей крепи на завальный конвейер. Было установлено, что выпуск угля в задней части секций крепи у почвы пласта с шибберным затвором, является управляемым и отделённым от зоны работы выемочного комбайна. Саморазрушение и обрушение угля подкровельной пачки мощностью до 4,5–5 м осуществляется без специальных мер по разупрочнению. Общий вид комплекса ОКПВ-70 приведён на рис. 2.



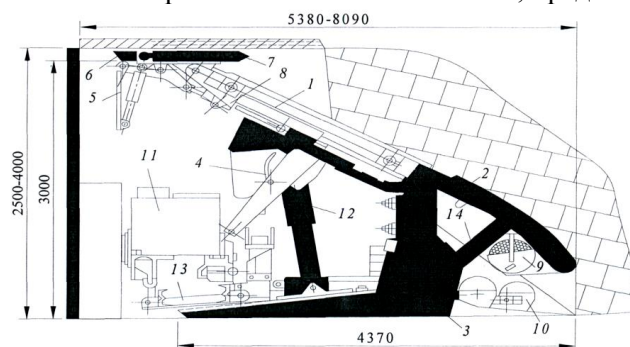
- 1 – активный козырёк; 2 – ограждающая часть секции; 3 – гидростойка; 4 – щит выпуска угля из подкровельной пачки; 5 – комбайн; 6 – забойный конвейер; 7 – завальный конвейер; 8 – гидродомкраты передвижки секций и конвейера; 9 – домкрат передвижки завального конвейера; 10 – гидродомкрат козырька

Рис. 2. Общий вид комплекса ОКПВ-70

Опыт подтвердил целесообразность разработки и совершенствования механизированных комплексов для отработки мощных пологих пластов с выпуском угля из межслоевых и подкровельных пачек.

С целью совершенствования технологии отработки мощных пологих пластов существуют предложения о создании специального механизированного комплекса, с помощью которого можно отрабатывать мощные пологие пласты в сложных горно-геологических условиях, позволяющих производить комбайновую выемку угля, выпуск подкровельной или межслоевой пачки угля, воз-

ведение защитных гибких перекрытий в зонах неустойчивых пород и геологических нарушений. Экспериментальный комплекс с обеспечением указанных требований был разработан и испытан в шахтных условиях [4] - это механизированный комплекс КНК-М, представленный на рис. 3.

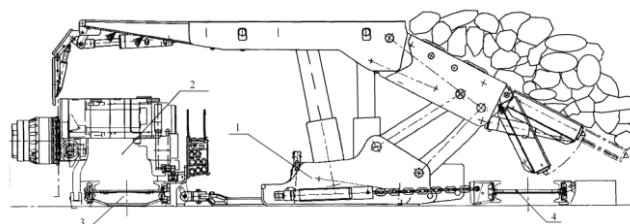


- 1 – верхняк секции крепи; 2 – нижнее ограждение; 3 – основание секции крепи; 4 – лоток с гидродомкратом для выпуска угля; 5 – щит удержания груди забоя; 6 – выдвижной козырёк; 7 – верхняя разрушающая пика; 8 – нижняя разрушающая пика; 9 – корзина для рулонов с металлической сеткой; 10 – кассеты для металлических полос; 11 – комбайн; 12 – гидростойка крепи; 13 – забойный конвейер; 14 – опора заднего ограждения

Рис. 3. Общий вид механизированного комплекса КНКМ

Испытания комплекса КНК-М проводились в условиях шахты им. В.И. Ленина при отработке первого и второго слоя пласта IV-V. Шахтные испытания комплекса подтвердили целесообразность создания комплекса [3].

Для отработки мощных пологих пластов в условиях шахты «Ольжерасская-Новая» был применён механизированный комплекс ZF производства КНР (рис. 4).



- 1 – секция крепи; 2 – комбайн; 3 – забойный конвейер; 4 – завальный конвейер
- Рис. 4. Взаимное положение секции крепи, забойного и завального конвейеров в период выемки угля комбайном в подсечном слое

С использованием комплекса в условиях шахты «Ольжерасская-Новая» отрабатывается мощный пласт 21. Отработаны столбы 21-1-5, 21-1-3, 21-1-7. В лаве 21-1-9 работы были остановлены.

Опыт отработки пласта 21 показал, что пласты мощностью до 10-12м можно отрабатывать комплексами ZF-8000-22-35 или ZF-8600-18-36.

С применением опыта разработки пластов мощностью до 12м комплексом ZF были разработаны специальные технические условия (СТУ) на отработку комплексами данного типа пологих пластов мощностью более 12м в условиях шахты «Сибиргинская».

Мощность пласта III составляет 7,3-10м. Пласт III рекомендуется отрабатывать технологией с выпуском подкровельной пачки комплексом ZF-8000-22-35 производства КНР.

Пласт IV-V-VI образован слиянием пластов IV-V и VI (рис. 5), суммарная средняя мощность пласта 18м, максимальная - 20м, на отдельных участках - 25м. Угол падения пласта 6-8°, залегает ниже пласта III в 46-54м. Глубина залегания пласта 380-400м.

Для отработки пласта IV-V-VI предлагается технологическая схема с 2-х кратным выпуском угля межслоевой пачки с разделением пласта на три слоя, (рис. 6). Верхний слой отрабатывается у кровли пласта мощностью 3,5м, средний слой мощностью 10м разделяется на межслоевую пачку мощностью 7м и подсечной слой мощностью 7м. Нижний слой мощностью 10,5м так же, как и средний слой разделяется на подсечной слой мощностью 3,5м и межслоевую пачку угля мощностью 7м (рис. 6).

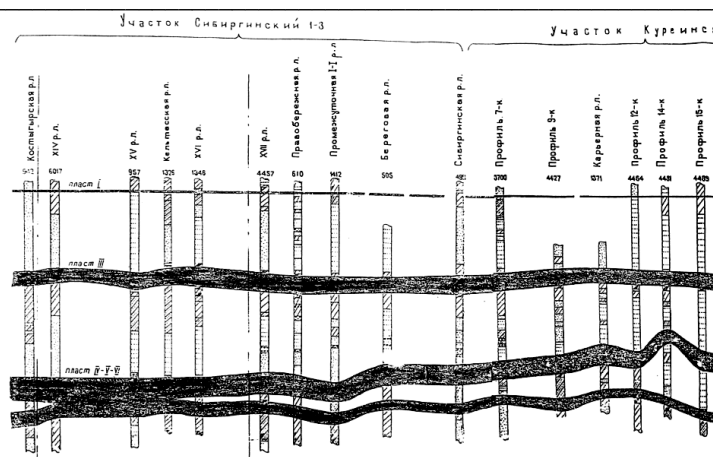


Рис. 5. Стратиграфическая схема расположения пластов на участке "Сибиргинский 1-3", (М 1:1480)

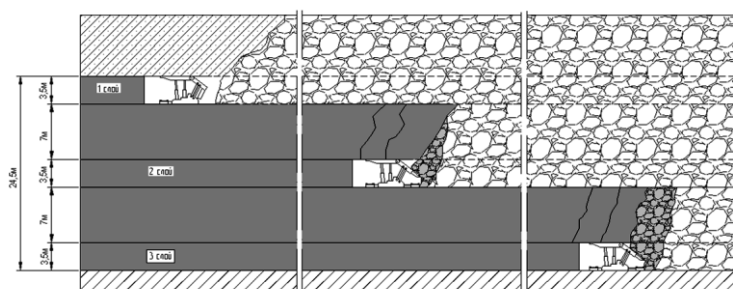


Рис. 6. Технология отработки пласта IV-V-VI в три слоя с выпуском межслоевой пачки угля во 2-ом и 3-ем слоях

Принципиальная технологическая схема подготовки и отработки пласта IV-V-VI приведена на рис. 7.

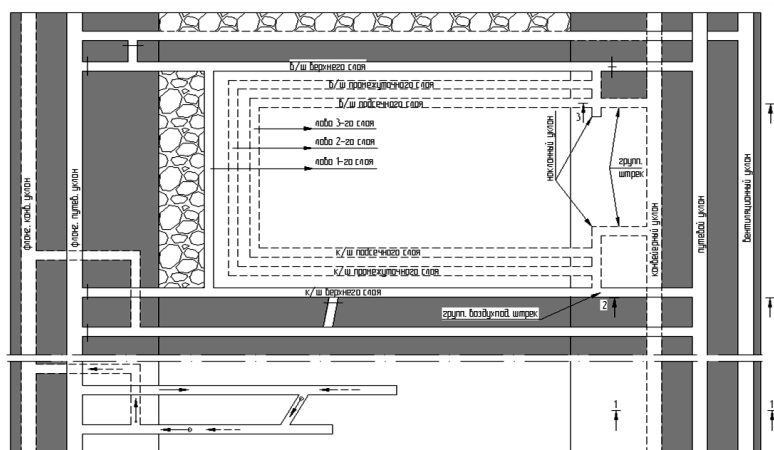


Рис. 7. Принципиальная технологическая схема подготовки и отработки пласта IV-V-VI в три слоя с выпуском межслоевой пачки угля

Выводы. Анализ представленных материалов позволяет сделать следующие выводы:

Технология отработки мощных пологих пластов с использованием гибких перекрытий имела широкое применение только при использовании комплексов типа КТУ с предварительной отработкой монтажного слоя.

Система разработки мощных пологих пластов с выпуском подкровельной пачки угля и использованием механизированных комплексов ZF производства КНР является перспективной для отработки пластов мощностью до 12м.

Для отработки пластов мощностью 20-25м предлагается экспериментальная технология с 2х кратным выпуском межслоевой пачки угля с разделением пласта на 3 слоя и использованием комплексов ZF-8000-22-35 производства Китайской народной республики.

Список литературы

1. Выбор параметров технологии отработки мощных пологих пластов с выпуском межслоевых и подкровельных пачек угля / И.А. Шундулиди [и др.]. – Кемерово, Кемеровское отделение Академии горных наук, 1999. – 258с.
2. Калинин С.И., Колмогоров В.М. Геомеханическое обеспечение эффективной выемки мощных пологих пластов с труднообрушаемой кровлей механизированными комплексами. – Кемерово: Кемеровское книжное изд-во, Кузбассвуиздат, 2002. – 113с.
3. Оработка мощного угольного пласта механизированным комплексом с выпуском подкровельной пачки / С.И. Калинин [и др.]. – Кемерово, 2011. – 224 с.
4. Комплекс КНК-М. Техническое задание : заказчик ИГД им. А.А. Скочинского; разработчик – КузНИУ. – 1985. – 140с.

УДК: 622.268.13: 622.284.74

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКИХ КУПОЛОВ
В ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТКАХ И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЁТА
ПАРАМЕТРОВ КУПОЛОВ И АНКЕРНОЙ КРЕПИ ДЛЯ КРЕПЛЕНИЯ КУПОЛОВ**

¹Венгер В.Г., ¹Разумов Е.А., ²к.т.н. Пудов Е.Ю., ¹д.т.н. Калинин С.И.

1 – Филиал СФ АО «ВНИМИ», г. Прокопьевск, Россия

2 – Филиал КузГТУ, г. Прокопьевск, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследования геомеханических процессов при проведении и эксплуатации подготовительных выработок в сложных горно-геологических условиях шахт Кузбасса, установлены закономерности процесса развития куполов, обоснован метод расчёта параметров куполов и параметров анкерного крепления куполов. Проведено исследование влияния длительного срока службы выработок на устойчивость пород в выработках.

Ключевые слова: аварийная ситуация, срок службы, взрыв метана, пожар, затопление, устойчивость выработок, анкерная крепь, сводообразование.

Процесс формирования высоких куполов наблюдался в разных горно-геологических условиях проведения подготовительных выработок [1], в условиях шахты им. В.И. Ленина, шахт «Сибиргинская», «Распадская», «Юбилейная», «Талдинская-Западная-2», шахты им. В.Д. Ялевского. Исследования проводились в соответствии с действующими нормативными документами [2-7].

В условиях шахты им. В.И. Ленина исследования процесса формирования куполов проводились в выработке с большим сроком службы (15-20 лет).

В условиях шахты «Сибиргинская» наблюдения проводились в наклонном стволе и капитальных уклонах пласта III, находящихся в зоне влияния массовых взрывов разреза «Сибиргинский». Кроме этого, на этой шахте исследования проводились в подземных выработках верхнего слоя пласта III, отрабатываемого системой наклонных слоёв механизированным комплексом.

В условиях шахты «Юбилейная» наблюдения проводились в подготовительных выработках после произошедшего взрыва метана и угольной пыли.

Оценивалось влияние взрыва на шахте «Распадская», была обследована группа выработок на 4-х пластах, попавшая в зону влияния взрыва метана и пожара, затем затопленных. В зоне затопления выработки находились около 1 года. Обследование выработок проводилось после откачки воды и проветривания выработок.

В условиях шахты «Талдинская-Западная-2» исследования проводились по оценке влияния массовых взрывов разреза «Заречный» на устойчивость вентиляционного ствола, закреплённого анкерной крепью. Кроме того, в условиях шахты им. В.Д. Ялевского производилась оценка влияния высокой скорости подвигания лавы при отработке пласта 52 на состояние выемочных выработок и увеличенной длины лавы до 400м. Исследования проводились по специальной методике, согласованной с органами Ростехнадзора. Исследованиями установлено, что процессы развития деформаций пород в выработках в разных осложнённых условиях являются схожими, отличие заключается в параметрах деформаций.

Характерными деформационными процессами являются локальные вывалообразования, сплошное сводообразование с обрушениями и вывалами, деформирование пород массива с нарушением сплошности массива (расслоением пород, отслоением с образованием вывалов и куполов),

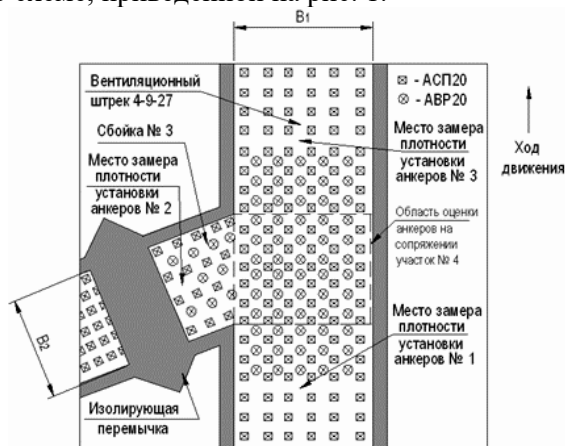
деформирование пород без разрыва их сплошности (в виде крупных блоков), сползание угля в боках выработок и вывалы угля из боков, особенно на участках сечения вблизи сопряжений кровли выработки с боками.

Установлено, что породы «ложной» кровли, малоустойчивые слои непосредственной кровли мощностью 0,3-0,8м, смещаются, деформируют сетчатую затяжку, подхваты, шайбы подхватов, появляются, так называемые, «гамаки» с накоплением пород и последующими их вывалами в выработку. Далее начинают обрушаться вышележащие слои непосредственной кровли. В большинстве выработок при их проведении и эксплуатации происходит два вида деформации пород кровли: процесс постоянного сводообразования и процесс образования локальных куполов и вывалов пород. Бока выработок обрушаются в пределах зон неупругих деформаций. Пучение пород в почве в выработках наблюдается реже.

Причинами проявления пучения почвы выработок являются следующие факторы:

- глубина горных работ. С увеличением глубины вероятность пучения почвы возрастает;
- повышенная влажность пород. Влияние влажности пород проявляется в двух видах деформаций: снижение прочности пород, набухание пород и увеличение их объёма;
- существенное различие в прочных свойствах пород кровли и почвы пласта. Прочность пород подошвы пласта часто является меньше прочности пород кровли;
- ширина целика у конвейерного штрека. При недостаточной ширине целика для охраны конвейерного штрека (целика со стороны падения) не только возрастает давление пород на крепь выработки, но и происходит пучение почвы в штреке.

Обследование в условиях шахты «Распадская» после затопления и откачки воды из выработок производилось на пластах: 3-3а, 7-7а, 9, 10. После затопления обследовалось всего выработок – 73. Путём замеров оценивалась ширина выработок, высота, параметры крепи. На сопряжениях измерения проводились по схеме, приведённой на рис. 1.



тип сопряжения – ответвление: участок № 1 – длина участка 0,5 B_1 ; участок № 2 – длина участка 0,5 B_2 ; участок № 3 – длина участка 0,5 B_3 ; участок № 4 – длина участка равна длине линии сопряжений выработок

Рис. 1. Характерные участки оценки плотности установки анкеров на сопряжении выработок

Наиболее часто наблюдаются в выработках типы образующихся куполов, приведённые на рис. 2.

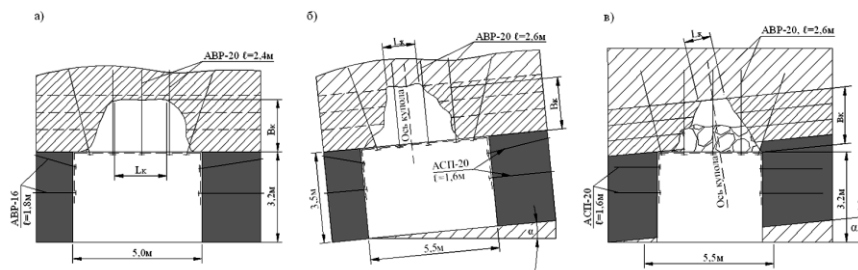


Рис. 2. Типы наблюдаемых куполов в кровле выработок пласта 9, 10:

- а – непосредственная кровля - крупнослоистый алевролит; б – участок с послойной трещиноватостью алевролитов непосредственной кровли; в – непосредственная кровля – мелкослоистый алевролит

При локальных вывалах ожидаемая нагрузка на крепь определяется параметрами вывала и объёмом обрушенных пород.

При сплошном сводообразовании ожидаемая нагрузка на крепь определяется массой отслоившихся пород в объёме зоны предельного равновесия.

Зона предельного равновесия для выработок определяется параметрами свода обрушения.

Зоны неупругих деформаций для выработок определяются параметрами свода обрушения и шириной призмы сползания пород и угля в боках выработки.

Тип кровли и класс кровли оценивались по рекомендациям [4, 8].

Необходимость крепления боков выработок и параметры крепления оценивались по результатам определения относительной напряжённости в боках выработок.

По результатам исследований установлено, что в затопленных водой выработках в течение года после откачки воды высота образования свода обрушения изменялась в пределах

$$h_c = (0,2 - 0,25) \cdot B, \quad (1)$$

где h_c – высота образующегося свода, м; B – ширина выработок, м.

Исследованиями было установлено следующее:

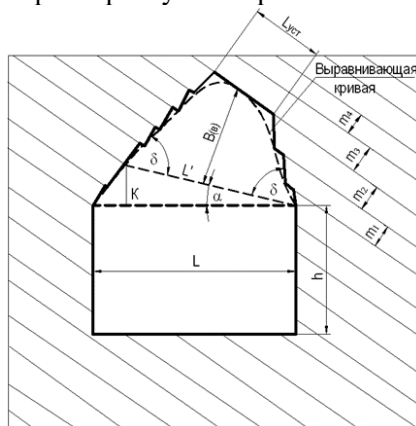
- величина усилия закрепления анкера в водонасыщенных породах превышает усилие разрыва анкерного стержня;

- образование куполов и вывалов в выработках наиболее интенсивно проявляется при отсутствии решетчатой затяжки;

- развитие трещиноватости формируется, в основном, в пределах сформировавшегося свода давления, не выходит за пределы высоты купола;

- формирования куполов в кровле выработок происходит в направлении, перпендикулярном к направлению послойных трещин (рис. 3).

На рис. 3 приведена форма и размеры купола при вывалах пород из кровли выработки.



L – пролёт выработки; $L_{уст}$ – устойчивый пролёт вывала в кровле; δ – угол наклона линии облома слоёв опор (60- 70 град.); α – угол залегания породных слоёв; $B_{(в)}$ – высота вывала; h – высота выработки; m_1, m_2, m_3, m_4 – мощности слоёв пород в кровле; L' – основание вывала;

K – количество слоёв от контура выработки до основания вывала $K = \sum m_i$

Рис. 3. Форма и размеры вывала пород в куполе над выработкой при слоистой кровле

При формировании купола образуются следующие параметры: h – высота выработки, м; $m_1, m_2 \dots m_3$ – мощность слоёв пород кровли; L' – основание вывала; δ – угол наклона линии облома слоёв опор купола; $B_{(в)}$ – высота вывала пород в куполе, м; β – угол наклона высоты купола к послойным трещинам, $\beta = 90^\circ$; α – угол залегания породных слоёв, град; $L_{уст}$ – устойчивый пролёт вывала в куполе, м; K – количество слоёв пород кровли от контура выработки до основания купола; h – высота выработки, м.

Расчёт ожидаемых геометрических параметров вывалов пород производится по параметрам свода обрушения пород.

Высота вывала зависит от высоты свода обрушения

$$B_{(в)} = \frac{L}{2f \cdot K_c}, \quad (2)$$

где L – пролёт выработки, м; f – коэффициент крепости пород; K_c – коэффициент структурного ослабления пород, для трещиноватых и увлажнённых пород принимается равным 0,5-0,6.

При отжиме угля в боках выработки высота свода определяется по формуле

$$B_{(c)}^1 = \frac{\alpha + h \cdot \operatorname{tg} \cdot (90^\circ - \varphi)}{f \cdot K_c}, \quad (3)$$

где φ – угол внутреннего трения угля, принимается в пределах 35-37°, (для пород 27-32°).

Длина анкера для крепления купола определяется по высоте купола

$$\ell_a = B_{(c)}^1 + h_3 + h_n, \quad (4)$$

где h_3 – глубина расположения анкера за свод купола, принимается 0,4-0,6м; h_n – часть анкера, выступающая наружу, принимается 0,1м.

Принимается, что основание свода давления в кровле имеет форму параболы, ожидаемое давление на крепь в этом случае определяется по формуле

$$P = 4/3 \cdot a \cdot B_{(c)}^1 \cdot \gamma, \text{ т/м}, \quad (5)$$

где a – половина основания свода, м; γ – объёмный вес пород в куполе, т/м³; $B_{(c)}^1$ – высота свода, м.

Удельное давление пород в своде определяется по формуле

$$P_{уд} = P/B, \text{ т/м}^2, \quad (6)$$

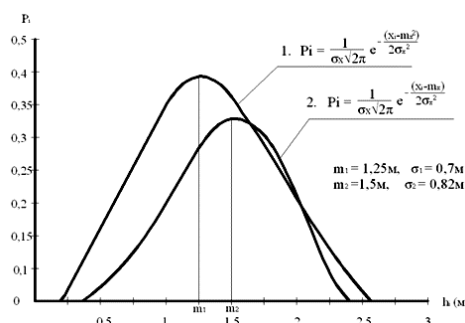
где B – пролёт выработки, м.

Давление, действующее в боках выработки, определяется по формуле проф. Цимбаревича П.М. [10].

Установлено, что недостаточная прочность крепления боков в выработках и принятая длина анкеров способствуют деформации пород кровли за контурами выработки и вывалам пород в выработку.

Установлено, что доля деформаций участков в выработках и элементов анкерной крепи с длительным сроком эксплуатации значительно больше, чем в выработках со сроком службы 4-5 лет. Максимальная высота свода при проведении исследований составляла не более 0,5В, максимальная высота купола наблюдалась равной 2,7м.

Высота свода в выработках рассчитывалась по указанной выше методике и сравнивалась с высотой свода, установленной экспериментально, кривые распределения вероятностей приведены на рис. 4.



1 – теоретический расчёт высоты свода разрушения; 2 – кривая вероятностей высоты расслоения пород в кровле выработок по измерениям

Рис. 4. График распределения высоты свода разрушения пород кровли в выработках

Вывод. Установлено, что усилие предварительного натяжения анкеров после схватывания скрепляющего состава не нарушает в дальнейшем прочность закрепления анкеров в шпурах.

Список литературы

1. Методика обследования и оценки состояния подготовительных выработок, закреплённых анкерной крепью и работоспособности анкерной крепи по истечении 5 лет эксплуатации выработок. – Прокопьевск, 2007. – 11с.
2. Методика обследования и оценки состояния ранее пройденных и закреплённых анкерной крепью горных выработок, подвергшихся воздействию взрывной волны, температуры и затоплению с учётом их фактических параметров и возведённого крепления в условиях ОАО «Распадская». – Прокопьевск, 2012.
3. Проект по усилению (ремонт, перекрепке) крепления ранее пройденных и закреплённых анкерной крепью горных выработок, подвергшихся воздействию взрывной волны, температуры, и затоплению с учётом их фактических параметров и возведённого крепления в условиях ОАО «Распадская» / НИ ПКП – «УТК», филиал КузГТУ. – Прокопьевск, 2014. – 253с.
4. Оценка сейсмического воздействия массовых взрывов разреза «Заречный» на подземные горные выработки шахты «Талдинская-Западная-2» ОАО «СУЭК-Кузбасс»: отчёт о НИР. Этап 2 / филиал КузГТУ, НИ ПКП – «УТК». – Прокопьевск, 2013. – 106 с.

5. Инструкция по безопасному ведению горных работ на шахтах, разрабатывающих угольные пласты, склонные к горным ударам. – Л.: ВНИМИ, 1981. – 119 с.
6. Инструкция по расчёту и применению анкерной крепи на угольных шахтах : зарегистрир. Минюст России 19.02.2014, № 31354.
7. Венцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Изд-во «Наука», 1969. – 576 с.
8. Механика горных пород и устойчивость выработок шахт Кузбасса / под ред. В.Г. Кожевина. – Кемерово: Кемеровское книж. изд-во, 1973. – 348 с.

УДК 622.831.22; 622.268.13

ПОСТРОЕНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

к.т.н. Волошин В.А., Сабиров Р.М., Петров В.И., Балачев С.Н.
Филиал СФ АО «ВНИМИ», г. Прокопьевск, Россия

Аннотация. Предложена математическая модель цифровой угольной шахты для формирования стандартных параметров подготовительного забоя. Представлены предварительные результаты анализа работоспособности системы на основе когнитивного моделирования с целью повышения безопасности работ, сокращения внеплановых простоев. Предложена к использованию автоматизированная система расчета дерева отказов и событий с определением возможных рисков с использованием средств Microsoft Visio и оценки качества системы по коэффициенту вероятности аварии.

Ключевые слова: цифровая модель, информационные системы, оптимизация работы предприятия, технологическая схема.

На протяжении последних 30 – 40 лет внедрение систем автоматизации производственных процессов на угольных предприятиях объявляется собственниками и руководителями высшего звена основной задачей. В последнее время реальность создания предпосылок передачи части объема полномочий инженерно-технических работников в управлении производственным процессом искусственному интеллекту становится весьма реальным и видится сегодня как ближайшее неотвратимое будущее.

Поставленные цели планируется достичь за счет создания «Цифрового двойника» угольного предприятия. При интеграции всех автоматизированных систем предприятия воплощается в жизнь представленный проект цифрового предприятия.

Для реализации проекта создания «Цифрового двойника» предприятия, для рассмотрения возможных вариантов развития производства при принятии или отклонении технических и инвестиционных проектов авторами статьи предлагается «пилотный вариант» рассмотрения работы подготовительного забоя.

Общеизвестно, что характеристика любого производственного участка определяется такими показателями как:

- кадровый потенциал, т.е. способность членов коллектива выполнять поставленные задачи (производственный план);
- контроль аварийности горно-шахтного оборудования (далее ГШО), для минимизации рисков аварийности оборудования и механизмов с целью предотвращения незапланированных остановок;
- оптимизация паспортов крепления и технологических схем расстановки оборудования на рассматриваемом участке;
- стабильная работа участка в опасных зонах (геологические нарушения, зоны повышенного горного давления, неустойчивые вмещающие породы, повышенное газовыделение и т.п.).

К рассмотрению была предложена весьма распространенная на шахтах Кузбасса технологическая схема расстановки ГШО в подготовительном забое и принятая за стандарт. Комбайн КП-21, ленточный перегружатель КЛП-800, скребковые конвейера СР-70/05 в количестве до 4-х штук. Крепление выработки осуществляется сталеполимерной анкерной крепью, забойный компрессор ШК8-0,6 переносные пневматические анкероустановщики СБР, MQT-120.

Для контроля состояния горных работ подготовительного участка составлена компьютерная программа развития забоя на период 1 год. В программе занесены данные по нормам выработки рабочих забоя, основные нормы монтажных работ, определены сроки ревизии и технического обслуживания забойного и участкового оборудования, проведено нормирование затрат на транспортирование горной массы и вспомогательные работы по доставке материалов и оборудования в забой. Программой произведен расчет нормативных темпов проведения выработки по имеющимся методикам и проведено сравнение с запланированными объемами.

В течении нескольких месяцев планируется вести сравнение фактических и запланированных ежесменных результатов работы. Результаты мониторинга заносятся в чек-лист и накапливаются в базе данных с анализом причин отставания или перевыполнения плановых заданий.

По истечению пяти месяцев работы участка планируется проведение анализа наиболее влиятельных причин незапланированных остановок и простоев, должны быть определены основные ошибки и недочеты планирования по представленным направлениям (кадровый потенциал, работоспособность технологической схемы и паспорта крепления, качество сервисного и технического обслуживания, соблюдение безопасных методов работы и работоспособность мероприятий в опасных зонах).

К основным видам незапланированных простоев, полученных по данным мониторинга на нескольких шахтах юга Кузбасса, можно отнести: аварийность скребковых конвейеров, перебои с энергоснабжением, перебои в доставке материалов и оборудование в забой, длительные остановки на ремонт оборудования и зачистку выработки.

Очевидно, что скребковые конвейеры являются наибольшей составляющей аварийных остановок на участке. Кроме того, фактические простои по причине ведения мероприятий по дегазации, не были запланированы первоначально.

По результатам работы программы «Цифровой двойник», в которую включены разделы по вариантам технологических схем и крепления выработки сформулированы предварительные рекомендации по повышению производительности труда и увеличению темпов проведения выработки.

По результатам проработки основных причин простоев очевидно, что в способе работы основного транспорта рекомендуется к применению замена скребковых конвейеров самоходным колесным вагоном или ленточным конвейером. Эксплуатация самоходного вагона ВС15М позволит сократить время и трудоемкость на монтаж и зачистку СР-70/05 и повысит нормативные темпы проведения выработки за счет сокращения простоев во время зачистки скребкового конвейера и монтажа ленточного конвейера.

Применение самоходного вагона исключает ручную доставку материалов до забоя, повышается качество монтажа монорельсовой дороги. Зачистка выработки с помощью самоходного вагона исключает повышенные трудозатраты по пред-монтажным работам. Доставка и раскладка элементов каркаса ленточного конвейера ведется параллельно с работой подготовительного забоя «по уходу».

Однако, при кажущейся видимости очевидной выгоды замены технологической схемы отсутствует краткосрочная экономическая целесообразность не запланированных инвестиций покупки нового оборудования, требуются дополнительные затраты на переобучение персонала. Представленная программа «Цифровой двойник» оценивает перспективы развития производства по заданным критериям, с учетом интересов всех участников и элементов системы.

Дополнительно был тщательно проанализирован раздел оптимизации крепления. В соответствии с «Инструкцией...» выполнен расчет для одиночной выработки, что не противоречит требованиям действующей инструкции [2]. Крепь усиления для эксплуатации выработки в зоне влияния очистных работ предложено устанавливать с отставанием от забоя на расстоянии до 200 м и сроком не более месяца. Таким образом, время проходческого цикла сократится без снижения безопасности работ. Безопасность и качество работ по креплению боков повышается за счет переноса работ из стесненных условий забоя. Для возведения анкерной крепи позади забоя рекомендуется к применению гидравлический облегченный анкероустановщик.

Выполнение работ по мониторингу работоспособности забойного и участкового ГШО с ежесменным картированием работы и безусловным выполнением требований по его техническому обслуживанию позволит создать постоянно пополняемую базу с внесением результатов в настройки математической модели работоспособности подготовительного забоя (рис. 1). Расчетные нормативные темпы проведения выработки должны увеличиться при сохранении численности персонала.

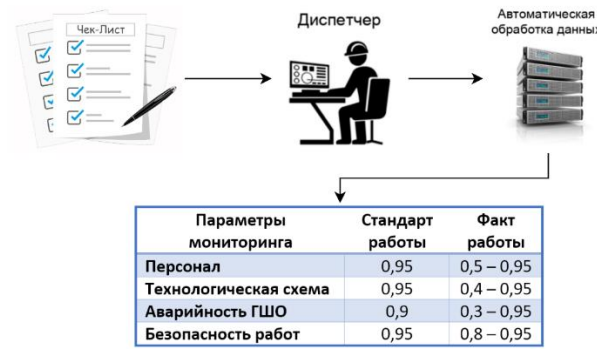


Рис. 1. Мониторинговая система, основанная на модернизации контрольных функций

Главным достоинством рекомендованной программой технологической схемы считается безопасность работ, которая за счет разнесения рабочих процессов и операций снижает риск аварийности и травматизма.

Основным достоинством представленной программы «Цифровой двойник» является возможность выбора рациональных путей развития из большого многообразия вариантов по заданным критериям. Авторами статьи в качестве основной методики анализа возможных вариантов развития по заданным критериям предложен вариант когнитивного моделирования [1].

Нечеткая когнитивная карта определяет причинно-следственную сеть взаимосвязи концептов и индикаторов. Связи задаются по результатам мониторинга работы подготовительного участка с определением степени влияния значимых, промежуточных и целевых концептов на искомые индикаторы (промежуточные результаты работы), где в качестве критерия оценки результатов рассмотрения является мнение экспертов или руководителей и экономических аналитиков. Результаты когнитивного моделирования рассматриваются по степени влияния концепта на промежуточные, целевые концепты, а также на искомые индикаторы. При оценке результатов моделирования для каждого концепта исключаются из списков рассматриваемых вариантов заведомо неудачные сценарии, а прошедшие количественную оценку представляются для дальнейшего анализа и вносятся в исходные данные вариантного моделирования (рис. 2).

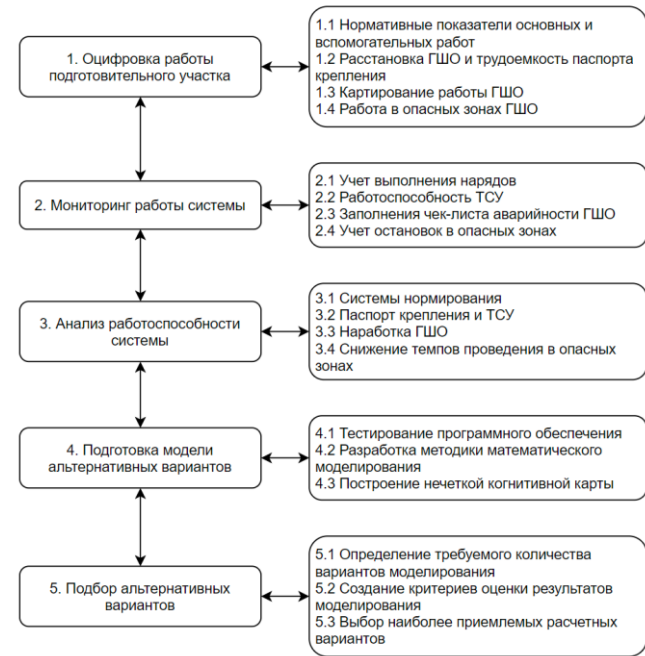


Рис. 2. Схема выбора оптимального сценария развития решения с использованием установленных критериев

Цифровые технологии позволяют оптимизировать производственные и бизнес-процессы, принимать обоснованные управленческие решения, снижать себестоимость, повышать гибкость и конкурентоспособность предприятия. Предложенная программа математического моделирования способствует развитию технологических процессов, стратегий управления, управлению качеством

реагирования системы на инвестиции, оптимизации численности персонала и других внешних воздействий [3].

Применение системы когнитивного моделирования расширяет горизонты возможностей руководителей, освобождая их от рутинной работы оперативного анализа, стимулирует генерации идей оригинальных решений в сложных ситуациях.

Создание «цифрового двойника» работы подготовительного забоя позволит обеспечить обоснование методического подхода к выбору пакета компьютерных программ оценки целесообразности организационных и технологических решений. Пакет компьютерных программ позволит оценить варианты развития событий в пределах подготовительного участка и обосновать рациональное направление развития технологии производства, обеспечивающее выполнение плановых заданий. В компьютерных программах реализован алгоритм сценарного развития системы подготовительного забоя, позволяющий качественно и количественно оценивать инвестиции и изменения организации работ в подготовительном забое. Внедрение мониторинговой системы, основанной на модернизации контрольных функций, обеспечит:

- оперативное управление потока транспортных единиц в установленное время;
- воздействие как на отдельные механизмы, так и общего потока работы подготовительного забоя;
- контроль интенсивности работы системы по фактору ГШО и кадрового потенциала.

Подготовительный забой, как один из элементов производственного процесса, представляет собой сложно-структурированную геотехническую систему, которую можно представить в виде вариационной математической модели с применением когнитивного подхода для обеспечения рационального сценария развития участка в ходе моделирования в постоянно изменяющихся горно-геологических условиях.

На основании построения НКК и многочисленных вариантов моделирования развития системы в условиях выбранного подготовительного участка ожидается получить:

- количественные и качественные параметры «стандарта забоя», позволяющие определять критерии оценки работоспособности системы;
- обоснование выбора технологической схемы участка и параметров возведения временной и постоянной крепи по забою;
- сокращение времени вынужденных простоев в условиях изменения горно-геологических условий;
- прогнозную оценку целесообразности инвестиций, технологических и кадровых реорганизаций.

В процессе оценки работоспособности системы «подготовительный забой» для «цифрового двойника» необходимо выполнять большой объем трудоемких операций расчета вероятных «отказов» системы с анализом коэффициента риска. Для устранения этой проблемы авторами статьи предлагается к использованию автоматизированная система расчета дерева отказов и событий. Программа позволит производить оценку возможных рисков с использованием средств Microsoft Visio, создав критерии зависимости и вероятности наступления события [4]. Система автоматически производит расчет вероятности возникновения отказов по каждому объекту и дает оценку качества системы с коэффициентом вероятности аварии. Автоматизированная система имеет огромный потенциал при анализе работоспособности широкого круга опасных производственных объектов.

Список литературы

1. Кулак В.Ю. Петрова Т.В. Обоснование направлений поэтапного развития технологии подземной угольной добычи на действующих шахтах на основе когнитивного моделирования // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2017. – Т.23. – №3. – С.12-21.
2. ФЗ РФ. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности : Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах от 19 ноября 2020 года, № 448.
3. Клебанов А.Ф. Автоматизация и роботизация открытых горных работ: опыт цифровой трансформации // Горная промышленность. – 2020. – №1.
4. Лисанов М.В. Ханин Е.В., Сумской С.И. О регулировании промышленной безопасности по количественным критериям допустимого риска // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 12.

ВЕДЕНИЕ МОНИТОРИНГА СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРА НА ШАХТАХ ЮГА КУЗБАССА

¹Мулев С.Н., ²Разумов Е.А., ¹к.т.н. Волошин В.А.

1 – АО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Россия

2 – Филиал СФ АО «ВНИМИ», г. Прокопьевск, Россия

Аннотация. В статье обозначена проблема безопасности горных работ в условиях высокого опережающего давления, а также при различных техногенных и природных сейсмических событиях. Предлагается методика контроля напряженно деформированного состояния массива горных пород в очистных и подготовительных забоях с применением системой GITS работающей в автоматическом режиме.

Ключевые слова: сейсмическая активность, угольный пласт, шахтное поле, шахта, исследование.

При разработке свиты угольных пластов, ведения работ в зонах повышенного горного давления от оставленных угольных целиков на надработанных пластах создаются условия неблагоприятного воздействия массива на устойчивость крепи штрековых выработок, особенно в зоне влияния очистного забоя при зависании основной трудно обрушаемой кровли. В этих условиях возрастает ответственность руководителей предприятия за принятые решения по усилению крепи или проведению разгрузочных мер, предусмотренных инструкцией по динамическим явлениям. В особо опасных зонах суточный отход комплексно-механизированных очистных забоев резко снижается, усиливается давление не только на секции крепи и возрастает риск вывалов породы и отжим угля в лаве, но и повышается концентрация горного давления в угольных целиках, в створе с очистным забоем, растягивающие напряжения в кровле выработок приводят к поломке крепи и др. На сегодняшний день отсутствует единый критерий определения вероятности повышенного давления на крепь штрековых оконтуривающих выработок, прогноза интенсивности горного давления в кровле и боках выработки, а также интенсивности растягивающих напряжений в створе лавы со штреками.

АО «ВНИМИ» предлагает методику контроля напряженно деформированного состояния массива горных пород в очистных и подготовительных забоях. Предложена система горного сейсмологического мониторинга GITS, которая в автоматическом режиме обеспечивает мониторинг событий (техногенных и природных сейсмических событий) в широком диапазоне режима онлайн при ведении горных работ в пределах всего шахтного поля.

Программный, многофункциональный комплекс GITS (рис. 1) конструктивно состоит из сети сейсмических датчиков, цифровых телеметрических каналов связи, программного комплекса обнаружения и обработки сигналов, SQL-сервера. Интенсивность потока регистрируемых событий до 100 событий в сутки. Базовый комплект 35 телеметрии поддерживает 6 - 10 сейсмотатчиков. Необходимое количество комплектов определяется конкретным местом установки системы. Программное обеспечение системы позволяет сконфигурировать до двух базовых комплектов и обеспечить 12 трехкомпонентных каналов регистрации.

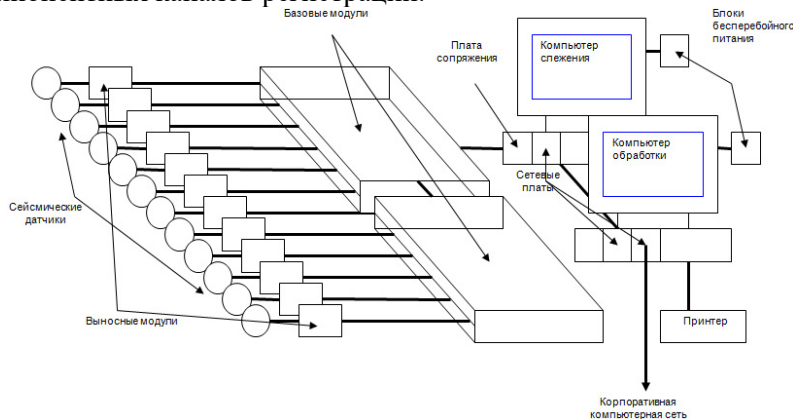


Рис. 1. Общий вид схемы системы GITS АО «ВНИМИ»

Выносные модули GITS устанавливаются в удаленных от базовых модулей (до 8 км) скважинах. С них информация поступает на компьютер, где установлена программа выделения сей-

смических сигналов, превышающих заданный уровень. Компьютер по заданным параметрам производит запись сигналов и передает их в базу компьютера обработки и связи, на котором установлен SQL-сервер, передающий реплику базы данных по единой вычислительной сети на обрабатывающий компьютер. Интенсивность выявления зон потенциально опасных по проведению динамических явлений несколько раз в секунду.

Результаты обработки передаются в Сибирское представительство «ВНИМИ» в городе Прокопьевск.

По полученным данным специалист «ВНИМИ» контролирует (задает параметры) построение графиков и диаграмм, анализ карт сейсмической активности программа производит в автоматическом режиме, на основании результатов замеров выдаются рекомендации на усиление крепи, разгрузку массива или принудительную посадку основной кровли, для устранения риска повышенного давления на крепь штрековых выработок в зоне опорного давления от выемочного участка. Представленные мероприятия важны при ведении работ в особо опасных зонах (зонах повышенного горного давления и в зонах геологических нарушений).

Работая в автономном режиме, система является предшественником «цифрового двойника» шахты, способного выбирать минимальные затраты и оптимальную трудоемкость работ и выбрать меры по приведению горных работ в безопасное состояние по заданным критериям.

По результатам сейсмических мониторинговых наблюдений на шахтах установлены закономерности группирования сейсмических событий по координатам их очага в пределах одинаковых элементов шахтного поля с характерным размером L и классам энергии от E_{min} до E_i . По закономерностям группирования за период T_i с определенной периодичностью строится «Карта плотности сейсмических событий» по энергии; - каждые 15 дней - «Карта зон активации геомеханических процессов участков шахтного поля» с зонами повышенной активности и изменения критерия удароопасности массива параметра F . Критическим энергетическим порогом сейсмического события, определяющим удароопасность массива принято зарегистрированное сейсмическое событие с $E \geq 35,0$ кДж. Для контроля состояния зон активации геомеханических процессов во времени ежедневно оцениваются параметры распределения событий по уровням энергии по строящимся графикам за предшествующий моменту оценки период времени T_i . (рис. 2)

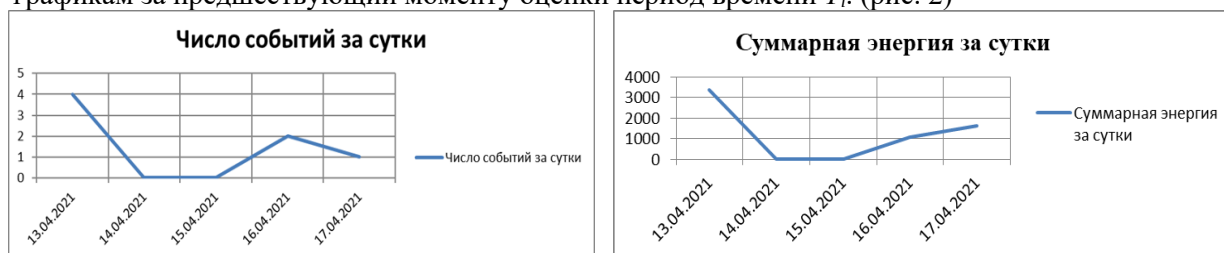


Рис. 2. Построение карты сейсмических событий по результатам суточного мониторинга

В режиме онлайн система GITS регистрирует геодинамические события в разных частях шахтного поля при ведении подготовительных и очистных работ. Работники «ВНИМИ» осуществляют контроль за работоспособностью системы, выдают рекомендации по настройке оборудования и установке дополнительных датчиков.

Полученные в ходе непрерывного наблюдения результаты системы GITS возможно использовать при составлении карты зон активации геомеханических процессов и после согласования методики «ВНИМИ» определять коэффициент удароопасности в различных участках массива шахтного поля. Более того, возможно прогнозирование изменения НДС массива горных пород в очистных и подготовительных забоях по накопленным результатам базы данных и установленных закономерностях.

Для расширения области применения информации системы GITS необходимо организовать постоянно пополняемую базу данных ежедневной оценки параметров распределения событий техногенного характера в пределах шахтного поля по уровням энергии, определить основные тенденции развития и перераспределения напряжений в массиве при ведении горных работ.

Имеющиеся показатели и зависимости накопительной базы данных отдельной шахты или участка позволят создать исходные данные для расчета параметров крепи методом математического моделирования с определением максимально допустимого уровня риска с сохранением установленного запаса надежности системы «выработка – крепь».

Методика предполагает методом математического моделирования по результатам полученных системой GITS расчет вероятного риска работы отдельных участков и оборудования.

Установленные зависимости, подтвержденные расчетными данными и результатами мониторинга на основе системы GITS, могут быть представлены в территориальный орган РТН для утверждения критерия удароопасности массива применительно к сейсмогеологическим условиям конкретных шахт.

Система GITS определяет зоны для ведения детального контроля состояния массива при помощи портативного прибора «ANGEL-M», производства АО «ВНИМИ». Прибор «ANGEL-M» (рис. 3) предназначен для оценки удароопасности в горных выработках угольных шахт и рудников, в том числе опасных по газу и пыли, позволяет на основе анализа накопленных данных определять критерии повышенной интенсивности горного давления в кровле, боках и почве выработки и принимать решения о возможности продолжения работы или проведения прогнозных мероприятий и мер по разгрузке массива.



Рис 3. Геофизический комплекс «ANGEL-M» АО «ВНИМИ»

Комплекс обеспечивает прием сигналов от источников электромагнитных колебаний, способен определить разрушение пород в массиве на ранних стадиях (в процессе интенсивного трещинообразования и интеграции напряжений в глубине массива), а запись результатов, полученных в ходе исследования, позволяет сравнивать их с ранее полученными и делать вывод о напряженно деформированном состоянии массива горных пород в окрестности горных выработок. Результаты замеров заносятся в базу памяти, передаются на компьютер для вывода исходных данных при математическом моделировании запаса прочности принятого паспорта крепления в конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях шахты.

Построена базовая настройка математической модели по результатам геологического прогноза и паспортов крепления выработок с корректировкой деформационных свойств пород. Выполняется визуализация состояния вмещающих пород в режиме онлайн вероятных изменений в конфигурации выработок с учетом прочностных свойств массива и установленного крепления. По проведенному анализу математической модели ожидания максимальных сжимающих и растягивающих напряжений на контуре выработки осуществляется корректировка паспорта усиления крепи по результатам расчетов (рис. 4).

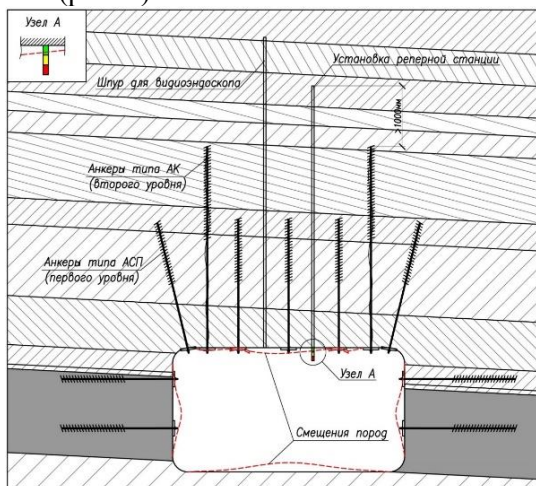


Рис 4. Схема определения вероятных деформаций вмещающих пород и крепи выработки в ходе ведения горных работ

В Сибирском филиале АО «ВНИМИ» создан банк данных для резервирования сейсмособытий техногенного характера на шахтах юга Кузбасса. Данные по всем шахтам анализируются в автономном режиме с определением основных векторов напряженности в пределах шахтного поля. По полученным данным определяется шаг обрушения непосредственной и основной кровли, определяется степень воздействия на закрепленные выработки.

Для условий конкретных предприятий (рис. 5, 6) разрабатываются прогнозные карты возможного негативного фактора на выработки выемочного участка, особенно в наиболее опасных зонах (геологические нарушения и зоны ПГД).



Рис. 5. Схема обустройства выемочного участка для проведения гидроразрыва угольного пласта

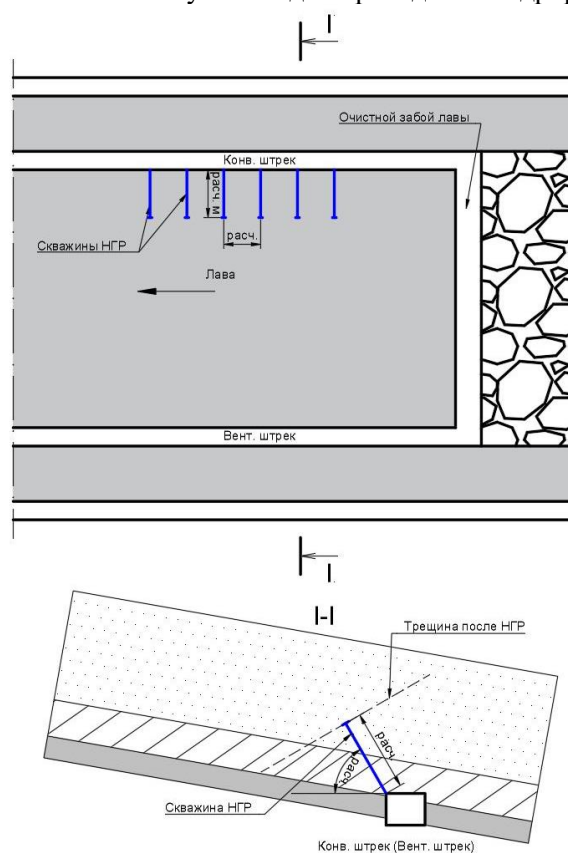


Рис. 6. Схемы бурения скважин для проведения принудительной посадки кровли

Автоматизированная система GITS позволит существенно повысить безопасность горных работ, особенно в особо опасных условиях (зонах геологических нарушений и повышенного горного давления при отработке сближенных пластов). Оперативное принятие решения об усилении крепи или проведения мероприятий по принудительной посадке зависающих пород основной кровли позволит повысить безопасность труда рабочих, снизить трудоемкость работ, повысить производительность труда рабочих очистного забоя.

Список литературы

1. Яковлев Д.В., Лазаревич Т.И. Методические указания по созданию систем контроля состояния горного массива и прогноза горных ударов как элементов многофункциональной системы безопасности угольных шахт (во исполнение требований п. 41 ЕПБ). –ОАО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр ВНИМИ». – Санкт-Петербург, 2012 – 82 с.
2. ВНИМИ [Электронный ресурс]. Режим доступа: Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр «ВНИМИ».

3. Система сейсмического мониторинга GITS / Д.В. Яковлев [и др.] // Сборник научных трудов ВНИМИ. / отв. ред. Д.В. Яковлев. – СПб.: ВНИМИ, 2012. – С. 18-25.
4. Мулёв С.Н., Старников В.Н., Романевич О.А.. Современный этап развития геофизического метода регистрации естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) // Уголь. – 2019. – № 10. – С. 6-14.
5. Яковлев Д.В., Мулёв С.Н. Опыт применения многофункциональной геофизической аппаратуры АНГЕЛ-М в угольной и рудной промышленности // Уголь. – 2014. – № 10. – С. 14-19.

УДК 539.2: 536.1

КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ СОРБЦИИ ГАЗА В КОНЕЧНОМ ОБЪЕМЕ УГЛЯ

Немцев А.Ю., д.т.н. Калашников С.Н.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Работа посвящена клеточно-автоматному моделированию на основе класса клеточных автоматов с окрестностью Марголуса. Выполнено моделирование процесса сорбции газа частицей угля. Для организации подобного рода эволюционного процесса метод клеточно-автоматного моделирования был дополнен методом Монте-Карло для реализации краевых условий на границе «твёрдое тело – газ».

Ключевые слова: клеточный автомат, окрестность Марголуса, моделирование, кинетика газораспределения, газораспределительная смесь, метод Монте-Карло.

При численном решении уравнений в частных производных, описывающих диффузионные процессы, часто используются разностные схемы. Теория сходимости разностных схем показывает, в какой мере последние отражают свойства исходных дифференциальных уравнений [1].

В связи с появлением компьютеров с высокой степенью параллельности, для моделирования диффузионных процессов широко используются КА, при помощи которых были решены некоторые проблемы газодинамики [2].

Клеточный автомат (КА) может мыслиться как стилизованный мир, в котором пространство представлено равномерной сеткой, а каждая клетка кодируется конечным числом битов, время дискретно [3]. Законы перехода состояний клетки, определяют состояние каждой клетки на текущий шаг по ее состоянию и состоянию ее соседей на предыдущем шаге по времени. Соседние клетки образуют ее окрестность [4].

Иногда при решении довольно простых дифференциальных уравнений возникают проблемы, связанные со сложными граничными условиями. Например, при решении параболического уравнения, описывающего диффузию в области со сложной границей (например, в пористой среде) возникают серьезные трудности.

Рассмотрим модель кинетики сорбции газа частицей угля. Изотерма сорбции описывается уравнением Ленгмюра. Частица, представляющая собой конечный объем угля с порами, содержащая сорбированный газ, характеризуется равномерным распределением микропор по объему. Перенос газа внутри частицы осуществляется диффузией по закону Фика.

Математическая постановка соответствующей двумерной задачи [5]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

$$C(x, y, t_0) = C_0(x, y), \quad (2)$$

$$C(x, y, t) = \frac{abP(t)}{1+aP(t)}, \quad (x, y) \in \Gamma, \quad (3)$$

где C – концентрация сорбированного газа; D – коэффициент диффузии; P – давление газа; C_0 – начальное значение концентрации; a, b – коэффициенты уравнения Ленгмюра; Γ – поверхность частицы.

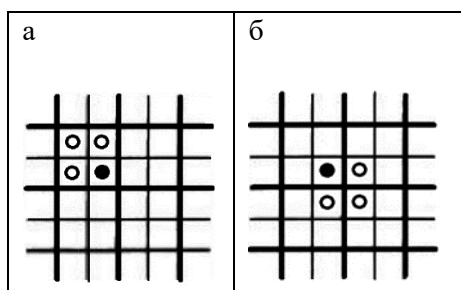
Будем исходить из того, что диффузия газа в твердом пористом теле эквивалентна самодиффузии. Рассмотрим движение отдельной молекулы газа. Столкновение этой молекулы с другими молекулами приводит к тому, что ее движение имеет стохастический характер. Заменим реальную молекулу молекулой «решеточного газа», которая движется скачками единичной длины в дискретные моменты времени по бесконечной решетке с квадратными ячейками. В каждый момент времени все четыре направления движения для частицы равновероятны. Такая модель движения частицы является случайным блужданием [6].

Случайного блуждания хорошо описывает диффузию [7]. Распределение вероятностей для модели случайного блуждания сводится к распределению для континуального движения реальной молекулы. Соответствующий результат получен аналитически [6-8], что было продемонстрировано для двумерного КА [4]. Такое двумерное случайное блуждание очень эффективно реализуется в виде КА с окрестностью Марголуса.

В рассмотренном ранее КА правила эволюции формулировались в терминах локального взаимодействия с использованием окрестности фон Неймана или Мура. Определим другой класс КА – КА с окрестностью Марголуса [4]:

- массив клеток разбит на множество конечных частей – блоков;
- задается правило для блока, правило применяется ко всем блокам, блоки не пересекаются;
- разбиение на блоки меняется от шага к шагу так, чтобы обеспечивалась пересеченность блоков, на соседних шагах.

Используя схему разбиения: массив клеток разбиваем на блоки размером 2×2 – на четных и нечетных шагах по времени производятся два разных разбиения на блоки (рис. 1) – четная решетка сдвинута по отношению к нечетной на одну клетку по вертикали и горизонтали. КА с окрестностью Марголуса может быть преобразован в обычный КА. В зависимости от того, какая решетка используется, клетка с черным кругом, будет иметь окрестностью либо четный, либо нечетный блок.



жирные линии – четная решетка; тонкие линии – нечетная решетка

Рис. 1. Блоки 2×2 окрестности Марголуса: а – четный блок; б – нечетный блок

Существенной частью поставленной с самого начала задачи (1), (2), (3) является реализация граничных условий (2) и (3), которая для клеточного автомата может быть осуществлена, исходя из решеточной модели адсорбции [9], где сложное адсорбционное поле поверхности заменяется на дискретную.

Суть решеточной модели адсорбции состоит в следующем. Имеется решетка из конечного числа центров, причем все центры одинаковы. Каждый центр может находиться в двух состояниях: 1) центр свободен; 2) центр занят молекулой адсорбата. Число адсорбированных молекул соответствует числу занятых центров. Если не учитывать взаимодействия между занятыми центрами, то при математическом описании модели получается уравнение Ленгмюра [9].

Уравнение Ленгмюра в его «решеточном» виде определяет число занятых адсорбционных центров как функцию давления газа. Этим уравнением можно пользоваться как критерием дискретного сорбционного равновесия при задании граничных условий вида (2), (3) для КА.

С учетом изложенного клеточный автомат для исследования кинетики газовой выделения можно определить следующим образом. На клеточной плоскости выделяется два сорта клеток: клетки «твердое тело» (частица угля) и клетки «свободный газ». Клетки могут находиться в одном из двух состояний: «заполнено молекулой газа» и «пусто».

Клетки свободного газа будем считать находящимися в неопределенном состоянии: каждая из них содержит молекулу газа с некоторой вероятностью. Эта вероятность общая для всего массива клеток типа «свободный газ» и является аналогом давления свободного газа.

Обновление состояния клеток «твердое тело» осуществляется в соответствии с правилом для окрестности Марголуса.

На границе «твердое тело — газ» при разбиении на блоки в один блок попадают клетки обеих фаз. При повороте такого блока молекула газа имеет возможность покинуть «твердое тело». Неопределенное содержимое клетки свободного газа оказывается на границе «твердое тело — газ». Необходимо соотнести их таким образом, чтобы относительное число граничных клеток области сорбента, занятых молекулами, было равно отношению числа адсорбированных молекул к общему числу центров решетки, что обеспечит выполнение граничных условий (2), (3). Молекула

газа, покинувшая «твердое тело», поглощается. Вероятность наличия молекулы в клетке, «внедрившейся» в «твердое тело», равна единице. Этот механизм может быть реализован с помощью метода Монте-Карло, суть метода заключается в следующем: процесс описывается математической моделью с использованием генератора случайных величин.

Клеточно-автоматная диффузия. Ряд наиболее известных КА-моделей диффузии описан в [10]. Строгое доказательство соответствия КА-представления диффузии дифференциальному уравнению Лапласа дано в [11] для КА с окрестностью Марголуза. Там же впервые получена величина коэффициента диффузии $D = \tau d / h^2$ для этой КА-модели, который в двумерном случае $D_{2D} = 3/2$. Далее эта модель будет описана и использована для решения.

2D-модель КА с окрестностью Марголуза двумерной диффузии (1) с краевыми условиями (2), (3) — КА с множеством имен $M = \{(i, j): i = 0, 1, \dots, g; j = 0, 1, \dots, l\}$ и с шаблоном соседства $T\{i, j\} = \{(i, j), (i + 1, j), (i + 1, j + 1), (i, j + 1)\}$. Функция $v(i, j)$ может рассматриваться как булев клеточный массив $\Omega_B = \{(v_m, m)\}$, в котором клетка — это пара символов (v_m, m) , где v_m — переменная состояний, а $m \in M$ — имя клетки из множества имен M , обозначенных парой координат (i, j) в случае 2D-декартова пространства, а в общем случае — одним символом m . Область значений переменных состояний $v_m \in B$, где $B = \{0, 1\}$ — алфавит состояний.

Правила перехода из состояния в состояние вероятностные для «твердого тела» без граничных условий (3) имеющие следующий вид:

$$\begin{aligned} & \{(v_0, (i, j)), (v_1, (i + 1, j)), (v_2, (i + 1, j + 1)), (v_3, (i, j + 1))\} = \\ & = \begin{cases} \{(v_1, (i, j)), (v_2, (i + 1, j)), (v_3, (i + 1, j + 1)), (v_0, (i, j + 1))\}, & \text{если } rand < p_s, \\ \{(v_3, (i, j)), (v_0, (i + 1, j)), (v_1, (i + 1, j + 1)), (v_2, (i, j + 1))\}, & \text{если } rand \geq p_s, \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

где $rand$ — случайное число в интервале $(0, 1)$; $p_s \leq 1/2$ — вероятность взаимодействия клетки $(v_0, (i, j))$ с клетками соседями для «твердого тела». При $p_s = 1/2$ коэффициент диффузии $D = 3/2$.

Режим работы КА синхронный двухтактный. На первом такте подстановка (4) выполняется всеми клетками, у которых имена удовлетворяют условию: $i + j$ — четное число. На втором такте ту же подстановку выполняют клетки, у которых $i + j$ — нечетное число. Изменяя величину вероятности p , можно моделировать процесс диффузии с коэффициентом в широком диапазоне [12] т.е. при уменьшении p коэффициент D пропорционально уменьшается.

Правила перехода из состояния в состояние вероятностные для «свободного газа»:

$$v_m = \begin{cases} 1, & \text{если } rand < p_G, \\ 0, & \text{если } rand \geq p_G, \end{cases} \quad (5)$$

где $p_G \leq 1/2$ — вероятность наполненности клетки молекулой газа $(v_0, (i, j))$ для всего массива «свободного газа». Чем больше p_G тем больше давление «свободного газа».

Краевое условие (2) выполняется для границы «твердое тело — газ» следующим образом. Если в соседстве с клеткой «твердого тела» имеется хотя бы одна клетка «свободного газа», происходит проверка того что эта клетка содержала молекулу газа и одновременно с этим взаимодействовала с клеткой «свободного газа», если проверка успешна, то проводится проверка наполненности остальных клеток «твердого тела» молекулой газа, если они заполнены, то все клетки «твердого тела» будут заполнены, если нет, то между ними случайно выбирается одна из пустых клеток, и она заполняется молекулой газа, что является применением метода Монте-Карло т.е. применения генератора случайных чисел.

Численный эксперимент строится следующим образом. Задается начальное состояние системы (КА) (2), затем выполняется алгоритм (4), (5) и алгоритм для краевого условия (3), возникающего на границе «твердое тело — газ».

На рис. 2 показаны состояния эволюции процесса сорбции газа частицей угля с 4 микропорами. Использована 2D-модель КА с окрестностью Марголуза. Размеры массива 16×16 клеток, четыре массива со «свободным газом» 4×4 . На границах «твердое тело — газ» применялось условие (3). Клетки с толстыми черными границами «твердое тело», клетки с тонкими границами «твердое тело — газ», клетки с бледно серыми границами «свободный газ». Серые клетки — наличие молекулы газа (заполненные), белые клетки — отсутствие молекулы газа (пустые).

Соответствующий алгоритм решения уравнения (1) применим для исследования других физических процессов, тепло- и электропроводности, магнитных и электромагнитных потоков и др. В таких компьютерных экспериментах наблюдается самоорганизация материи [13]. Самоорганизация вытекает из локальных взаимодействий, правило которых задаются, а структура возникает сама.

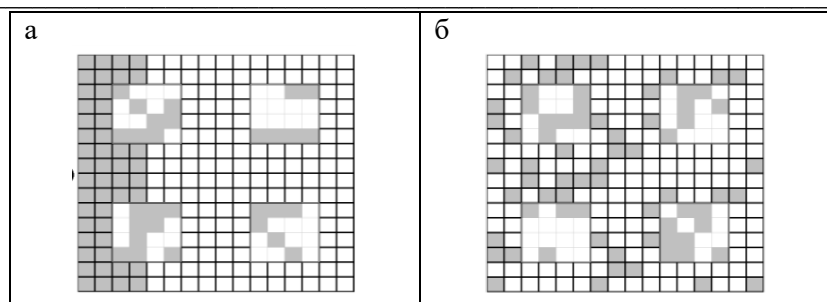


Рис. 2. Клеточно-автоматное моделирование сорбции газа частицей угля: а) начальное состояние; б) сотый шаг

Таким образом, результаты проведенных численных экспериментов показали, что клеточные автоматы обладают рядом возможностей с точки зрения качественного моделирования газодинамических процессов. Разработанная методология компьютерного моделирования эволюции состояний газоугольного раствора предусматривает использование КА как инструмента для исследования. Методология заключается в создании алгоритма, и его компьютерной реализации для исследования эволюции КА, выявления его свойств и анализа свойств газоугольного раствора.

Вывод. Предлагаемый концептуально КА предназначен для моделирования активных сред, отличается от известных КА тем, что клетка имеет одно для всех, фиксированное конкретной эволюции число состояний, для определения которых на каждом шаге решается краевая задача диффузии, а набор правил определяет состояние каждой клетки на текущем шаге по состоянию ее и ее соседей на предыдущем шаге по времени.

Список литературы

1. Самарский А.А., Гулин А.В. Устойчивость разностных схем. – М.: Наука, 1973.
2. Малинецкий Г.Г., Степанцов М.Е. Клеточные автоматы для расчета некоторых газодинамических процессов // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1996. – № 5. – Т. 36. – С. 137-145.
3. Дж. фон Нейман. Теория самовоспроизводящихся автоматов. – М.: Мир, 1971.
4. Тофоли Т., Мареолус Н. Машины клеточных автоматов. – М.: Мир, 1991. – 278 с.
5. Мясников А.А., Садохин В.П., Жирнова Т.С. Применение ЭВМ для решения задач управления метановыделением в шахтах. – М.: Недра, 1977. – 248 с.
6. Спирцер Ф. Принципы случайного блуждания. – М.: Мир, 1969. – 137 с.
7. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Том 1. – М.: Мир, 1984. – 128 с.
8. Резибуа П., М.Де Ленер. Классическая кинетическая теория жидкостей и газов. – М.: Мир, 1980. – С. 35-39.
9. Лопаткин А.А. Теоретические основы физической адсорбции. – М.: Изд-во Моск.ун-та, 1983. – 233 с.
10. Bandman O. Comparative study of cellular automata diffusion models // Lecture Notes in Computer Science. – Berlin: Springer, 1999. – P. 395.
11. Малинецкий Г. Г., Степанцов М. Е. Моделирование диффузионных процессов клеточными автоматами с окрестностью Марголуса // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1998. – Т. 36. – № 6. – С. 1017-1021.
12. Бандман О. Л. Клеточно-автоматные модели пространственной динамики // Системная информатика. – 2006. – № 10. – С. 59-113.
13. Мелькер А.И. Моделирование эксперимента. Физика / Новое в жизни, науке, технике. – М.: Знание, 1991. – №10. – 64 с.

УДК 544.431.24

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ РЕАКЦИИ АЛКИЛИРОВАНИЯ БЕНЗОЛА

д.т.н. Калашников С.Н., Бабушкина О.С., Гаун М.А.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В работе представлено исследование процесса превращения углеводородов на примере реакции алкилирования бензола этиленом. Построена математическая модель исследуемого процесса в виде

задачи Коши для дифференциальных уравнений, описывающих динамику изменения концентрации бензола и этилена. Для решения поставленной задачи Коши использован численный метод на основе конечно-разностной схемы Кранка-Николсона.

Ключевые слова: имитационное моделирование, углехимия, кинетика химических реакций, алкилирование, крекинг, пиролиз, конечно-разностная схема Кранка-Николсона, фазовый портрет системы.

Объемы добычи угля в Кузбассе неуклонно растут. Темпы этого роста уже превысили плановые показатели, предусмотренные стратегией развития отечественного углепрома. Если к 2030 году Кузбасс будет добывать более 200 миллионов тонн угля в год, то с этим углем нужно будет что-то делать. Как энергетический актив он уже в ближайшем будущем станет гораздо менее конкурентоспособным и востребованным. Именно поэтому в Кемеровской области целесообразно начать развитие производств, позволяющих получать из угля товары высокого передела, такие как сорбенты, смолы, метанол, бензол, этилбензол и другие химические продукты [1].

В рамках вышесказанного перспективным направлением развития угольной отрасли является внедрение современных технологий как по обогащению, так и по глубокой переработке угля, а также развитие углехимии. На основе экспертных оценок можно говорить об экономической выгоде углехимии, поскольку продукты глубокой переработки угля в десятки и сотни раз превышает цену обычного топлива [2].

Углехимия как раздел химической технологии включает в себя технологические процессы, применяемые в промышленности при переработке твердых горючих ископаемых, такие как коксование, газификация, гидрогенизация. Прямая гидрогенизация угля является перспективным методом получения углеводородов в связи с истощением запасов нефти и ростом её стоимости, а также с учётом значительности запасов каменного угля [3].

В качестве одного из важнейших продуктов углехимии выделяют бензол, являющийся наиболее распространённым представителем такого класса веществ как ароматические соединения (арены). Бензол получается в процессе коксования угля, который нагревается, выделяя бензол и иные летучие вещества, и широко применяется в промышленности для производства лекарств, различных пластмасс, синтетической резины, красителей. Кроме этого, значительную часть получаемого бензола используют для синтеза следующих новых продуктов:

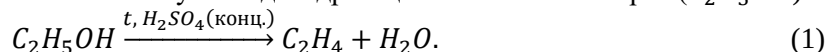
- примерно 50% бензола превращают в этилбензол (алкилирование бензола этиленом);
- порядка 25% бензола превращают в кумол (алкилирование бензола пропиленом);
- приблизительно 10-15% бензола гидрируют в циклогексан;
- около 10% бензола расходуют на производство нитробензола;
- 2-3% бензола превращают в линейные алкилбензолы;
- приблизительно 1% бензола используется для синтеза хлорбензола.

В существенно меньших количествах бензол используют для синтеза других соединений. Изредка и в крайних случаях, ввиду высокой токсичности, бензол используют в качестве растворителя. Кроме того, бензол входит в состав бензина [3].

В данной работе рассмотрен один из важных процессов углехимии – превращение бензола (C_6H_6) в этилбензол (C_8H_{10}) путем его алкилирования этиленом (C_2H_4).

Этилен – это самое производимое органическое соединение в мире. Он играет чрезвычайно важную роль в промышленности, а также является фитогормоном практически у всех растений, среди прочего отвечает за опадание иголок у хвойных деревьев [3].

В промышленности этилен получают крекингом продуктов переработки нефти, например, керосина. В лабораторных условиях этилен получают дегидратацией этилового спирта (C_2H_5OH):



Этилбензол содержится в нефти и каменноугольной смоле. В качестве применения этилбензола можно отметить следующее: при пропускании паров этилбензола над катализаторами образуется стирол C_8H_8 , являющийся сырьём при производстве некоторых видов пластмасс и синтетических каучуков. Его используют также в органическом синтезе, например, для получения ацетофенона или как растворитель и компонент высокооктановых бензинов. Наиболее дешёвый этилбензол получают, выделяя его из ксилольной фракции продуктов риформинга или пиролиза, где он содержится в количестве 10...15%; основная же масса этилбензола производится алкилированием бензола этиленом:



Реакция алкилирования с активным комплексом хлорида алюминия $AlCl_3$ идет очень быстро, сильно ускоряется при механическом перемешивании или интенсивном барботировании газообразных олефинов через реакционную массу и протекает в диффузионной или близкой к ней области. Ее скорость повышается при росте давления, но мало зависит от температуры, имея низкую энергию активации [4].

Скорость произвольной реакции зависит от природы реагирующих веществ, их концентрации, температуры и наличия катализатора. Зависимость скорости реакции от концентрации описывается основным постулатом химической кинетики – законом действующих масс, согласно которому скорость химической реакции в каждый момент времени пропорциональна текущим концентрациям реагирующих веществ, возведенным в некоторые степени:

$$w(t) = k \cdot [A]^X \cdot [B]^Y, \quad (3)$$

где k – константа скорости реакции; X, Y – числа, которые называют порядком реакции по веществам A и B , соответственно [5-7].

Нелинейность в правой части соотношения (3) дает возможность возникновения режимов самоорганизации при протекании химических реакций [8-10].

Кинетические кривые реакций различных порядков, вычисленные для одних и тех же значений начальной концентрации c_0 и констант скорости k , при выборе периода полупревращения в качестве масштаба времени проходят через точку $(\tau_{1/2}, c_0/2)$ и различаются кривизной тем большей, чем выше порядок реакции.

В работе представлено исследование двухстадийного процесса превращения углеводородов на примере реакции алкилирования бензола этиленом. Построена математическая модель исследуемого процесса в виде задачи Коши для дифференциальных уравнений, описывающих динамику изменения концентрации бензола и этилена. Для решения поставленной задачи Коши использован численный метод на основе конечно-разностной схемы Кранка-Николсона [11, 12].

Математическая модель процесса алкилирования бензола этиленом, полученная на основе закона действующих масс из химической кинетики, в безразмерном виде имеет вид

$$\begin{cases} \frac{d[\text{Э}]}{d\tau} = K_1 \cdot [\text{ЭС}] - K_2 \cdot [\text{Б}] \cdot [\text{Э}]; \\ \frac{d[\text{Б}]}{d\tau} = -K_2 \cdot [\text{Б}] \cdot [\text{Э}]; \\ [\text{Э}] \Big|_{\tau=0} = [\text{Э}]_0; \\ [\text{Б}] \Big|_{\tau=0} = [\text{Б}]_0, \end{cases} \quad (4)$$

где $[\text{Э}]$ – безразмерная концентрация этилена; $[\text{Б}]$ – безразмерная концентрация бензола; $[\text{ЭС}]$ – безразмерная концентрация этилового спирта; K_1 – критерий подобия, учитывающий значение константы скорости реакции (1); K_2 – критерий подобия, учитывающий значение константы скорости реакции (2).

Для исследования рассматриваемого двухстадийного процесса в работе использовано имитационное моделирование режимов поведения многомерных динамических систем [13].

Результаты имитационного моделирования с воздействием помехи на процесс дегидратации этилового спирта представлены на рис. 1. Воздействие этой помехи повлияло в целом на протекание исследуемого двухстадийного процесса.

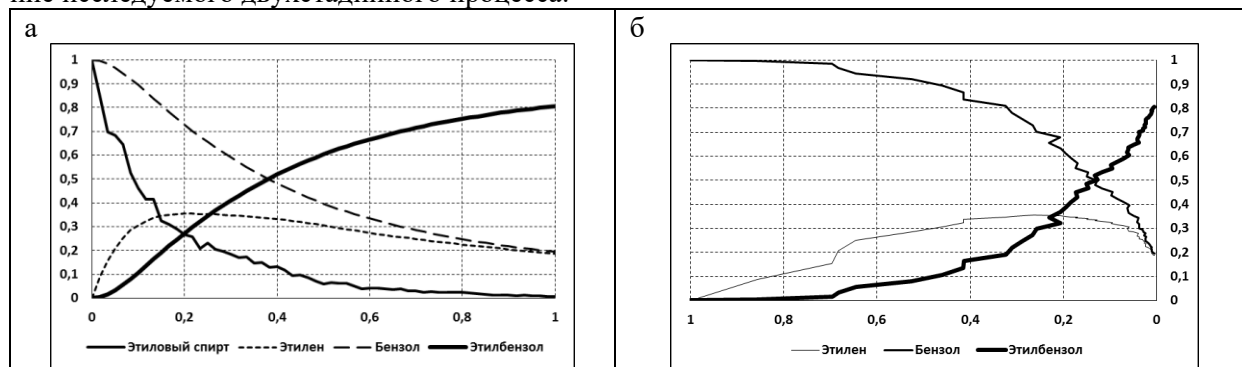


Рис. 1. Кинетические кривые (а) и фазовый портрет (б) процесса протекания реакций (1) и (2)

На рис. 1 а представлены кинетические кривые реакций (1) и (2), показывающие развитие процесса протекания двухстадийной реакции дегидратации этилового спирта и алкилирования бензола этиленом во времени.

На рис. 1 б представлен фазовый портрет процесса протекания реакций (1) и (2), на котором безразмерные значения концентраций этилена, бензола и этилбензола развернуты по значениям концентрации этилового спирта.

Вывод. Рассмотренный подход к исследованию процесса превращения бензола в этилбензол с помощью его алкилирования этиленом на основе имитационного моделирования применим к исследованию процесса превращения других углеводородов.

Список литературы

1. Почему необходимо развивать углехимию в Кузбассе? [Электронный ресурс] // Новости сибирской науки. – URL: <http://www.sib-science.info/ru/sbras/v-kuzbasse-neobkhodimo-04022016>.
2. Филиппова Л.В. Углехимия и переработка угля: перспективы развития // Уголь Кузбасса. – 2020. – № 1. – С. 70-75.
3. Русьянова Н.Д. Углехимия. – М.: Наука, 2003. – 315 с.
4. Химическая технология органических веществ / Т.П. Дьячкова [и др.]. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – Ч. 2. – 100 с.
5. Семиохин И.А., Страхов Б.В., Осипов А.И. Кинетика химических реакций. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 351 с.
6. Холохонова Л.И., Короткая Е.В. Кинетика химических реакций. – Кемерово: КемТИПП, 2004. – 80 с.
7. Эткинс П. Физическая химия. Т. 2, гл. 26, 27. – М.: Мир, 1980.
8. Цымбал В.П., Мочалов С.П., Калашников С.Н. Модели и механизмы самоорганизации в технике и технологиях: в 3х ч. Ч. 2. / Под ред. В.П. Цымбала. – Новокузнецк, 2004. – 180 с.
9. Цымбал В.П. Введение в теорию самоорганизации с примерами из металлургии. – Новокузнецк, 2001. – 251 с.
10. Калашников С.Н. Математическое моделирование тепломассообменных процессов в металлургических агрегатах на основе объектно-ориентированной технологии: дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук: 05.13.18 / Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2002. – 330 с.
11. Sunday F., Edogbanya O.H., Samuel C.Z. Crank Nicolson Method for Solving Parabolic Partial Differential Equations // International Journal of Applied Mathematics and Modeling IJA2M. – 2013. – Vol.1. – № 3. – P. 8-23.
12. Omowo B. J., Longe I. O. Crank-Nicolson and Modified Crank-Nicolson Scheme for One Dimensional Parabolic Equation // International Journal of Applied Mathematics and Theoretical Physics. – 2020. – Vol 6. – № 3. – P. 35-40.
13. Бабушкина О.С. Имитационное моделирование режимов поведения двумерной линейной динамической системы // Научное сообщество студентов: междисциплинарные исследования: сб. статей по материалам XIX междунар. студ. науч.-практ. конф. № 2(109).

УДК622.2

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАДИЦИОННЫХ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ДЕГАЗАЦИИ ВЫСОКОГАЗОНОСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Крестьянинов А.В., Шмаков И.К., к.т.н. Васильев П.В.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье проведен анализ эффективности традиционных способов и средств дегазации высокогазоносных угольных пластов. Выявлено что традиционные способы не всегда обеспечивают санитарно-гигиенические нормы шахтной атмосферы, в этой связи обосновывается актуальность создания более эффективных способов дегазации угольных пластов.

Ключевые слова: метан, дегазация, проницаемость угольных пластов, искусственное воздействие, скважина.

Введение. Метан и связанная с ним взрывоопасность являются одним из опасных факторов, ограничивающих добычу каменного угля. Разработка угольных пластов на шахтах, опасных по газу метану, требует применения специальных мер [1], не допускающих превышение концентрации газа в рудничном воздухе в соответствии с действующей проектной документацией предприя-

тия. Основным способом снижения концентрации метана в рудничной атмосфере является применение вентиляционных систем с обеспечением параметров вентиляционной струи в соответствии с проектной документацией. Однако, использование только вентиляции не всегда обеспечивает санитарно-гигиенические параметры шахтной атмосферы. Поэтому в горной практике широко апробированы следующие способы и средства дегазации: заблаговременная, предварительная, текущая и выработанного пространства дегазации метана из угольных пластов и вмещающих пород [2]. При извлечении метана из разрабатываемого пласта до 80-90% [3] находится в связанном состоянии и перевод газа метана в свободную фазу, а также миграция его в массиве с низкой проницаемостью требует проведение дополнительных мероприятий по повышению пористости угольных пластов.

Заблаговременная дегазация угольных пластов скважинами, пробуренными с поверхности, может обеспечивать эффективность извлечения метана на уровне 50-60%, снижение газообильности горных выработок осуществится в период от 3 – 5 и более лет до начала ведения горных работ в зонах дегазации [4].

Существенно шире область применения подземной пластовой дегазации, осуществляемой из горных выработок. Реально достижимая эффективность типовых способов подземной пластовой дегазации не превышает 15-20%. Связано это с низкой природной проницаемостью угольных пластов на глубинах более 400-500 м [5].

В соответствии с актуальностью повышения эффективности дегазации в настоящей работе предложена и реализуется научная программа проведения исследований с целью разработки новых способов и средств повышения пористости угольных пластов посредством искусственного воздействия на них.

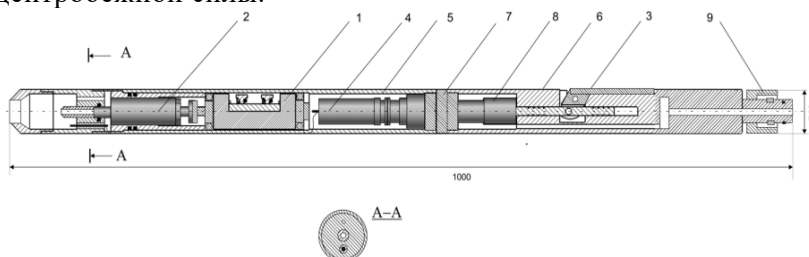
Для достижения поставленной цели предлагается использовать результаты решения следующих задач:

- анализ способов и средств искусственного воздействия на угольный пласт и выбор рационального способа повышения проницаемости угольных пластов;
- выбор направления исследований для разработки технических и технологических решений по повышению эффективности способов искусственного воздействия на угольный пласт.

Метод исследования. В данной работе использованы следующие методы исследования технологий способов и средств дегазации высокогазоносных угольных пластов: анализ и обобщение сведений, содержащихся в научно-информационных источниках, патентах и нормативно-технических документах.

Для анализа эффективности способов воздействия на угольный пласт обобщены результаты исследований, полученных Институтом горного дела им. Н.А. Чинакала, горным институтом НИТУ МИСИС, Институтом угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН, группой компаний «Новас» - «Георезонанс».

Результаты. В Институте горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН разработан способ повышения проницаемости угольного пласта в призабойной зоне дегазационной скважины за счет создания в ней интенсивных колебаний с использованием вибросейсмических источников. В пробуренные скважины вводится скважинный вибратор (рис. 1), состоящий из неуравновешенного вала, который вращается вокруг своей оси на подшипниках [6]. Вращение дебалансного вала осуществляется пневматическим приводом. Снижение общего кинематического момента дебалансного генератора колебаний при достижении пороговой частоты происходит автоматически за счет смещения малой массы дебаланса в радиальном направлении от оси вращения под действием центробежной силы.

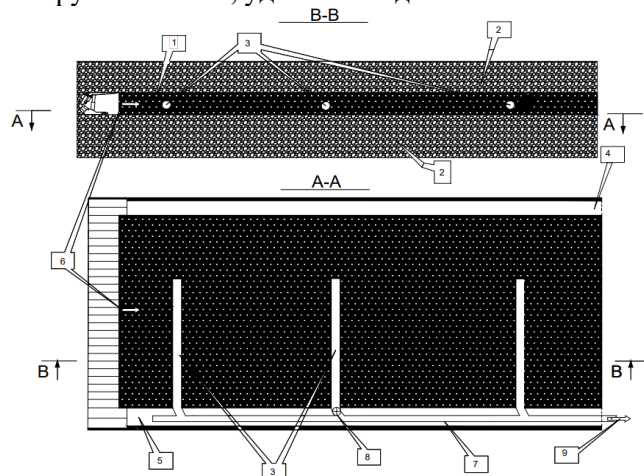


- 1 – дебалансный генератор колебаний; 2 – пневматический мотор; 3 – прижимной рычаг;
4 – электрический мотор-редуктор; 5-7 – элементы корпуса; 8 – винтовая пара; 9 – стыковочный узел

Рис. 1. Скважинный вибратор [7]

Использование сейсмических колебаний удельной мощностью менее $1Ю5 \text{ Вт/м}^2$ повышает проницаемость угля до 1,5 раза [7]. Вибросейсмическое воздействие удельной мощностью $1,5-14,0 \text{ Вт/м}^2$ увеличивает проницаемость угля в 3-8 раз, причем эффективность воздействия растет с частотой сейсмических колебаний [8].

В горном институте НИТУ «МИСиС» разработан и апробирован способ дегазации угольного пласта в условиях шахты имени С.М. Кирова ОАО «СУЭК-Кузбасс», обеспечивающий интенсификацию извлечения метана при минимальных затратах на его реализацию [9]. В патенте [10] рассмотрен способ предотвращения геодинамических явлений при подземной разработке газоносного угольного пласта, включающий бурение в пласт дегазационной скважины, формирование каналов проницаемости вокруг скважины, удаление воды и извлечение метана (рис. 2).

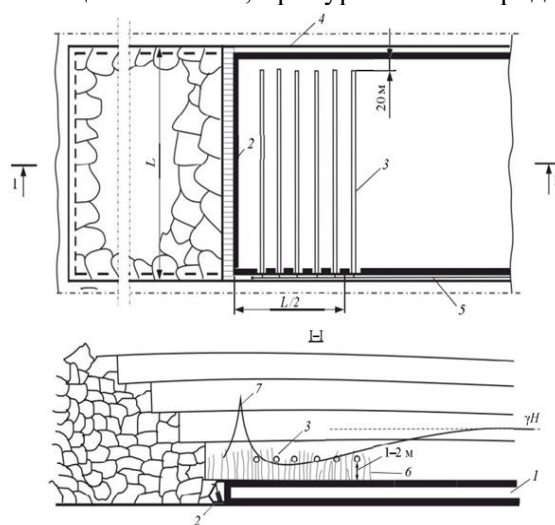


- 1 – угольный пласт; 2 – вмещающие породы; 3 – дегазационные скважины; 4,5 – вентиляционный и откаточные штреки; 6 – направление движения лавы; 7 – магистральный газопровод; 8 – аппарат для измерения пластового давления; 9 – направление газоотсоса

Рис. 2. Схема пластовой дегазации выемочного столба [9]

Техническим результатом является повышение дебита метана из скважины в 10-15 раз, сокращение длительности подготовки особо опасного пласта к отработке за счет интенсификации процесса дегазации и релаксации высоких напряжений горного давления.

В Институте угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН разработан способ дегазации отрабатываемого угольного пласта [11], включающий бурение параллельных очистному забою скважин по породам кровли. Способ дегазации отрабатываемого угольного пласта с помощью скважин, пробуренных в породах кровли (рис. 3).

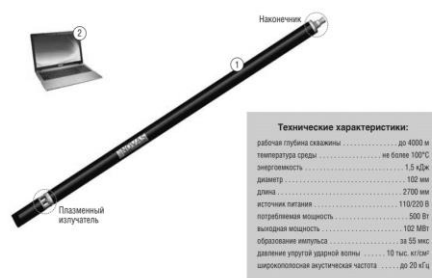


- 1 – угольный пласт; 2 – очистной забой; 3 – дегазационные скважины; 4 – вентиляционный штрек; 5 – дегазационный трубопровод в конвейерном штреке; 6 – искусственные трещины; 7 – эпюра частичной разгрузки

Рис. 3. Способ дегазации отрабатываемого угольного пласта с помощью скважин, пробуренных в породах кровли [11]

Предложенный способ основан на использовании эффекта периодической частичной разгрузки пласта и его непосредственной кровли впереди очистного забоя под воздействием циклического изменения опорного горного давления. Указанный способ позволит эффективно дегазировать пласт за счет расположенных в породах кровли скважин и снизить затраты на их герметизацию и поддержание.

Специалистами группы компаний «Новас» - «Георезонанс» разработана технология плазменно-импульсного воздействия на угольный пласт с целью создания сети микротрещин методом заблаговременного искусственного стимулирования угольного пласта [12]. Данный способ позволит максимально перевести газ в свободное состояние, а затем извлечь его через вертикальные скважины. Комплектность и технические характеристики оборудования (рис. 4).



1 - погружной плазменно-импульсный генератор; 2 - наземный контрольный блок управления

Рис. 4. Комплектность и технические характеристики оборудования [12]

Как считают специалисты, способ плазменно-импульсного воздействия позволит в кратчайшие сроки (1,5 - 2 года) выполнить дегазацию и снизить содержание метана до безопасного уровня в конкретном участке разрабатываемого пласта.

По результатам обобщения изложенных выше способов и средств разработана их классификация, представленная в табл. 1.

Таблица 1

Классификация способов воздействия на угольный пласт

Способы и методы дегазации	Сущность способов и методов дегазации	Эффективность	Источники
Способ повышения проницаемости угольного пласта в призабойной зоне дегазационной скважины посредством использования вибросейсмического источника	В пробуренные скважины запускается виброисточник, состоящий из неуравновешенного вала. Вращение дебалансного вала осуществляется за счет пневматического привода	Вибросейсмическое воздействие удельной мощностью 1,5-14,0 Вт/м ² увеличивает проницаемость угля в 3-8 раз	[6-8]
Способ формирования каналов проницаемости вокруг скважины под высоким давлением	Для создания стартовых каналов проницаемости в угольный пласт пробуривают дегазационные скважины и нагнетают воздух под абсолютным давлением более 0,6 МПа. В процессе формирования каналов проницаемости вокруг скважины осуществляют периодическое закрытие и открытие устья скважины	Техническим результатом является повышение дебита метана из скважины в 10-15 раз	[9, 10]
Способ дегазации отрабатываемого угольного пласта скважинами в породах кровли	Проводят бурение параллельных очистному забою скважин по породам кровли. При подходе очистного забоя к скважинам на расстояние менее 0,5 длины лавы начинается каптаж метана, интенсивно выделяющегося из пласта в следствии его частичной разгрузки от геостатического горного давления	Способ позволит эффективно дегазировать пласт за счет расположенных в породах кровли скважин	[11]

Способы и методы дегазации	Сущность способов и методов дегазации	Эффективность	Источники
Способ плазменно-импульсного воздействия	Ток высокого напряжения 3000–5000 В от батареи накопительных конденсаторов подается на электроды внутри скважины, которые замыкаются калиброванным проводником, что приводит к его взрыву и образованию плазмы в замкнутом пространстве	Способ позволит в кратчайшие сроки (1,5 - 2 года) провести дегазацию или довести содержание метана до безопасного уровня	[12]

Выводы. Таким образом, по результатам проведенного анализа традиционных способов и средств дегазации высокогазоносных угольных пластов, установлено, что эти способы и средства обеспечивают дегазацию в пределах 20-30%, так как газ метан находится в связанном состоянии и выделяется только из порового пространства. Основными направлениями повышения эффективности дегазации является искусственное воздействие на угольный пласт.

Для дальнейших исследований предлагаются варианты повышения эффективности дегазации с применением искусственных источников комплексного воздействия такие как: гидроразрыв и гидрорасчленение, вибросейсмическое воздействие с использованием скважинного вибратора, частичная разгрузка пласта и его непосредственной кровли впереди очистного забоя под воздействием циклического изменения опорного горного давления, плазменно-импульсное воздействие на угольный пласт с последующей гидрообработкой угольного пласта.

Список литературы

1. О допустимых нормах содержания взрывоопасных газов (метана) в шахте, угольных пластах и выработанном пространстве, при превышении которых дегазация является обязательной [Электронный ресурс]: постановление Правительства Российской Федерации от 25.04.2011г. №315. – Доступ из справ.-правовой системы «Техэксперт».
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по аэрологической безопасности угольных шахт» [Электронный ресурс]: приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 №506. – Режим доступа: www.pravo.gov.ru.
3. Сластунов С.В., Коликов К.С., Агарков А.В. Структура угольного пласта и особенности извлечения угольного метана // Газовая промышленность. – 2009. – №5 – (633). – С. 18.
4. Золотых С.С. Заблаговременная дегазация угольных пластов как фактор повышения безопасности на шахтах Кузбасса // Горная промышленность. – 2019. – №5. – С. 18-22.
5. Шахтные испытания усовершенствованной технологии подземной пластовой дегазации с использованием гидроразрыва / С.В. Сластунов [и др.]. // Уголь. – 2016. – № 11. – С.32-37.
6. Рыбалкин Л.А., Азаров А.В., Сердюков А.С. Дебалансный источник для вибрационного воздействия на массив горных пород и результаты его стендовых испытаний // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2016. – №3. – Т.2. – С.151-157.
7. Рыбалкин Л.А., Азаров А.В., Захаров Ю.С. Разработка скважинного виброисточника для интенсификации дегазации угольных пластов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2015. – №2. – С. 344-348.
8. Скважинный вибрационный источник для сейсмического воздействия на призабойную зону породного массива / С. В. Сердюков [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – №5. – С.186-204.
9. Каркашадзе Г.Г., Хаутиев А.М. Механизм повышения газопроницаемости угольного пласта в процессе циклической сорбционной усадки и разбухания угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – №4. – 2015. – С. 249-254.
10. Пат. 2539074 Российская Федерация № 2013144993. Способ предотвращения геодинамических явлений при подземной разработке газоносного угольного пласта; заявл. 09.10.2013; опубл. 10.01.2015. – Бюл. №1. – 10 с.
11. Шинкевич М.В., Родин Р.И. Способ дегазации отрабатываемого угольного пласта скважинами в породах кровли // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – №3. – С. 115-121.
12. Технология плазменно-импульсного воздействия – нетрадиционный подход к дегазации угольных пластов / Н.П. Агеев [и др.]. // Горная промышленность. – 2015. – №1 (119). – С. 28-33.

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ МЕТОД ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

к.э.н. Новоселов С.В.

г. Кемерово, Россия

Аннотация. В статье раскрыта актуальность разработки методик параметрической оценки надежности многофункциональных систем безопасности (МФСБ) угольных шахт. Параметрическая оценка надежности подсистем и МФСБ шахты в целом позволит их ранжировать, и делать альтернативный выбор как при проектировании, так и при приобретении. Интегральная оценка дает целостную оценку МФСБ для горного менеджмента и бизнеса.

Ключевые слова: междисциплинарный подход, интегральный метод, безопасность, надежность, риск, коэффициент готовности, авария, ущерб, интегральный показатель безопасности.

На угольных шахтах РФ применяются МФСБ различных производителей, вследствие чего возможен альтернативный выбор при их проектировании, в зависимости от технического задания и конкретных горно-геологических условий с учетом финансовых интересов собственников. Актуальность аспекта безопасности угольных шахт России и МФСБ раскрыта рядом российских ученых [1-8] и др. В современных условиях угольного рынка, для любой шахты, важна стабильная работа, которая обеспечивается безаварийным функционированием и полученной прибылью, что является результатом комплекса факторов производственно-хозяйственной деятельности, постоянно меняющих свои знаки и параметры в зависимости от конъюнктуры топливно-энергетического рынка.

В современных условиях глобализации и информатизации, решение стратегических производственных задач и проектов невозможно без междисциплинарного подхода. Промышленная и экономическая безопасность шахты неразрывно связаны, а мониторинг за безопасностью базируется на МФСБ. Уровень надежности МФСБ определяется техническими характеристиками системы конкретного производителя – фирмы изготовителя, качеством монтажа системы и обслуживания. Концептуальный подход оценки, создаваемой на шахте МФСБ, представлен следующими блоками критериев: технический, безопасность, экономический (рис. 1).

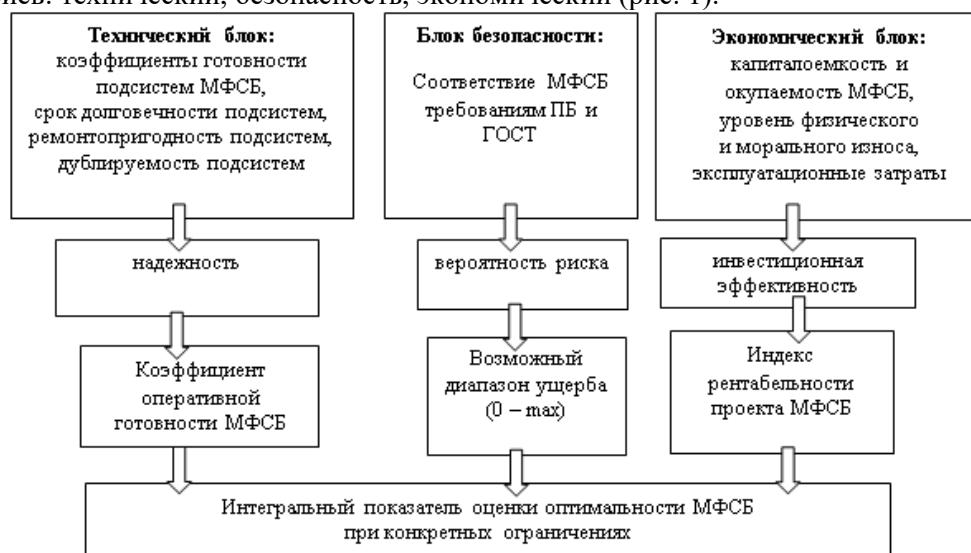


Рис. 1. Концептуальный подход оценки создаваемой на шахте МФСБ на основе интегрального показателя

Все элементы вышеприведенной концепции можно рассчитать по параметрам, что требует конкретной информации по шахте и заданным условиям точности проекта, и позволит разрабатывать МФСБ высокого уровня надежности и экономичности.

ГОСТ и нормативно не определяет параметров коэффициента оперативной надежности, но дает формулу ее нахождения. Однако, как определить вероятность безотказной работы, также не регламентировано. Если определять статистически – это прошлый опыт, на него ориентироваться

не совсем надежно, прогноз – это вероятное состояние будущего – тоже имеет лишь некоторую достоверность. Поэтому предлагается показатель надежности МФСБ шахты определять по среднему времени безотказной работы ее 13-ти подсистем, т.е. средней наработкой на отказ, которая также будет варьироваться в каждом конкретном случае (табл.1). В идеале показатель, оперативной готовности должен стремиться к 1, но уже по нормативным расчетам, согласно ГОСТ, средний показатель оперативной готовности МФСБ составляет порядка 0,728, что направляет оперативную работу персонала на повышение надежности системы на 27%.

При расчетах вероятности безопасной работы шахт согласно [9], вероятность категорической аварии на шахтах России колеблется от 0,0005 – 0,000076 или противоположное событие – безопасная работа находится в пределах 0,9995 – 0,999924 – это очень высокая вероятность, но аварии происходят. Поэтому очевиден вывод – аварии носят случайный характер с предыдущим накоплением рисков (предлагается развитие теории сатурации рисков) [10], которые при достижении критических параметров инициируют категорическую аварию (взрыв, пожар), с выводом из строя самой МФСБ шахты.

Следует уточнить, что интегральный показатель надежности – совместный показатель (единый), формируется всеми подсистемами, которые дополняют друг друга. В виду наличия необходимого количества рабочих и резервных объектов жизнеобеспечения шахты, с резервным электропитанием, при ведении эффективного обслуживания и планово-предупредительных ремонтов самой системы, резервных и дублирующих каналов связи, телеметрии, интегральная надежность безаварийной работы шахты стремится к 1, но мы понимаем, что МФСБ контролирует нормируемые угрозы и существует латентность угрозы горно-геологического фактора. Согласно [11] и [12], к МФСБ шахт ГОСТ предъявляются требования, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Требования к техническим средствам подсистем многофункциональных систем безопасности угольных шахт

Подсистема МФСБ	Средняя наработка на отказ	Среднее время восстановления работоспособного состояния (ремонтотпригодность)	Средний срок службы (норматив долговечности)	Расчетный коэффициент технической готовности	Расчетная вероятность безотказной работы в течении года	Расчетный коэффициент оперативной готовности
Подсистема контроля и управления стационарными вентиляционными установками, вентиляторами местного проветривания и газоотсасывающими установками	не менее 5000 ч	не более 10 ч	не менее 5 лет	0,998	0,571	0,749
Подсистема контроля и управления дегазационными установками и подземной дегазационной сетью	не менее 2500 ч	не более 6 ч.	не менее 5 лет	0,997	0,285	0,284
Подсистема аэрогазового контроля содержания кислорода, метана, оксида углерода, диоксида углерода и других вредных газов стационарными и индивидуальными средствами контроля	не менее 2500 ч	не более 3 ч	не менее 5 лет	0,999	0,285	0,285
Подсистема контроля пылевых отложений и управления пылеподавлением	не менее 10000 ч.	не более 6 ч	не менее 5 лет	0,999	1	0,999
Подсистема геофизического регионального и локального прогноза горных ударов и внезапных выбросов	не менее 10000 ч	не более 6 ч	не менее 4 лет	0,999	1	0,999
Подсистема деформационного контроля массива горных пород	не более 10000 ч	не менее 6 ч	не менее 4 лет	0,999	1	0,999

Подсистема МФСБ	Средняя наработка на отказ	Среднее время восстановления работоспособного состояния (ремонтотпригодность)	Средний срок службы (норматив долговечности)	Расчетный коэффициент технической готовности	Расчетная вероятность безотказной работы в течении года	Расчетный коэффициент оперативной готовности
Подсистема обнаружения и локализации ранних признаков эндогенных и экзогенных пожаров	не менее 5000 ч	не более 6 ч	не менее 5 лет	0,998	0,571	0,570
Подсистема контроля и управления пожарным водоснабжением	не менее 10000 ч	не более 30 мин.	не менее 5 лет	0,9999	1	0,999
Подсистема наблюдения и определения местоположения персонала в подземных выработках (позиционирование)	не менее 5000 ч	не более 6 ч	не менее 5 лет	0,998	0,571	0,570
Подсистема аварийного оповещения с возможностью передачи сообщений об аварии персоналу независимо от его местонахождения до, во время и после аварии	не менее 15000 ч	не более 30 мин	не менее 5 лет	0,9999	1	0,9999
Подсистема поиска и обнаружения людей, застигнутых аварией	не менее 5000 ч	не более 30 мин	не менее 5 лет	0,9999	1	0,9999
Подсистема оперативной, технологической, громкоговорящей и аварийной подземной связи	не менее 2500 ч	не более 6 ч	не менее 5 лет	0,997	0,285	0,284
Подсистема прямой телефонной и дублирующей ее альтернативной связи с аварийной горноспасательной службой, обслуживающей шахту	не менее 10000 ч	не более 30 мин	не менее 5 лет	0,9999	1	0,9999
Средние показатели оперативной готовности МФСБ				не менее 0,998	не менее 0,736	не менее 0,728

В виду того, что подсистемы МФСБ имеют высокий расчетный коэффициент технической готовности и частично дополняют друг друга, то создается эффект резервирования контролируемых объектов, тем самым приближая коэффициент оперативной готовности к 1.

Вывод. Развитие междисциплинарного подхода необходимо при исследовании сложных систем - МФСБ. Развитие методик интегральной параметрической оценки уровня надежности МФСБ угольных шахт будет способствовать минимизации аварийности в угольной промышленности. Предложенный в статье метод будет полезен для студентов специальности 20.04.01 – «Техносферная безопасность», а также аспирантов и соискателей специальности 05.26.01 – «Охрана труда» (угольная отрасль), 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность» (угольная отрасль).

Список литературы

1. Производственная травма и производственный травматизм: явление и сущность, случайность и закономерность / В.Б. Артемьев [и др.] // Уголь. – 2020. – №5. – С. 4 – 11.
2. Совершенствование системы управления промышленной безопасностью в угольной отрасли / Ю.Ю. Костюхин [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – №6. – С. 184 – 192.
3. О мерах радикального повышения взрывобезопасности при современных технологиях подземной добычи угля / Н.О. Каледина [и др.] // Горный журнал. – 2010. – №7. – С. 98 – 100.
4. Оценка проектных решений технологических систем угольных шахт с учетом риска / А.Е. Ютяев [и др.] // Уголь. – 2019. – №7(1120). – С.52– 57.

5. Харитонов В.Г., Ремезов А.В., Новоселов С.В. Теория и практика формирования и функционирования системы безопасности на шахтах нового поколения (оценка системы безопасности ОАО ш. «Заречная» на период до 2020 года). – Кемерово: КузГТУ, 2007. – 349 с.
6. Михайлова О.В., Полосухин А.С. Анализ современного состояния многофункциональных систем безопасности шахты // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: труды междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2011. – 429 с.
7. Бабенко А.Г. Теоретическое обоснование и методология повышения уровня охраны труда в угольных шахтах на основе риск-ориентированного подхода и многофункциональных систем безопасности: автореф. дис. докт. техн. наук. – СПб., 2018. – 40 с.
8. Новиков А.В., Паневников К.В., Писарев И.В. МФСБ – состояние дел (движение вперед или остановка!)? // Уголь. – 2019. – №6. – С. 41-45.
9. Новоселов С.В., Панихидников С.А. Травматизм в угольной промышленности России и прогнозирование риска аварий взрыва метана на опасном производственном объекте – очистном забое сверхкатегорной шахты // Уголь. – 2017. – № 9. – С. 32–35.
10. Панихидников С.А., Новоселов С.В. Инновации в обеспечении безопасности жизнедеятельности на угольных шахтах России: монография. – СПб: СПбГУТ, 2017. – 212 с.
11. ГОСТ Р 55154-2012 Оборудование горно-шахтное. Системы безопасности угольных шахт многофункциональные. Общие технические требования.
12. Правила безопасности в угольных шахтах (с изменениями на 8 августа 2017 года). Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору: приказ от 19 ноября 2013 года № 550.

УДК 666.7-12

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА ОБЪЕМНОГО ОКРАШИВАНИЯ ИЗ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

д.т.н. Столбоушкин А.Ю., Акт Д.В., Истерин Е.В., к.т.н. Фомина О.А.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Обоснована необходимость разработки новых технологических принципов объемного окрашивания керамического кирпича с матричной структурой при использовании минеральных отходов и попутных продуктов промышленного производства. Рассмотрены процессы гранулирования пресс-порошков по запатентованной технологии и получения стеновой керамики на действующем кирпичном заводе полусухого прессования. Представлена разработанная технологическая схема керамического кирпича из глины и марганцевого концентрата.

Ключевые слова: керамический кирпич, марганцевый концентрат, объемное окрашивание, матричная структура, технологическая схема.

На современном этапе в производстве декоративных керамических материалов лидирующие позиции по-прежнему занимает выпуск кирпича объемного окрашивания. Среди основных проблем этой технологии можно отметить неоднородную окраску материала, появление пятен, налета и разводов [1]. Также немаловажным фактором является дефицит качественных и недорогих отечественных керамических пигментов, а для работы с зарубежными концентрированными красками заводские линии должны быть полностью укомплектованы готовым автоматизированным оборудованием иностранных фирм HÄNDLE GmbH, Hans Lang Anlagenbau und Verfahrenstechnik GmbH & co. KG, Marcheluzzo Impianti SRL Unipersonale и др. [2]. С учетом текущего курса Российского рубля к доллару и евро ориентация на «такое производство» декоративного кирпича значительно повышает его себестоимость и делает малопривлекательным для реализации на внутреннем рынке страны.

В условиях сокращения запасов качественного глинистого сырья, переориентации на отечественные технологии и необходимости использования вторичных минеральных ресурсов и техногенных отходов актуальна разработка новых технологий керамического кирпича объемного окрашивания. Особенно важна организация крупнотоннажного производства стеновых материалов, сориентированного на местные сырьевые ресурсы, в промышленных регионах России с высоким уровнем ежегодного накопления техногенных отходов. Например, на трех обогатительных фабриках юга Кемеровской области – Кузбасса (Мысковская ЦОФ «Сибирь», Абашевская ЦОФ и Кузнецкая ЦОФ) пополнение отходов углеобогащения ежегодно насчитывает более 2,2 млн. тонн [3].

В свете решений заседания Государственного совета по вопросу об экологическом развитии Российской Федерации в интересах будущих поколений [4] строительно-технологическая утили-

зация минеральных промышленных отходов в производстве декоративной стеновой керамики при повышенном спросе строительного рынка на «цветной кирпич» обоснована и весьма своевременна.

Цель работы заключалась в разработке технологии керамического кирпича объемного окрашивания с матричной структурой на основе природного и техногенного сырья.

Объекты исследований. При разработке технологии керамического кирпича объемного окрашивания использовались местное глинистое сырье и побочные продукты промышленного производства. В качестве основного компонента (рис. 1) для формирования гранул применялся низкодисперсный, красножгущийся новокузнецкий суглинок с высоким содержанием красящих оксидов. В роли красящего компонента (рис. 1) была выбрана попутная продукция производства ферросиликомарганца ООО «Западно-Сибирский электрометаллургический завод» (марганцевый концентрат МК-30) с общим содержанием оксидов марганца около 30 % по массе.

Результаты и обсуждение. Для решения обозначенных проблем авторами была разработана модель формирования стеновой керамики объемного окрашивания с матричной структурой, которая обеспечивает усиление окраски керамического композита за счет концентрации пигмента в оболочке вокруг гранул даже при малых содержаниях красящих оксидов [5].

На рис. 1 представлены общие технологические принципы получения декоративного кирпича с матричной структурой. На практике их реализация предполагает формирование рациональной структуры композиционного материала, состоящей из системы ядер, объединенных единым каркасом-матрицей. Для этого обязательным является грануляция основного компонента шихты, нанесение на поверхность образованных гранул оболочки на основе красящего компонента и последующее полусухое прессование сырца из загранулированного порошка.

Для получения гранул преимущественного размера 1-3 мм основной сырьевой компонент засыпается в чашу турболопастного смесителя-гранулятора периодического действия и агрегируется при одновременном увлажнении капиллярным распылением воды. После завершения процесса гранулообразования в чашу подается тонкомолотая красящая добавка для формирования окрашивающей оболочки по поверхности гранул. Фактическая влажность опудренного гранулята в зависимости от вида основного компонента шихты составляет порядка 10-12 %.



Рис. 1. Общие технологические принципы получения декоративного кирпича с матричной структурой

В соответствии с представленной схемой формирования стеновой керамики объемного окрашивания была разработана технология декоративного керамического кирпича с матричной структурой, включающая семь основных этапов.

1) Добыча глинистой породы в карьере экскаватором, ее доставка автосамосвалами на завод и хранение в глинозапаснике для обеспечения подсушки, вылеживания, а также защиты от попадания атмосферных осадков и промерзания в зимний период.

2) Первичная переработка глинистого сырья, включая предварительное выделение каменистых включений и дробление на валковых дробилках СМК-1198 и СМ-1096.

3) Вторичная переработка глины, включая сушку, помол в измельчительно-сепарационной установке, доставку пневмотранспортом и хранение в силосах запаса.

4) Доставка на завод, сушка в барабанной сушилке и размещение марганцевого концентрата в силосах запаса.

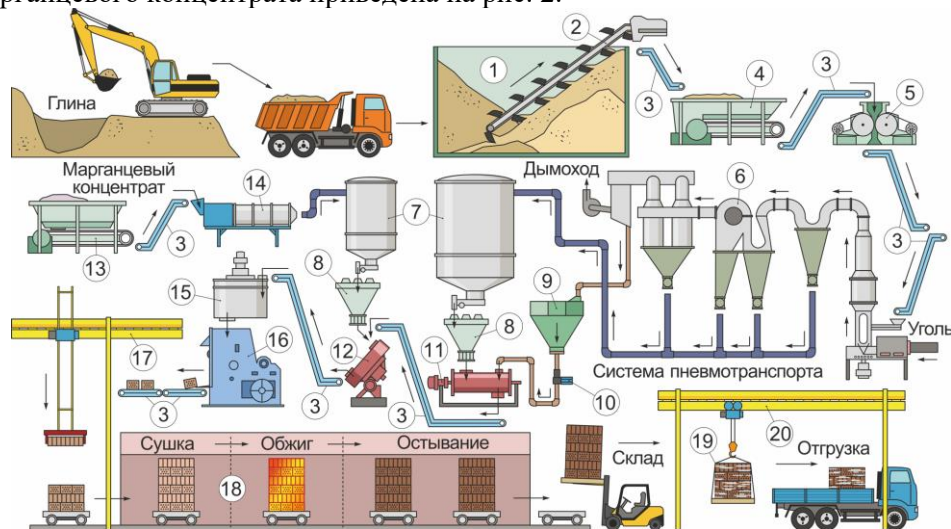
5) Получение пресс-порошка путем дозированной весовой подачи, увлажнения и агрегации глины в турболопастных смесителях-грануляторах периодического действия ТЛ-150 с дальнейшим

опудриванием гранул марганцевым концентратом в тарельчатых грануляторах Т-300 до получения гранул размером 1-3 мм и фактической влажностью 11-12 %.

6) Полусухое прессование кирпича-сырца формата 1НФ на прессе СМК-491 при удельном давлении 14-16 МПа и укладка автоматом-садчиком в транспортные пакеты.

7) Сушка и обжиг керамического кирпича в туннельной печи при максимальной температуре 1000 °С.

Технологическая схема производства керамического кирпича объемного окрашивания из глины и марганцевого концентрата приведена на рис. 2.



- 1 – глинозапасник; 2 – многоковшовый экскаватор; 3 – ленточный конвейер;
 4 – ящичный питатель; 5 – валковая дробилка; 6 – измельчительно-сушильная установка;
 7 – силос запаса; 8 – весовой дозатор; 9 – бак-накопитель шликера; 10 – насос-дозатор;
 11 – турболопастной смеситель-гранулятор; 12 – тарельчатый гранулятор;
 13 – бункер с питателем; 14 – барабанная сушилка; 15 – мешалка-питатель; 16 – пресс;
 17 – автомат-садчик; 18 – туннельная печь-сушилка; 19 – пакет кирпича в пленке;
 20 – мостовой кран

Рис. 2. Технологическая схема производства керамического кирпича объемного окрашивания с матричной структурой из глины и марганцевого концентрата

Новокузнецкий суглинок (основной сырьевой компонент, рис. 1) неравномерной влажности (до 15 %) добывается в карьере экскаватором в период с мая по октябрь и доставляется на завод автосамосвалами, где хранится в глинозапаснике для обеспечения его подсушки, вылеживания, а также защиты от попадания атмосферных осадков и промерзания в зимний период. Резерв сырья в глинозапаснике организуется с учетом бесперебойной работы предприятия в течение 30-45 дней.

Марганцевая пыль газоочистки (красящий сырьевой компонент, рис. 1) влажностью до 4 % после доставки автомобильным грузовым транспортом на завод подвергается сушке в барабанной сушилке «Шторм-2» (поз. 14) и размещается в силосах запаса (поз. 7).

Глинистое сырье из глинозапасника забирается многоковшовым экскаватором (поз. 2) и через ленточный конвейер (поз. 3) попадает в ящичный питатель СМК-213 (поз. 4). Далее суглинок подвергается предварительному выделению камней и дроблению на валковых дробилках СМК-1198 и СМК-1096 (поз. 5), а затем сушке и помолу в измельчительно-сепарационной установке УСП-С-04.55 (поз. 6) для получения порошка, который пневмотранспортом направляется в силосы запаса (поз. 7). Из силосов запаса новокузнецкий суглинок через весовые дозаторы (поз. 8) попеременно подается в два турболопастных смесителя-гранулятора периодического действия ТЛ-150 (поз. 11), где проводится увлажнение и грануляция полифракционного пресс-порошка преимущественного размера 1-3 мм.

Полученный пресс-порошок влажностью 12-13 % ленточным конвейером попеременно подается в два тарельчатых гранулятора Т-300 (поз. 12). Одновременно из силосов запаса через весовые дозаторы (поз. 8) во вращающуюся тарель засыпается марганцевая пыль газоочистки. В результате происходит покрытие гранул из глины красящей техногенной добавкой. Опудренный марганецсодержащими отходами гранулят ленточным конвейером (поз. 3) подается в мешалку-

питатель СМК-282 (поз. 15), установленную над прессом СМК-491 (поз. 16). Фактическая влажность приготовленного пресс-порошка составляет 11-12 %.

На прессах полусухого прессования кирпича СМК-491 (поз. 16) при удельном давлении 14-16 МПа формуются сырцовые изделия размером 250×120×65 мм (формат 1НФ) со сквозными пустотами, которые укладывается автоматом-садчиком ВСКО-25 (поз. 17) в транспортные пакеты с габаритными размерами 750×750×1720 мм.

Пакеты с кирпичом-сырцом автоматическим захватом устанавливаются в туннельную печь (поз. 18), где последовательно проводятся сушка и обжиг изделий при максимальной температуре 1000 °С. Процесс обжига осуществляется при помощи автоматизированной системы пылевидного сжигания топлива УСКР-7,5 с пылеугольными горелками инжекторного типа «Powers» ГПГК 26.

Паллеты с обожженным кирпичом из туннельной печи подаются на транспортную вагонетку, с помощью которой доставляются к месту автоматического формирования готовых пакетов с обвязкой стальной лентой и упаковкой в термоусадочную пленку. Упакованные поддоны доставляются виловым погрузчиком на склад готовой продукции, где хранятся до момента реализации.

В проекте технологической линии по производству керамического кирпича объемного окрашивания используется как серийное, так и нестандартное (уникальное) оборудование.

Для удовлетворения потребности проектируемого предприятия в текущем и планово-предупредительном ремонтах на территории производственного корпуса предусмотрена слесарно-механическая мастерская со следующим оборудованием: фрезерный универсальный станок ОММ-67; токарно-винторезный станок 1К62; поперечно-строгальный станок 7305 ТД-1; вертикально-сверлильный станок РК050 А/В; станок для обдирочно-шлифовальных работ ОШ-1; ленточно-пильный станок WEY TRAIN UE-712; сварочный трансформатор ТДМ-УО2У2; верстаки слесарные и др. Для транспортировки тяжелых деталей в мастерской запроектирован электрический подвесной кран грузоподъемностью 2 т. Проведение капитального и гарантийного ремонтов оборудования предполагается в специализированных мастерских вне завода.

Контроль качества изготавливаемой продукции проводится специализированной лабораторией при заводе, которая также располагается в производственном корпусе. Для проверки соответствия изделий установленным требованиям в лаборатории предусмотрено следующее оборудование: машина для испытания кирпича на сжатие ИП6012-1000; машина для испытания кирпича на изгиб ИП6010-100; прибор для определения удельной поверхности порошков ПСХ-4; электропечь сопротивления СНОЛ-6/11(В); шкаф сушильный электрический СНОЛ-67/350; бегуны лабораторные 018М2; холодильно-дождевальная установка ХДУ-02; весы лабораторные электронные; морозильная установка КМ-0,13.

Проверка разработанной технологии стеновой керамики объемного окрашивания с матричной структурой проведена на практически единственном на настоящий момент действующем в Сибирском регионе заводе полусухого прессования ООО «Бердский кирпичный завод» (Новосибирская обл.). В ходе опытно-промышленных испытаний использовалось глинистое сырье, прошедшее заводскую массоподготовку по сушильно-помольной технологии. На базе лабораторного комплекса строительных материалов Сибирского государственного индустриального университета запатентованным способом [6] был наработан гранулированный пресс-порошок из глинистого сырья и марганцевого концентрата. Из опудренного гранулята на прессах СМ-1085Б при средних показаниях амперметра 80 А был отпрессован кирпич-сырец. Сушка и обжиг кирпича осуществлялись в туннельной печи в соответствии с принятым на заводе технологическим регламентом по 42-часовому режиму при максимальной температуре 1000 °С.

Кирпичи после обжига имели нормальный внешний вид без видимых дефектов окрашивания, обжиговых трещин, вздутий, искривлений и сколов. Изделия из гранулированной шихты с марганецсодержащей техногенной добавкой имели коричневый цвет. В отдельных случаях наблюдалось незначительное изменение оттенка цвета в сторону красных тонов, связанное с местоположением кирпича в садке и возможным восстановлением оксидов железа при обжиге [7].

Определение физико-механических свойств полученных керамических изделий с матричной структурой проводилось в аккредитованной заводской лаборатории по ГОСТ 7025-91. Кирпичи имеют прочность при сжатии и изгибе 15,0 и 2,1 МПа соответственно, среднюю плотность около 1800 кг/м³, водопоглощение не более 12,5 %, морозостойкость не менее 50 циклов и соответствуют марке М150 по ГОСТ 530-2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия».

Выводы. По разработанной технологии керамического кирпича объемного окрашивания с матричной структурой на основе природного и техногенного сырья получен декоративный кера-

мический стеновой материал, имеющий структурную окраску коричневого цвета. Высокая прочность и морозостойкость кирпича обуславливают его применение для облицовки наружных стен зданий.

Реализация разработанной технологии позволит использовать марганецсодержащие попутные продукты для объемного окрашивания стеновой керамики и обеспечить выпуск недорогого строительного материала, востребованного на современном отечественном рынке.

Список литературы

1. Ceramic pigments and dyes beyond the inkjet revolution: From technological requirements to constraints in colorant design / C. Molinari [et al.] // *Ceramics International*. – 2020. – Vol. 46. – Iss. 14. – P. 21839-21872.
2. Development of an energy-saving technology for sintering of bricks from high-siliceous clay by the plastic molding method / M.F. Nicolas [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 242.
3. Панова В.Ф. Строительные материалы на основе отходов промышленных предприятий Кузбасса: учеб. пособие / В. Ф. Панова. – Новокузнецк: СибГИУ, 2005. – 182 с.
4. Заседание Государственного совета по вопросу об экологическом развитии Российской Федерации в интересах будущих поколений. 27 декабря 2016 г., Москва, Кремль [Электронный ресурс] URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/53602>.
5. Столбоушкин А.Ю., Акст Д.В., Фомина О.А. Разработка модели формирования цвета и распределения красящего компонента при обжиге керамики каркасно-окрашенной структуры // *Строительные материалы*. – 2020. – № 8. – С. 38-46.
6. Патент 2701657 РФ. Способ получения сырьевой смеси для декоративной строительной керамики / Акст Д.В., Столбоушкин А.Ю., Фомина О.А.; заявл. 19.12.2018; опубл. 30.09.2019, Бюл. № 28.
7. Научные основы управления цветом лицевого кирпича на заводе «Алексеевская керамика» / А.М. Салахов [и др.] // *Строительные материалы*. – 2017. – № 3. – С. 90-95.

УДК 622.85:622.271.45

РЕЗУЛЬТАТЫ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ЭКОЛОГИИ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ НА БОГОСЛОВСКОМ УГОЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

^{1,2} д.т.н. Зеньков И.В.

1 - Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия

2 - Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты оценки экологического состояния земель, нарушенных при разработке двух участков Богословского угольного месторождения в Свердловской области. В ходе исследований установлено, что экологически приемлемое восстановление растительного покрова на территории породных отвалов произошло как за счет работ по рекультивации, так и за счет природных процессов его самовосстановления.

Ключевые слова: Богословское угольное месторождение, Средний Урал, угольные разрезы, породные отвалы, нарушенные земли, растительные экосистемы дистанционное зондирование Земли.

Введение. В Российской Федерации Богословское бурого угольное месторождение угля расположено в Свердловской области в 307 км на север от областного центра г. Екатеринбурга, в 100 м на запад и 4,8 км на юг от г. Карпинска. Разработка месторождения с использованием ручного труда началась с 1911 г., а начало масштабным горным работам было положено в 1935 г. Два крупных участка месторождения разрабатывались угольными разрезами «Карпинский 1» и «Карпинский 2». Последние запасы угля были отработаны в 2004 г., после чего добыча угля открытым способом была полностью остановлена из-за невозможности перекрыть затраты на добычу угля доходами от его реализации (рис. 1).

За многолетний период ведения горных работ на этом месторождении образован горнопромышленный ландшафт в виде двух карьеров, полностью заполненных водой (1, 2), и четырех внешних породных отвалов (3 - 6). Горно-геологическое строение участков месторождения обусловило разноску бортов карьеров в ходе добычи угля и отсыпку вскрышных пород во внешние отвалы. Добыча угля осуществлялась более 90 лет, поэтому на объектах горнопромышленного ландшафта целесообразно провести оценку экологического состояния нарушенных земель.



Рис. 1. Фрагмент космоснимка с объектами горнопромышленного ландшафта на Богословском угольном месторождении (июль 2020 г.)

Результаты исследования экологического состояния нарушенных земель. Вопросы, касающиеся оценки экологии земель, нарушенных открытыми горными работами, всегда волнуют общественное сознание. Поэтому, их решению в нашей стране и за рубежом в последние годы уделяется самое пристальное внимание. Оценке восстановления экологии на территориях с объектами горнодобывающей промышленности посвящено множество работ, в т. ч. представленных в [1-9]. Но, несмотря на большой объем научных исследований, по-прежнему отсутствуют работы, посвященные оценке экологии земель, нарушенных в ходе добычи угля в Свердловской области.

Как показывает обзор космоснимков высокого разрешения, на объектах горнопромышленного ландшафта, образованного на исследуемом месторождении, в разное время были остановлены открытые горные работы, и вследствие этого, на них по-разному сформировалась экосистема – в карьерах сформированы техногенные водоемы, на поверхности породных отвалов произошло расселение всех ярусов растительного покрова. Горнодобывающими предприятиями проведен комплекс работ по рекультивации нарушенных земель для их использования в сельском хозяйстве и по лесной рекультивации. На момент оценки общая площадь нарушенных земель составляла 3838 га.

Получить картину экологического состояния территорий с открытыми горными работами позволяет оценка, основанная на использовании космических технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Космические снимки исследуемой территории, размещены на официальных сайтах: Global Land Cover Facility (GLCF); United States Geological Survey (USGS). В ходе обработки космоснимков выполнено их дешифрирование с выделением границ классов горнопромышленного ландшафта. В результате выделено восемь классов – участки с полным отсутствием растительного покрова, техногенные водоемы и участки с шестью видами хорошо развитого растительного покрова.

В настоящее время площадь зеркала двух водоемов составляет 1074 га. Общая площадь внешних отвалов равна 2764 га. Структура растительного покрова, его отсутствие, наличие техногенных водоемов, рекультивированных участков на внешних породных отвалах представлена на рис. 2. Количественные показатели классов ландшафта определены с учетом трендов в изменении их площадей на основе дистанционного мониторинга.

Так, структура устойчивой водной экосистемы на территории горнопромышленного ландшафта, образованном в результате отработки запасов угля на двух участках месторождения, представлена двумя водоемами (фигуры 1 и 2) площадью 858 и 216 га соответственно. В ходе исследований было установлено, что поверхность внешних отвалов практически на 100 % покрыта растительностью. Наше внимание было обращено на большие площади лиственного леса (береза, осина) 274,3 га, появившегося на породных отвалах в результате ветрового переноса семян, снабженных крыльчаткой. Большие площади участков под молодым смешанным лесом свидетельствуют о высокой эффективности природных процессов, протекающих в условиях Среднего Урала. Этот класс растительного покрова имеет один из высоких показателей на уровне 331,9 га.

Площадь участков с хорошо развитым хвойным лесом, сформировавшимся в результате работ по лесной рекультивации, составляет 1354,6 га. Участки с травянистой растительностью и с травянисто-кустарниковой растительностью находятся на площади 98,2 и 270,9 га. На внешних

породных отвалах также проведены работы по рекультивации земель для использования в сельском хозяйстве на площади 357,9 га. В настоящее время на рекультивированных участках предприятия агропромышленного комплекса выполняют сельскохозяйственные работы.

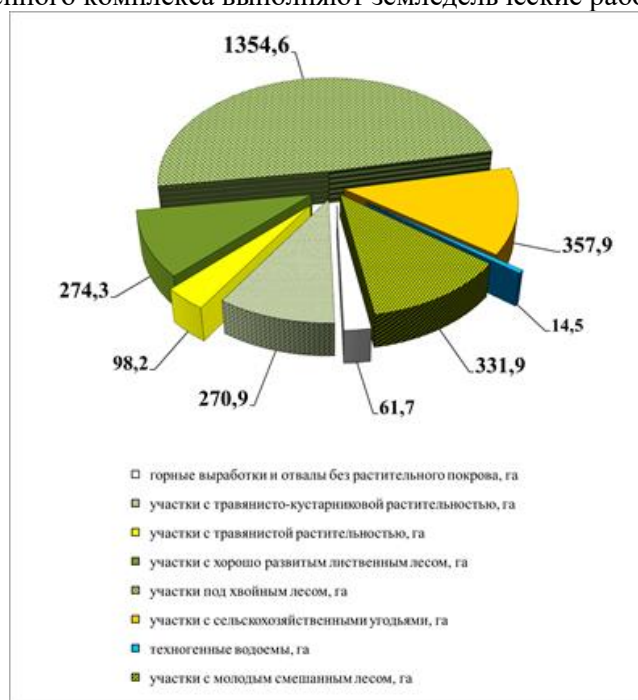


Рис. 2. Структура нарушенных земель и восстановленной экосистемы на поверхности внешних отвалов, отсыпанных в ходе разработки Богословского бурогоугольного месторождения в 2020 г.

В целом, коэффициент восстановления растительной экосистемы на внешних отвалах, отсыпанных при разработке этого месторождения, находится на очень высоком уровне 0,9775.

Вывод. В ходе исследований, проведенных с использованием информационных ресурсов дистанционного зондирования, на территории объектов горнопромышленного ландшафта, сформированного в ходе добычи угля открытым способом на Богословском месторождении, выявлено высокоэффективное восстановление экологического баланса при формировании растительной экосистемы. Внешние отвалы можно считать индикаторными с позиции восстановления на них растительного покрова в виде хорошо развитых древостоя и кустарников. Как показали результаты исследования, проведение работ по рекультивации породных отвалов позитивно сказалось на их экологическом состоянии, а также способствовало сдвигу равновесия экобаланса в сторону улучшения его показателей на территории природного ландшафта, прилегающего к участкам нарушенных земель.

Список литературы

1. Результаты дистанционного мониторинга экологического состояния нарушенных земель разрезом «Коркинский» / И.В. Зеньков [и др.] // Уголь. – 2018. – № 9. – С. 119-121.
2. Жарко В.О., Бартаев С.А., Егоров В.А. Исследование возможностей оценки запасов древесины в лесах Приморского края по данным спутниковой системы Proba-V // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15. – № 1. – С. 157-168.
3. Автоматическое распознавание используемых пахотных земель на основе сезонных временных серий восстановленных изображений Landsat / Д.Е. Плотников [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15. – № 2. – С. 112-127.
4. Крутских Н.В., Кравченко И.Ю. Использование космоснимков Landsat для геоэкологического мониторинга урбанизированных территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15. – № 2. – С. 159-168.
5. Щадов И.М., Франк Е.Я. О результатах и перспективах использования ресурсов ДЗЗ в решении прикладных задач угледобывающей отрасли в формате мировой экономики // Уголь. – 2018. – № 7. – С. 58-61.
6. The use of remote sensing to develop a site history for restoration planning in an arid landscape / M. Meshal [et al.] // Restoration Ecology. – 2016. – V. 24(1). – P. 91-99.
7. Christa L. Zweig and Susan Newman. Using landscape context to map invasive species with medium-resolution satellite imagery // Restoration Ecology. – 2015. – V. 23(5). – P. 524-530.

8. A GIS-based decision-making approach for prioritizing seabird management following predator eradication / B. Stephanie [et al.] // Restoration Ecology. – 2015. – V. 23(5). – P. 580-587.

9. Remote sensing for restoration planning: how the big picture can inform stakeholders / Susan Cordell [and etc.] // Restoration Ecology. – 2017. – V. 25(2). – P. 147-154.

УДК 622.85:622.271.45

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ НА ЮЖНОМ УРАЛЕ НА ОТРАБОТАННЫХ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ

^{1,2}д.т.н. Зеньков И.В.

1 - Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия

2 - Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты оценки экологического состояния земель, нарушенных при разработке Еманжелинского угольного месторождения в Челябинской области. В ходе исследований установлено, что экологически приемлемое восстановление растительного покрова на территории горнопромышленного ландшафта произошло исключительно за счет природных процессов его самовосстановления.

Ключевые слова: Еманжелинское угольное месторождение, Южный Урал, угольные разрезы, породные отвалы, нарушенные земли, растительные экосистемы, дистанционное зондирование Земли.

Введение. В Российской Федерации Еманжелинское угольное месторождение, запасы которого частично отработаны открытым способом, находится в Челябинской области в 27-51 км на юг от областного центра г. Челябинска, вблизи г. Еманжелинска и пос. Красногорский (рис. 1). Комбинированная разработка месторождения началась в 1931 г., а начало масштабным горным работам было положено в послевоенный период. Месторождение разрабатывалось пятью карьерами с условной нумерацией № 1-5. Последние запасы угля были отработаны в период с 1997 по 2002 гг., после чего добыча угля открытым способом была полностью остановлена из-за невозможности перекрыть затраты на добычу угля доходами от его реализации.

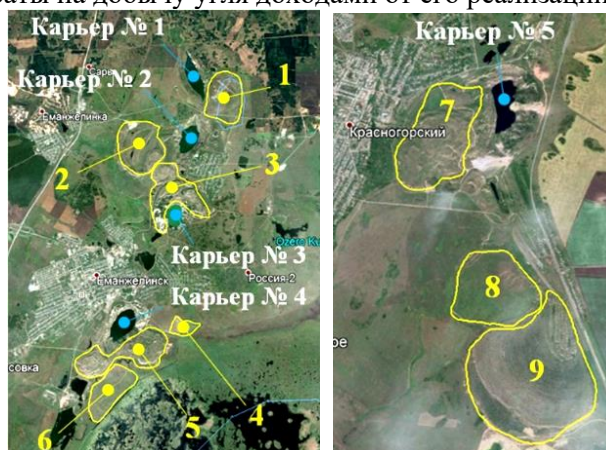


Рис. 1. Фрагменты космоснимков с объектами горнопромышленного ландшафта на Еманжелинском угольном месторождении (2020 г.)

За долготелный период ведения горных работ на этом месторождении образован горнопромышленный ландшафт в виде пяти карьеров, полностью (карьер № 1) или частично (карьеры № 2-5) заполненных водой, и девяти внешних породных отвалов (1-9). Горно-геологическое строение угленасыщенных участков месторождения обусловило разноску бортов карьеров в ходе добычи угля и размещение вскрышных пород во внешних отвалах. Добыча угля на разрозненных участках месторождения осуществлялась более 60 лет и была прекращена 20 лет назад, поэтому на территории сформированного горнопромышленного ландшафта проведение исследования самовосстановления экосистемы является актуальной научной задачей.

Результаты исследования экологического состояния нарушенных земель. Как известно, территории природных ландшафтов, на которых производятся горные работы, существенно трансформируются. Уровни таких трансформаций и последующее восстановление экосистем на землях, нарушенных деятельностью горнодобывающих предприятий, всегда находятся в поле зрения экологов как в нашей стране, так и за рубежом. Оценке восстановления экологии на территориях с техногенными нарушениями со стороны горнодобывающей промышленности посвящено множество работ, в т. ч. представленных в [1-9]. Вместе с тем, как показал анализ научных исследований, в специальной литературе отсутствуют работы по оценке экологического состояния горнопромышленных ландшафтов, образованных в ходе разработки Еманжелинского угольного месторождения в Челябинской области.

Обзор архива космоснимков высокого разрешения высветил временные периоды производства и даты окончания открытых горных работ в карьерах на исследуемом угольном месторождении. Горные работы в карьере № 1 были остановлены в середине 1970-х гг. В настоящее время карьерная выемка полностью заполнена водой, а в его северо-восточном секторе более 15 лет функционирует рыбное хозяйство. В юго-восточном секторе береговой линии размещена база отдыха из пяти домиков. В 420 м от них находится здание аэроклуба, в собственности которого находятся два одномоторных самолета. На северо-восток от здания обустроены две взаимопересекающиеся взлетно-посадочные полосы протяженностью 700 м каждая. Все недвижимые объекты аэроклуба расположены на гидроотвале, намыв которого прекращен в начале 2000-х гг. (объект 1 на рис. 1). Это направление использования земель, нарушенных в ходе открытой угледобычи, является, пожалуй, единственным и уникальным на территории России, хотя подобные решения в более масштабном формате реализованы в восточных регионах Германии на отработанных угольных месторождениях.

Горные работы в других карьерах окончены в период с 1997 по 2002 гг. К настоящему времени в них продолжается формирование техногенных водоемов. В этот же период закончена отсыпка внешних породных отвалов. Отметим, что породные гидроотвалы 1, 4, 6 и 8 сформированы в ходе гидромониторной разработки верхнего уступа карьеров. Отвалы 2 и 9 отсыпаны с использованием экскаваторов ЭКГ-5 и железнодорожного транспорта на вывозке вскрышных пород из карьеров. Остальные отвалы отсыпаны с применением карьерных автосамосвалов. На момент окончания горных работ общая площадь всех нарушенных земель составила 1832,9 га.

В исследовании формирования экосистемы на территории горнопромышленного ландшафта были использованы результаты дистанционного мониторинга, размещенные на официальных сайтах: Global Land Cover Facility (GLCF); United States Geological Survey (USGS).

Общая площадь карьерных выемок равна 513,1 га. В них находятся пять водоемов, зеркало которых составляет 181,5 га. Общая площадь внешних отвалов равна 1319,8 га. На их поверхности два локальных водоема занимают 0,7 га. Структура горнопромышленного ландшафта с шестью классами, установленными по результатам космической съемки, представлена на рис. 2.

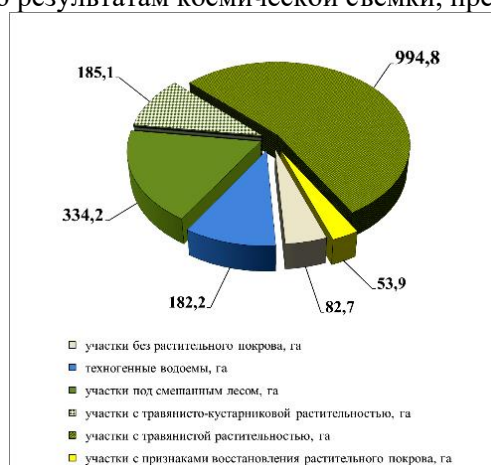


Рис. 2. Структура нарушенных земель и восстановленной экосистемы на территории горнопромышленного ландшафта, образованного в ходе разработки Еманжелинского угольного месторождения в 2020 г.

Участки без растительного покрова общей площадью 60 га находятся на нерабочих бортах в отработанных карьерах. Аналогичные участки на породных отвалах занимают площадь 22,7 га. Значительная часть (38 %) травянистой растительности находится на поверхности гидроотвалов,

на 100 % покрытых растительным покровом. В ходе исследований также было установлено, что на нерабочих бортах карьеров и на поверхности внешних отвалов сформированы многочисленные участки с хорошо развитым смешанным лесом. Этот вид растительного покрова занимает 18,2 % от общей площади нарушенных земель. Смешанный лес (береза, сосна и др.) появился на объектах горнопромышленного ландшафта (карьеры и отвалы) в результате ветрового переноса семян, снабженных крыльчаткой, с лесов, находящихся в естественном природном состоянии вблизи территорий с остановленными горными работами. Весьма позитивным обстоятельством считаем формирование кустарниковой растительности, служащей своеобразной нишей для обитания многочисленных пернатых и мелких животных.

В целом, коэффициент восстановления растительной экосистемы, рассчитанный исходя из площади «сухой» части нарушенных земель, находится на очень высоком уровне 0,95.

Вывод. Результаты дистанционного мониторинга исследуемой территории горнопромышленного ландшафта на Еманжелинском угольном месторождении высветили высокую эффективность природных процессов восстановления экосистемы. По нашей оценке, этому способствуют природно-климатические характеристики географической зоны, на территории которой находятся участки отработанного месторождения. Внешние породные отвалы, несмотря на незначительный период времени, прошедший после окончания их отсыпки, можно считать индикаторными с позиции восстановления на них всех видов растительного покрова.

Список литературы

1. Сафронова О.С., Ламанова Т.Г., Шерemet Н.В. Результаты исследования естественного восстановления растительного покрова на вскрышных отвалах, возникших в 1990-е годы в Республике Хакасия // Уголь. – 2018. – № 7. – С. 68-77.
2. Харионовский А.А., Франк Е.Я. Обоснование горнотехнической рекультивации в целях левосстановления на Крутокачинском щебеночном карьере // Уголь. – 2018. – № 4. – С. 75-77.
3. Remote sensing for restoration planning: how the big picture can inform stakeholders / Susan Cordell [et al.] // Restoration Ecology. – 2017. – V. 25(2). – P. 147-154.
4. Plant response to biochar, compost, and mycorrhizal fungal amendments in post-mine sandpits / Brian M. Ohsowski [et al.] // Restoration Ecology. – 2018. – V. 26. – P. 63-72.
5. DNA metabarcoding - new approach to fauna monitoring in mine site restoration / Kristen Fernandes [et al.] // Restoration Ecology. – 2018. – V. 26. – I. 6. – P. 1098-1107.
6. Jessie Lanterman, Karen Goodell. Bumble bee colony growth and reproduction on reclaimed surface coal mines // Restoration Ecology. – 2018. – V. 26. – P. 183-194.
7. Spatially balanced sampling and ground-level imagery for vegetation monitoring on reclaimed well pads / Michael F. Curran [et al.] // Restoration Ecology. – 2019. – V. 27. – P. 974-980.
8. Amalesh Dhar, Philip G. Comeau, Robert Vassov. Effects of cover soil stockpiling on plant community development following reclamation of oil sands sites in Alberta // Restoration Ecology. – 2019. – V. 27. – P. 352-360.
9. Ecohydrological gradients and their restoration on the periphery of extracted peatlands / Stéphanie Lefebvre-Ruel [et al.] // Restoration Ecology. – 2019. – V. 27. – P. 782-792.
10. <https://www.google.com.earth>

УДК 622.85:622.271.45

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ В ОЦЕНКЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ЭКОЛОГИИ НА ТЕРРИТОРИЯХ ОТРАБОТАННЫХ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА СРЕДНЕМ И ЮЖНОМ УРАЛЕ

^{1,2}Д.Т.Н. Зеньков И.В.

- 1 - Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия
- 2 - Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты оценки экологического состояния земель, нарушенных при разработке открытым способом четырех угольных месторождений в Свердловской и Челябинской области. В ходе исследований установлено, что экологически приемлемое восстановление растительного покрова на территории нарушенных земель происходит за счет проведения работ по рекультивации и природных процессов его самовосстановления.

Ключевые слова: угольные месторождения Урала, открытые горные работы, угольные разрезы, породные отвалы, нарушенные земли, растительные и водные экосистемы, дистанционное зондирование Земли.

Введение. На территории Урала добыча угля открытым способом производилась на четырех месторождениях – Волчанском, Богословском, Коркинском и Еманжелинском – в Свердловской и Челябинской области. Уголь использовали в регионах при выработке тепловой и электрической энергии, а также на промышленных предприятиях металлургии и химической отрасли. Масштабная разработка месторождений производилась в период после окончания Гражданской войны в бывшем СССР до конца 2000-х гг. При этом суммарный объем добычи угля находился на уровне 18 млн т в год. Горно-геологическое строение месторождений (в основном углы залегания угольных пластов) предопределило ведение горных работ с постоянной углубкой и размещением вскрышных пород во внешних отвалах. В период с 1946 по 2000 г. на месторождениях работали 9 карьеров. В последние 17 лет добыча угля постепенно была прекращена, поскольку глубина двух последних действующих карьеров превысила 300 м и более (на Волчанском и Коркинском месторождениях).

В настоящее время общая картина горнопромышленного ландшафта представлена 10-ю карьерами и 18-ю внешними породными отвалами. Четыре карьера находятся на территории Свердловской области, а остальные – южнее г. Челябинска. Отработанные месторождения расположены в виде прерывающейся цепи и находятся в прямоугольнике с границами, проходящими по 59° 56' 48" с. и 54° 33' 36" с. и 59° 51' 36" в. и 61° 26' 44" в.

Добыча угля на разрозненных месторождениях в разных природно-климатических зонах осуществлялась более 70 лет и была прекращена в разное время в начале XXI в., поэтому получение целостной картины экологического состояния нарушенных земель на территории отработанных угольных месторождений общей площадью более 10000 га, является актуальной научной задачей.

Результаты исследования экологического состояния нарушенных земель. Как известно, территории природных ландшафтов, которые подвергаются воздействию открытых горных работ, существенно трансформируются с нарушением экологического баланса. Уровни таких трансформаций и последующее восстановление экосистем на землях, нарушенных деятельностью горнодобывающих предприятий, всегда находятся в поле зрения экологов как в нашей стране, так и за рубежом. Изучению экологического состояния территорий, нарушенных в ходе деятельности горнодобывающих предприятий, посвящено множество работ, небольшая часть которых представлена в [1-9]. Вместе с тем, как показал анализ научных работ, в специальной литературе отсутствуют исследования по оценке экологического состояния горнопромышленных ландшафтов, образованных в ходе разработки всех угольных месторождений в регионах Урала.

Обзор архива космоснимков высокого разрешения высветил основные направления восстановления экосистем (водная и растительная) на каждом исследуемом месторождении. К настоящему времени экосистемы частично сформированы за счет выполнения работ по четырем направлениям рекультивации земель: сельскохозяйственное, лесохозяйственное, водохозяйственное и рекреационное. В четырех карьерах: на локальном участке Волчанского месторождения, в двух карьерах на Богословском и в одном – на Еманжелинском месторождении угля завершено формирование водоемов. Площадь водных зеркал в карьерах не меняется на протяжении последних 10 лет. Это обстоятельство говорит о завершении формирования водной экосистемы в этих карьерах.

В основном карьере на Волчанском месторождении и в карьере – на Коркинском техногенные водоемы только начинают формироваться. Здесь окончание формирования водных экосистем может сдвинуться на неопределенный срок из-за значительной разницы объема карьерных выработок и воды, поступающей в них. По нашей оценке, объем карьерной выемки на Коркинском месторождении составляет 1,3 млрд. м³. Если обеспечить ежесуточный круглогодичный водоприток в этот карьер порядка 50 тыс. м³, то период его заполнения составит 70 лет. Существенной экологической проблемой карьера на Коркинском месторождении является постоянное горение угольных пластов, оставленных в почве (недобор) на значительной площади в придонной части карьера. Кроме этого, нерабочие борта карьера постоянно деформируются. При этом обнажаются угольные пласты, которые в свою очередь также начинают со временем самовозгораться. В четырех карьерных выемках на Еманжелинском месторождении, объем которых в десятки раз меньше объема карьера на Коркинском месторождении, потребуется около 10 лет до завершения формирования в них техногенных водоемов за счет наличия горизонтов подземных вод, разгружающихся в нерабочих бортах.

Отметим, что в северном карьере на Еманжелинском месторождении занимаются разведением и выращиванием рыбы. На берегу этого же карьера находится небольшая база отдыха. Рядом расположен аэроклуб, взлетно-посадочные полосы которого обустроены на поверхности гидроотвала, намытого в ретроспективном периоде.

На внешних породных отвалах, отсыпанных в ходе разработки Волчанского и Богословского угольных месторождений, проводились работы по сельскохозяйственной и лесовосстановительной рекультивации. Именно здесь породные отвалы используются фермерскими хозяйствами по прямому назначению. Лесная рекультивация проводилась на этих же отвалах путем высадки саженцев хвойных пород деревьев. На породных отвалах, отсыпанных в ходе разработки Коркинского и Еманжелинского месторождений, искусственное лесовосстановление не проводилось. Смешанный лес и кустарниковая растительность, появившаяся здесь – результат высокоэффективных природных процессов саморасселения аборигенных видов флоры с прилегающих территорий при ветровом переносе семян, снабженных крыльчаткой. Аналогичное восстановление растительного покрова за счет ветрового преноса семян происходит на внешних отвалах, отсыпанных при разработке Волчанского и Богословского месторождений.

На момент окончания горных работ общая площадь всех земель, нарушенных в ходе открытой разработки угольных месторождений на Урале, составила 10431,6 га.

Общая площадь десяти карьерных выемок равна 2990 га. В них находятся 12 техногенных водоемов (три разрозненных водоема находятся в карьере на Коркинском месторождении), площадь зеркала, которых составляет 1411,3 га. Общая площадь внешних отвалов равна 7441,6 га. Структура горнопромышленного ландшафта с основными классами, установленными по результатам космической съемки, представлена на рис. 1.

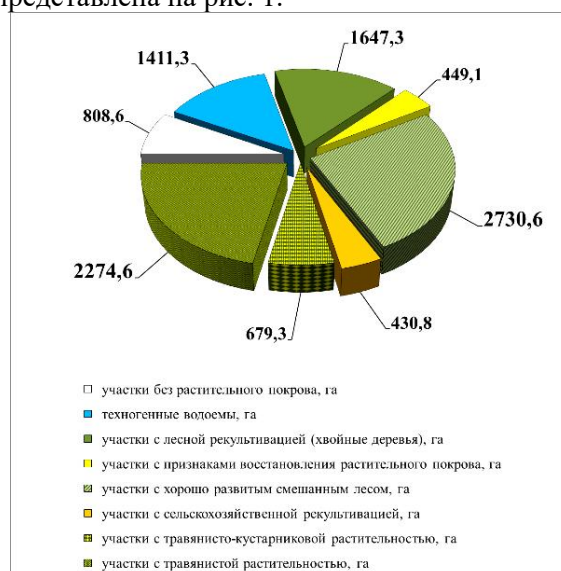


Рис. 1. Структура нарушенных земель и восстановленной экосистемы на территории горнопромышленных ландшафтов, образованных в ходе разработки открытым способом угольных месторождений на Урале в 2020 г.

Участки без растительного покрова общей площадью 808,6 га в основном находятся в нижней части нерабочих бортов в отработанных карьерах. Из них более 50 % (416,2 га) находятся в карьере на Коркинском месторождении и 29 % (238 га) – в карьере на Волчанском. Полностью отсутствует растительный покров на площади 60 га в четырех карьерах на Еманжелинском месторождении. Аналогичные участки на породных отвалах занимают площадь 94,4 га. Значительная часть (92,1 %) травянистой растительности находится в карьерах и на поверхности отвалов на Коркинском и Еманжелинском месторождениях.

На породных отвалах, отсыпанных вблизи карьеров на Волчанском и Богословском месторождениях, были проведены масштабные работы по лесной рекультивации – в результате хорошо развитый сосновый бор суммарно занимает довольно значительную площадь – 1647,3 га.

В ходе дистанционного мониторинга также было установлено, что на нерабочих бортах карьеров и на поверхности внешних отвалов сформированы многочисленные участки с хорошо развитым смешанным лесом. Этот вид растительного покрова занимает 26,17 % от общей площади нарушенных земель. Весьма позитивным обстоятельством считаем наличие на отвалах хорошо

развитой густой кустарниковой растительности, служащей своеобразной нишей для обитания многочисленных пернатых и мелких животных.

В целом, коэффициент восстановления растительной экосистемы, рассчитанный исходя из площади «сухой» части нарушенных земель, находится на очень высоком уровне 0,91.

Вывод. Результаты дистанционного мониторинга территории горнопромышленных ландшафтов, образованных при разработке угольных месторождений на Среднем и Южном Урале подтвердили нашу гипотезу о высоких экологических показателях восстановления баланса на нарушенных землях. По нашей оценке, этому способствовали масштабные работы по рекультивации земель и природно-климатические характеристики географических зон, на территории которой находятся участки отработанных месторождений. В карьерах формируются водные экосистемы, которые пригодны для коммерческого выращивания рыбы. Практически все внешние породные отвалы, несмотря на незначительный период времени, прошедший после окончания их отсыпки, можно считать индикаторными с позиции восстановления на них всех видов растительного покрова.

Список литературы

1. Сафронова О.С., Ламанова Т.Г., Шеремет Н.В. Результаты исследования естественного восстановления растительного покрова на вскрышных отвалах, возникших в 1990-е годы в Республике Хакасия // Уголь. – 2018. – № 7. – С. 68-77.
2. Харюновский А.А., Франк Е.Я. Обоснование горнотехнической рекультивации в целях восстановления на Крутокачинском щебеночном карьере // Уголь. – 2018. – № 4. – С. 75-77.
3. Remote sensing for restoration planning: how the big picture can inform stakeholders / Susan Cordell [et al.] // Restoration Ecology. – 2017. – V. 25(2). – P. 147-154.
4. Plant response to biochar, compost, and mycorrhizal fungal amendments in post-mine sandpits / Brian M. Ohsowski [et al.] // Restoration Ecology. – 2018. – V. 26. – P. 63-72.
5. DNA metabarcoding - new approach to fauna monitoring in mine site restoration / Kristen Fernandes [et al.] // Restoration Ecology. – 2018. – V. 26. – I. 6. – P. 1098-1107.
6. Jessie Lanterman, Karen Goodell. Bumble bee colony growth and reproduction on reclaimed surface coal mines // Restoration Ecology. – 2018. – V. 26. – P. 183-194.
7. Spatially balanced sampling and ground-level imagery for vegetation monitoring on reclaimed well pads / Michael F. Curran [et al.] // Restoration Ecology. – 2019. – V. 27. – P. 974-980.
8. Amalesh Dhar, Philip G. Comeau, Robert Vassov. Effects of cover soil stockpiling on plant community development following reclamation of oil sands sites in Alberta // Restoration Ecology. – 2019. – V. 27. – P. 352-360.
9. Ecohydrological gradients and their restoration on the periphery of extracted peatlands / Stéphanie Lefebvre-Ruel [et al.] // Restoration Ecology. – 2019. – V. 27. – P. 782-792.
10. <https://www.google.com.earth>

УДК 504.03/.06:622.271.3

ОЦЕНКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА РЕКУЛЬТИВИРОВАННЫХ УЧАСТКАХ ОТХОДАМИ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ В КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ-КУЗБАССЕ

¹к.б.н. Семина И.С., ²к.б.н. Соловьев С.В., ²д.б.н. Андрюханов В.А., ¹к.с-х.н. Шипилова А.М.

1 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

2 – Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. В работе проведены результаты исследования и оценки степени восстановления растительного покрова на рекультивированных участках с применением отходов углеобогащения в Кемеровской области – Кузбассе. Проведенные исследования также показали, что на рекультивированных участках с использованием плодородного слоя почвы для формирования корнеобитаемого слоя фиксируется постепенное восстановление почвенных свойств в поверхностных отсыпанных слоях, которые по некоторым параметрам приближаются к естественным почвам, распространенным на прилегающих территориях.

Ключевые слова: растительный покров, отходы углеобогащения, рекультивация, почвы, техноземы, эмбриозем, отходы углеобогащения.

Введение. Почвенный и растительный покров Кемеровской области – Кузбасса богат и разнообразен. Горнодобывающие компании в соответствии с Программой развития угольной промышленности наращивают производственные мощности и оказывают техногенное воздействие на объекты окружающей среды.

Первые попытки по нивелированию последствий негативного воздействия добычи полезных ископаемых, в том числе добычи угля, на окружающую среду путем целенаправленного формирования растительного покрова на нарушенных землях начали предпринимать в промышленно развитых странах Европы в начале XX века [1]; на территории бывшего Советского союза данный процесс начался в 50-х годах XX столетия в Донбассе [2]. Необходимо отметить, что за рубежом работы по рекультивации техногенных ландшафтов путем формирования растительного покрова преследовали сельскохозяйственные и лесохозяйственные цели, однако в конце XX века больше внимания стало уделяться экологической составляющей. Помимо прочего, в последние годы в рекультивации нарушенных земель перешли от простого засева нарушенных территорий травами и посадок древесных растений к более осмысленному – комплексному подходу, который заключается в разработке индивидуальных проектов рекультивации с учетом множества факторов, в том числе климата, рельефа, уровня плодородия и физических свойств пород, и др. [2]. Накоплен богатый опыт по восстановлению почвенного и растительного покрова на техногенно нарушенных территориях в России и за рубежом [3 – 12]. Для восстановления нарушенных земель применяются различные технологии рекультивации с учетом специфики местных природных ресурсов, физических и агрохимических свойств субстратов, также особое внимание уделяется подбору подходящих видов растений для формирования растительного покрова. Но все же главным условием успешной рекультивации техногенных ландшафтов остается создание благоприятных эдафических условий для формирования первичного растительного покрова. Этим вопросам посвящено немало работ по разным видам нарушенных территорий, расположенных в разнообразных климатических условиях [13 – 16]. Тем не менее, исследования по восстановлению растительного покрова на рекультивированных участках с отходами углеобогащения являются актуальными.

Целью работы являлось исследование процессов восстановления растительного покрова на рекультивированных участках с отходами углеобогащения и оценка фиторазнообразия на участках с различным корнеобитаемым слоем.

Материалы и методы. Рекультивированные участки, в административном отношении расположены на территории Ленинск-Кузнецкого городского округа, который находится в западной части Кемеровской области – Кузбасса, в центре Кузнецкой котловины – в пределах Кузбасского угольного бассейна. В природном отношении исследованная территория относится к Центральному лесостепному району Кузнецкой котловины, который является наиболее остепненной частью области. Лесостепной характер ландшафта типичнее выражен по периферии района и правобережью р. Ини. Область между р. Иней и Салаирским кряжем в настоящее время представляет почти чистую степь с мелкими и чрезвычайно редко разбросанными березовыми перелесками. Участки рекультивации отличаются возрастом (3 – 9 лет) и особенностями формирования корнеобитаемого слоя на поверхности спланированного отвала отходов углеобогащения.

Технический этап рекультивации нарушенных земель выполнялся путем засыпки отработанных карьеров бывшего угольного разреза отходами углеобогащения и формированием на выровненной поверхности рекультивационного слоя мощностью 20 – 40 см с использованием материалов плодородного слоя почвы (ПСП) и потенциально плодородных пород (ППП).

В соответствии с классификацией почв техногенных ландшафтов участки рекультивации представлены: без нанесения на поверхность отвала PPP и ПСП (точка 1 – эмбриозем инициальный, возраст участка – 7 лет), с нанесением на поверхность PPP (точка 2 – технозем литогенный, возраст участка – 3 года), с нанесением на поверхность отвала PPP и ПСП (точка 3, технозем гумусогенный недифференцированный, возраст участка – 7 лет), с нанесением смеси на поверхность отвала PPP и ПСП (точка 4 – технозем гумусогенный недифференцированный, возраст участка – 7 лет) и послойное нанесение на поверхность отвала PPP и ПСП (точка 5 – технозем гумусогенный дифференцированный, возраст участка – 9 лет). Разрезы заложены на горизонтальной поверхности в центральной части участка. Контроль – чернозем выщелоченный (точка 6). Все выбранные участки характеризуются выровненным, волнистым рельефом с мелкими западинами.

По результатам исследований физических свойств поверхностных слоев молодых почв и субстратов было установлено, что техноземы характеризуются повышенной плотностью (в нижней части отсыпанного слоя плотность по сравнению с контрольным вариантом и составляет в

среднем более $1,30 \text{ г/см}^3$). Плотность поверхностного слоя эмбриозема инициального (участок без отсыпки ППП и ПСП) – $1,56 \text{ г/см}^3$, что обусловлено свойствами техногенного субстрата, переуплотнения при проведении планировочных работ тяжелой техникой на техническом этапе рекультивации и неразвитостью растительного покрова на данном участке. По гранулометрическому составу, по классификации Качинского, материал мелкозёмной части субстратов изменяется в широких пределах от легких суглинков до глин. Содержание частиц физической глины (фракции менее $0,01 \text{ мм}$) в мелкозёмистой части субстратов подстилающих пород (горизонт D) изменяется в пределах $28 - 38 \%$ и характеризуется как средний суглинок. Однако нужно учитывать, что количество мелкозёма в данном субстрате не превышает 15% . Это связано с высокой каменистостью данных субстратов, которые слабо разрушаются в процессе обогащения, рекультивации и последующего размещения. Из результатов исследований физических свойств рекультивированных почв следует, что значения pH варьируют в интервале от $7,9$ до $9,9$, что свидетельствует о щелочной реакции почвенного раствора. Наибольшие значения pH $9,00$ до $9,9$ характерны для горизонтов подстилающих пород, состоящих из отходов углеобогащения. Величина pH обусловлена минералогическим составом породы. Основную массу вмещающих пород составляют песчаники, алевролиты, аргиллиты, а также углистые частицы. Породы сцементированы карбонатным, глинисто-карбонатным, карбонатным-глинистым и углисто-глинистым составами. Карбонаты представлены зернами кальцита, сидерита и доломита. Для алевролитов также характерна карбонатизация. Содержание водорастворимых солей в молодых почвах и субстратах в сухом остатке, в основном, составляет от $0,039$ до $0,118 \%$, сумма токсичных солей не превышает $0,01 \%$. В техноземе литогенном (точка 2) на глубине $6 - 17 \text{ см}$ зафиксировано увеличение суммы токсичных солей до $0,202 \%$ (преобладают гидрокарбонаты – $3,00 \text{ ммоль/100 г.}$, соли кальция – $2,22 \text{ ммоль/100 г.}$, сульфаты – $0,228 \text{ ммоль/100 г.}$) и техноземе гумусогенном недифференцированном (точка 4) на глубине $20 - 30 \text{ см}$ сумма токсичных солей составляет $0,218 \%$ (преобладают гидрокарбонаты – $2,50 \text{ ммоль/100 г.}$, соли натрия – $2,53 \text{ ммоль/100 г.}$).

Для оценки степени восстановления растительного покрова участков рекультивации проведено геоботаническое описание на пяти пробных площадках размером 100 м^2 , характеризующихся различными свойствами, корнеобитаемого слоя [7]. Также, с целью выявления степени восстановленности растительного покрова рекультивированных участков, был исследован расположенной вблизи рекультивированных участков, ненарушенный фитоценоз. Геоботанические описания выполнялись на стандартных бланках для их систематизации и стандартизации полученных данных.

Образцы молодых почв и субстратов техногенных ландшафтов исследовались в аналитических лабораториях АО «Западно-Сибирский испытательный центр», ФГБУН «Институт почвоведения и агрохимии СО РАН», СибГИУ.

Результаты и обсуждение. При обследовании растительного покрова методом геоботанических описаний (ГБО) участков рекультивации были отмечены следующие особенности. Рекультивированный участок № 2 возрастом 3 года, с отсыпкой легких суглинков (ППП) в качестве корнеобитаемого слоя, без посева трав (рис. 1 а), характеризуется большим видовым разнообразием – 34 вида (преобладающая доля рудеральных видов – характерно для начальных стадий зарастания, ГБО участка № 2), но при этом с очень малым проективным покрытием – не более 15% .

Доминантами выступают *Artemisia absinthium* L. и *Elytrigia repens* (L.) Nevski. Древесный ярус представлен одним экземпляром подроста *Ulmus pumila* L.

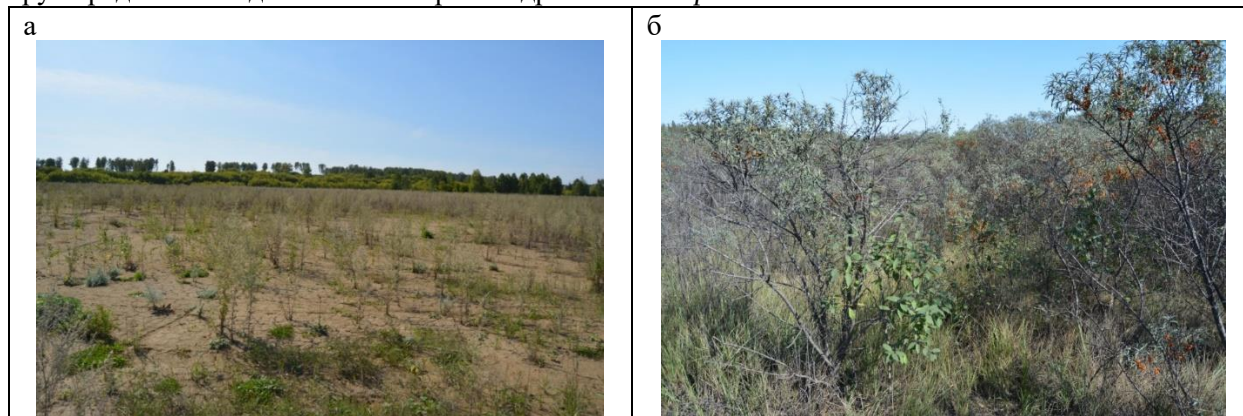


Рис. 1. Растительный покров: а – на участке № 2; б – на участке № 3

На двух участках (№№ 3 и 4) в 2013 году биологический этап рекультивации проводился двумя методами. Первый способ – посредством посевов *Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub и *Medicago sativa* L. (ГБО участка № 4), второй – посадки *Hippophae rhamnoides* L. и *Pinus sylvestris* L. (ГБО участка № 3, рис. 1 б).

При посеве многолетних трав проективное покрытие достигает 90 %, видовое разнообразие составляет 16 видов, доминантами выступают *Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub, *Elytrigia repens* (L.) Nevski и *Poa stepposa* (Krylov) Roshev. После семи лет рекультивации, на данном участке *Medicago sativa* L. полностью выпала из состава растительного покрова. На участке с посадкой облепихи и сосны – проективное покрытие составляет 85 % с видовым разнообразием в 15 видов, среди которого в травянистом ярусе доминирует *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth, а среди древесного и кустарникового яруса – *Hippophae rhamnoides* L. Среди древесного яруса, высаженная ранее *Pinus sylvestris* L. оказалась малопригодной для данных условий, хотя и сохранила свое присутствие. Необходимо отметить, что в древесном ярусе появились *Betula pendula* Roth, *Populus tremula* L. и *Acer negundo* L. Помимо прочего, на этих двух участках отмечается напочвенный ярус, представленный мхами и составляющий до 10 % проективного покрытия, также на участках установлена значительная активность животного мира, в частности, в первом случае (преобладание травянистого яруса) обнаруживается значительное количество нор грызунов, во втором (преобладание древесного яруса) – большое количество муравейников.

В 2013 году был спланирован участок из отходов углеобогащения и шахтных пород (ГБО участка № 1, рис. 2 а), на котором биологический этап рекультивации не проводился, а был проведен только технологический этап рекультивации. В момент обследования на данном участке зафиксировано значительное видовое разнообразие – 20 видов с проективным покрытием не более 7 %. Древесный и кустарниковый ярусы представлены несколькими экземплярами *Acer negundo* L., *Pinus sylvestris* L., *Populus nigra* L. и *Hippophae rhamnoides* L., а в травянистом ярусе – разнотравье рудеральных видов. Необходимо подчеркнуть тот факт, что все представленные на данном участке растения находятся в угнетенном состоянии, что может свидетельствовать о неблагоприятных эдафических условиях корнеобитаемого слоя.

Растительный покров на участке рекультивации (ГБО участка № 5), проведенной в 2011 году путем посева *Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub, представлен 18 видами травянистых растений с проективным покрытием в 80%. Доминантами являются *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth, *Dactylis glomerata* L., *Poa stepposa* (Krylov) Roshev. и *Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub. Напочвенный ярус также представлен мхами с проективным покрытием 10 %. На территории обследованного участка отмечается значительное количество нор грызунов.

Контрольной площадкой (остепненный луг) был выбран участок близ исследуемой территории (ГБО контрольного участка № 6, рис. 2 б), растительный покров которой представлен травянистым ярусом. Проективное покрытие равно 95 %, а видовое разнообразие насчитывает 31 вид. Доминантами выступают *Artemisia glauca* Pall. ex Willd., *Phlomis tuberosa* (L.) Moench, *Filipendula vulgaris* Moench и др. На участке также отмечена деятельность животного мира, в частности несколько муравейников.

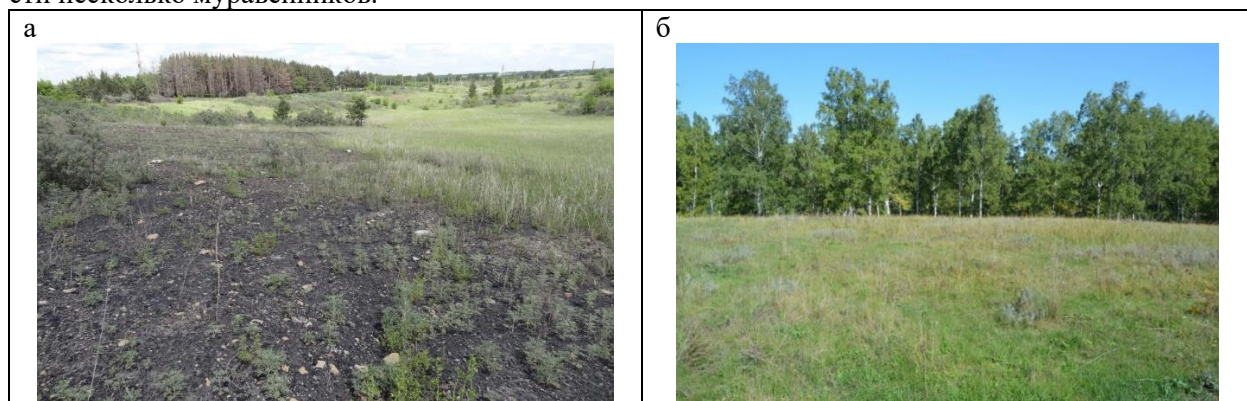


Рис. 2. Растительный покров: а – на участке № 1; б – на участке № 6 (контроль)

Таким образом, на исследованных участках в общей сложности отмечено 76 видов растений, значительная часть которых является рудеральными видами.

Выводы. В ходе полевого обследования участков рекультивации установлено, что при посеве многолетних трав (*Bromopsis inermis*, *Medicago sativa* и др.) или посадке древесно-

кустарниковой растительности (*Hippophae rhamnoides*, *Pinus sylvestris* и др.) на отсыпанную поверхность корнеобитаемого слоя из ППП (потенциально плодородных пород) и/или ПСП (плодородный слой почвы), на рекультивированных участках создаются благоприятные условия для формирования первичного фитоценоза. Так, на исследованных участках, имеющих возраст семь лет, проективное покрытие составляет 80 – 90 % и приближается к проективному покрытию на ненарушенных участках (95 %). С увеличением возраста рекультивации отмечается увеличение видового разнообразия до 18 видов (в составе которых обнаруживается высокая доля аборигенных видов), при условии, что этот показатель колеблется в разные периоды времени, в результате постепенного замещения однолетних видов растений на многолетние рудеральные виды и одновременного замещения их аборигенными. Свидетельством интенсивных процессов восстановления нарушенных фитоценозов является восстановление биоценоза, заселение этих территорий животным населением, в частности на исследованных участках возрастом семь лет и более отмечено значительное количество муравейников и подземных ходов грызунов.

На участке без нанесения ППП и ПСП (№ 1) зафиксировано значительное видовое разнообразие – 20 видов с проективным покрытием не более 7 %, что свидетельствует о начальной стадии сукцессии. Древесный и кустарниковый ярусы представлены несколькими экземплярами *Acer negundo*, *Pinus sylvestris*, *Populus nigra* и *Hippophae rhamnoides*, а в травянистом ярусе – разнотравье рудеральных видов. Значительная часть растений на этой площадке находится в очень угнетённом состоянии, что вызвано неблагоприятными физическими свойствами субстрата корнеобитаемого слоя.

Проведенные исследования показали, что лучшие значения почвенно-экологического состояния рекультивированных участков получены в вариантах с использованием плодородного слоя почвы для формирования корнеобитаемого слоя. На таких участках формируется устойчивый растительный покров и фиксируется постепенное восстановление почвенных свойств в поверхностных отсыпанных слоях в направлении к естественным почвам, распространенным на прилегающих территориях, а также наиболее активно идет восстановление всего биоценоза.

Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-44-420006/20. Полевые исследования выполнялись в рамках экспедиционных работ по плановым заданиям ИПА СО РАН и СибГИУ.

Список литературы

1. Knabe W. Methode and resultat of strip-mine reclamation in Germany // The Ohio Journal of Science. – 1964. – Vol. 64. – № 2. – P. 75-82.
2. Андроханов В.А., Курачев В.Н. Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов: динамика и оценка. – Новосибирск, 2010. – 224 с.
3. Шипилова А.М., Семин И.С. Оценка почвенно-экологического состояния техногенных ландшафтов Кузбасса в зависимости от технологии рекультивации нарушенных земель // Известия Уральского государственного горного университета. – 2017. – № 3 (47). – С. 53-56.
4. Манаков Ю.А., Куприянов О.А. Система ООПТ Кемеровской области как фактор смягчения воздействия угледобычи на биоразнообразие // Уголь. – 2019. – № 7 (1120). – С. 89-94.
5. Чибрик Т.С. Некоторые аспекты оценки опыта биологической рекультивации на угольных месторождениях Урала // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2012. – № 5 (37). – С. 216-218.
6. Восстановления биоразнообразия на отвалах Черемшанского Никелевого месторождения / Т. С. Чибрик [и др.] // Промышленная ботаника. – 2019. – Т. 19. – № 3. – С. 45-48.
7. Temporal and spatial change of land use in a large-scale opencast coal mine area: A complex network approach / M.A Zhang [et al.] // Land Use Policy. – 2019. – Vol. 86. – P. 375-386.
8. Age chronosequence effects on restoration quality of reclaimed coal mine soils in Mississippi Agroecosystems / A. Adeli [et al.] // Soil Science. – 2013. – Vol. 178. – Issue 7. – P. 335-343.
9. Bond-Lamberty B., Thomson A. Temperature associated increases in the global soil respiration record // Nature. – 2010. – Vol. 464 (7288). – P. 579-582.
10. Bradshaw A. Restoration of mined lands – Using natural processes // Ecological engineering. – 1997. – Vol. 8(4). – P. 255-269.
11. Robert B. Finkelman. Potential health impacts of burning coal beds and waste banks // International Journal of Coal Geology. – 2004. – Vol. 59. – P. 19 – 24.
12. Soil quality index for evaluation of reclaimed coal mine spoil / S. Mukhopadhyay [et al.] // Science of the Total Environment. – 2016. – Vol. 542. – P. 540-550.
13. Результаты исследования формирования экосистемы на угольных разрезах в западной части центральных районов Кузбасса с использованием ресурсов ДЗЗ / И.В. Зеньков [и др.] // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22. – № 2. – С. 40-45.

14. Семина И.С., Андроханов В.А., Куляпина Е.Д. Опыт использования отходов углеобогащения для рекультивации нарушенных участков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 9. – С. 159-175.

15. Семина И.С., Андроханов В.А., Куляпина Е.Д. Почвенно-экологическое состояние рекультивированных участков с использованием отходов углеобогащения // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – № 6. – С. 439–444.

16. Restoration of vegetation cover in reclaimed areas with coal preparation waste in Kuzbass / S. Soloviev S [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2021. – 244. – (01015).

Научное издание

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Под общей редакцией профессора В.Н. Фрянова

Компьютерная верстка Л.Д. Павловой

Подписано в печать 24.05.2021 г.

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.

Усл.печ.л. 23,76 Уч.-изд. л. 25,16 Тираж 1000 экз. Заказ

Сибирский государственный индустриальный университет

654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.

Издательский центр СибГИУ