Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

ВК «Кузбасская ярмарка»

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№ 10 - 2024

УДК 622.2 ISSN 2311-8342

ББК 33.1
Н 340

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, 2024. - № 9. – 350 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, 4-7 июня 2024 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

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР 11
ПРИРОСТ КАПТИРУЕМОГО МЕТАНА ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА МЕТОДОМ ПОИНТЕРВАЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА 13
чл.-корр. РАН Клишин В.И., к.т.н. Опрук Г.Ю., Связев С.И. 13
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия 13
СТРАТЕГИЯ ДОЛГОСРОЧНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ КУЗБАССА 19
[1]чл.-корр. РАН Клишин В.И., [2]д.т.н. Рогова Т.Б., [1]д.т.н. Шаклеин С.В., [1, 2]д.т.н. Писаренко М. В. . 19
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия 19
2 – Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия 19
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КУЗБАССА 26
чл.-корр. РАН Клишин В.И., д.т.н. Федорин В.А., Татаринова О.А. 26
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия 26
ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КРОВЛИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ДЕМОНТАЖЕ ОБОРУДОВАНИЯ В ЛАВАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ШАХТНЫХ СЕТОК «ГЕОШАХТ» 31
[1]Новиков Р.П., [1]Чуков А.С., [1] Филиппов М.С., [2]д.т.н. Земсков А.Н. 31
1 – ГК «Миаком», г. Санкт-Петербург, Россия 31
2 – АО «Гипроцветмет», г. Пермь, Россия 31
ОТКРЫТЫЕ ГОРНЫЕ РАБОТЫ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УГЛЯ В ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРОВИНЦИЯХ ТУРЦИИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА 34
[1]д.т.н. Зеньков И.В., [2]к.т.н. Черепанов Е.В., [3]Мулюшкина А.А., [4]к.т.н. Нефедов Б.Н. 34
1 – ООО «Сибирский научно-исследовательский институт горного и маркшейдерского дела», г. Красноярск, Россия 34
2 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия 34
3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия 34
4 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Россия 34
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УГЛЯ В ШТАТЕ НОВЫЙ ЮЖНЫЙ УЭЛЬС НА ТЕРРИТОРИИ АВСТРАЛИИ 38
[1]д.т.н. Зеньков И.В., [2]к.т.н. Черепанов Е.В., [3]Мулюшкина А.А., [4]к.т.н. Нефедов Б.Н. 38
1 – ООО «Сибирский научно-исследовательский институт горного и маркшейдерского дела», г. Красноярск, Россия 38
2 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия 38
3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия 38
4 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Россия 38
ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ В УГОЛЬНЫХ КАРЬЕРАХ НА ТЕРРИТОРИИ ШТАТА КВИНСЛЕНД В АВСТРАЛИИ 42
[1]д.т.н. Зеньков И.В., [2]к.т.н. Черепанов Е.В., [3]Мулюшкина А.А., [4]к.т.н. Нефедов Б.Н. 42
1 – ООО «Сибирский научно-исследовательский институт горного и маркшейдерского дела», г. Красноярск, Россия 42
2 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия 42
3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия 42
4 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Россия 42
ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ В УГОЛЬНЫХ КАРЬЕРАХ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ МОНГОЛИЯ 45
[1]д.т.н. Зеньков И.В., [2]к.т.н. Черепанов Е.В., [3]Мулюшкина А.А., [4]к.т.н. Нефедов Б.Н. 45

1 – ООО «Сибирский научно-исследовательский институт горного и маркшейдерского дела», г. Красноярск, Россия 45
2 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия 45
3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия 45
4 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Россия 45
ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ДОБЫЧЕ УГЛЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ ГИДРАВЛИКО-МЕХАНИЗИРОВАННЫМИ ЩИТОВЫМИ КОМПЛЕКСАМИ НА МОЩНЫХ КРУТЫХ ПЛАСТАХ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ 49
к.э.н., Новоселов С.В. 49
Академия горных наук, г. Москва, Россия 49
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОТРАБОТКИ УГЛЕНАСЫЩЕНОЙ ЗОНЫ ПОЛОГОПАДАЮЩИХ ПЛАСТОВ ОБРАТНОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЛОПАТОЙ 51
Нечаев А.И. 51
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия 51
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТУПА ПРИ РАБОТЕ ОБРАТНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЛОПАТ ДЛЯ УСЛОВИЙ УГЛУБОЧНО-СПЛОШНОЙ СИСТЕМЫ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ 56
Терентьев Д. Д. 56
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия 56
ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ОТРАБОТКЕ ЗАПАСОВ КРУТОНАКЛОННОЙ ЧАСТИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА 62
[1]к.т.н. Риб С.В., [1]к.т.н. Волошин В.А., [1]к.т.н. Петрова О.А., [1]д.т.н. Домрачев А.Н., [2]Полошков С.И., [2]к.т.н. Басов В.В. 62
1 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия 62
2 – АО «Шахта «Большевик», г. Новокузнецк, Россия 62
НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДОСТАВКИ И МОНТАЖА ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ПОМОЩИ САМОХОДНЫХ МАШИН 69
[1]Дадынский Р.А., [2]к.т.н. Никитина А.М., [2]к.т.н. Риб С.В. 69
1 – ООО «УМГШО», г. Новокузнецк, Россия, ... 69
2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия 69
ЭФФЕКТИВНОСТЬ БУРЕНИЯ НАПРАВЛЕННЫХ СКВАЖИН ИЗ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА ШАХТАХ КУЗБАССА 75
[1]к.т.н. Волошин В.А., [1]к.т.н. Риб С.В., [2]Рахимкулов И.Р., [2]Гончаров Р.С., [3]к.т.н. Розонов Е.Ю., [4]Бабичук А.В. 75
1 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия 75
2 – ООО «ДМТехнологии», г. Новокузнецк, Россия 75
3 – ООО «ММК-Уголь», г. Белово, Россия 75
4 – ООО «ММК-Уголь» «Шахта «Костромовская», г. Ленинск-Кузнецкий, Россия 75
РАСЧЁТ МИНИМАЛЬНОЙ ШИРИНЫ УГОЛЬНЫХ ЦЕЛИКОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ КРУТОНАКЛОННОЙ ЧАСТИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА 80
[1]к.т.н. Риб С.В., [1]к.т.н. Волошин В.А., [1]к.т.н. Петрова О.А., [1]д.т.н. Домрачев А.Н., [2]Полошков С.И., [2]к.т.н. Басов В.В. 80
1 − Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия 80
2 − АО «Шахта «Большевик», г. Новокузнецк, Россия 80
РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕХОДА РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ ДЛЯ ОБУЧАЮЩЕ-ТЕСТИРУЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ «ТЕХНОЛОГИЯ ОТРАБОТКИ ПОЛОГИХ ПЛАСТОВ» 83
д.т.н. Домрачев А.Н., к.т.н. Коряга М.Г. 83
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия 83

ГОРНЫЕ МАШИНЫ И ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ 89
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕДИНОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ 91
[1]к.т.н. Герике П.Б., [1]д.т.н. Герике Б.Л., [2]д.т.н. Никитин А.Г. 91
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия 91
2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия 91
ОЦЕНКА РЕСУРСА РАБОТОСПОСОБНОГО СОСТОЯНИЯ РЕДУКТОРОВ ГОРНЫХ МАШИН 97
[1, 2]д.т.н. Герике Б.Л., [3]к.т.н. Кузин Е.Г., [1]к.т.н. Герике П.Б. 97
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия 97
2 – Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия 97
3 – Прокопьевский филиал КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева», г. Прокопьевск, Россия 97
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЕЙ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ НАСЫПНЫХ МАТЕРИАЛОВ 105
к.т.н. Ланцевич М. А., к.т.н. Левенсон С.Я., Морозов А.В. 105
Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия 105
НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ДВУХПРИВОДНОГО ТРАНСПОРТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С КРИВОЛИНЕЙНЫМ УПРУГИМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ 109
[1,2]к.т.н. Куликова Е.Г. 109
1 – Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия 109
2 – Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия 109
РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ СМЕННОГО ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО КОВШОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭКСКАВАТОРОВ 117
Городилов Л.В., Коровин А.Н. 117
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия 117
ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТЕНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМА ВЫПУСКАЕМОЙ ГОРНОЙ МАССЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ И ПРОЕЦИРОВАНИЯ СЕТКИ ЛАЗЕРНЫХ ЛИНИЙ 120
[1,2]Черкасов П.В., [1,2]к.т.н. Никитенко М.С., [1,2]Кизилов С.А. 120
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия 120
2 – Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия 120
ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТЕНДА АНАЛИЗА ГОРНОЙ МАССЫ ГАММА-МЕТОДОМ 126
Баловнев Е.А., Кизилов С.А., к.т.н. Никитенко М.С. 126
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия 126
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПАРКА ГОРНЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН В КАРЬЕРАХ ПО ДОБЫЧЕ НЕРУДНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ НА ТЕРРИТОРИИ РОСИИ 132
[1]д.т.н. Зеньков И.В., [2]к.т.н. Черепанов Е.В., [3]Терехина К.Ф., [4]к.т.н. Нефедов Б.Н. 132
1 – ООО «Сибирский научно-исследовательский институт горного и маркшейдерского дела», г. Красноярск, Россия 132
2 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия 132
3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия 132
4 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Россия 132
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАРЬЕРНЫХ МАШИН В ПО ДОБЫЧЕ ЦЕМЕНТНОГО СЫРЬЯ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ 137
[1]д.т.н. Зеньков И.В., [2]к.т.н. Черепанов Е.В., [3]Терехина К.Ф., [4]к.т.н. Нефедов Б.Н. 137
1 – ООО «Сибирский научно-исследовательский институт горного и маркшейдерского дела», г. Красноярск, Россия 137
2 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия 137

3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия 137
4 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Россия 137
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ГОРНОТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОМ УГОЛЬНОМ КАРЬЕРЕ В СОСТАВЕ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ АВСТРАЛИИ 143
[1]д.т.н. Зеньков И.В., [2]к.т.н. Черепанов Е.В., [3]Мулюшкина А.А., [4]к.т.н. Нефедов Б.Н. 143
1 – ООО «Сибирский научно-исследовательский институт горного и маркшейдерского дела», г. Красноярск, Россия 143
2 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия 143
3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия 143
4 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Россия 143
К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕХЛОПАТ 146
к. т. н. Чаплыгин В. В., к. т. н. Садыков А. А., Матвеев А. В. 146
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия 146
РОБОТИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА 155
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД 157
д.т.н. Фрянов В.Н., д.т.н. Павлова Л.Д. 157
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия 157
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ УГЛЕОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК 164
[1,2]к.т.н. Грачев В.В., [3]д.т.н. Ивушкин А.А., [1]д.т.н. Мышляев Л.П., [1,2]к.т.н. Макаров Г.В. 164
1 – ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия 164
2 – Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия 164
3 – ООО «Объединенная компания «Сибшахтострой», г. Новокузнецк, Россия 164
ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ 170
[1]д.т.н. Мышляев Л.П., [2]д.т.н. Ивушкин А.А., [1,3]к.т.н. Грачев В.В., [1,3]к.т.н. Макаров Г.В., [4]Коршунов С.Ю. 170
1 – ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия 170
2 – ООО «Объединенная компания «Сибшахтострой», г. Новокузнецк, Россия 170
3 – Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия 170
4 – ООО «РТ-Инжиниринг», г. Москва, Россия 170
СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ РУБЦОВСКОЙ ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКОЙ 174
[1]д.т.н. Ивушкин А.А., [2,3]к.т.н. Макаров Г.В., [2,3]к.т.н. Грачев В.В., [3]д.т.н. Мышляев Л.П., [2,3] Свинцов М.М., [2,3]Загидулин И.Р., [2,3]Курышев Е.В. 174
1 – ООО «Объединенная компания «Сибшахтострой», г. Новокузнецк, Россия 174
2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия 174
3 – ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия 174
ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ MASTERSCADA 4D ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОИЗВОДСТВА ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ ПОЛИМЕТАЛЛОВ 179
[1,2]Курышев Е.В., [1,2]к.т.н. Грачев В.В., [1,2]Кулюшин Г.А., [1,2]к.т.н. Макаров Г.В., [2]д.т.н. Мышляев Л.П., [1,2]Халимов В.А. 179
1 - Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия 179
2 - ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия 179
К ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ СУШИЛЬНО-ТОПОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ 183
Коровин Д.Е. 183
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия 183

АВТОНОМНАЯ И ДИСТАНЦИОННО-УПРАВЛЯЕМАЯ ТЕХНИКА НА ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ.....188
[1]д.э.н. Никитенко С.М., [1]к.т.н. Никитенко М.С., [1]Худоногов Д.Ю., [1]Кизилов С.А., [2]PhD Вайс И..188
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия.....188
2 – EEP Elektro-Elektronik Pranjic GmbH, Гельзенкирхен, Германия.....188
СПОСОБ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ С ИХ ФИЗИЧЕСКИМИ МАКЕТАМИ.....193
[1]Кизилов С.А., [1]к.т.н. Никитенко М.С., [1]Худоногов Д.Ю., [2]Neogi B., [1]Верховцев Д.О.....193
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия.....193
2 – Инженерный колледж JIS, Кальяни, Западная Бенгалия, Индия.....193
A COMPREHENSIVE REVIEW ON ADVANCING COAL MINING THROUGH INDUSTRY 4.0 AND INDO-RUSSIA COLLABORATION.....198
Shaw H. K., Rajak A., Chanda A., Pal M., Neogi B.....198
JIS College of Engineering, Kalyani, West Bengal, India.....198
ДИСКРЕТНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ ПО ПЕРЕСЫПНОМУ УЗЛУ СТАКЕРА-РЕКЛАЙМЕРА.....203
к.т.н. Клишин С.В., Морев А.Э., Тимофеев Т.Т.....203
АО «Моделирование и цифровые двойники», г. Москва, Россия.....203
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА T-ENERGY.....209
к.т.н. Сеченов П.А., д.т.н. Рыбенко И.А.....209
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....209
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РЕМОНТОВ И РАБОТЫ КОНВЕРТЕРОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....213
Прохоров И. М., к.т.н. Турчанинов Е. Б., к.т.н. Шакиров М. К., д.т.н. Зимин А.В.....213
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....213
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЯГОВЫХ НАГРУЗОК НА КАЧЕСТВО ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В РАЙОНАХ УГЛЕДОБЫЧИ.....217
[1]Стишенко К.П., [2]Герасимук А.В., [1]к.ф-м.н. Хаимзон Б.Б., [1]к.т.н. Кипервассер М.В.....217
1 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....217
2 – АО «Сибирский Тяжпромэлектропроект», г. Новокузнецк, Россия.....217
ХАРАКТЕРИСТИКИ СХЕМ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ МЕХАНИЗМОВ В ГОРНОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....222
Александров Н.А., Жданов Е.В., к.т.н. Кипервассер М.В.....222
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....222
ПРИМЕНЕНИЕ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК.....226
к.т.н. Поползин И.Ю.....226
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....226
ВЛИЯНИЕ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ НА РАБОТУ ЧАСТОТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....230
Жданов Е.В., Александров Н.А., к.т.н. Кубарев В.А.....230
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....230
МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МАТРИЧНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ.....233
Петрущенко А.Ю.....233
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....233
РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ.....238
к.т.н. Кузнецова Е.С., Богдановская Т.В., Игнатенко О.А.....238
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....238
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА МОЩНЫХ ИМПУЛЬСА НА БАЗЕ КОНТРОЛЛЕРА.....243
Кузнецова Е.С., Арбузов И.С.....243
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия.....243

ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СУВЕРЕНИТЕТ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ 247
НЕОБХОДИМОСТЬ РАЗРАБОТКИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА И ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЁТА НОРМАЛЬНОГО И АВАРИЙНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ УГОЛЬНЫХ ШАХТ ПРИ ВЗРЫВАХ МЕТАНА И УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В НЕСТАЦИОНАРНОЙ ПОСТАНОВКЕ 249
д.т.н. Палеев Д.Ю. 249
Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия 249
ОПЕРАТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПАСНОСТИ ДЛЯ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА, ОСНОВАННЫХ НА СПЕКТРАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ «ШУМА» РАБОТАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ 257
д.т.н. Шадрин А.В. 257
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия 257
О ПЕРСПЕКТИВНОМ НАПРАВЛЕНИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕМ НА ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ 265
[1]к.т.н. Говорухин Ю.М., [2]д.т.н. Кубрин С.С. 265
1 – ФГКУ «Национальный горноспасательный центр», г. Новокузнецк, Россия 265
2 – Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Россия 265
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЗДУШНОЙ ВОЛНЫ С ДИСПЕРГИРОВАННЫМИ СРЕДАМИ (ВОДА) 270
к.т.н. Говорухин Ю.М., к.т.н. Криволапов В.Г. 270
ФГКУ «Национальный горноспасательный центр», г. Новокузнецк, Россия 270
ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОРЯДНОЙ СИСТЕМЫ ПЕРФОРИРОВАННЫХ ПРЕГРАД ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ВО ФРОНТЕ УДАРНОЙ ВОЗДУШНОЙ ВОЛНЫ 278
[1]к.т.н. Говорухин Ю.М., [1]к.т.н. Криволапов В.Г., [2]к.т.н. Сенкус Вал.В., [1]Мясников Н.В. 278
1 – ФГКУ «Национальный горноспасательный центр», г. Новокузнецк, Россия 278
2 – «Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия 278
ТОНКОДИСПЕРСНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПЫЛИ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ДОБЫЧЕ И ПЕРЕРАБОТКЕ УГЛЕЙ 286
[1,2]д.т.н. Журавлева Н.В., [3]Журавлева Е.В., [1]Кутищев А.С. 286
1 – АО «Западно-Сибирский испытательный центр», г. Новокузнецк, Россия 286
2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия 286
3 – АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», г. Новокузнецк, Россия 286
ТЕХНОЛОГИИ УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ И ТЕХНОЛОГИИ НИЗКОУГЛЕРОДНОЙ ЭКОНОМИКИ – СУБСИТУТЫ ИЛИ КОМПЛЕМЕНТАРИИ? 293
к.э.н. Федюнина А.А., к.т.н. Симачев Ю.В. 293
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия 293
ИЗОЛЯЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ УГОЛЬНЫХ ТЕРРИКОНОВ, СОЛЕОТВАЛОВ И ДАМБ СОВРЕМЕННЫМИ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫМИ СРЕДСТВАМИ ПРОИЗВОДСТВА ГК «МИАКОМ» 298
[1]Новиков Р.П., [1]Филиппов М.С., [2]д.т.н. Земсков А.Н. 298
1 – ГК «Миаком», г. Санкт-Петербург, Россия 298
2 – АО «Гипроцветмет», г. Пермь, Россия 298
ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЙ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ И КАЛИЙНЫХ РУДНИКАХ 303
[1]д.т.н. Земсков А.Н., [1]Липницкий Н.А., [2] к.т.н. Смирняков В.В. 303
1 – АО «Гипроцветмет», г. Пермь, Россия 303
2 – Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт –Петербург, Россия 303
КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОСВЕЩЕНИЮ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ. ОПЫТ КОМПАНИИ «СВЕТКОНСАЛТ» В ОПТИМИЗАЦИИ ЗАТРАТ НА ОСВЕЩЕНИЕ 308
[1]Сасонко П.П., [1]Бакатнюков В.С., [2]д.т.н. Земсков А.Н. 308
1 – ООО «Светконсалт», г. Санкт-Петербург, Россия 308
2 – АО «Гипроцветмет», г. Пермь, Россия 308

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЦЕПОЧКИ В УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ КУЗБАССА 311
[1]д.т.н. Клишин В.И., [1]д.э.н. Никитенко С.М., [1]к.э.н. Гоосен Е.В., [2]Кавкаева О. 311
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия 311
2 – Университет г. Павия, Италия 311
РОЛЬ ГОСУДАРСТВА В ПОДДЕРЖАНИИ УСТОЙЧИВОСТИ УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ: ПРИОРИТЕТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ.....317
к.э.н. Саблин К.С., к.э.н. Гоосен Е.В., Гоосен О.К. 317
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия 317
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ КРЕПЕЙ СОПРЯЖЕНИЯ 324
[1]д.э.н. Никитенко С.М., [1]Королев М.К., [2]PhD Вайс И. 324
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия 324
2 – EEP Elektro-Elektronik Pranjic GmbH, Гельзенкирхен, Германия 324
О КОМБИНИРОВАННЫХ СПОСОБАХ ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНОГО МАССИВА 330
[1,2]д.э.н. Никитенко С.М., [2]к.б.н. Игнатова А.Ю., [3]к.х.н. Овсянникова В.С. 330
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия 330
2 – Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия 330
3 – Института химии нефти СО РАН, г. Томск, Россия 330
ОПЕРАТИВНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЗОН ЭНДОГЕННЫХ ПОЖАРОВ В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ПОРОДОУГОЛЬНЫХ МАССИВАХ 337
Калайгорода В.В. 337
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия 337
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УГЛЯ В АВСТРАЛИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ.....343
[1]д.т.н. Зеньков И.В., [2]к.т.н. Черепанов Е.В., [3]Мулюшкина А.А., [4]к.т.н. Нефедов Б.Н. 343
1 – ООО «Сибирский научно-исследовательский институт горного и маркшейдерского дела», г. Красноярск, Россия.....343
2 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия 343
3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия.....343
4 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Россия 343
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ НА ЭКОЛОГИЮ КУЗБАССА 347
Чижик Ю.И., к.т.н. Риб С.В., к.т.н. Никитина А.М. 347
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия 347

ГЕОТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР

УДК 622.245.542.3

ПРИРОСТ КАПТИРУЕМОГО МЕТАНА ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА МЕТОДОМ ПОИНТЕРВАЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА

чл.-корр. РАН Клишин В.И., к.т.н. Опрук Г.Ю., Связев С.И.
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
г. Кемерово, Россия

Аннотация. Предложено создание комплекса технологий и средств их реализации, повышающих эффективность угледобычи и обеспечивающих высокий уровень промышленной безопасности, а также формирование эффективной системы оценки и управления процессами интенсификации дегазации методом поинтервального гидроразрыва угольного пласта.

Ключевые слова: подземная разработка угольных месторождений, предварительная дегазация, поинтервальный гидроразрыв, сдвоенный пакер, уплотнитель, герметизатор, скважина, геофизические исследования, мониторинг.

Введение. Последние крупные аварии под землей в Кузбассе произошли в очистных забоях, использующих самую современную технику, обеспечивающую наилучшую производительность и комфортность рабочих мест. Одной из основных причин взрыва метана стало повышенное газовыделение, вызванное концентрацией горного давления на угольный массив в зоне очистного забоя и на сопряжениях его с горными выработками, в совокупности с недостаточным извлечением объема выделяющегося метана из горного массива при предварительной дегазации выемочного столба.

Вследствие малого объема дегазационных работ и недостаточной их эффективности на многих газообильных шахтах России сохраняется газовый барьер, препятствующий достижению высоких скоростей проведения выработок и больших нагрузок на очистные забои. По этой причине в угледобывающей промышленности сложилась парадоксальная ситуация, когда технические возможности средств очистной выемки на пологих пластах в несколько раз превышают допустимую нагрузку на лаву по газовому фактору. Этим объясняется также низкая производительность труда и высокая степень травматизма при ведении подземных работ. Удовлетворительного технического решения таких задач на стадии ведения очистных и подготовительных работ нет ни в России, ни за рубежом.

Большое значение угля в России обусловлено тем обстоятельством, что он имеет более широкое территориальное распространение, чем другие энергоресурсы. Его запасы выявлены практически повсеместно в районах, где нет значительных ресурсов нефти и газа, – на юге Сибири, в Забайкалье, Приамурье, Приморье и на северо-востоке. В указанных и в ряде других регионов уголь длительное время будет основным или даже единственным крупным источником теплоэлектроснабжения.

Кемеровская область обеспечила 57 % добычи углей всех марок, 77 % добычи коксующихся углей и 79 % экспорта угля в Российской Федерации. В Кемеровской области существует и последовательно реализуется программа развития угледобычи.

Однако функционирование предприятий угольной промышленности сопровождается многосторонним негативным воздействием на окружающую природную среду. Взрывы и выбросы метана являются наиболее опасными и крупномасштабными авариями на угольных предприятиях во всем мире. Они являются основной причиной аварий, произошедших на шахтах стран СНГ, которые влекут за собой большие человеческие жертвы, потери и материальные, и финансовые, выводят на долгое время из строя целые шахты. Об этом свидетельствует, например, крупная авария, которая произошла 25.11.2021 г. на шахте «Листвяжная» в Кузбассе. Шахта «Листвяжная» была оснащена новейшей техникой и системой безопасности, а по итогам 2020 года на

предприятии достигнуты рекордные среднесуточные нагрузки на один очистной забой – 12,6 тыс. т. Причинами крупных, как правило, аварий является совокупность факторов – природного и человеческого.

Средняя метанообильность шахт Кузбасса оценивается в 25 куб. м на 1 т добываемого угля, достигая на ряде шахт 60-80 м^3/т, а на отдельных, особо метанообильных шахтах превышает эти величины в 1,5-2 раза. Существующими средствами дегазации, применяемыми в России, извлекается от 20 до 30 % общего объема выделяющегося метана. По мере роста объемов добычи угля, роль дегазации угля на стадии подготовительных работ возрастает и постепенно становится доминирующей.

Развитие на новом уровне технологий и средств управляемого воздействия на массив горных пород и угольный пласт могут обеспечить безопасность от природных и техногенных явлений. Дальнейшее повышение эффективности, технической и экологической безопасности подземной разработки высокогазоносных угольных месторождений неразрывно связано с разработкой комплекса специальных способов и средств управления горным давлением, а также стимулирования газоотдачи неразгруженных угольных пластов с последующей утилизацией шахтного метана.

Основной раздел. Один и тот же пласт в различных местах порой может проявлять совершенно разную способность отдавать газ. Так, при отработке угольного пласта после прохождения лавы под воздействием горного давления и процессов сдвижения происходит нарушение массива горных пород и, как следствие, образование трещин и пустот, в которые из углепородного массива выделяется газ и потом поступает в выработанное пространство шахты и горные выработки.

В недрах, осваиваемых и перспективных угольных бассейнов, сосредоточена значительная часть мировых ресурсов углей, а также их спутника – метана, масштабы ресурсов которого соизмеримы с ресурсами газа традиционных месторождений мира. В процессе дегазации ключевую роль играет техногенное воздействие на углепородный массив с целью развития его трещиноватости, что способствует выходу из угольного вещества связанного метана. Разработкой методов извлечения метана в угольных пластах до ведения очистных и подготовительных работ занимаются как у нас в стране [1–11], так и за рубежом [12–21].

По аналогии с нефтяными и газовыми месторождениями предлагались технологии применения дегазации угольных пластов с поверхности через вертикальные и наклоннонаправленные дегазационные скважины. Это требует разработки специального бурового оборудования, поэтому направленные скважины бурятся с поверхности в тех случаях, когда угольный пласт залегает неглубоко от поверхности и затраты на бурение таких скважин сопоставимы с затратами на бурение скважин из горных выработок. Установлено, что дебит горизонтальных скважин может в 10 раз превышать объемы, получаемые из вертикальных скважин, а из веера горизонтальных скважин дебит увеличивается в разы.

В работах, выполненных группой специалистов из Кувейта, Саудовской Аравии, США и Республики Конго на примерах из Северной Америки, Африки, Саудовской Аравии и Кувейта показано, что создание поперечных трещин в горизонтальных скважинах значительно увеличивает площадь контакта с газоносным пластом [22, 23]. Поперечные трещины (рис. 1., сиреневые области) – это трещины, направление которых перпендикулярно стволу скважины. Они создаются путем бурения в направлении наименьших горизонтальных напряжений. Продольные трещины (рис. 1, зеленые области) параллельны стволу и возникают в результате гидроразрыва скважин, пробуренных в направлении наибольших горизонтальных напряжений.

Рассмотрим результаты теоретических исследований распространения трещины и изменения ее направления при гидрорасчленении угольного пласта, а также сопоставление результатов с результатами эксперимента в Китае [24]. Скважины располагались на расстоянии 12 м, разрыв осуществлялся из центральной скважины (рис. 2 а). Процесс

гидрорасчленения длился 60 минут, давление, при котором началось расчленение, составляет 10 МПа (рис. 2 б). За этот период скважина наполнилась водой, и произошло гидрорасчленение с насыщением угольного пласта значительным количеством жидкости. Такой гидроразрыв происходит вдоль скважины и приводит к выходу трещины в подготовительный забой, что создает опасную ситуацию.

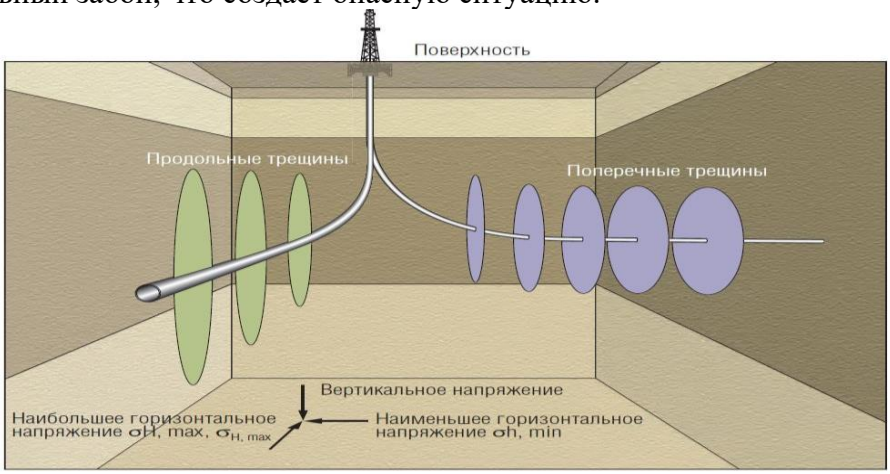


Рис. 1. Создание продольных и поперечных трещин в горизонтальных скважинах [22, 23]

Аналогичный результат получен специалистами «СУЭК-Кузбасс» и Института угля ФИЦ УУХ СО РАН в рамках аналогичной технологической схемы выполнения шахтных исследований применения гидрорасчленения угольного пласта из горизонтальных скважин, пробуренных из горных выработок, для повышения его газоотдачи [25]. Существование естественных трещин будет способствовать образованию сложной сети трещин. Наилучший результат для дегазации угля достигается, когда трещина гидроразрыва пересекает перпендикулярно естественную трещиноватость. Наличие естественных трещин может изменять путь распространения трещины и с разворотом распространяться вдоль естественных трещин.

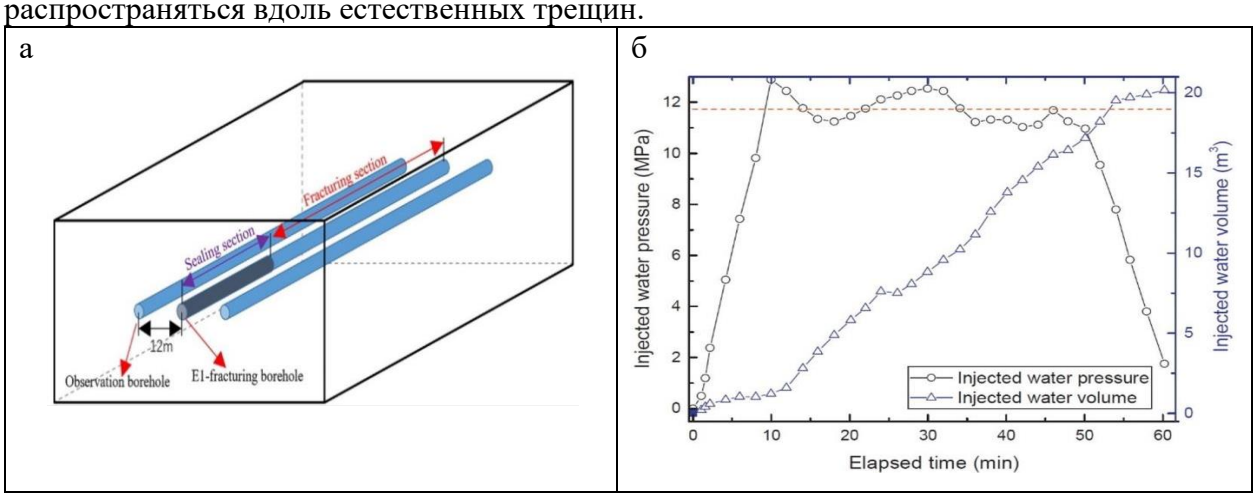


Рис. 2. Расположение скважин дегазации (а) и характер изменения давления (МПа) и объёма закачанной жидкости ($м^3$) во времени (минуты) (б) [24]

Газоотдающую способность неразгруженных угольных пластов можно повысить путем улучшения их коллекторских свойств на основе метода поинтервального гидроразрыва (ПГР) из подземных горных выработок через необсаженные дегазационные скважины, представленного в работах [26-28]. Технология ПГР основана на создании разрывного устройства (двусторонний пакер), включающего в себя два упруго расширяющихся рукава (пакера), между которыми установлен межпакерный клапан, предназначенный для регулирования давления рабочей жидкости в гидросистеме [29,30].

Он служит для своевременного пакерования скважины в зоне между упруго расширяющимися рукавами и дальнейшего повышения давления в этой зоне до величины, достаточной для гидроразрыва. Перемещая разрывное устройство вдоль скважины, можно производить гидроразрывы водой или водными растворами в заданных участках угольного пласта.

При осуществлении поинтервального гидроразрыва в угольном пласте при бурении возникает изменчивость сечения дегазационных скважин и отклонения их сечения от круговой формы [31] (рис. 3), что компенсируется упруго расширяющимися рукавами.

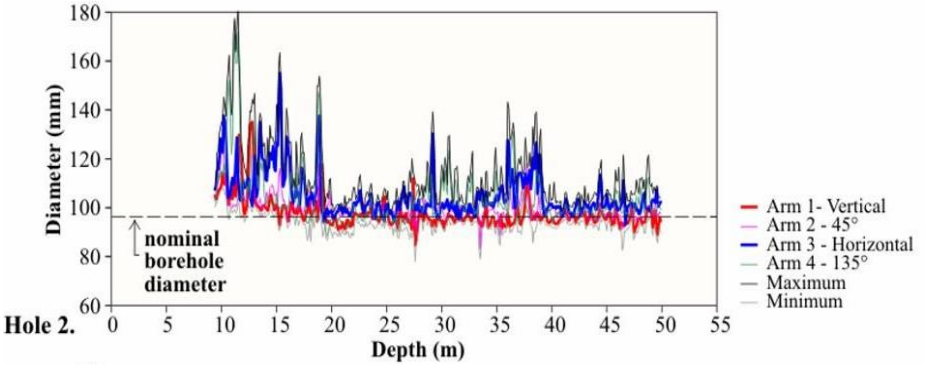


Рис. 3. Изменчивость необсаженной скважины по ее длине [31]

Поинтервальный гидроразрыв обеспечивает увеличение трещиноватости и газопроницаемости угольного пласта, а дальнейшее использование непосредственно энергии горного давления сохраняет их раскрытое состояние. Во время операции гидроразрыва пласта создаваемая трещина распространяется по пути наименьшего сопротивления перпендикулярно направлению действия минимального главного напряжения.

После разрыва под воздействием давления жидкости трещина увеличивается, возникает ее связь с системой естественных трещин, не вскрытых скважиной, и с зонами повышенной проницаемости; таким образом, расширяется область пласта, дренируемая скважиной. В результате ПГР пласта кратно повышается проницаемость и дебит добывающих скважин за счет снижения гидравлических сопротивлений в призабойной зоне и увеличения фильтрационной поверхности скважины, а также увеличивается конечная газоотдача за счет приобщения к выработке слабо дренируемых зон и пропластков.

В результате выполнения работ предполагается создать основы технологии, обеспечивающей снижение объемов бурения дегазационных скважин в 3 раза при одновременном увеличении интенсивности и глубины дегазации угольных толщ не менее, чем в 2 раза с получением на выходе метановоздушных смесей.

Показательные пробные шахтные испытания были проведены в условиях шахты ПАО «Распадская» из конвейерного штрека на пласт 7-7а мощностью 3,60-4,24 м, где природная газоносность составляла 22,0-22,5 м^3/т в восстающей скважине предварительной дегазации с разворотом от оси выработки на 90°. Для определения эффективной зоны гидровоздействия в 9,6 метрах по обе стороны пробурены контрольные скважины. Первые три гидроразрыва с регистрацией изменения диаметра скважины были проведены на устье выработки в 30 метрах. Установлено, что при реализации трех разрывов вблизи выработки (30 м) произошло увеличение выхода метана в среднем в 2,4 раза. Ежесуточный мониторинг изменения параметров дегазации в скважине гидроразрыва и соседних контрольных скважин проводился до и после реализации работ (рис. 4). Показано, что увеличение среднего показателя дебита метана свыше 60 %

Выводы. Опытные испытания показали, что для эффективной интенсификации предварительной дегазации через необсаженные скважины в части увеличения объема каптируемого метана и снижения природной газоносности подготавливаемого выемочного участка целесообразно применять метод поинтервального гидроразрыва. Комплексный

подход к мероприятиям по ПГР с целью подготовки выемочного столба и заблаговременной дегазации, позволит:

– повысить безопасность добычи угля за счет повышения глубины его дегазации и снижения опасности внезапных выбросов метана;

– повысить безопасность добычи угля за счет снижения опасности горных ударов вследствие частичной разгрузки массива от напряжений трещинами гидроразрыва;

– снизить объемы бурения дегазационных скважин;

– снизить вредные выбросы метана в атмосферу.

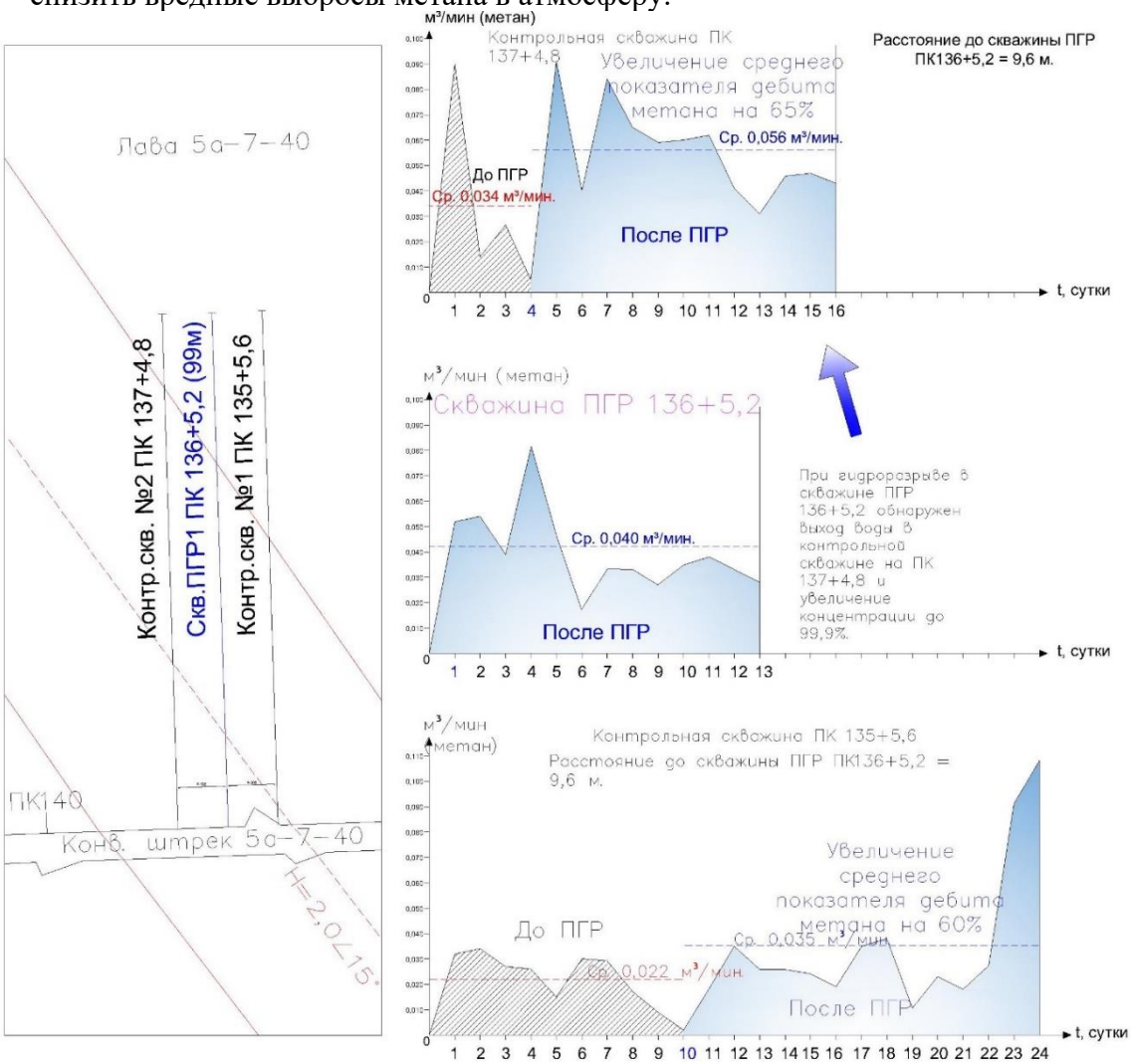


Рис. 4. Мониторинг изменения параметров дегазации до и после поинтервального гидроразрыва угольного пласта

Благодарности. Исследование выполнено в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. №1144-р (Соглашение № 075-15-2022-1191).

Список литературы

1. Трубецкой К.Н., Рубан А.Д., Забурдяев В.С. Методология обоснования способов и параметров дегазации угольных шахт // ФТПРПИ. – № 1. – 2011. – С. 3-11.

2. Трубецкой К.Н., Гурьянов В.В. Повышение эффективности подземной разработки высокогазоносных угольных месторождений на основе организации совместной добычи угля и метана // Уголь. – 2003. – № 9. – С. 3-6.

3. Метан в угольных шахтах и рудниках России: прогноз, извлечение и использование / А.Д. Рубан, В.С. Забурдяев, Г.С. Забурдяев [и др.]. – М.: ИПКОН РАН, 2006. – 312 с.

4. Ножкин Н.В. Заблаговременная дегазация угольных месторождений. – М.: Недра, 1979. – 271 с.

5. Сергеев И.В. Управление газовыделением в угольных шахтах при ведении очистных работ / И.В. Сергеев, В.С. Забурдяев [и др.]. – М.: Недра, 1992. – 256 с.

6. Сластунов С.В. Заблаговременная дегазация и добыча метана из угольных месторождений. – М.: Изд-во МГГУ, 1996. – 441 с.

7. Проблемы разработки метаноносных пластов в Кузнецком угольном бассейне / Ю.Н. Малышев, Ю.Л. Худин, М.П. Васильчук и [др.]. – М.: Изд-во Академии горных наук, 1997. – 463 с.

8. Пучков Л.А., Сластунов С.В., Федунец Б.И. Перспективы добычи метана в Печорском угольном бассейне. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 557 с.

9. Пучков Л.А., Сластунов С.В., Презент Г.М. Перспективы промышленного извлечения угольного метана // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Изд-во МГГУ, 2002. – № 6. – С. 6-10.

10. Пучков Л.А., Сластунов С.В., Коликов К.С. Проблемы реализации концепции метанобезопасности на угольных шахтах России // Уголь. – № 1. – 2009. – С. 28-30.

11. Сластунов С.В., Шилов А.А., Грибанов Н.И. Дегазация угольных пластов пороховыми генераторами давления // Горная промышленность. – № 2. – 2004. – С. 12-18.

12. Сикора П., Смыслов Д., Плетнер О. Особенности заблаговременной дегазации угольных пластов методом бурения скважин с поверхности // Глюкауф. – 2008. – № 1. – С. 39-45.

13. Пармузин П.Н. Зарубежный и отечественный опыт освоения ресурсов метана угольных пластов : монография. – Ухта: УГТУ, 2017. – 109 с.

14. Directional hydraulic fracturing to control hard-roof rockburst in coal mines / F. Jun, D. Linming, H. Hua [et al.] // International Journal of Mining Science and Technology. – 2015. – Vol. 22, Is. 2. – PP. 177-181.

15. 3D finite element modeling of directional hydraulic fracturing based on deformation reinforcement theory / J. Deng, Q. Yang, Y. Liu [et al.] // Computers and Geotechnics. – 2018. – Vol. 94. – PP. 118-133.

16. Руководство по наилучшей практике эффективной дегазации источников метановыделения и утилизации метана на угольных шахтах. – Женева: ООН, второе издание. Серия публикаций Европейской экономической комиссии по энергетике. – № 47. – 2016. – 132 с.

17. Дуган Т., Арнольд Э. GAS! Страницы истории добычи угольного метана в бассейне Сан-Хуан: пер. с англ. – М.: CBM Partners Corporation, 2008. – 208 с.

18. C. Özgen Karacan, Ricardo A. Olea. Stochastic reservoir simulation for the modeling of uncertainty in coal seam degas-ification // Fuel. – 2015. – Vol. 148. – PP. 87-97. – URL: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.046

19. Wang Z.R., Li K., Wang Y.X. Characteristics of compression fracture of three soft coal bed by perfusion and gas sucking technique // Journal of Coal Science and Engineering. – 2011. – Vol. 17. – PP. 43-46.

20. Sui W., Zhang S. Optimization design of integral fracturing parameters for low permeability highly faulted reservoirs // Petroleum Exploration and Development. – 2007. – Vol. 24. – № 1. – PP. 98-103.

21. Hossain M.M., Rahman M.K., Rahman S.S. Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of wellbore trajectory, per-foration and stress regimes // Journal of Petrole-um Science and Engineering. – 2000. – Vol. 27. – № 34. – PP. 129-149.

22. Метан угольных пластов: чистая энергия для всего мира / Ахмед Аль-Джубори, Шон Джонстон, Чак Бойер [и др.] // Нефтегазовое обозрение. – 2009. – Т. 21. – № 2. – С. 4-17.

23. Индивидуальный подход к проектированию гидроразрыва пласта / Бадер Аль-Мата, Маджди Аль-Мутава, Мухаммад Аслам [и др.] // Нефтегазовое обозрение. – 2008. – С. 4-18.

24. Crack propagation and crack direction changes during the hydraulic fracturing of coalbed / Y. Zhao [et al.] // Computers and Geotechnics. – 2019. – Т. 111. – PP. 229-242.

25. Оценка фильтрационных свойств угля в гидродинамических испытаниях дегазационных пластовых скважин / Е.П. Ютяев, А.П. Садов, Мешков А.А. [и др.] / Уголь. – 2017. – №11. – С. 24-27.

26. Klishin V.I., Opruk G.Y., Tatsienko A.L. Technology and means of a coal seam interval hydraulic fracturing for the seam degassing intensification // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2017. – Volume 53. – Issue 1. – PP. 012019.

27. Development of device for interval-by-interval hydraulic fracture / V.I. Klishin, G. Opruk, D.I. Kokoulin [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2019. – Volume 262. – Issue 1. – PP. 012028.

28. Klishin C.V., Klishin V.I. Packer Sealing–Wellbore Interaction in Hydraulic Fracturing in Coal Seams // Journal of Mining Science. – 2020. – Т. 56. – №. 4. – С. 547-556.

29. Разупрочнение угольного пласта в качестве метода интенсификации выделения метана / В.И. Клишин, Д.И. Кокоулин, Б. Кубанычбек [и др.] // Уголь. – 2010. – № 4. – С. 40-42.

30. Поинтервальный гидроразрыв угольного пласта для интенсификации процесса дегазации / В.И. Клишин, Г.Ю. Опрук, С.В. Клишин [и др.] // Уголь. – 2022. – № S12. – С. 16-22. DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-S12-16-22.

31. El Rabaa W. Experimental study of hydraulic fracture geometry initiated from horizontal wells // Annual Technical Conference and Exhibition. – San Antonio, Texas, 1989. – SPE paper 19720.

УДК 622.33:622.8:622.014.1:622.232:553

СТРАТЕГИЯ ДОЛГОСРОЧНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ КУЗБАССА

[1]чл.-корр. РАН Клишин В.И., [2]д.т.н. Рогова Т.Б., [1]д.т.н. Шаклеин С.В., [1, 2]д.т.н. Писаренко М. В.

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

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

Аннотация. Анализ минерально-сырьевой базы угольной отрасли показал, что в среднесрочной перспективе поддержание сырьевого потенциала отрасли по отдельным высокоценным технологическим маркам угля предполагает разработку новых и совершенствование существующих технологий добычи угля подземным способом, ориентированных на отработку запасов, залегающих в сложных горно-геологических условиях. Успешная разработка, испытание и внедрение новых технологий добычи для отработки таких запасов, предполагает отнесение их решением Правительства РФ к трудноизвлекаемому виду полезного ископаемого, к которому, прежде всего, следует

отнести запасы в пластах с круто-наклонным и крутым залеганием, а также с высокой степенью геологической нарушенности.

Ключевые слова: уголь, минерально-сырьевая база, технологии добычи, лицензирование, стратегия.

Уголь на протяжении длительного периода остается одним из ключевых мировых источников получения первичной энергии, и ни один из базовых сценариев глобальных прогнозов развития мировой энергетики до 2040 года не предполагает снижения физических объемов потребления угля. Ожидается лишь снижение его доли в мировом энергетическом балансе до 20–23 % в 2040 [1-2].

Согласно отчету Международного энергетического агентства по рынку угля, мировое потребление и производства угля в 2023 году установило новый рекорд, превысив прошлогодний – мировое потребление угля оценивается в 8,4 млрд. т [3].

Основной причиной сохранения значимости угля является его ресурсная база, объекты которой размещены на территории 50 государств мира. Россия, по масштабам учтенной сырьевой угольной базы угля занимает второе место в мире.

По состоянию на 01.01.2021 на государственном балансе России числится 196,6 млрд. т запасов промышленных категорий $A+B+C_1$ и 78,5 млрд. т – категории C_2, а добыча угля в России в 2023 году несколько снизилась и составила 438,7 млн. т [4].

Общее количество апробированных прогнозных ресурсов угля страны категорий $P_1+P_2+P_3$ составляет 1529,3 млрд. т [5]. При этом существует огромный потенциал их увеличения, прежде всего за счет Западно-Сибирского угольного бассейна простирающегося от побережья Карского моря примерно до Барнаула и от Екатеринбурга до Красноярска и Норильска, предварительно оцененные прогнозные ресурсы которого составляют порядка 26 трлн. т, что почти в два раза превышает современную оценку ресурсов угля остального мира [6]. В ближайшем будущем большая часть ресурсов этого бассейна для промышленного освоения мало перспективна из-за сложных горно-геологических условий их залегания, но они могут стать востребованными при условии появления новых эффективных технологий добычи и переработки углей, в том числе таких, как скважинная гидродобыча, подземная газификация, биоожижение, и биогазификация и т.п.

Основным угольным регионом России является Кемеровская область-Кузбасс. Состояние минерально-сырьевой базы Кузбасса отражает и общероссийское ее состояние, оцениваемое с точки зрения добывающей отрасли по количеству запасов промышленных категорий $A+B+C_1$.

Источником данных о состоянии ресурсного обеспечения отрасли является государственный баланс запасов, содержащий сведения о количестве запасов, движении запасов, промышленной значимости и марочном составе. Получить представление о тенденциях изменения запасов угля Кузбасса можно по двум его временным срезам: настоящего времени и данным 2004 года, когда в Кузбассе развернулось массовое лицензирование новых участков недр.

Обеспеченность угольной промышленности Кузбасса запасами угля промышленных категорий формально выглядит вполне удовлетворительным (табл. 1).

Наличие мощной ресурсной базы предопределило высокие темпы освоения Кузнецкого угольного бассейна, ставшего основным поставщиком российских углей на внутренний и внешний рынки. По итогам работы в 2023 году добыча угля составила 214,2 млн. т, из которого 143 млн. тонн (66%) добыто открытым способом и порядка 71,2 млн. т подземным (34%) [4].

Данные табл. 1 демонстрируют огромный дисбаланс между объемами добычи и ресурсной базой подземного и открытого способов добычи. Если в добыче угля доля

открытого способа около 70 %, то в его запасах всего 23 %, а по особо ценным маркам коксующегося угля дисбаланс существенно выше – 24 и 3 % соответственно.

Отсюда следует, что дальнейшее поддержание и развитие существующего потенциала угольной отрасли, прежде всего по направлению сырьевого обеспечения коксохимической промышленности, может быть достигнуто только за счет использования подземной добычи угля. Это утверждение справедливо и в отношении остальных коксодобывающих бассейнов страны [7-8].

Таблица 1

Балансовые запасы каменного угля и антрацитов Кузбасса

Год	Балансовые запасы категорий $A+B+C_1$ по состоянию на 1 января, млрд. т					
	Каменный уголь и антрацит		Коксующийся уголь		Особо ценные марки коксующегося угля*	
	всего	из них для подземной добычи	всего	из них для подземной добычи	всего	из них для подземной добычи
2004	52,419	42,031 (80 %)	28,548	26,059 (91 %)	12,271	12,096 (99 %)
2020	55,471	42,900 (77 %)	28,572	25,620 (90 %)	13,749	13,337 (94 %)
2021	54,696	42,008 (77 %)	28,515	25,491 (89 %)	13,773	13,313 (97 %)
2022	54,387	41,465 (76 %)	27,972	25,201 (90 %)	13,606	13,144 (97 %)

*нормативно к ним относятся коксующиеся угли марок КЖ, К, Ж, ГЖ, ОС

Как известно, к балансовым запасам относятся запасы, разработка которых на момент оценки экономически эффективна при использовании технологических приемов добычи и переработки, проверенных в промышленных или полупромышленных условиях, обеспечивающих соблюдение требований по рациональному использованию недр и охране окружающей среды. Балансовая значимость запасов оценивается по результатам их государственной экспертизы осуществляемой по требованиям действующей в момент оценки Классификации запасов и используемых технологий извлечения угля. Естественно, что классификационные и технологические требования не постоянны и изменяются во времени. Однако их изменение не предполагает пересмотра данных государственного баланса и внесения в него каких-либо изменений. По состоянию на 01.01.2020 в пределах Кемеровской области–Кузбасса на учете числились 633 угольных объекта (608 в пределах Кузнецкого и 25 в пределах Канско-Ачинского бассейнов), 59% из которых содержат запасы, утвержденные по требованиям уже недействующих Классификаций 1933, 1941, 1953, 1960, 1981, 1997 годов и технологических подходов этих лет [9]. Уже сам этот факт позволяет усомниться в представительности данных госбаланса.

Важнейшим показателем объективности баланса является востребованность числящихся на нем запасов промышленностью.

Вновь обратившись к табл. 1, можно увидеть, что с 01.01.2004 по 01.01.2020 балансовые запасы каменных и коксующихся углей Кузбасса выросли с 52,419 до 55,471 млрд. т. За этот период в Кузбассе по ходатайствам бизнеса были проведены аукционы и конкурсы на получение права пользования недрами 206 участков недр с суммарными запасами и ресурсами угля в 18,60 млрд. т. Однако почти половина их – 9,06 млрд. т (49 %), на момент проведения аукционов и конкурсов вообще не числилась на государственном балансе. Именно за счет разведки этих запасов с доведением их разведанности до категорий $A+B+C_1$, а также перевода в эти категории еще 1,37 млрд. т ранее числящихся на балансе запасов категории C_2 и произошел рост запасов промышленных категорий бассейна за указанный период (за 16 лет). Несложно подсчитать, что при указанном уровне прироста запасов их среднегодовое погашение составило в этот период порядка 460 млн. т из чистых

угольных пачек при средней добыче из них в 171 млн. т (т.е. на 1 т добычи погашалось около 3 т запасов). Продемонстрированный за 16 лет уровень востребованности имеющегося значительного количества уже разведанных запасов Кузбасса нельзя не признать симптоматичным.

Значительно меньший уровень востребованности учтенных балансом запасов наблюдается в период с 01.01.2020 по 01.01.2023. За это время было проведено семь конкурсов и аукционов с общим объемом передаваемых в пользование ресурсов и запасов 1,879 млрд. т, из которых 1,565 млрд. т (83 %) на балансе на момент лицензирования не числились.

Представленная на рис. 1 динамика востребованности промышленностью запасов госбаланса в период с 2004 по 2021 годы показывает, что в среднем за этот период доля учтенных балансом запасов в пополнении запасов шахтного и карьерного фонда бассейна составила лишь 47 %.

Более того, с 2010 года востребованность запасов Госбаланса начала постоянно снижаться. Если исключить из статистики непредставительные данные 2013 и 2021 годов (в которые было проведено четыре аукциона по участкам-«прирезкам» к полям действующих предприятий с суммарными запасами соответственно в 38,07 и 82,42 млн. т), то данные 2010 – 2022 годов демонстрируют устойчивое снижение уровня использования запасов Госбаланса с темпом снижения его доли на 4 % в год (пунктирная линия на рисунке, построенная по «закрашенным» точкам) при коэффициенте корреляции 0,80.

Рис. 1. Востребованность промышленностью в период 2004-2021 годов запасов, числящихся на государственном балансе

Таким образом, содержащаяся в государственном балансе информация не отражает реального состояния минерально-сырьевой базы угольной промышленности Кузбасса.

По состоянию на 01.01.2022 учтенные балансом запасы нераспределенного фонда недр, за счет которого предусматривается восполнение выбывающих запасов действующих и создаваемых горных предприятий области, составляют 33,988 млрд. т (табл. 2).

Таблица 2

Балансовые запасы каменного угля и антрацитов нераспределенного фонда недр Кузбасса по состоянию на 01.01.2022

Балансовые запасы категорий $A+B+C_1$, млрд. т					
Каменный уголь и антрацит		Коксующийся уголь		Особо ценные марки коксующегося угля	
всего	из них для подземной добычи	всего	из них для подземной добычи	всего	из них для подземной добычи
33,988	28,935 (84 %)	17,944	16,624 (93 %)	7,963	7,870 (99 %)

Теоретически, при годовой добыче угля в Кузбассе на уровне 300 млн. т (соответствующей добыче 260 млн. т угля из угольных пачек) и соотношении объемов добычи и погашения запасов, обеспеченность промышленности запасами за счет нераспределенного фонда недр оценивается в 48 лет. Однако, учитывая сложившую тенденцию низкой востребованности запасов этого фонда, оптимистическая оценка продолжительности его использования снижена в два раза – до 24 лет.

Невостребованность значимой части балансовых запасов Кузбасса обусловлена их низкой технологичностью, т.е. отсутствием эффективных технологий извлечения, прежде всего подземным способом. По сути, это трудно извлекаемые запасы, которые оцениваются для Кузбасса в 17–25 млрд. т, горно-геологические условия их залегания не отвечают требованиям промышленных технологий добычи.

Приведенная выше оценка показывает, что Кузбасс уже прошел стадию экстенсивного развития своей минерально-сырьевой базы, в основе которой лежал поиск участков недр пригодных к эффективному освоению промышленными технологиями. Наступает новый этап развития Кузбасса – этап интенсивного развития, в основе которого лежит не поиск запасов под промышленные технологии, а разработка и совершенствование технологий под горно-геологические условия разведанных запасов.

Помимо балансовых запасов, классификации запасов выделяют группу забалансовых запасов, вовлечение которых в эксплуатацию на момент оценки экономически нецелесообразно или технически и технологически невозможно, но освоение которых в ближайшем будущем становится экономически возможным при изменении цен на полезные ископаемые или появлении новых технологий добычи.

Количество забалансовых запасов каменного угля и антрацита в Кузбассе постоянно увеличивается и составляет на 01.01.2022 10,3 млрд. т (19 % от всех и 21 % от балансовых запасов для подземной добычи) – табл. 1 и 3.

Доля коксующихся забалансовых углей по отношению к аналогичным балансовым – 15 %, а для подземной добычи 16 %, по особо ценным – 19 %. Часть этих запасов (официально, чуть более 1 млрд. т) находится на полях действующих предприятий.

Промышленные технологии извлечения угля исключают возможность эффективного ведения очистных работ в условиях высокой геологической нарушенности пластов и на пластах круто-наклонного и крутого залегания. Об этом свидетельствует результат проведенного в 2022 году анализа подземной добычи на 26 шахтах 1-й и 2-й групп сложности геологического строения, расположенных в девяти угленосных районах Кузбасса.

Таблица 3

Забалансовые запасы каменного угля и антрацитов Кузбасса

Год	Забалансовые запасы по состоянию на 1 января, млрд. т					
	Каменный уголь и антрацит		Коксующийся уголь		Особо ценные марки коксующегося угля	
	всего	из них для подземной добычи	всего	из них для подземной добычи	всего	из них для подземной добычи
2004	7,203	7,094 (98 %)	3,454	3,394 (98 %)	2,609	2,591 (99 %)
2020	9,470	8,261 (87 %)	3,768	3,644 (97 %)	2,451	2,407 (98 %)
2021	9,928	8,597 (87 %)	4,038	3,912 (97 %)	2,578	2,534 (98 %)
2022	10,298	8,837 (86 %)	4,147	3,991 (96 %)	2,599	2,555 (98 %)

Анализ показал, что экономически приемлемые результаты отработки достигались при коэффициенте нарушенности выемочных полей по показателю А.С. Забродина не

превышающем 24 м/га [10]. Отметим, что ни один участок недр 3-й группы сложности за всю историю лицензирования не был востребован промышленностью для шахт, а все ранее действовавшие в советский период шахты этой группы сложности закрыты.

В целом, на основе представленного выше можно утверждать, что развитие угольной отрасли, прежде всего Кузбасса, предполагает необходимость разработки новых технологий подземной добычи, обеспечивающих отработку невостребованных промышленностью запасов, объем которых сопоставим с запасами действующего фонда горнодобывающих предприятий. Такие запасы можно классифицировать как трудноизвлекаемые. К ним объективно следует отнести запасы всех (начиная с тонких) круто-наклонных и крутых пластов (с углами падения более 35°), а также дизъюнктивно нарушенные пласты при коэффициенте нарушенности свыше 25 м/га при любых углах их падения.

Кроме того, при ведении открытых горных работ часть запасов безвозвратно остается в бортах разрезов, так как их добыча затруднительна при использовании промышленных технологических решений, также следует рассматривать в качестве трудноизвлекаемых.

Таким образом, состояние минерально-сырьевой базы угольной отрасли России и Кузбасса предполагает необходимость разработки новых технологий подземной добычи как главной стратегической задачи технологического развития. Встает вопрос об обеспечении финансирования таких работ. Угольная промышленность России представлена частными компаниями, наиболее крупные из которых в последние годы создали для себя мощную сырьевую базу приемлемого качества. Истощение этой базы, безусловно, наступит. Но, исходя из неверного восприятия угольным бизнесом реального ее состояния и перспектив дальнейшего развития, сроки ее реального истощения воспринимаются как чрезмерно отдаленные и пока не требующие принятия превентивных решений. Привлечение финансовых ресурсов компаний к решению стратегических задач технологического развития в целях расширения минерально-сырьевой базы страны представляется возможным только при условии получения ими определенных преференций уже в настоящее время. Пожалуй, единственным исключением из этого могут стать лишь государственные угольные компании, возникновение которых, судя по всему, возможно на территориях Донецкой и Луганской народных республик РФ, ресурсная база которых весьма специфична и во многом представлена именно трудноизвлекаемыми запасами. Несомненно, что на первом этапе работы, состоящем в поиске принципиально новых технологических подходов и создании «черновых» прототипов, основную роль может взять на себя государство путем включения таких работ в программы работ исследовательских институтов, а также их поддержки грантами. Результаты работ по этому этапу позволят перейти к этапу практической реализации.

Организация проведения натурных экспериментов, опытно-промышленных работ и испытаний в шахтных условиях представляет собой еще более сложную задачу, возможность решения которой на действующих предприятиях ограничено нормативными требованиями к проектированию и эксплуатации угольных шахт, многие из которых ныне просто не преодолимы.

В мае 2020 года вступили в силу принятые в ноябре 2019 года поправки к Закону РФ «О недрах», устанавливающие новый вид пользования недрами: «для разработки технологий геологического изучения, разведки и добычи трудноизвлекаемых полезных ископаемых». Он может использоваться как для вновь предоставляемых участков недр, так и для ранее уже переданных в освоение (в том числе, и по фрагментам участков недр). Законом определено, что виды трудноизвлекаемых полезных ископаемых, в отношении которых данный вид пользования может использоваться, устанавливается Правительством РФ. Из этого следует, что действующие законодательные подходы не препятствуют признанию угля в качестве трудноизвлекаемого полезного ископаемого для условий подземной добычи при определенных условиях залегания его пластов.

Несомненно, что такое признание будет стимулировать недропользователей к участию в финансировании и в разработке новых технологий добычи. Во-первых, уже сейчас в перечень научных исследований и опытно-конструкторских разработок, расходы налогоплательщика на которые включаются в состав прочих расходов с коэффициентом 1,5, входит «разработка технологий геологического изучения и освоения месторождений трудноизвлекаемых и нетрадиционных источников минерального сырья» [11]. А во-вторых, Минприроды России уже признало целесообразным введение понижающих коэффициентов к ставке НДПИ для трудноизвлекаемых запасов и приступило к продвижению этой идеи.

Однако, самое главное, наличие статуса трудноизвлекаемого, позволит «легализовать» возможность проведения опытно-промышленных испытаний новых технологий в шахтных условиях.

Следует отметить, что вовлечение в освоение трудноизвлекаемых запасов действующих предприятий позволит продлить срок их службы и, тем самым, снизить остроту проблем, которые неизбежно возникнут при ликвидации градообразующих горных предприятий.

Выводы. Таким образом, стратегической задачей технологического развития угольной отрасли является разработка новых технологий подземной добычи трудноизвлекаемых запасов угля, решение которой предполагает необходимость придания ему соответствующего статуса Правительством РФ.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0024 «Разработка эффективных технологий добычи угля роботизированными горнодобывающими комплексами без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ, систем управления и методов оценки технического состояния и диагностики их ресурса и обоснование обеспечения воспроизводства минерально-сырьевой базы. 2024-2025 гг.» (рег. № 1022041500010-0-1.5.1;2.7.5).

Список литературы

1. Долгосрочное развитие мировой энергетики и место России в ней // Энергетический бюллетень Аналитического центра при Правительстве РФ. – 2017. – № 54.– С. 14-23.

2. Отражение кризисов 2020–2021 годов в энергетических прогнозах // Энергетический бюллетень Аналитического центра при Правительстве РФ. – 2021. – № 102. – С. 4-7.

3. Плакиткина Л.С, Плакиткин Ю.А., Дьяченко К.И. Современные тренды и прогноз развития угольной промышленности мира и России в условиях трансформации мировой экономики // Уголь. –2024. –№ 3. –С.44-51. –DOI: 10.18796/0041-5790-2024-3-44-51.

4. Добыча угля в России в 2023 году снизилась на 1,1%. – ТАСС, 6 февраля 2024 г. – URL: https://tass.ru/ekonomika Л 9912963.

5. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году. – М.: Минприроды России. Роснедра, 2021. – 567 с.

6. Угольная база России. Т. II. Угольные бассейны и месторождения Западной Сибири (Кузнецкий, Горловский, Западно-Сибирский бассейны, месторождения Алтайского края и Республики Алтай). – М.: ООО «Геоинформцентр», 2003. – 604 с.

7. Клишин В.И., Писаренко М.В., Шаклеин С.В. Перспективные технологии освоения месторождений коксующихся углей подземным способом // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2022. – № 1. – С. 115-119. – DOI: 10.15372/FPVGN2022090115/

8. Pissarenko M.V., Shaklein S.V. Prospects for Coking coal extraction //Coal and chemistry. – 2022. – № 10. – PP. 427-432.

9. Рогова Т.Б., Шаклеин С.В. О взаимосвязи между современными и ранее существовавшими оценками категорий запасов твердых полезных ископаемых // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2022. – № 1. – С. 35-44.

10. Шаклеин С.В., Рогова Т.Б., Писаренко М.В. О неопределенности (достоверности) геологических материалов, обеспечивающей реализуемость проекта освоения угольного месторождения // Рациональное освоение недр. – 2022. – № 3. – С. 26–37. – DOI: 10.26121/RON.2022.16.62.002.

11. Изменения, которые вносятся в перечень научных исследований и опытно-конструкторских разработок, расходы налогоплательщика на которые в соответствии с пунктом 7 статьи 262 части второй Налогового кодекса Российской Федерации включаются в состав прочих расходов в размере фактических затрат с коэффициентом 1,5: утв. постановлением Правительства РФ 18.02.2022 № 207 // Офиц. интернет-портал правовой информации. – URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/.

УДК 622.333

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КУЗБАССА

чл.-корр. РАН Клишин В.И., д.т.н. Федорин В.А., Татаринова О.А.
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
г. Кемерово, Россия

Аннотация. При оценки использован традиционный подход, рекомендованный МПР России, для технологической оценки запасов угольных пластов в Терсинском геолого-экономическом районе Кузбасса. Дополнительно рассмотрены вопросы создания производственной инфраструктуры угледобывающего комплекса «Увальный» Терсинского ГЭР.

Ключевые слова: углеплотность, технологическая оценка, Терсинский геолого-экономический район, метод доступа к георесурсам.

На основании выполненных исследований установлено, что состояние и воспроизводство ресурсной базы в угольной промышленности Кузбасса достаточно надежны, однако для эффективного развития угледобычи и обеспечения конкурентоспособности угля на внутреннем и внешнем рынках в ближайшие годы необходима переоценка сырьевого потенциала действующих шахт и резервных участков для нового шахтного строительства. Существуют проблемы, связанные с территориальным размещением, марочным составом углей и особенно с технологической оценкой отработки пластов угля в Кузбассе при применении новых технологий угледобычи.

Для анализа распределения угольных пластов по геолого-экономическим районам Кузбасса использована электронная база данных д.г.-м.н. Юзвицкого А.З. [1], в создании которой принимали непосредственное участие сотрудники Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН [2, 3]. Геолого-промышленная карта Кузнецкого бассейна создана с пакетом прикладных информационных программ по марочному составу угля (ГОСТ 25543-88). геологической изученности, особенностях геологического строения, угленосности, перспективного освоения и воспроизводства угольной сырьевой базы Кузнецкого бассейна

По качественным характеристикам запасы угля для подземного способа разработки разделяются на 3 группы: высокотехнологичные, технологичные и нетехнологичные (табл. 1) [4]. Из общего резерва выделяются, с одной стороны, категории наиболее рентабельных,

или технологичных запасов и, с другой – категории нерентабельных, или нетехнологичных, запасов.

Повышение планки группы высокотехнологичных запасов по мощности пластов до 7 метров, а в отдельных случаях до 8,4 метра (в один слой) связано с новым очистным оборудованием в длинном забое (Eickhoff SL 1000) с месячной производительностью до 1 млн. т угля или с комплексом выпуска угля подкровельной толщм роботизированным комплексом [5]. В практике угледобычи пласты мощностью более 3,5 м (для подземного способа) и более 4,5 м (для открытого) считаются мощными.

Приведенный выше качественный анализ запасов угля по технологичности разработки показывает, что технологическая оценка угля, находящегося в недрах, является сложной и многоплановой задачей, требующей нестандартных решений, связанных с методологией оценки месторождений полезных ископаемых. Главными причинами такого состояния являются постоянно меняющаяся экономическая среда и особенности национального недропользования [6].

Этот подход реализован в международном стандарте VALMIN, разработанный Австралийским институтом горного дела и металлургии (AusIMM) и рекомендован МПР России в Методических рекомендациях по технико-экономическому обоснованию кондиций для подсчета запасов месторождений твердых полезных ископаемых. Угли и горючие сланцы [7].

Для первоначальной оценки денежного потока (ДП), или Cash Flow (CF) по прибыли, использована формула

$$П_{ДП} = \mathbf{S}(Ц_t - З_t)/(1 + E)^t,$$

где $Ц_t$ – стоимость реализованной продукции соответствующей марки в t-м году с учетом обогащения; $З_t$ – полные затраты (включая налоги) с учетом геотехнологического способа разработки (открытый, подземный или комбинированный) в t-м году, руб.; E – ставка дисконтирования (норма дисконта времени), доли ед.

Первоначальная исходная информация по группам технологичности запасов угля разбивается на участки по площади (углеплотность), которая выражается в количестве запасов угля, заключенных в угленосной формации (свите, горизонте) по мощности и маркам угля, на единицу площади (км^2) ее общего распространения или в принятых границах технологической оценки.

На рис. 1 представлено распределение углеплотности (млн. т/кв. км) и удельной по площади ценности запасов угля (млрд. руб./кв. км) Терсинского ГЭР ($П_н$ в координатах *x, y*) где выделяются две области (юго-западная и восточная) с максимальными значениями удельной ценности запасов угля по мощности пластов и марочному составу [8].

Проблема стоимостной оценка запасов угля является сравнительно новой, а ее решение еще недостаточно проработано как в теоретическом, так и в практическом плане. Схемы разработки месторождений могут быть весьма разнообразны, а расчетные показатели производительности существенно отличаться от реальных значений технологической оценки.

Определить стоимость конкретного месторождения можно лишь путем имитационного моделирования всего процесса разведки, разработки, обустройства месторождения, добычи и реализации продукции (включая процесс обогащения). При этом должны быть обоснованы геологические, технологические, экологические, экономические и другие показатели, характеризующие этот процесс с учетом оценки устойчивости и обоснованности принимаемых решений.

При оценке угольных месторождений предлагается использовать метод пооперационного моделирования параметров технологических схем и процессов. Этот метод был использован авторами при анализе производственной инфраструктуры угледобывающего комплекса «Увальный» Терсинского геолого-экономического района Кузбасса [9].

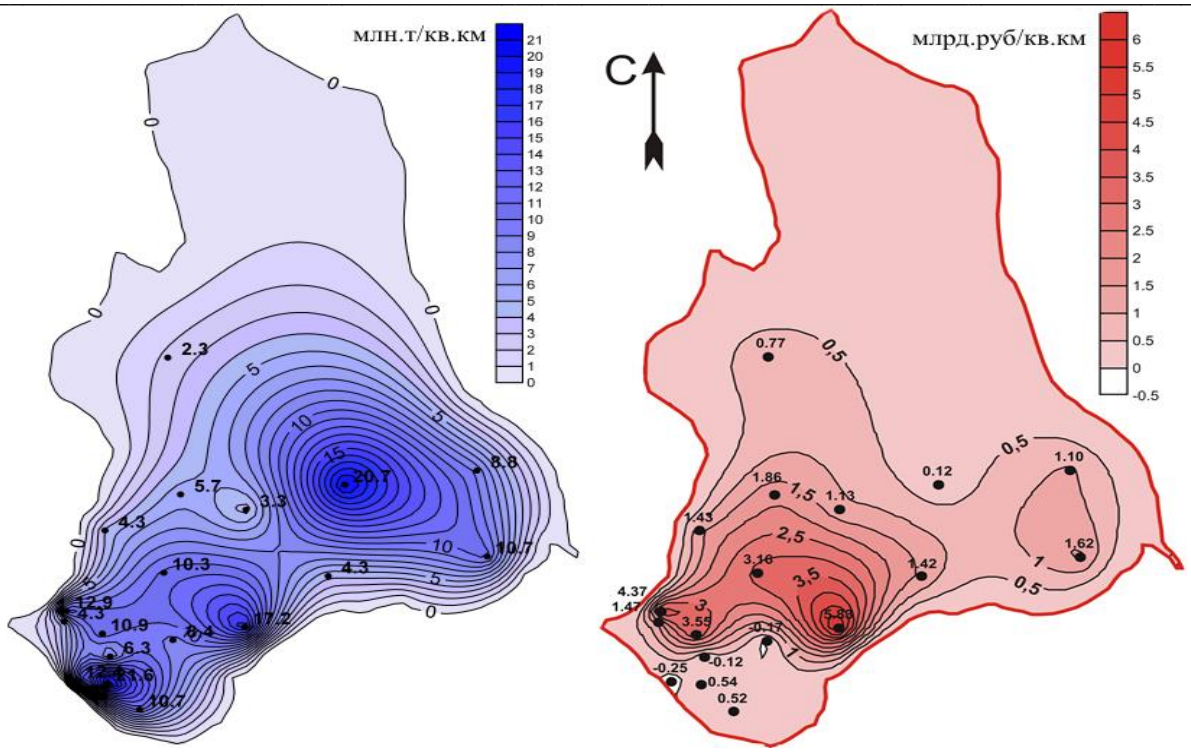


Рис. 1. Распределение углеплотности (млн. т/кв. км) и удельной по площади ценности запасов угля (млрд. руб./кв. км) Терсинского ГЭР

Создание транспортных коридоров и введение самого понятия стало в последнее время поистине мировой тенденцией. Основная задача транспортной логистики заключается в создании оптимальных транспортных маршрутов и разработке транспортных цепочек, с помощью которых будет доставляться груз. Транспортная задача в классической постановке не дает возможности учитывать многие факторы, от которых зависит в итоге эффективность организации перевозок. Учет всех факторов отражает тот важный факт, что планирование, организация перевозки должно быть построено на основе того представления, что логистика, является динамической категорией [10].

Сложностью освоения Терсинского ГЭР является его отдаленность и недостаточно развитая инфраструктура, а также важной особенностью района является то, что на севере и востоке района нет промышленно развитых соседей. Требования охраны природы являются одним из важнейших факторов, влияющих на условия развития и размещения объектов на территории района.

Для нормального функционирования угледобывающего предприятия необходимо до его ввода в эксплуатацию создать инженерно-техническую инфраструктуру осваиваемого региона, которая должна финансироваться за счет средств федерального бюджета. Прежде всего, это объекты энергохозяйства, железнодорожного хозяйства и автодороги.

Следует добавить, что интенсивное освоение угольных месторождений невозможно без соответствующей транспортной инфраструктуры, основанной на принципах транспортной логистики [11]. Основным из принципов логистики является принцип оптимальности, определяющий характеристику уровня качества (оптимальное решение задачи, оптимальный план, оптимальное управление). Задача заключается не в том, чтобы найти решение лучше существующего, а в том, чтобы найти самое лучшее решение из всех возможных. Поэтому в работе использован принцип динамической оптимизации трасс подъездных путей и наземных грузоперевозок, основанный на методе динамического программирования (Р. Беллман) в сочетании с подземными грузоперевозками. В результате анализа степени влияния факторов, выделены наиболее существенные и получена оптимизационная модель вида:

$$F_i = min_j\{f_{ij} + F_j\}, i > j, i = 1, \dots, N;$$

$$F_{ij} = C_p \frac{L_{ij}}{\cos(arctgK)} + C_g V_{ij} + EQ,$$

где Ср – удельные затраты на строительство и эксплуатацию коммуникационного коридора, руб./м; Cg – удельные приведенные затраты на земляные работы, руб./м^3; $L_{i\ j}$ – длина отрезка коммуникационного коридора, м; V_{ij} – объем земляных работ между i-й и j-й точками трассы, м^3; K – руководящий уклон для коммуникационного коридора; E – экономический ущерб от консервации запасов в целике под коммуникационный коридор, руб./т; Q_{ij} – объем консервируемых запасов угля, т.

В этом случае все затраты по работе транспорта будут минимальными. Минимизация функции по простиранию пласта (с транспортом на поверхности) двукрылое шахтное поле превращается в модульный шахтоучасток-лава [12] с односторонней схемой вскрытия, по которой и произведены расчеты капитальных вложений в строительство и затраты на развитие инженерно-технологической инфраструктуры.

Предварительное освоение Терсинского ГЭР рекомендовано начать с участка «Увальный Южный». И на основе анализа построенной транспортно-технологической характеристики всего Терсинского ГЭР (рис. 2) были определены участки для первоочередного освоения и оптимальная трасса коммуникационного коридора на территории ГЭР, обеспечивающая доступ к месторождениям полезных ископаемых, пригодным для промышленного освоения.

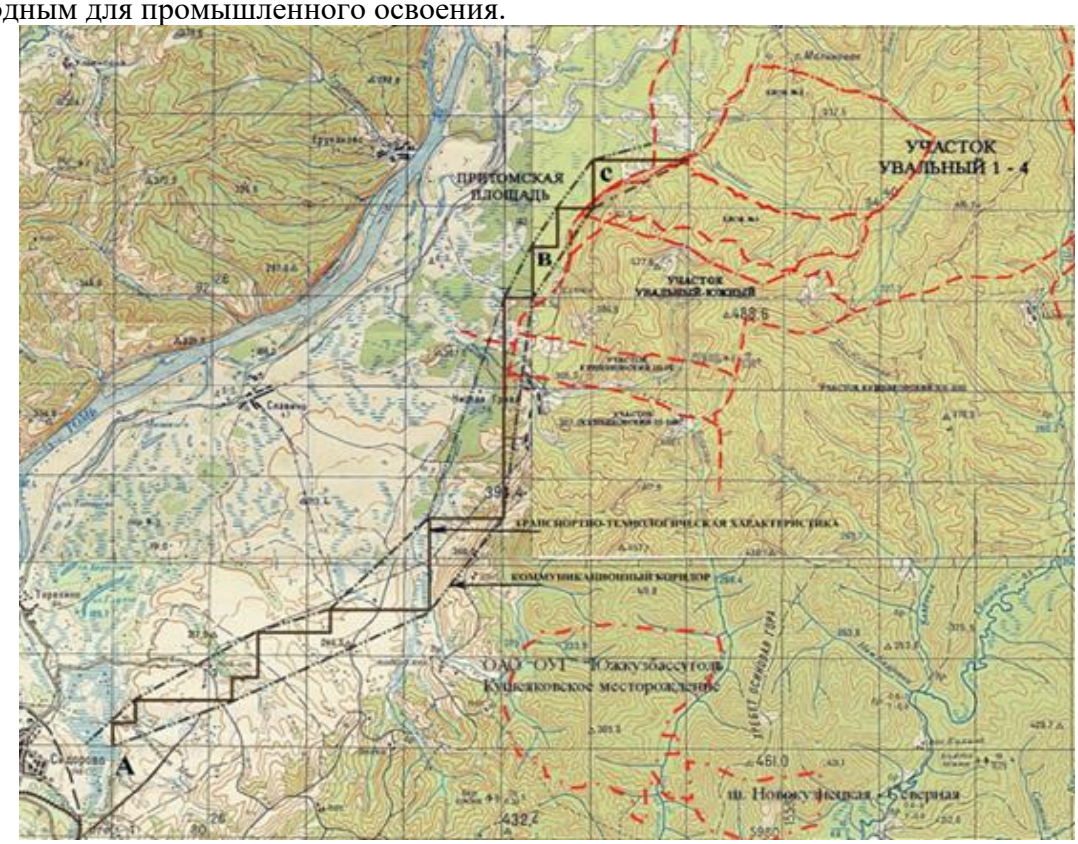


Рис 2. Транспортно-технологическая характеристика на поверхности поля УДК «Увальный»

Освоение и эксплуатация участков «Увальный» является не исключением и потребует развития инженерно-технической инфраструктуры на основе метода динамической оптимизации доступа к георесурсами, что было подробно рассмотрено в предыдущем разделе данной работы. Для выбора эффективного пути развития был предложен вариант возможного развития железнодорожного хозяйства, автодорог и

объектов электроснабжения. Для рассмотренных вариантов определены необходимые капитальные вложения на их реализацию, расчеты сведены в табл. 1.

Выводы. Из представленных данных следует, что удельные капитальные вложения на инженерно-технические сооружения при освоении Терсинского ГЭР составят в среднем 536-666 руб. на тонну производственной мощности. Эти вложения были использованы в ТЭО обоснования кондиций угольных запасов шахты «Увальная», построенной в 2017 году по проектной документации Института ОАО Кузбассгипрошахт с корректировкой технологических решений в границах северо-восточеого блока пласта 67.

Таблица 1

Капитальные затраты на развитие инженерно-технической инфраструктуры*

Наименование объектов	Протяженность, км	Стоимость, тыс. руб.
Железные дороги	30	2851704
Автодороги	30	842164
ЛЭП	30	240898
Подстанции ЛЭП		253178
Неучтенные затраты,3%		118412
Общие затраты		4065482

*) 1. СП 37.13330.2012 Промышленный транспорт. http://docs.cntd.ru/document/

2. Комплексная инженерная подготовка территории. ООО «Регион» с представителем в г. Новокузнецк. http://dc-region.ru//

На основе анализа построенной транспортно-технологической характеристики всего Терсинского ГЭР были определены участки для первоочередного освоения и оптимальных трасс коммуникационного коридора на территории ГЭР, обеспечивающая доступ к месторождениям полезных ископаемых, пригодных для промышленного освоения и выбора оптимальных схем вскрытия для данных горно-геологических условий месторождения.

В 2023 году шахта «Увальная» (в составе УК «Сибирская» с обогатительной фабрикой) вышла на добычу 6,4 млн. тонн высококачественного угля марок ГЖ и Ж себестоимостью 1365 рублей за тонну со средней производительностью труда на одного рабочего 443,5 тонн. По рейтингу – шахта «Увальная» самое лучшее угольное предприятие в Кемеровской области в составе УК «Сибирская» (Новокузнецкий административный район) – победитель в номинации «Угольная компания Кузбасса – 2023»

Список литературы

1. Геолого-промышленная карта Кузнецкого бассейна. М-б 1:100 000. Объяснительная записка; под ред. А.З. Юзвицкого. –Новосибирск: СНИИГГиМС, 2000. – 128 с.

2. Угольные ресурсы Сибири и их рациональное использование / А.З. Юзвицкий, В.М. Станкус, С.В. Шаклеин [и др.] // Минеральные ресурсы России: экономика и управление. – 1999. – № 3.– С. 11-20.

3. Станкус В.М., Анферов Б.А., Кузнецова Л.В. Состояние и перспективы освоения Терсинского геолого-экономического района Кузбасса // Уголь. – №11.– 2006. – С. 37-40.

4. Уголь в экономике России / Г.Л. Краснянский, В.Е. Зайденварг, А.Б. Ковальчук [и др.]; под общ. ред. Г.Л. Краснянского. – М.: Экономика, 2010. – 383 с.

5. Клишин В..И., Анферов Б.А., Кузнецова Л.В. Разработка мощного пологого пласта с выпуском угля подкровельной толщи роботизированным комплексом // Горная промышленность. – 2023. – S2. – С.26-31.

6. Шулятьева Л.И. Оценка угольных месторождений: проблемы и методы решения. Часть 1. // Уголь. – 2024. – № 3. – С. 110-116.

7. Методические рекомендации по технико-экономическому обоснованию кондиций для подсчета запасов месторождений твердых полезных ископаемых. Угли и горючие сланцы. – М.: Министерство природных ресурсов РФ, № 37-р от 05.06.2007 г. – 49 с.

8. Клишин В.И., Федорин В.А., Борисов И.Л. Перспективы освоения Терсинского геолого-экономического района Кузбасса / Перспективы инновационного развития регионов России: сб. тр. IV межд. науч.-практ. конф. – Прокопьекск: Изд-во КузГТУ в г. Прокопьевске, 2014. –С. 136-140.

9. Федорин В.А., Татаринова О.А. Оптимальное расположение коммуникационного коридора с учетом очередности освоения геологических участков и схем вскрытия угольных пластов // Вестн.КузГТУ. – Кемерово. – 2014. - №4. – С. 49 – 53.

10. Доенин В.В. Динамическая логистика транспортных процессов. – М.: Издательство «Спутник+», 2010. – 246с.

11. Федорин В.А., Татаринова О.А. Цифровой метод в задачах оптимизации доступа к георесурсам // Горный информационно-аналитический бюллетень. –2022. – № 12-1. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_ 121_0_134.

12. Программа развития угольной промышленности России до 2035 года: распоряж. Правительства РФ от 13 июня 2020 г., № 1582-р.

УДК 622.831

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КРОВЛИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ДЕМОНТАЖЕ ОБОРУДОВАНИЯ В ЛАВАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ШАХТНЫХ СЕТОК «ГЕОШАХТ»

[1]Новиков Р.П., [1]Чуков А.С., [1] Филиппов М.С., [2]д.т.н. Земсков А.Н.
1 – ГК «Миаком», г. Санкт-Петербург, Россия
2 – АО «Гипроцветмет», г. Пермь, Россия

Аннотация. При передислокации оборудования из одной лавы в другую возникает ряд серьезных технологических трудностей, сопровождающихся к тому же опасностью травматизма шахтеров. Применение для этих целей шахтных сеток «ГЕОШАХТ» во многом облегчает осуществление этих операций и обеспечивает их безопасность.

Ключевые слова: угольная шахта, перемонтаж лавы, металлические сетки, сетки «ГЕОШАХТ», система лавного перекрытия, формирование демонтажной камеры, безопасность работ.

Увеличение объемов добычи угля влечет за собой появление множества сопутствующих трудностей. Одной из таких сложностей является обеспечение безопасного и нетрудоемкого перехода от одной лавы к другой путем демонтажа и перемещения оборудования. Потеря времени при демонтажных работах характеризуется большими материальными затратами. К тому же всякий раз проведение работ подобного типа является опасным.

Применение систем лавного перекрытия позволяет сократить на 2-3 недели время демонтажа по сравнению с традиционными методами.

При создании лавного перекрытия обычно применяются металлические сетки, которые также используются для ограждения стенок и кровли горизонтальных и наклонных горных выработок. Однако, металлические сетки имеют свою специфику:

– большой вес;
– сложность монтажа;
– травмоопасность при монтаже конструкции;
– неустойчивость к воздействию химических сред;

– высокая стоимость.

В качестве альтернативы металлическим сеткам ГК «МИАКОМ» предлагает свое решение – применение геосинтетических шахтных сеток «ГЕОШАХТ» (рис. 1).

Сетки «ГЕОШАХТ» производятся из полиэфирных нитей или стеклоровинга с ПВХ пропиткой и обеспечивают прочность до 800кН/м, а формируемая из нее система лавного перекрытия «МИАКОМ» (специальным образом сшитое из сеток различных прочностей полотно) имеет разрывное сопротивление до 80 тонн на каждый метр, в 30 раз превышает прочность обычной решетки, используемой для перетяжки стенок выработок.

Рис. 1. Шахтные сетки «ГЕОШАХТ»

При изготовлении системы на немецком оборудовании «Karl Mayer» сначала производится сетка нужной прочности (до 800 кН/м), далее на ровной поверхности рулоны раскатываются, укладываются внахлест и скрепляются полипропиленовыми канатиками «крест-накрест». Таким образом, формируется единая система на всю ширину предполагаемого забоя. Далее производится укладка системы в основной рулон (дополнительно стянутый канатиками в соответствии с циклом, через 0,8 м) и дополнительный мини-ролл, в виде «гармошки» для более удобной подачи в камеру. Далее сетка увязывается брикетом для погрузки в фуру, перевозки до объекта и дальнейшего спуска по стволу и доставки в лаву.

Начало и конец системы сеток окрашиваются соответствующим выделяющимся цветом: синий – начало сетки (конвейерный штрек); красный – конец сетки (вентиляционный штрек). Это важно учесть, иначе рулон будет разматываться в обратную сторону, и технология будет полностью нарушена.

Дополнительно возможно вплетение металлических или полипропиленовых канатов для придания дополнительной прочности.

Применение сеток «ГЕОШАХТ» обеспечивает предотвращение обрушений и попаданий пород в рабочую зону, обеспечивая защитный барьер между рабочим и отработанным пространством лавы (рис. 2). При чем они могут использоваться в угольных шахтах и рудниках, опасных по газу и пыли.

Рис. 2. Система лавнового перекрытия «МИАКОМ»

Легкость транспортировки и применение сеток обуславливается тем, что от завода-изготовителя до места установки (лавы) она доставляется в сложенном виде, а в призабойном пространстве может быть протянута по лаве и подвешена к перекрытиям крепи менее чем на 4 часа.

Процесс возведения сетки «ГЕОШАХТ» безопасен и прост и легко осуществляется звеном горнорабочих, работающих в лаве.

Характерной особенностью сеток конструкции «МИАКОМ» является возможность их использования в лавах при мощности пластов до 5,5м, что достаточно для подавляющего числа очистных забоев.

Процедура установки монтажной системы «МИАКОМ» следующая.

На момент заведения сетки забой должен быть расположен на определенной отметке (например, 15 м), комбайн у сопряжения с вентиляционным штреком в положении зарубки в пласт с задвинутым забойным конвейером и секциями крепи.

Далее крепятся ручные лебедки. Козырек крепи опускается и через него пропускаются стропы и поднимаются лебедками. В первую очередь закрепляется анкерами стартовый канат. Козырек крепи поднимается. С помощью лебедок поднимается сам рулон, освобождая место для работы конвейера (рис. 3).

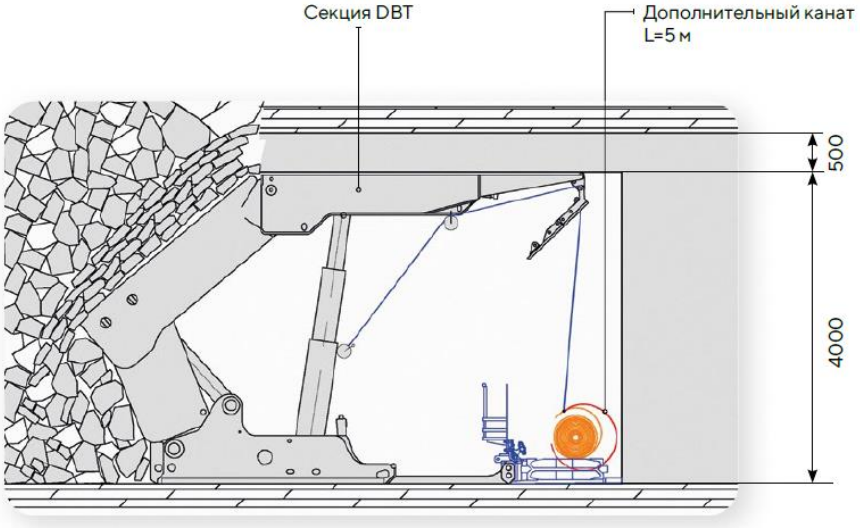


Рис. 3. Начальная фаза крепления «ГЕОШАХТ»

По окончанию цикла рулон опускается. Передвигаются секции крепи. Сетка фиксируется, затем поднимается снова. Начинается новый цикл (рис. 4).

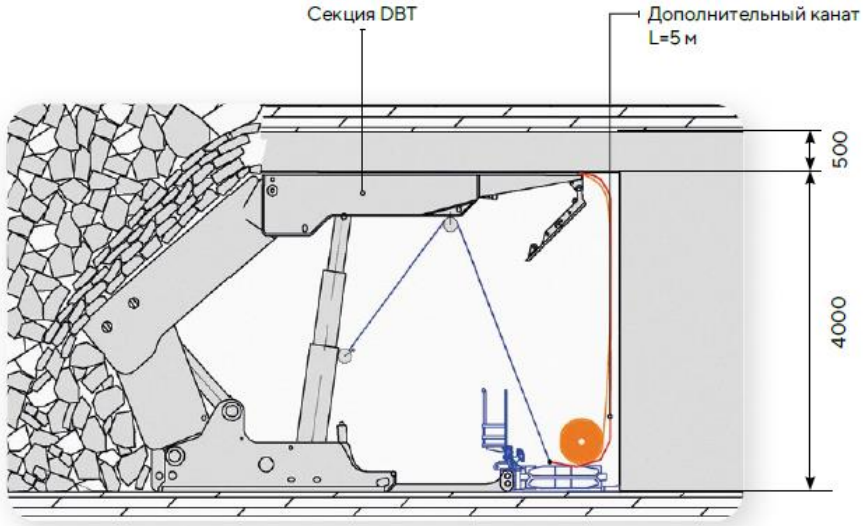


Рис. 4. Схема крепления «ГЕОШАХТ» между циклами выработки

После окончания процесса выемки угля, сетка крепится анкерами к кровле и стенке. Происходит демонтаж крепей. (рис. 5).

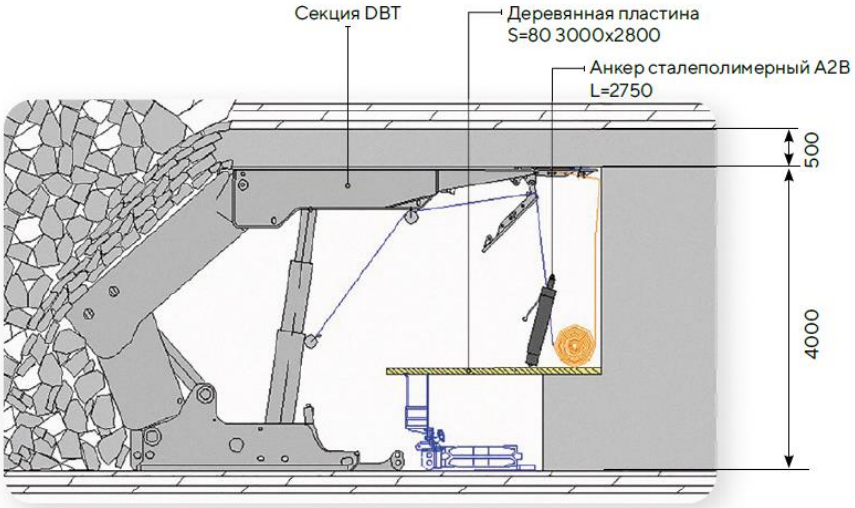


Рис. 5. Схема крепления «ГЕОШАХТ» после окончания процесса выемки угля

Имеются следующие особенности подбора элементов сетки.

По ширине выработке применяются сетки разной разрывной прочности. На первых 4…6 циклах – сетки средней прочности (ориентировочно 400 кН/м), которые в итоге окажутся заваленными породой.

На последних 10…12 циклах – сетки повышенной прочности (600 кН/м и выше), которые должны непосредственно удерживать кровлю от разрушения в момент демонтажа крепей.

На конечном этапе остается 1,5-3 метра сетки пониженной прочности, которые будут заводиться на бока и фиксироваться.

Вывод. Применение геосинтетических шахтных сеток «ГЕОШАХТ» обеспечивает безопасность монтажных работ в лаве и является положительным примером современного инновационного подхода к решению технологически сложных производственных задач.

УДК 622.271(73):550.814

ОТКРЫТЫЕ ГОРНЫЕ РАБОТЫ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УГЛЯ В ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРОВИНЦИЯХ ТУРЦИИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

[1]д.т.н. Зеньков И.В., [2]к.т.н. Черепанов Е.В., [3]Мулюшкина А.А., [4]к.т.н. Нефедов Б.Н.
1 – ООО «Сибирский научно-исследовательский институт горного и маркшейдерского дела», г. Красноярск, Россия
2 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия
3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия
4 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты исследования деятельности угольных разрезов и тепловых станций в Турции. 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. По результатам спутниковой съемки выявлен стабильный тренд в количественных показателях угольной генерации электрической энергии.

Ключевые слова: Турция, угольные месторождения, открытые горные работы, угольные карьеры, годовой объем добычи угля, горные и транспортные машины, дистанционное зондирование Земли.

Введение. Поступательное движение в развитии общества подразумевает повсеместный переход в промышленности на энергосберегающие технологии. В экономике промышленных стран всегда имеют место энергоемкие производства, потребность которых в электрической энергии невозможно покрыть использованием солнечных батарей и ветряных генераторов. В настоящее время на территории Турции развиваются крупные энергоемкие производства. По результатам спутниковой съемки установлено, что на западных и восточных территориях страны функционируют 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. Последнее является актуальной задачей в области горных наук и энергетики. Вместе с тем 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 [1-8].

Исследование производственной деятельности объектов топливно-энергетического комплекса (угольная генерация) на территории Турции. По данным дистанционного зондирования добыча угля открытым способом осуществляется в шести провинциях Бурса, Кютахья, Маниса, Мугла, Сивас и Кахраман-мараш [9]. Открытые горные работы масштабно производятся с конца 1980-х гг. Угольная генерация электрической энергии на двенадцати тепловых станциях осуществляется за счет деятельности 30 карьеров с производственной мощностью по добыче угля от 1 до 12 млн т в год [9].

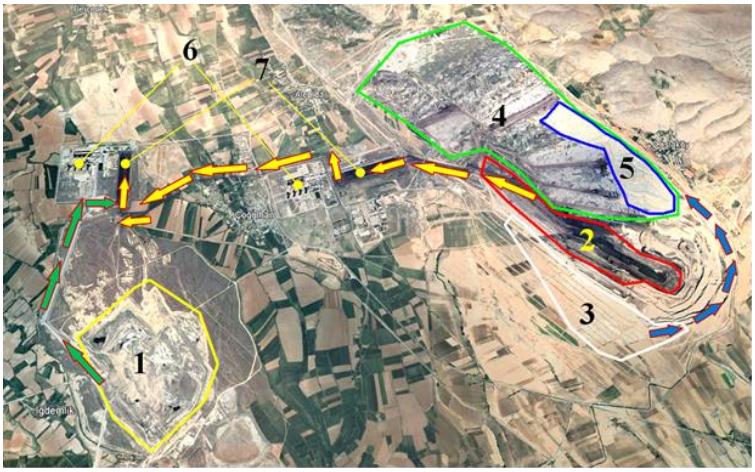
В провинции Бурса для нужд одной тепловой станции мощностью 700 МВт работает карьер по добыче угля с суммарной протяженностью добычных работ 1,35 км. В строении месторождений на этой территории угольные пласты мощностью до 20 м имеют углы залегания от 3 до 7 град. В провинции Кютахья для нужд трех тепловых станций суммарной мощностью 2100 МВт работает восемь карьеров по добыче угля на двух месторождениях. Суммарная протяженность добычных работ составляет 4,8 км. В строении месторождений на этой территории угольные пласты мощностью до 20 м имеют углы залегания в диапазоне 2-5 град.

На территории провинции Маниса в 4 и 8 км соответственно на юг и север от г. Сома работают 10 карьеров по добыче угля. Весь объем добытого угля сжигают на двух тепловых станциях с установленной суммарной мощностью энергоблоков 2000 МВт. Общая протяженность фронта добычных работ в карьерах составляет 5,5 км. В строении месторождений на этой территории угольные пласты мощностью до 15 м имеют углы залегания от 3 до 15 град. В провинции Мугла открытым способом разрабатывают три месторождения угля. Пять карьеров обеспечивают углем три тепловые станции общей мощностью 3200 МВт. Общая протяженность фронта добычных работ в карьерах составляет 5,5 км. В строении месторождений на этой территории угольные пласты мощностью до 18 м имеют углы залегания от 2 до 12 град [9].

По данным спутниковой съемки в провинции Сивас в ее южной части работает одна тепловая электростанция мощностью 1200 МВт. На расстоянии до 3 км от нее работают пять карьеров по добыче угля. Угольные пласты мощностью 6-16 м залегают горизонтально. Мощность вскрышных пород не превышает 60-70 м. Практически весь объем вскрышных пород отрабатывают с использованием буровзрывного способа. Уголь на стационарные склады транспортируют автомобильным транспортом [9].

В провинции Кахраман-мараш (на севере граничит с провинцией Сивас) находятся две тепловые станции мощностью 1600 МВт каждая. Станции углем снабжают с одного высокопроизводительного карьера с высокой степенью механизации. Расположение производственных и инфраструктурных объектов показано на космоснимке (рис. 1). Добыча угля до 2013 г. производилась в двух карьерах (1 и 2). Контур отработанного карьера обведен линией желтого цвета. Направление угольного потока в ретроспективном периоде из карьера 1 до тепловой станции обозначено стрелками зеленого цвета. Горно-геологическое строение месторождения угля позволило применить в карьере 2 роторные экскаваторы на отработке основного объема вскрышных пород и угольных пластов. Протяженность горных работ по верхнему уступу карьера составляет 4 км. Глубина карьера переменная с максимальным значением 150 м в юго-восточном секторе [9].

На угленасыщенном участке месторождения, находящемся в разработке, залегают практически горизонтально несколько пластов угля сложного строения с суммарной мощностью до 80 м. Вскрышная толща представлена тремя слоями, в составе которых разные по крепости горные породы. Верхний слой рыхлых пород четвертичного возраста мощностью до 4 м в контурах, показанных на рисунке белой линией, отрабатывают гидравлическими экскаваторами с погрузкой в автосамосвалы и вывозкой на внутренний отвал. В границах участка 3 также производят буровзрывное рыхление слоя более крепких вскрышных пород (песчаники) мощностью до 10 м, находящегося ниже рыхлых пород четвертичного возраста. Весь объем вскрышных пород, отрабатываемых на этом участке, транспортируют в автосамосвалах на внутренний отвал и отсыпают на участке 5, находящемся на вскрышных породах (участок 4), отработанных роторными экскаваторами и отсыпанных в более раннем периоде отвалообразователями. Направление движения автосамосвалов от участка 3 на участок 5 вдоль юго-восточного фланга карьера показано стрелками синего цвета. Оставшуюся толщу вскрышных пород, находящуюся ниже крепких песчаников, отрабатывают гидравлическими и роторными экскаваторами без буровзрывного рыхления.



1 – отработанный карьер (добыча угля до 2013 г.); 2 – действующий карьер; 3 – участок выемки вскрышных пород после буровзрывного рыхления; 4 – внутренний отвал вскрышных пород от роторных экскаваторов; 5 – внутренний отвал, отсыпаемый с использованием автомобильного транспорта; 6 – тепловая станция; 7 – стационарные расходные склады угля

Рис.1. Фрагмент космоснимка с расположением объектов ТЭК вблизи пос. Алемдар на севере провинции Кахраман-мараш в Турции

Контур карьера, где производится выемка вскрышных пород и угля роторными экскаваторами, обведен линией красного цвета. Гидравлические экскаваторы на всех вскрышных уступах работают в комплексе с автомобильным транспортом. Вскрышные породы и уголь от роторных экскаваторов перемещают по конвейерам. Сектор размещения

вскрышных пород от роторных экскаваторов обведен линией зеленого цвета. Общая протяженность конвейерных линий составляет 32,4 км.

Направление движения потоков угля по стационарным конвейерам общей протяженностью 15,5 км на тепловые станции показано на рисунке стрелками желтого цвета. По нашей оценке, производственная мощность карьера по добыче угля составляет 12 млн. т в год.

Отметим, что горно-геологическое строение четырех разрабатываемых открытым способом угольных месторождений в Турции предполагает использование технологий разработки с использованием на выемке надугольной толщи вскрышных пород драглайнов с длиной стрелы 90-100 м и емкостью ковша 20-40 м^3. Эти машины отрабатывают вскрышные уступы мощностью до 40 м с укладкой в выработанное пространство карьера.

Всего по данным спутниковой съемки на исследуемой территории Турции на вскрышных и добычных работах в карьерах по добыче угля установлены 4 драглайна (российские аналоги ЭШ-20/90 и ЭШ-40/100), 42 мехлопаты с емкостью ковша 12-18 м^3, 152 гидравлических экскаватора с емкостью ковша 2,5-14 м^3, шесть роторных экскаваторов производительностью 2500 т/час. На транспортировке вскрышных пород и угля задействованы 627 карьерных автосамосвалов грузоподъемностью 30-200 т и 48 шарнирно-сочлененных автосамосвалов повышенной проходимости грузоподъемностью 35 т. На отсыпке вскрышных пород на внутренних отвалах установлено 6 отвалообразователей. Это горнотранспортное оборудование по нашим расчетам обеспечивает годовой объем вскрышных работ на уровне 460 млн. т и объем добычи угля не менее 42 млн т.

По данным спутниковой съемки линии электропередач, идущие от тепловых станций, находящихся на исследуемой территории, охватывают всю территорию Турции – крупные и мелкие населенные пункты. Тепловые станции расположены таким образом, что протяженность ЛЭП не превышает 690 км до самого отдаленного населенного пункта.

Выводы. По результатам спутниковой съемки определен состав горнотранспортного оборудования, работающего в угольных карьерах в шести провинциях Турции, технологический объем вскрышных работ и объем добычи угля, который необходим для работы двенадцати тепловых станций. По нашей оценке, добыча угля в карьерах на территории исследуемых провинций характеризуется большим коэффициентом вскрыши - на уровне 11 т/т.

Исходя из технологий производства горных работ и производительности горной техники, объем перерабатываемой горной массы (вскрышные породы и уголь) находится на уровне 500 млн. т. В целом по данным дистанционного мониторинга в последнее десятилетие на территории Турции наблюдается стабильный тренд в объемах угольной генерации электрической энергии.

Список литературы

1. Терехин Э.А. Пространственный анализ особенностей формирования древесной растительности на залежах лесостепи Центрального Черноземья с использованием их спектральных признаков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17. – № 5. – С. 142–156.

2. Ложкин Д.М., Цхай Ж.Р., Шевченко Г.В. Особенности температурных условий и распределения концентрации хлорофилла в Охотском море в период нереста минтая по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 2. – С. 230–240.

3. Терехин Э.А. Оценка пространственно-временных изменений в зеленой фитомассе аграрной растительности с использованием спектрально-отражательных признаков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 1. – С. 138–148.

4. Quantifying Water Consumption through the Satellite Estimation of Land Use/Land Cover and Groundwater Storage Changes in a Hyper-Arid Region of Egypt / A. Halipu, X. Wang, E. Iwasaki [et al.] // Remote Sens. – 2022. – No. 14. P. 2608.

5. Wang Y., Bi H., Liang Y.A. Satellite-Observed Substantial Decrease in Multiyear Ice Area Export through the Fram Strait over the Last Decade // Remote Sens. – 2022. – No. 14. – P. 2562.

6. Retrieving Mediterranean Sea Surface Salinity Distribution and Interannual Trends from Multi-Sensor Satellite and In Situ Data / M. Sammartino, S. Aronica, R. Santoleri [et al.] // Remote Sens. – 2022. – No. 14. – P. 2502.

7. Oil-Contaminated Soil Modeling and Remediation Monitoring in Arid Areas Using Remote Sensing / G. Kaplan, H.O. Aydinli, A. Pietrelli [et al.] // Remote Sens. – 2022. – No. 14. – P. 2500.

8. Li X., Wang N., Wu Y. Automated Glacier Snow Line Altitude Calculation Method Using Landsat Series Images in the Google Earth Engine Platform // Remote Sens. – 2022. – No. 14. – P. 2377.

9. https://www.google.com.earth.

УДК 622.271(73):550.814

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УГЛЯ В ШТАТЕ НОВЫЙ ЮЖНЫЙ УЭЛЬС НА ТЕРРИТОРИИ АВСТРАЛИИ

[1]д.т.н. Зеньков И.В., [2]к.т.н. Черепанов Е.В., [3]Мулюшкина А.А., [4]к.т.н. Нефедов Б.Н.

1 – ООО «Сибирский научно-исследовательский институт горного и маркшейдерского дела», г. Красноярск, Россия

2 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия

4 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. В статье приводятся результаты оценки технологического потенциала и возможности по добыче угля угольных карьеров в штате Новый Южный Уэльс в Австралии. По космическим снимкам установлены технологические показатели угольных разрезов, применяемое горнотранспортное оборудование, элементы систем разработки угольных месторождений. Сделан вывод о том, что эффект от масштаба производства позволяет держать объем добычи угля на уровне 150 млн. т в год.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, Австралия, штат Новый Южный Уэльс, карьеры по добыче угля, технологический потенциал, горнотранспортное оборудование, системы разработки месторождений, эффект от масштаба производства.

Введение. В последние два десятилетия Австралия уверенно входит в десятку лидеров-стран в мировом угледобывающем секторе. Анализ информации на спутниковых снимках за период с 1985 г. высвечивает увеличение в разы количества карьеров по добыче угля в двух основных угледобывающих штатах Квинслед и Новый Южный Уэльс. На наш взгляд, в условиях отсутствия адекватной информации о состоянии открытой угледобычи на австралийском континенте необходимо провести детальное исследование этого вида деятельности в штате Новый Южный Уэльс, считающемся на материке вторым по объемам извлекаемого из недр угля. Такая информация необходима для прогнозирования мировой картины добычи угля в мировом недропользовании. Для исследования выбран участок

территории этого штата площадью 1650 км^2, на территории которого производится масштабная разработка угольных месторождений открытым способом. Как известно, проводить исследования на больших по площади территориях можно эффективно с использованием ресурсов спутниковой съемки, о чем свидетельствуют решенные задачи в выполненном кратком обзоре научных публикаций [1-8].

Исследование показателей открытых горных работ и технологических показателей горнотранспортного оборудования в карьерах по добыче угля. По нашей предварительной оценке, сделанной на основе информационных ресурсов дистанционного зондирования Земли из космоса, в австралийском штате Новый Южный Уэльс работает более 30 карьеров по добыче угля [11]. Территория штата с максимальной концентрацией горнодобывающих предприятий обведена линией желтого цвета (рис. 1). В выделенном секторе работает 20 карьеров с общей протяженностью фронта горных работ 44630 м. Протяженность длинной и короткой оси сектора составляет 60 и 28 км соответственно. Точками с нумерацией с 1 по 4 отмечены места расположения одиннадцати карьеров. Расстояние по прямой между точками 1 и 2, 2 и 3(4) составляет 103 и 126 км соответственно. В точке 1 работают три карьера с суммарной длиной горных работ 9300 м. В точке 2 работает один карьер, с длиной рабочего борта 750 м. В точках 3 и 4 работают в общей совокупности семь карьеров с общей протяженностью горных работ 8950 м. Всего в исследуемой местности в 1985 г. уголь добывали в 11 карьерах. По результатам спутниковой съемки установлено, что с 1985 г. было введено в эксплуатацию 40 карьеров и в 20 карьерах горные работы завершены [11]. В основном это карьеры с небольшими запасами угля, о чем свидетельствуют размеры выемок и породных отвалов.

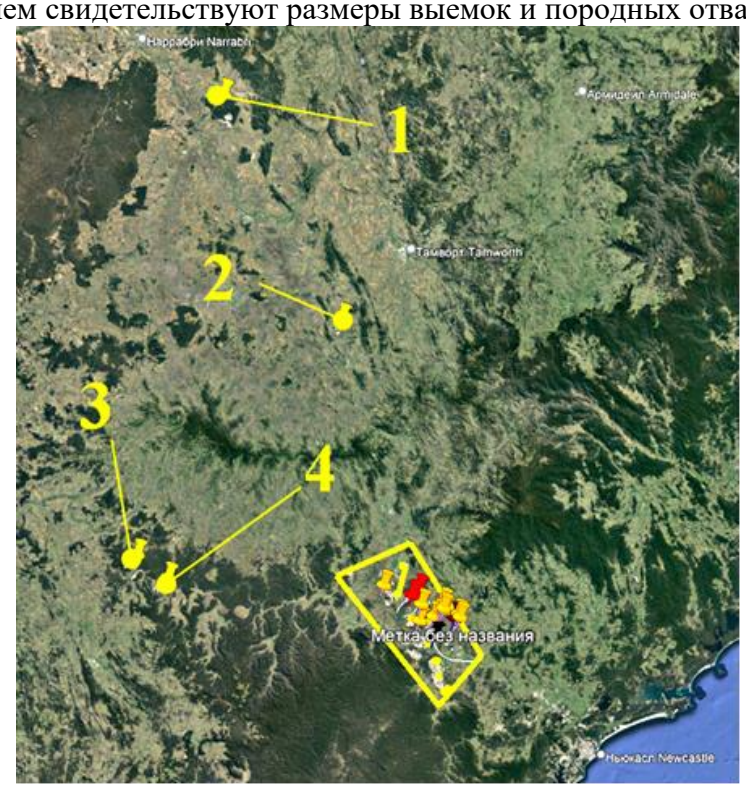


Рис. 1. Фрагмент космоснимка с выделением мест добычи угля открытым способом в штате Новый Южный Уэльс (Австралия)

По данным спутниковой съемки горно-геологическое строение месторождений угля характеризуются экономически благоприятными показателями. Количество пластов угля варьирует от 2 до 4. Углы залегания пластов в угленосной толще находятся в диапазоне от нуля до 8°. Суммарная мощность покрывающих верхний пласт вскрышных пород и породных междупластий, разделяющих угольные пласты, находится в диапазоне 40-90 м. Количество вскрышных уступов в среднем составляет 2-4. Угольные пласты имеют

суммарную мощность до 30 м. Залегание пластов в основном слабонаклонное с углами падения пластов 4-6°. Значительная протяженность пластов вдоль их выходов под наносы рыхлых горных пород четвертичного возраста позволяет строить карьеры с разрезными траншеями до 7,5 км [11].

Весь объем горных пород (вскрышные породы и уголь) подлежит обязательному рыхлению с применением буровзрывного способа. Исключение составляет небольшой объем рыхлых горных пород четвертичного возраста, которые снимаются и складируются мощными бульдозерами во временные насыпи. Далее эти горные породы загружают экскаваторами в автосамосвалы и транспортируют на отвалы. Взрывные скважины бурят по диагональной сетке с размерами не более 6×7 м. Выемочные панели имеют размеры 150×500 м. Объем горной массы после взрывания одной такой панели составляет 1,5 млн. м^3.

На перевалке надугольной вскрышной толщи в выработанное пространство в карьерах с протяженностью фронта горных работ более 1,0 км работают мощные драглайны с емкостью ковша 100 м^3 и длиной стрелы 100 м. Ширину заходок драглайнов выбирают в диапазоне 70-80 м [11].

Вскрышные уступы за исключением надугольного уступа отрабатывают мехлопатами или гидравлическими экскаваторами с объемом ковша 12-50 м^3 с погрузкой в автосамосвалы грузоподъемностью до 360 т. Внутрикарьерные породные перемычки с целью сокращения расстояния перевозки вскрышных пород на внутренние отвалы отсыпают весьма редко. Вскрышные породы транспортируют на внутренние отвалы в основном по въездным траншеям. В карьерах наблюдается выделение выемочных блоков при длине верхнего вскрышного уступа более 1,9 км.

Добычные работы производят аналогичным оборудованием с транспортировкой угля до обогатительных фабрик и поверхностных стационарных складов с углепогрузочными терминалами. При этом в структуре экскаваторно-автомобильных комплексов отмечается уменьшение емкости ковша экскаваторов и снижение грузоподъемности карьерных автосамосвалов относительно комплексов, задействованных на вскрышных работах.

После переработки уголь размещают на стационарных складах, из которых он по конвейерам направляется в накопительные емкости в виде силосов диаметром 17-18 м и высотой до 50 м. Из них уголь отгружают в железнодорожные составы, в которых он транспортируется до морского порта Ньюкасл на побережье Тихого океана. Объем угольных накопителей составляет 5000-5500 м^3, что отвечает объему железнодорожного состава из 70-80 вагонов грузоподъемностью 100 т каждый. При средней мощности угольных пластов 20 м и годовом подвигании фронта горных работ 100 м объем добычи угля на всех разрабатываемых месторождениях составляет 95 млн. т. Соответственно при 2-х и 3-х кратном увеличении темпов подвигания горных работ, составляющем 200 и 300 м соответственно, объем добычи может находиться на уровне 190 и 285 млн. т в год. В этом случае необходима проверка этого показателя по технологическим возможностям горнотранспортного оборудования.

В составе горнотранспортного оборудования, работающего в карьерах по добыче угля в этом штате, находятся 98 буровых станков, семь драглайнов с емкостью ковша 100 м^3 и длиной стрелы 100 м. На выемке горных пород установлено 134 гидравлических экскаватора типа «прямая» и «обратная лопата» с емкостью ковша от 12 до 42 м^3, а также шесть гусеничных экскаваторов с канатным приводом рабочего оборудования и емкостью ковша 45 м^3. Вывозка горной массы из забоев производится 764 автосамосвалами грузоподъемностью в широком диапазоне 160-360 т.

Отметим особое положительное отношение к экологии со стороны угледобывающих корпораций в этом штате. Собственники карьеров по добыче угля профинансировали работы по пересадке 3030 диких орхидей, произрастающих в долине реки Хантер, которая

протекает по территории с интенсивным масштабным ведением открытых горных работ и отсыпкой породных отвалов [9, 10].

Выводы. По результатам дистанционного зондирования Земли определены состав горнотранспортного оборудования, работающего в угольных карьерах в штате Новый Южный Уэльс, технологический объем вскрышных работ и объем добычи угля. По нашей оценке, добыча угля в карьерах на территории этого штата характеризуется средними коэффициентами вскрыши в диапазоне 4-8 т/т.

Исходя из стабильного мирового спроса на коксующийся и энергетический уголь со стороны развивающихся стран Юго-Восточной Азии, с одной стороны, а с другой, согласно выявленным темпам подвигания фронта горных работ во всех карьерах в последние годы, объем добываемого угля в штате Новый Южный Уэльс держится на уровне 120 млн. т.

В целом по данным дистанционного мониторинга в последние два десятилетия на территории штата Новый Южный Уэльс наблюдается понижательный тренд в объемах добычи угля открытым способом.

Список литературы

1. Пономаренко М.Р., Кутепов Ю.И., Шабаров А.Н. Информационно-аналитическое обеспечение мониторинга состояния объектов открытых горных работ на базе технологий веб-картографии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 8. – С. 56–70.

2. Унифицированная технология дистанционного мониторинга природных и антропогенных объектов / А.М. Константинова, И.В. Балашов, А.В. Кашницкий [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. № 4. – С. 41–52.

3. Разработка системы анализа состояния окружающей среды в зонах расположения крупных промышленных объектов, хвостохранилищ и отвалов / Е.А. Лупян, А.М. Константинова, И.В. Балашов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17. – № 7. – С. 243–261.

4. Space-based Applications of Remote Sensing in Studying Opencast Mining and Ecology at Deposits of Non-ferrous Metal Ore / I.V. Zenkov, T. Le Hung, V.N. Vokin [et al.] // Ecology and Industry of Russia. – 2022. – V. 26. – I. 1. – PP. 24–29.

5. Spatial data and technologies for geomonitoring of land use under aspect of mineral resource sector development / N.J. Adero, C. Drebenstedt, E.N. Prokofeva [et al.] // Eurasian mining. – 2020. – No. 1. – PP. 69–74.

6. Mujawdiya Ritesh, Chatterjee R.S., Kumar Dheeraj. MODIS land surface temperature time series decomposition for detecting and characterizing temporal intensity variations of coal fire induced thermal anomalies in Jharia coalfield, India // Geocarto International. – 2020. – DOI: 10.1080/10106049.2020.1818853.

7. Retrieval of precise land surface temperature from ASTER night-time thermal infrared data by split window algorithm for improved coal fire detection in Jharia Coalfield, India / Narendra Singh, R.S. Chatterjee, Dheeraj Kumar [et al.] // Geocarto International. – 2020. – DOI: 10.1080/10106049.2020.1753820.

8. Combining Satellite InSAR, Slope Units and Finite Element Modeling for Stability Analysis in Mining Waste Disposal Area / J. López-Vinielles, J.A. Fernández-Merodo, P. Ezquerro [et al.] // Remote Sens. – 2021. – 13(10):2008.

9. Bell Stephen A.J. Translocation of threatened terrestrial orchids into non-mined and post-mined lands in the Hunter Valley of New South Wales, Australia // Restoration Ecology. – 2020. – V. 28. – I. 6. – PP. 1396–1407.

10. Bell Stephen A.J. Successful recruitment following translocation of a threatened terrestrial orchid (Diuris tricolor) into mining rehabilitation in the Hunter Valley of NSW // Ecological Management and Restoration. – 2021. – V. 22. – I. 2. – PP. 204–207.

11. https://www.google.com.earth.

УДК 622.271(73):550.814

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ В УГОЛЬНЫХ КАРЬЕРАХ НА ТЕРРИТОРИИ ШТАТА КВИНСЛЕНД В АВСТРАЛИИ

[1]д.т.н. Зеньков И.В., [2]к.т.н. Черепанов Е.В., [3]Мулюшкина А.А., [4]к.т.н. Нефедов Б.Н.
1 – ООО «Сибирский научно-исследовательский институт горного и маркшейдерского дела», г. Красноярск, Россия
2 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия
3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия
4 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. В статье приводятся результаты оценки технологического потенциала и возможности по добыче угля угольных карьеров в штате Квинсленд в Австралии. По данным спутниковой съемки установлены технологические показатели угольных карьеров, комплектация горнотранспортного оборудования, элементы систем разработки угольных месторождений. Сделан вывод о том, что эффект от масштаба производства позволяет держать объем добычи угля на уровне 300 млн. т в год.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, Австралия, штат Квинсленд, карьеры по добыче угля, технологический потенциал, горнотранспортное оборудование, система разработки месторождения, эффект от масштаба производства.

Введение. В настоящее время Австралия занимает одно из лидирующих положений в мировой экономике по объемам добычи угля. Экспорт угля за последние десять лет достиг внушительных размеров, что стало возможным за счет того, что на материке, в ее восточных штатах построены самые мощные угольные карьеры в мире с протяженностью фронта горных работ до 50 км. Проводить исследование больших по площади территорий в настоящее время позволяет использование информационных ресурсов спутниковой съемки. С появлением и совершенствованием технологий дистанционного зондирования Земли из космоса спектр решаемых научно-прикладных проблем значительно расширился, о чем свидетельствуют работы российских и зарубежных исследователей [1-10]. По нашему мнению, эта тематика не потеряет своей актуальности в ближайшие десятилетия.

Исследование особенностей работы карьеров по добыче угля в штате Квинсленд с использованием ресурсов дистанционного зондирования Земли из космоса. С целью выявления трендов в динамике открытой угледобычи на Австралийском континенте проведено масштабное исследование на территории штата Квинсленд, где, по нашей оценке, добывают основной объем коксующегося и энергетического высококачественного угля, отправляемого на экспорт [10]. По предварительной оценке, в полосе с размерами 120-250×910 км работают более 50 карьеров с различной производственной мощностью. Восточная граница выделенной полосы переменной ширины проходит в 70-120 км от морской береговой линии Кораллового моря.

На территории штата выделено пять секторов с присвоенной условной нумерацией, в которых производят добычу угля открытым способом (рис. 1). По данным дистанционного мониторинга выявлено количество отработанных и работающих карьеров, а также протяженность горных работ в карьерах. В 1985 году в выделенных секторах уголь добывали в 22 карьерах, из них в 13 карьерах уголь добывают по настоящее время. В настоящее время в границах сектора 1 в работе находятся 16 карьеров и в 22 карьерах горные работы остановлены. В секторе 2 работают 13 карьеров и в 18 карьерах добыча угля прекращена. В секторах 3 и 4 работает соответственно 13 и 12 карьеров, а в 11 и 8 карьерах горные работы завершены. На территории пятого сектора добывают небольшой объем угля

в шести карьерах и в пяти карьерных выемках добыча угля остановлена. Таким образом, с 1985 по 2021 г. количество карьеров увеличилось в шесть раз до 124. За 36-летний период в этом штате было введено в эксплуатацию 111 карьеров, а добыча угля закончена в 64. Суммарная протяженность горных работ в работающих карьерах в настоящее время составляет 269200 м, а общая протяженность отработанных карьерных выработок - 212000 м [10].

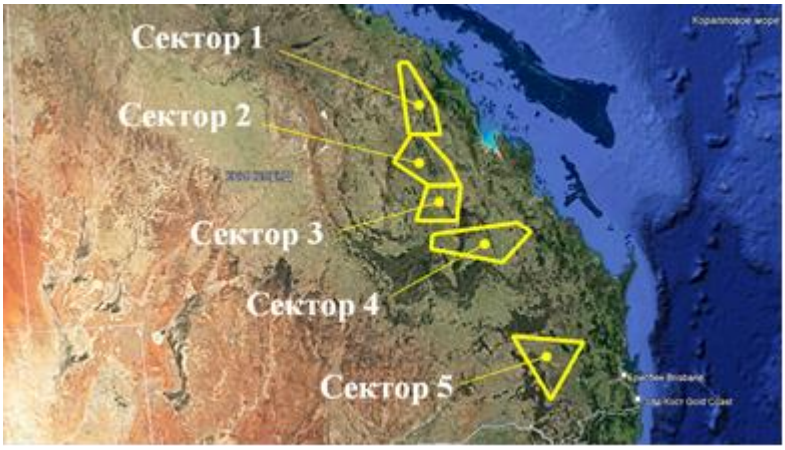


Рис. 1. Фрагмент космоснимка территории штата Квинсленд с выделением секторов с добычей угля открытым способом

По данным дистанционного мониторинга Земли из космоса практически на всех месторождениях используют сплошные однобортовые системы разработки с размещением вскрышных пород в выработанном пространстве карьеров. В некоторых случаях вскрышные породы отсыпают в безугольных зонах с организацией внешних отвалов. Длина фронта добычных работ в карьерах находится в широком диапазоне от 700 до 50100 м.

Анализ данных спутниковой съемки говорит о том, что угледобывающие предприятия ведут добычу угля при весьма благоприятных горно-геологических условиях залегания угольных пластов. Количество вскрышных уступов в среднем составляет 2-3. Средняя мощность отрабатываемых угольных пластов варьирует по секторам в диапазоне 8-18 м. Максимальная мощность угольных пластов (30 м) наблюдается в одном из карьеров, работающем во втором секторе. Залегание пластов в основном слабонаклонное с углами падения пластов 3-5°. Отметим, что во втором секторе работают три карьера на месторождениях угля с углами залегания пластов 10-12°. Конструкции нерабочих бортов на флангах карьеров позволяют сделать вывод о том, что в крест простирания по падению угольные пласты имеют горизонтальное залегание [10].

Все карьеры по добыче угля в исследуемых секторах штата Квинсленд в зависимости от горно-геологических условий разработки пластов можно условно разделить на две группы: ровные прямолинейные контуры рабочих уступов на месторождениях без тектонических сдвигов пластов и криволинейные в плане контуры уступов на месторождениях со смятыми пластами. На месторождениях первой группы на нижнем вскрышном уступе устанавливают драглайны с годовой производительностью 12-18 млн. м^3. Это позволяет значительно снизить затраты на вскрышные работы.

Практически во всех карьерах разработка вскрышных пород производится после предварительного рыхления буровзрывным способом. Скважины бурят по диагональной сетке с размерами 7×8 м. Средний размер взрывных блоков 150×800 м. Объем горной массы при высоте уступа 25 м после взрывания такого одного блока составляет 3,0 млн. м^3. В этом имеется глубокий экономический смысл – максимальная загрузка мощных экскаваторно-автомобильных комплексов.

В открытой угледобыче при небольших углах наклона угольных пластов (до 18°) на нижнем вскрышном (надугольном) уступе используют достаточно эффективно шагающие экскаваторы-драглайны. Поэтому для всех карьеров характерной является работа

драглайнов с перэкскавацией вскрышных пород. Ширина заходок драглайнов равна 75-80 м. В карьерах, где длина выемочных блоков менее 700 м драглайны не применяют [10].

Вскрышные уступы за исключением надугольного уступа отрабатывают мехлопатами или гидравлическими экскаваторами с объемом ковша 20-40 м^3 с погрузкой в автосамосвалы грузоподъемностью до 360 т. С целью сокращения расстояния перевозки вскрышных пород на внутренние отвалы широко применяют внутрикарьерные породные перемычки. Вскрышные породы транспортируют на внутренние отвалы по внутрикарьерным перемычкам, либо по въездным траншеям. Расстояние между осями траншей составляет 1-1,5 км и определяется длиной выемочных блоков. Добычные работы производят аналогичным оборудованием с транспортировкой угля до поверхностных стационарных складов с углепогрузочными терминалами.

Добытый в карьерах уголь вывозят в автосамосвалах на стационарные склады. В исследуемых пяти секторах штата уголь хранят и отгружают на 29 складах. С них уголь отгружают в железнодорожные составы в направлении трех морских портов Боуэн, Маккай и Гладстон на побережье Кораллового моря. Погрузка угля в железнодорожные составы из трех магистральных тепловозов и 110 вагонов грузоподъемностью 100 т каждый углем производится на петлевых разворотных участках железной дороги по конвейерам, подведенным к погрузочным устройствам со стационарных угольных складов.

В состав горнотранспортного оборудования входят 267 буровых станков, 52 драглайна с емкостью ковша от 40 до 100 м^3, и длиной стрелы от 60 до 100 м. В линейке драглайнов большой удельный вес в структуре занимают машины с максимальными параметрами. На выемке горных пород установлено 184 гидравлических экскаватора типа «прямая» и «обратная лопата» с емкостью ковша от 20 до 42 м^3, а также 53 гусеничных экскаватора с канатным приводом рабочего оборудования и емкостью ковша 30-50 м^3. Вывозка горной массы из забоев производится 1193 автосамосвалами грузоподъемностью в широком диапазоне 220-360 т [10].

При усредненных мощности угольных пластов 15 м и годовом подвигании фронта горных работ 60 м общий технологически возможный объем добычи угля в карьерах в этом штате может составить 450 млн. т. Соответственно при увеличении или падении спроса на уголь этот показатель может значительно варьировать в широком диапазоне.

Выводы. По результатам спутниковой съемки определены состав горнотранспортного оборудования, работающего в угольных карьерах в штате Квинсленд, технологический объем вскрышных работ и объем добычи угля. По нашей оценке, добыча угля в карьерах на территории этого штата характеризуется большими средними коэффициентами вскрыши в широком диапазоне 5-9 т/т.

Исходя из стабильного мирового спроса на коксующийся и энергетический уголь со стороны развивающихся стран Юго-Восточной Азии, с одной стороны, а с другой, согласно выявленным темпам подвигания фронта горных работ во всех карьерах в последние годы, объем добываемого угля в штате Квинсленд держится на уровне 300 млн. т.

В целом по данным дистанционного мониторинга в последние два десятилетия на территории Квинсленда наблюдается в значительной степени понижательный тренд в объемах добычи угля открытым способом.

Список литературы

1. Озарян Ю.А., Бубнова М.Б., Усиков В.И. Методика дистанционного мониторинга природно-технических систем (в условиях горнопромышленных территорий юга Дальнего Востока России) // Горный журнал. – 2020. – № 2. – С 84–87.

2. Особенности разработки регионального водного индекса для мониторинга воздействия изливов кислых шахтных вод на речные системы / Д.М. Ермаков, А.Д. Деменев, О.Ю. Мещерякова [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 6. – С. 222–237.

3. Разработка системы анализа состояния окружающей среды в зонах расположения крупных промышленных объектов, хвостохранилищ и отвалов / Е.А. Лупян, А.М. Константинова, И.В. Балашов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17. – № 7. – С. 243–261.

4. 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.

5. Remote-Sensing Evaluation and Temporal and Spatial Change Detection of Ecological Environment Quality in Coal-Mining Areas / X. Nie, Z. Hu, M. Ruan [et al.] // Remote Sens. – 2022. – No. 14. – P. 345.

6. Dust Dispersion and Its Effect on Vegetation Spectra at Canopy and Pixel Scales in an Open-Pit Mining Area / B. Ma, X. Li, Z. Jiang [et al.] // Remote Sens. – 2020. – 12(22):3759.

7. Detecting the Sources of Methane Emission from Oil Shale Mining and Processing Using Airborne Hyperspectral Data / C. Xiao, B. Fu, H. Shui [et al.] // Remote Sens. – 2020. – 12(3):537.

8. Yi Xu, Hongdong Fan, Libo Dang. Monitoring coal seam fires in Xinjiang using comprehensive thermal infrared and time series InSAR detection // International Journal of Remote Sensing. – 2021. – V. 42. – I. 6. – P. 2220–2245.

9. A Remote-Sensing-Based Alteration Zonation Model of the Duolong Porphyry Copper Ore District, Tibet / F. Yao, X. Xu, J. Yang [et al.] // Remote Sens. – 2021. – 13(24):5073.

10. https://www.google.com.earth.

УДК 622.271(73):550.814

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ В УГОЛЬНЫХ КАРЬЕРАХ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ МОНГОЛИЯ

[1]д.т.н. Зеньков И.В., [2]к.т.н. Черепанов Е.В., [3]Мулюшкина А.А., [4]к.т.н. Нефедов Б.Н.

1 – ООО «Сибирский научно-исследовательский институт горного и маркшейдерского дела», г. Красноярск, Россия

2 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия

4 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты исследования деятельности угольных карьеров на территории Республики Монголия. В ходе дистанционного мониторинга и аналитических расчетов выявлены территории с открытыми горными работами на угольных месторождениях, а также количество горных и транспортных машин, работающих в угольных карьерах. По результатам спутниковой съемки выявлены направления логистического перемещения и использования добытого угля, а также тренд в объемах добычи угля в сторону увеличения.

Ключевые слова: Республика Монголия, угольные месторождения, открытые горные работы, угольные карьеры, годовой объем добычи угля, горные и транспортные машины, направления использования угля, дистанционное зондирование Земли.

Введение. В структуре энергетической отрасли Республики Монголия по разным информационным источникам угольная генерация занимает ведущее место. География и рельеф страны, суровые климатические условия, концентрация и плотность населения, традиционное ведение хозяйства в равной степени сказываются на размещении объектов,

обеспечивающих выработку электрической энергии для нужд национальной экономики. Вместе с тем, как показывают результаты дистанционного мониторинга на исследуемой территории, работает более сорока угольных разрезов, продукция которых по-разному распределяется относительно внутреннего потребления в экономике. По нашей оценке, основанной на использовании результатов спутниковой съемки, весь объем угля, добываемый в южной части Монголии, транспортируется в Республику Китай. При этом собственное потребление угля для сжигания на тепловых станциях в системе топливно-энергетического комплекса республики многократно обеспечено работой угольных карьеров.

С появлением технологий дистанционного зондирования Земли из космоса спектр исследований значительно расширяется, о чем свидетельствуют работы российских и зарубежных исследователей [1-9]. Мировые тенденции использования ресурсов дистанционного зондирования в решении прикладных задач свидетельствуют об актуальности этого направления в ближайшие годы.

Исследование и особенности производственной деятельности угольных карьеров в системе собственного топливно-энергетического комплекса Монголии. Размещение и проживание населения на территории республики имеет специфические особенности. В северной части в трех географически компактно расположенных городах (Улан-батор, Дархан и Эрдэнэт) проживает более половины (50,5 %) населения страны. Ввиду небольшого количества энергоемких промышленных предприятий тепловые станции, работающие в этих городах, специализированы на выработке большого количества тепловой энергии для обогрева зданий, сооружений, жилых домов, объектов социальной инфраструктуры, что в свою очередь обусловлено холодным климатом в условиях среднегорья в центре континента. Вместе с тем на этих же станциях вырабатывается небольшое количество электроэнергии для промышленных предприятий и объектов социально-культурного назначения.

Большая ставка в топливно-энергетическом комплексе сделана на запасы разрабатываемого Багануурского угольного месторождения. Горный отвод карьера находится в 106 км восточнее г. Улан-Батора. По данным спутниковой съемки протяженность фронта горных работ составляет 9,5 км. В разработке находятся два пласта суммарной мощностью до 18 м с пологими углами залегания. Вскрышные породы четвертичного возраста разрабатывают без рыхления, а крепкие песчаники между этими породами и верхним угольным пластом, а также слой песчаников между пластами подлежат буровзрывному рыхлению. Верхняя часть вскрышных пород отрабатывается экскаваторно-автомобильными комплексами из экскаваторов ЭКГ-8и, ЭКГ-10 (7 ед.) с автосамосвалами грузоподъемностью 55-90 т (14 ед.). Толщу вскрышных пород, расположенную между пластами, перемещают во внутренние отвалы драглайнами ЭШ-10/70 (4 ед.), ЭШ-15/90 и ЭШ-20/90. Выемка угольного пласта из недр производится экскаваторами ЭКГ-5А (4 ед.) в комплексе с автосамосвалами грузоподъемностью 55 т (8 ед.). Фрагмент горных работ в карьере показан на рис. 1 а. На высокодетальном снимке из космоса кольцом желтого цвета обведен драглайн ЭШ-20/90 на вскрытии угольного пласта, а справа от него находится ЭКГ-8и (в кольце красного цвета) на отработке вскрышного уступа. Расстояние транспортировки вскрышных пород на отвалы составляет 1,6-2,3 км, а угля на расходные склады – не более 2,8 км.

Добытый уголь вывозят на два промежуточных поверхностных склада, к которым подведены железнодорожные тупики для постановки под загрузку составов из 20-25 стандартных полувагонов грузоподъемностью 70 т каждый. Далее по железной дороге составы направляют в г. Улан-Батор для выгрузки на трех ТЭЦ, одной котельной и на крупном региональном расходном складе, с которого уголь вывозят магистральными полуприцепами до мелких потребителей. По нашей оценке, производственная мощность разреза находится на уровне 3,5 млн. т в год. Отметим, что ведение горных работ осложнено

часть возникающими оползневыми явлениями в секторе внутренних отвалов бестранспортной вскрыши.

В исследуемом географическом секторе южнее пос. Шарынголь с середины 1960-х гг. до конца 2010-х гг. работал угольный разрез «Шарынгольский». С этого предприятия каменный уголь поставлялся для нужд промышленных предприятий и тепловых электростанций в г. Дархане и г. Эрдэнэт. В настоящее время горные работы (направление развития работ показано стрелками) остановлены ввиду ухода пластов в глубину и выросшего уровня коэффициента вскрыши (рис. 1 б).

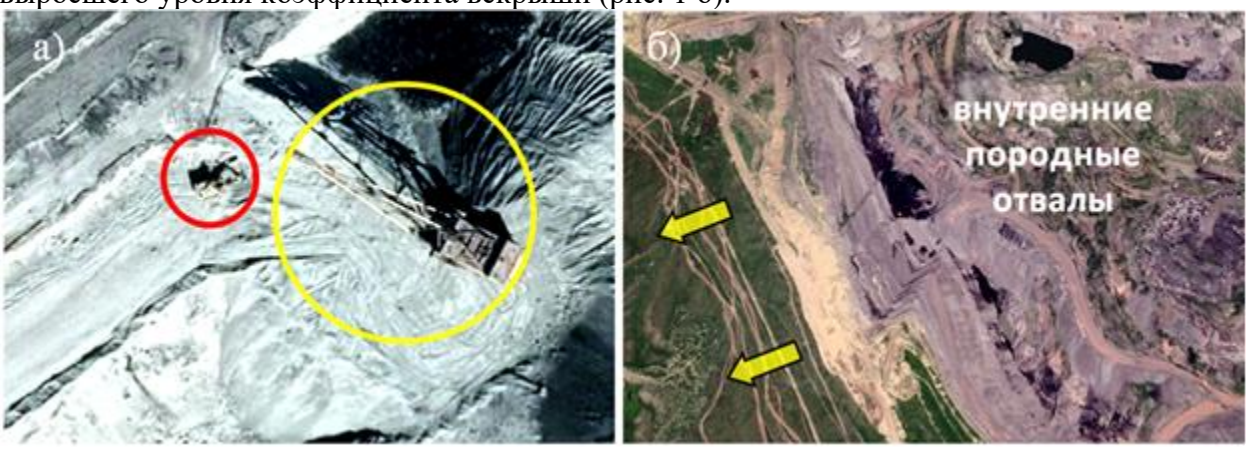


Рис. 1. Угольные карьеры в Республике Монголия на снимках из космоса:
а – фрагмент горных работ на Багануурском месторождении;
б – консервация горных работ на Шарынгольском месторождении

На юго-восток от г. Улан-Батора в 220 км работает с 1978 г. угольный разрез с координатами центра 46° 13′ 34″с. и 108° 32′ 19″в. на месторождении бурого угля южнее пос. Чойр. Протяженность фронта горных работ составляет 4,5 км. Вскрышные породы, расположенные ниже горных пород четвертичного возраста, рыхлят перед экскавацией с использованием буровзрывного метода. Горизонтальное залегание угольного пласта позволяет часть вскрышных пород отрабатывать двумя драглайнами ЭШ-10/70 и ЭШ-20/90. Верхнюю часть вскрышных пород отрабатывают с применением экскаваторно-автомобильных комплексов из ЭКГ-5А (4 ед.) и автосамосвалов грузоподъемностью 55 т (16 ед.). На отработке угольного пласта используют аналогичные выемочно-транспортные комплексы. Вскрышные породы с верхних уступов транспортируют через фланги карьера и по одной породной перемычке на внутренние отвалы. Весь объем добытого угля доставляют на дробильную установку, соединенную со стационарным конвейером протяженностью 1900 м. Уголь с конвейера разгружается на стационарный поверхностный склад. Склад расположен рядом с проложенной трансконтинентальной железной дорогой в направлении «север-юг». По нашей оценке, объем добычи угля на месторождении составляет 1,5 млн. т в год.

В восточном секторе республики более тридцати лет работает угольный разрез с координатами 48° 07′ 52″с. и 114° 32′ 22″в. Разрез обеспечивает топливом ТЭЦ в г. Чойбалсан. На месторождении разрабатывается угольный пласт горизонтального залегания мощностью до 12 м. Мощность вскрышных пород не более 60 м. В карьере работают эпизодически один буровой станок, пять экскаваторов ЭКГ-5А. В комплексе с экскаваторами на вывозке угля и вскрышных пород эксплуатируют 20 автосамосвалов общего назначения грузоподъемностью 30 т. Расстояние транспортировки вскрышных пород не более 1 км, а угля до ТЭЦ – 7 км. По нашей оценке, на этом месторождении ежегодно добывают 0,6 млн. т бурого угля.

По данным спутниковой съемки установлена связь энергосистемы Монголии и России в месте пограничного перехода (50° 18′ 50″с. и 106° 21′ 41″в.) линии

электропередачи, идущей от Гусиноозерской ГРЭС в Бурятии до тепловых электростанций в г. Улан-Баторе.

В исследуемом секторе Монголии в последние два десятилетия наблюдается резкий рост населения в трех городах (Улан-Батор, Дархан и Эрдэнэт), что неизбежно отражается на адекватном увеличении потребления тепловой и электрической энергии. Поэтому с учетом остановки горных работ на Шарынгольском месторождении необходимо, на наш взгляд, увеличение объема добычи угля на Багануурском разрезе и на разрабатываемом месторождении вблизи пос. Чойр. Выпадающие объемы добычи угля на Шарынгольском месторождении компенсируют за счет добычи угля на шахте Бор-Ундер, расположенной в 260 км на юго-восток от г. Улан-Батора.

Выводы. По результатам спутниковой съемки исследованы технологические показатели угольных разрезов на территории в Республике Монголия, а также определена комплектация горнотранспортного оборудования. Определены производственные мощности горнодобывающих предприятий по добыче угля. По нашей оценке, добыча угля в карьерах в северной части республики характеризуется большими коэффициентами вскрыши на уровне 8-10 т/т.

Весь объем угля на уровне 6 млн. т, добываемого открытым способом, за один календарный год в этих границах, используют на ТЭЦ столицы республики и в г. Эрдэнэт и Дархан. На юге республики в последнее десятилетие постоянно увеличивается объем добычи высококачественных марок угля, транспортируемый через южную границу в Республику Китай. По нашей оценке, годовой объем угля, добываемого в южном секторе республики, находится на уровне 30 млн. т.

В целом по данным дистанционного мониторинга в последние два десятилетия на территории Монголии наблюдается повышательный тренд в объемах добычи угля открытым способом, значительная часть которого направляется на экспорт.

Список литературы

1. Смирнова И.О., Кирсанов А.А. Состояние и перспективы использования данных дистанционного зондирования при изучении экзогенных геологических процессов на примере оползней // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 3. – С. 26–48.

2. Елсаков В.В. Спектральные различия характеристик растительного покрова тундровых сообществ сенсоров LANDSAT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 4. – С. 92–101.

3. Михайленко И.М., Тимошин В.Н. Оценивание параметров состояния агроценозов по данным дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 4. – С. 102–114.

4. Терехин Э.А. Оценка пространственно-временных изменений в зеленой фитомассе аграрной растительности с использованием спектрально-отражательных признаков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 1. – С. 138–148.

5. Pashkevich M.A., Danilov A.S., Matveeva V.A. Remote sensing of chemical anomalies in the atmosphere in influence zone of Korkino open pit coal mine // Eurasian mining. – 2021. – № 1. – PP. 79–83.

6. Including 38 kHz in the standardization protocol for hydroacoustic fish surveys in temperate lakes / Anne Mouget, Chloé Goulon, Thomas Axenrot [et al.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2019. – V. 5. – I. 4. – PP. 332–345.

7. Peter T. Fretwell, Philip N. Trathan. Discovery of new colonies by Sentinel2 reveals good and bad news for emperor penguins // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2021. – V. 7. – I. 2. – PP. 139–153.

8. Remote sensing of three-dimensional coral reef structure enhances predictive modeling of fish assemblages / Lisa M., Stacy Jorgensen, Christopher A. Lepczyk [et al.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2019. – V. 5. – I. 2. – PP. 150–159.

9. Lawrence Ball, Joseph Tzanopoulos. Interplay between topography, fog and vegetation in the central South Arabian mountains revealed using a novel Landsat fog detection technique // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2020. – V. 6. – I. 4. – PP. 498–513.

10. https://www.google.com.earth.

УДК 622.261

ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ДОБЫЧЕ УГЛЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ ГИДРАВЛИКО-МЕХАНИЗИРОВАННЫМИ ЩИТОВЫМИ КОМПЛЕКСАМИ НА МОЩНЫХ КРУТЫХ ПЛАСТАХ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

к.э.н., Новоселов С.В.
Академия горных наук, г. Москва, Россия

Аннотация. Раскрыта актуальность разработки инновационных технологий и очистной техники для добычи угля на крутых пластах большой мощности. В Кузбассе при существующих ограничениях по площади горных отводов и уменьшении объемов легкодоступных промышленных запасов угля, неизбежно в ближайшие два десятилетия, угольщикам придется разрабатывать трудноизвлекаемые запасы угля, которые находятся на глубине 500-800м.Для этого нужны эффективные новые геотехнологии и инновационные комплексы безлюдной добычи угля типа гидравлико-механизированных щитовых комплексов (РГМЩК).

Ключные слова: трудноизвлекаемые запасы, гидравлико-механизированный щит**,** технологическая эффективность, роботизированный рабочий орган, безлюдная выемка.

Современные темпы и объемы развития угледобычи России и Кузбассе достигли соответственно 438,7 млн. т и 212,6 за 2023 год [1]. При этом открытым способом добыто 341 млн. т или 77,7% по России и 66,8% в Кузбассе – 143,1 млн. т, согласно сайту [2]. Очевиден факт значительного превышения открытого способа добычи над подземным.

Однако в Кузбассе, при существующих ограничениях по территории горных отводов и легкодоступных эффективных промышленных запасов угля, неизбежно в ближайшие два десятилетия угольщикам придется разрабатывать трудноизвлекаемые запасы угля, которые находятся на глубине 500-800м. Для этого потребуются эффективные новые геотехнологии и инновационные комплексы желательно при безлюдной добыче угля типа РГМЩК, которые пока находятся в стадии идей.

В Кузбассе, много запасов и часть из них трудноизвлекаемые, но они имеют отличное качество, особо ценные марки коксующихся углей, залегающие в мощных пластах, т.е. более 3,5м мощности, углам падения 55-90°, находящиеся на глубине 500м и более, которые в принципе эффективно возможно добывать только подземной разработкой.

Состояние минерально-сырьевой базы Кузбасса достаточно полно раскрыто кузбасскими учеными в источниках **[**3, 4] и др., где однозначно определено, что основная часть запасов коксующихся углей (86%) может отрабатываться только подземным способом, поэтому совершенствование технологий подземной добычи в направлении повышения их эффективности и безопасности остается основной задачей горной науки.

На современном этапе (пока балансовых запасов хватает), есть временной резерв для разработки инновационных технологий и очистной техники для подземной добычи угля на крутых пластах большой мощности. Предлагаемые технологии должны быть просты, прямоточны, эффективны, как технологически так технически, при достаточном уровне

технико-экономической эффективности. Кроме того, для обеспечения промышленной безопасности они должны максимально соответствовать требованиям времени: безлюдные, видео мониторинг в режиме онлайн, что раскрыто в ряде публикаций [5-8].

Например, образ роботизированного гидравлико-механизированного щитового комплекса видится сложной механической системой, управляемой дистанционно с диспетчерского пульта. Гидравлико-механизированный щит состоит из полужестко взаимосвязанных секций, опускающихся друг относительно друга по направляющим, имеет по 4 гидродомкрата с опирающимися основаниями. Секции поочередно распираются на величину заходки рабочего органа барабанного типа, который движется за счет зубчатых приводных шестерен по направляющим реечной передачи. В месте, где идет выемка, гидродомкраты «втянуты» в щит, а после распираются. При совершении цикла резания щит опускается или идет на зачистку.

В общем параметры техники определяются горно-геологическими условиями : мощность пласта, углом падения, (чем больше угол падения тем лучше, на нас работает сила гравитации, которая будет способствовать опусканию щита, и ликвидации малых «мертвых зон» при опускании секций), длиной выемочного забоя, и все это позволит сделать расчет мощности гидравлики, электроприводов, необходимой скорости движения (подачи) «робота», скорости вращения (резания) барабанного шнека, и главного организационного параметра – времени процессов.

В данной идее (проекте) есть особенность – конвейер находится в центре щита внизу и в центре самого робота, робот как бы насажен на конвейер и двигается по нему сверху и грузит отбитый уголь. При длине забоя 100м (50 секций), мощностью 5м, при объемном весе угля 1,3 т/м^3, со стружки будем иметь около 650 тонн.

Для реализации такого проекта, как минимум нужен ствол глубиной 500 м, главный квершлаг 5000 м на всю длину шахтного поля, при конвейерном уклоне 15° длиной около 2000 м, необходимы капитальные затраты плюс весь технологический комплекс. Если посчитать приблизительно, в шахтном поле 5 км х 5 км, будет 3 пласта и 3 этажа по 300 м без учета технологических потерь при подземной угледобыче.

Выводы. Актуальность разработки инновационных технологий и очистной техники для подземной добычи угля на крутых пластах большой мощности очевидна. Ввиду, будущей смены стратегических приоритетов, с открытой добычи на подземную в Кузбассе, необходимо проведение проектных и исследовательских работ по определению оптимальных технологий и созданию высокоэффективной очистной техники для трудноизвлекаемых запасов. Видится применение инновационных материалов и конструкций, уменьшающих материалоемкость и повышающих прочность.

Для решения данных аспектов в Кузбассе необходимо объединение усилий научных организаций: АГН, СО РАН, кафедр горных машин, способных разрабатывать проектную документацию для РГМЩК, как в Кузбассе (СибГИУ, КузГТУ), так и в ведущих горных вузах России (НИТУ МИСиС, Санкт-Петербургского горного университета), и конечно же, при взаимодействии с проектными институтами и горно-машиностроительным бизнесом, который возможно будет заинтересован финансировать данную научно-исследовательскую и проектно-изыскательскую деятельность.

Список литературы

1. Мешков Г.Б., Петренко И.Е. Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за 2023 год // Уголь. – 2024. – № 3. – С. 18-29.

2. https://tass.ru/ekonomika/19749807

3. Стратегические задачи технологического развития угольной отрасли / В.И. Клишин, Т.Б. Рогова, С.В. Шаклеин [и др.]. // Уголь. – 2023. – № 3. – С. 52-59.

4. Шаклеин С.В., Писаренко М.В. Оценка балансовых запасов сырьевой базы коксующихся углей // Геология и минеральные ресурсы Сибири. – 2023. – № 2 (54). – С. 60-67.

5. Производственная травма и производственный травматизм: явление и сущность, случайность и закономерность / В.Б. Артемьев, В.В. Лисовский, И.Л. Кравчук [и др.] // Уголь. – 2020. – № 5. – С. 4-11.

6. Совершенствование системы управления промышленной безопасностью в угольной отрасли / Ю.Ю. Костюхин, Д.Ю. Савон, А.Е. Сафронов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 6. – С. 184-192.

7. О мерах радикального повышения взрывобезопасности при современных технологиях подземной добычи угля / Н.О. Каледина, В.Н. Кутузов, В.В. Мельник [и др.] // Горный журнал. – 2010. – № 7. – С. 98-100.

8. Оценка проектных решений технологических систем угольных шахт с учетом риска / А.Е. Ютяев, Е.Н. Якунчиков, А.С. Оганесян [и др.] // Уголь. – 2019. – № 7 (1120). – С. 52-57.

УДК 622.271

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОТРАБОТКИ УГЛЕНАСЫЩЕНОЙ ЗОНЫ ПОЛОГОПАДАЮЩИХ ПЛАСТОВ ОБРАТНОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЛОПАТОЙ

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

Аннотация. При производстве горных работ для углубочно-сплошной системы разработки параметры уступа при работе обратных гидравлических лопат должна отвечать ряду условий. При ведении добычных работ экскаватор должен обеспечить выемку угля по всей ширине заходки с минимальными потерями, и ширина заходки должна обеспечить разворот автосамосвалов-углевозов в забое.

Ключевые слова: углубочно-сплошная система разработки, параметры уступа, обратная гидравлическая лопата.

При анализе угленасыщенных зон карьерных полей важным значением для технологии их отработки является взаимное расположение пластов относительно друг друга [1-8]. При отработке пологопадающих свит угольных пластов в зоне транспортной технологии их сближенность определяется возможностью формирования минимально необходимой ширины транспортной площадки при тупиковом развороте автосамосвала (рис. 1) в пределах экскаваторной заходки [9-11].

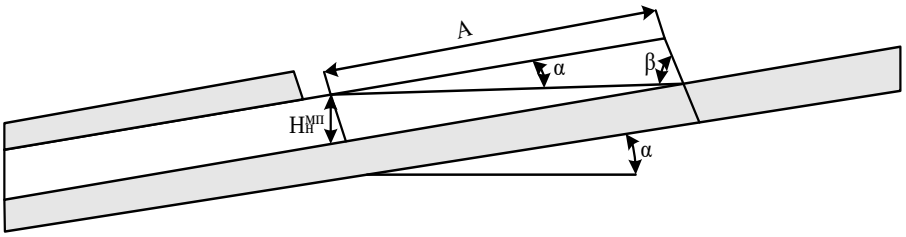


Рис. 1. Схема к обоснованию сближенности угольных пластов пологого залегания

Минимально необходимая ширина транспортной площадки должна быть равна значению

$$В_{тп}^{min} = R_а + 0{,}5(L_а + В_а) + С + Z, \quad (1)$$

что соответствует горизонтальной мощности междупластья, т.е. $В_{тп}^{min} = L_г^{мп}$.

Тогда мощность междупластья по нормали, обеспечивающая формирование транспортной площадки, определяется по выражению

$$\mathrm{H}_{\text{н}}^{\text{мп}} = \mathrm{B}_{\text{тп}}^{min} \cdot \sin\alpha = [R_{\text{а}} + 0{,}5(L_{\text{а}} + \mathrm{B}_{\text{а}}) + \mathrm{C} + Z] \cdot \sin\alpha,$$

где Z – берма безопасности, м.

При этом ширина экскаваторной заходки не должна быть менее следующего значения, определяемого по формуле

$$\mathrm{A} = \frac{[R_{\text{а}}+0{,}5(L_{\text{а}}+\mathrm{B}_{\text{а}})+\mathrm{C}+Z]\cdot\sin\beta}{\sin[180-(\alpha-\beta)]} = \frac{[R_{\text{а}}+0{,}5(L_{\text{а}}+\mathrm{B}_{\text{а}})+\mathrm{C}+Z]\cdot\sin\beta}{\sin(\alpha+\beta)}, \quad (2)$$

где α – угол падения пласта, град; β – угол откоса уступа по породе, град.

К сближенным пластам следует относить пласты, расстояние между которыми менее необходимого значения $\mathrm{H}_{\text{н}}^{\text{мп}}$. Зависимость минимальной мощности междупластья $\mathrm{H}_{\text{н}}^{\text{мп}}$, обеспечивающей создание транспортной площадки для раздельной выемки пологих угольных пластов, от угла падения пласта приведена на рис. 2.

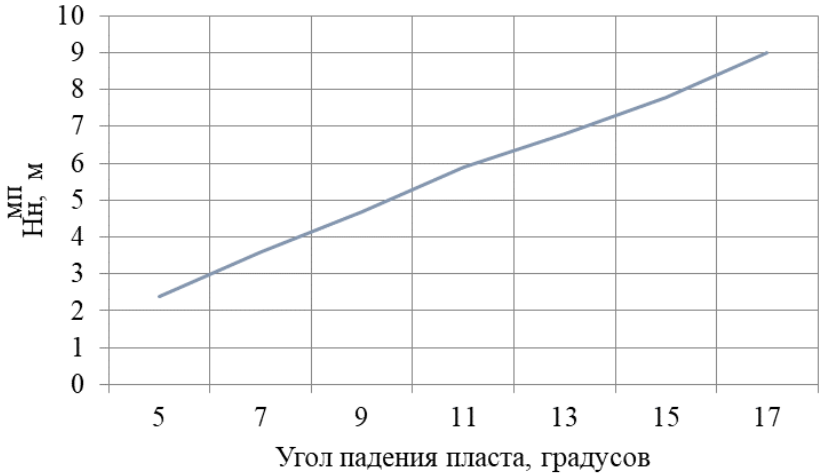


Рис. 2. Зависимость минимальной мощности междупластья, от угла падения пластов

При известном времени отработки бестранспортного уступа ($T_{\text{бт}}$, смен) определяется производительность экскаваторно-автомобильно-отвального (ЭАО) комплекса, обеспечивающего разработку пластов и междупластья в угленасыщенной зоне за указанный период времени.

Для выемки угля и породы в исследовании принят экскаватор – обратная гидравлическая лопата (ЭГО). В угленасыщенной зоне работает один экскаватор, т.к. по условию последовательности выемки угля и междупластья не представляется возможным совмещение работы двух или трех экскаваторов.

Необходимо отметить, что структура схемы экскавации по условию соблюдения безопасных расстояний между работающим драглайном и экскаватором в угленасыщенной зоне, позволяет производить независимо бестранспортную перевалку навалов и добычные и породные работы с применением автотранспорта в угленасыщенной зоне [12, 13].

Выемка верхнего пласта осуществляется по мере его обнажения драглайном. Однако добычной экскаватор вступает в работу только после удаления драглайна от торца заходки в зоне траншеи на безопасное расстояние, равное $R_{\text{ч}}+\Delta$ (рис. 3).

Тогда начало ведения добычных работ по верхнему пласту ($t_{\text{н.д.в}}$) равно, смен,

$$t_{\text{н.д.в}} = \frac{R_{\text{ч}}+\Delta}{v_{m_2}}, \quad (3)$$

где $R_{\text{ч}}$ – радиус черпания драглайна, м; Δ = 20 м – минимально допустимое безопасное расстояние между работающим драглайном и добычным экскаватором [14], м; v_{m_2}– скорость подвигания забоя драглайна при его первом рабочем ходе, м/см.

Добычные работы по верхнему пласту производятся со скоростью подвигания забоя драглайна до тех пор, пока он не перейдет на второй рабочий ход. Поэтому на расстоянии

($R_ч$+Δ) до торца заходки скорость подвигания добычного забоя будет определяться сменной производительностью добычного экскаватора ($П_{д.см}$, $м^3$/смену), а время доработки заходки будет равно $t_{к.д.в.}$, смен (рис. 3). Как только закончатся добычные работы по верхнему пласту за время ($t^I_{зах.}$+ $t_{к.д.в.}$), в зоне траншеи начинается подготовка к выемке буровзрывным способом первого блока по междупластью длиной $L_{бур}$ (м). Время обуривания и взрывания блока – $t_{бвр}$ (смен). За период обуривания блока добычной экскаватор холостым ходом перегоняется к траншее. Время перегона совмещается с временем обуривания блока.

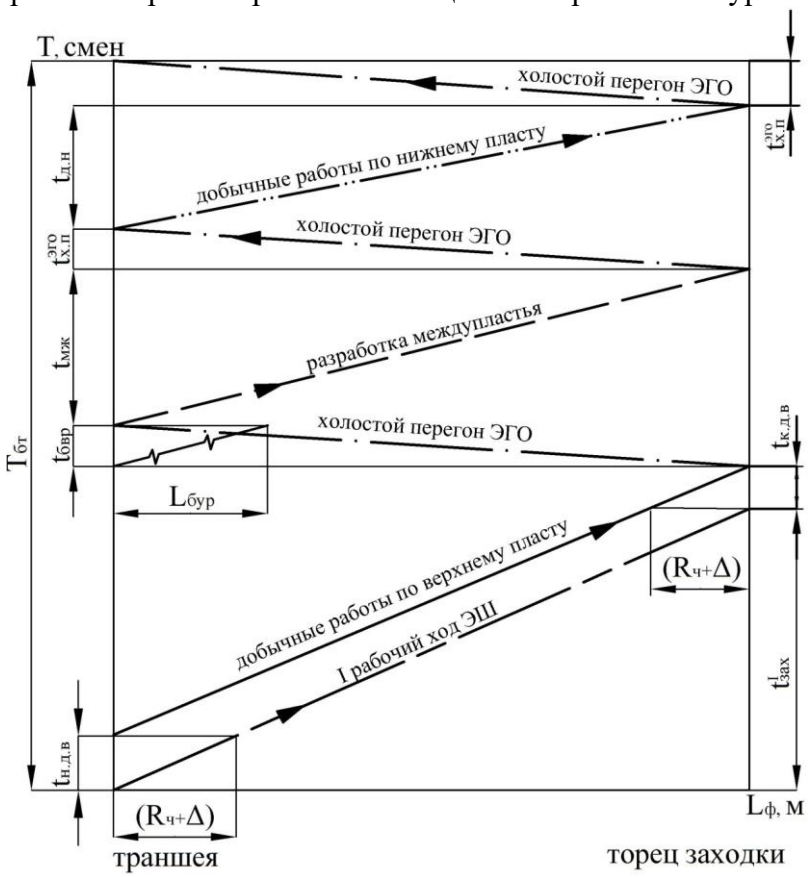


Рис. 3. Параметры планограммы разработки угленасыщенной зоны обратной гидравлической лопатой

После подготовки первого блока к выемке начинается разработка междупластья, которая займет время – $t_{мж}$ (смен).

Далее экскаватор холостым ходом за время $t^{эго}_{х.п}$ (смен) перегоняется к траншее и начинает разработку нижнего пласта за время – $t_{д.н.}$

По окончании выемки нижнего пласта драглайн холостым ходом перегоняется к траншее и выводится из угленасыщенной зоны (время перегона $t^{эго}_{х.п}$). На этом завершается цикл отработки заходки и драглайн переходит на разработку следующей.

По условию определения производительности комплекса ЭА справедливо равенство:

$$T_{бт} = t^I_{зах} + t_{к.д.в} + t_{бвр} + t_{мж} + 2 \cdot t^{эго}_{хп} + t_{д.н}. \quad (4)$$

Параметры $t_{к.д.в}$, $t_{бвр}$, $t_{мж}$, $t^{эго}_{хп}$, $t_{д.н}$ рассчитываются по следующим формулам:

$$t_{к.д.в} = \frac{А_{бтр} \cdot (R_ч + Δ)}{П_{д.см}}; \quad (5)$$

$$t_{бвр} = \frac{L_{бур} \cdot А_{бтр} \cdot l_{скв}}{a \cdot b \cdot П_{б.см}} + t_{в}, \quad (6)$$

где $А_{бтр}$– ширина бестранспортной (буровзрывной) заходки, м; $l_{скв}$– длина скважины, м; a – расстояние между скважинами в ряду, м; b – расстояние между рядами скважин, м; $П_{б.см}$–

сменная производительность бурового станка, м/см; $t_{взр}$ – время на заряжание и взрывание блока, смен,

$$t_{мж} = \frac{А_{бтр} \cdot L_м \cdot Н_м}{П_{в.см}}, \quad (7)$$

где $П_{в.см}$– сменная производительность экскаватора при разработке развала породы, $м^3$/смену.

$$t_{хп}^{эго} = \frac{L_{тр}}{Т_{см} \cdot v_{эго}}, \quad (8)$$

где $Т_{см}$ - продолжительность смены, час; $L_{тр}$– дальность перегона, м; $v_{эго}$– скорость передвижения экскаватора с дизельным двигателем, м/час.

$$t_{дн} = \frac{А_{бтр} \cdot m_1 \cdot L_{m_1}}{П_{д.см}}. \quad (9)$$

Заменяя в формуле (4) параметры $t_{к.д.в}$, $t_{мж}$ и $t_{д.н}$, соответствующими выражениями (5-9) получим

$$T_{бт} = t_{зах}^{I} + \frac{А_{бтр} \cdot (R_ч + \Delta)}{П_{д.см}} + t_{бвр} + \frac{А_{бтр} \cdot Н_м \cdot L_м}{П_{в.см}} + 2 \cdot t_{хп}^{эго} + \frac{А_{бтр} \cdot m_1 \cdot L_{m_1}}{П_{д.см}}. \quad (10)$$

На основе изложенной методики в табл. 1 приведены основные параметры технологической схемы разработки вскрышного уступа, экскаватором ЭШ 11.70.

Таблица 1

Основные параметры технологической схемы разработки вскрышного уступа

Наименование параметров и показателей	Условные обозначения	Мощность междупластья ($Н_м$), м		
		5	10	15
Высота бестранспортного уступа, м	$Н_{бт}$	30		
Ширина вскрышной и отвальной заходок, м	$А_{бтр}$	35		
Коэффициент переэкскавации в профиле заходки	$К_{пэ.пр}$	0,65	0,74	0,79
Общий по фронту работ коэффициент переэкскавации	$К_{пэ.об}$	0,91	1,00	1,19
Время отработки заходки, смен	$Т_{бт}$	682	749	792
Коэффициент затрат рабочего времени на организацию переходов	$К_{орг}$	0,122	0,156	0,171
Годовая скорость подвигания бестранспортного фронта, м/год	$v_{ф.бт}$	41,5	37,8	35,8
Годовой объем подготовительных запасов, млн. т/год	Qг	0,52	0,48	0,45

Обратные гидравлические лопаты имеют ограниченную глубину черпания [15], тогда как нормальная мощность пластов составляет от 3 м до 12 м. Кроме того, надо учитывать, что пологое залегание пластов увеличивает их вертикальную высоту. Поэтому технологические схемы добычных работ могут характеризоваться как однослойной отработкой, так и двухслойной.

Возможность применения той или другой схемы для отработки пласта оценивается сравнением рабочей глубины черпания ($Н_{ч.у}$) с параметром h_m, представляющим разность отметок (высоту) между трассой рабочего хода экскаватора и транспортной полосой, формируемой на почве пласта (рис. 4).

Параметр (hм) равен

$$h_м = А_{бтр} \cdot tg\beta + \frac{m \cdot \sin\beta}{\sin(\alpha+\beta)} - \frac{(0{,}5 \cdot В_т + В_{тп}) \cdot tg\alpha}{(1 + tg\alpha \cdot tg\beta_0)}. \quad (11)$$

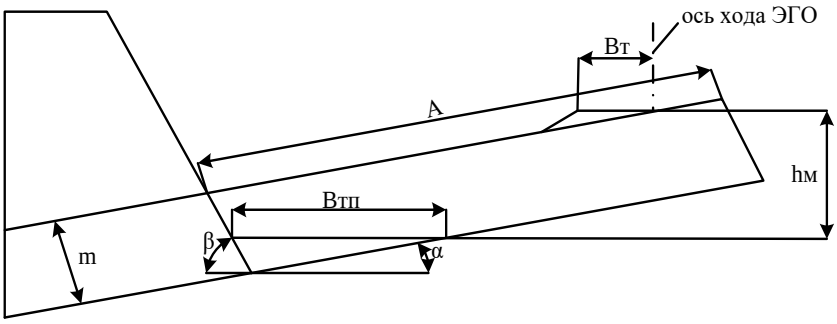


Рис. 4. Расчетная схема для определения числа слоев разработки угольного пласта

Для инженерных расчетов на рис. 5 приведены значения h_m в зависимости от нормальной мощности пласта (m) и угла его падения (α). Расчет произведен для анализируемого драглайна ЭШ 11.70, работающего с шириной заходки $А_{бтр}$ = 35 м.

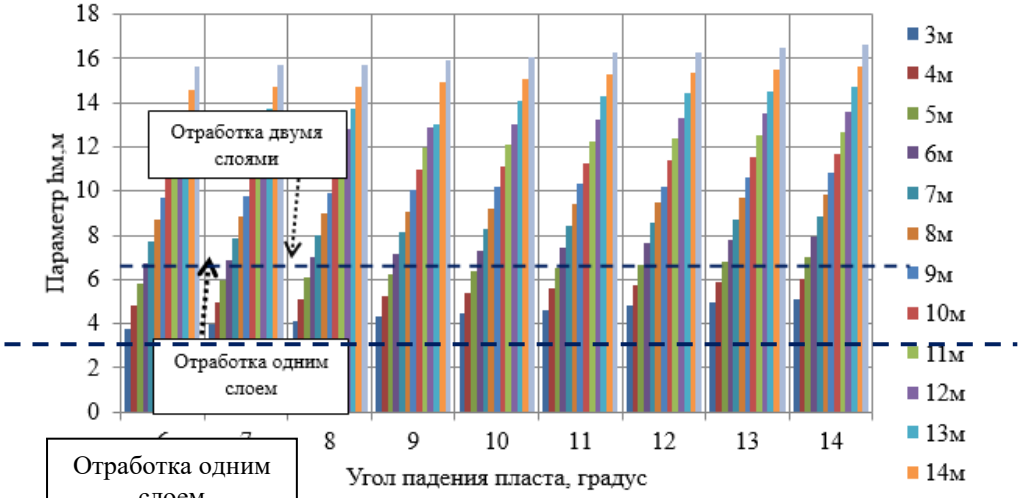


Рис. 5 Зна[illegible]m) в зависимости от угла падения пласта и его мощности

Вывод. Из рис. 5 следует, что в рассматриваемом диапазоне мощностей пластов они могут разрабатываться одним слоем, при мощности пласта до 7 м включительно, и двумя слоями при мощности пласта от 8 м до 12 м.

Список литературы

1. Гвоздкова Т.Н. Обоснование структуры бестранспортных схем разработки свит из трех пологих угольных пластов: автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук; Кузбасс. гос. техн. ун-т. – 2006. – 22 с.

2. Воронков В.Ф. Обоснование технологии инженерной разработки вскрышных надугольных горизонтов с размещением породы во внутренних отвалах на разрезах южного Кузбасса: автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук; МГИ. – Москва, 1989.– 20 с.

3. Разработка угленасыщеных зон карьерных полей выемочно-транспортным комплексом / В.Ф. Колесников, А.И. Корякин, В.Г. Проноза [и др.]. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2010. – 247с.

4. Корякин А.И., Селюков А.В. Определение основных технологических параметров карьера при проектировании // Вестник КузГТУ. – 2010. – №2 – С. 66–68.

5. Ермолаев В.А., Селюков А.В. Моделирование состава и взаимосвязи элементов производственного процесса карьера // Техника и технология горного дела. – 2019. – №2(5). – С.42-55.

6. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Часть 1. Производственные процессы. – М.: Недра, 1985. – 509 с.

7. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Часть 2. Технология и комплексная механизация. – М.: Недра, 1985. – 549 с.

8. Типовые технологические схемы ведения горных работ на угольных разрезах. – М.: Недра, 1982. – 405 с.

9. Томаков П.И., Наумов И.К. Технология, механизация и организация открытых горных работ. – М.: Изд-во Московского горного института, 1992. – 464 с.

10. Мельников Н.Н., Неволин Д.Г., Скобелев Л.С. Технология применения и параметры карьерных гидравлических экскаваторов; отв. ред. Н.Н. Мельников. – Апатиты: Кольский научный центр РАН. – 1992. – 212 с.

11. Беляков Ю.И. Экскаваторные работы: справочник рабочего. – М.: Недра, 1992. – 288 с.

12. Селюков А.В. Контурное развитие карьерного поля и внешнего отвала в задачах сокращения избыточного выработанного пространства разрезов с автотранспортной технологией // Вестник КузГТУ. – 2016. – №4. – С. 7-14.

13. Селюков А.В. Проектирование динамичностью рядов вариаций транспортной и бестранспортной технологий открытой разработки наклонных и крутопадающих залежей // Вестник КузГТУ. – 2016. – № 4. – С.59-64.

14. Справочник механика открытых работ. Экскавационно-транспортные машины цикличного действия / М.И. Щадов, Р.Ю Подерни, Е.Н Улицкий [и др.]. – М.: Недра, 1989. – 374 с.

15. Ржевский В.В. Процессы открытых горных работ. – М.: Недра, 1978. – 541 с.

УДК 622.271

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТУПА ПРИ РАБОТЕ ОБРАТНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЛОПАТ ДЛЯ УСЛОВИЙ УГЛУБОЧНО-СПЛОШНОЙ СИСТЕМЫ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ

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

Аннотация. При производстве горных работ для углубочно-сплошной системы разработки параметры уступа для экскаватора типа ЭГО должна отвечать ряду условий. При ведении добычных работ выемка угля по всей заходке должна быть с минимальными потерями, и ширина заходки должна обеспечить разворот автосамосвалов-углевозов в забое.

Ключевые слова: углубочно-сплошная система разработки, параметры уступа, обратная гидравлическая лопата.

Развитие масштабов горного производства ориентирует недропользователей на внедрение бережливого производства, к числу таких решений относят углубочно-сплошные системы разработки с внутренним отвалообразованием [1,2], в том числе с применением бестранспортной технологии [3-5]. Общие принципы проектирование параметров горного производства, включая обоснование параметров уступа изложены в работах [6-9]. При ограниченных размерах разгрузочного параметра обратных гидравлических лопат разработку развалов породных междупластий на уступе со сбросом породы в выработанное пространство необходимо осуществлять за один рабочий ход. При ведении добычных работ ширина заходки должна обеспечить разворот автосамосвалов-углевозов в забое. Ширина заходки для обратных гидравлических лопат рассмотрена в работах [11-13].

В работе КФ НИИОГР [14] ширина буровзрывной заходки рассмотрена для условий продольной системы разработки с размещением развала на рабочей площадке уступа. Разработка развала обратной гидравлической лопатой осуществляется нижним черпанием с установкой на рабочей площадке невзорванного массива. Выемка породы производится за один проход с верхней погрузкой в автотранспорт, располагающимся также на верхней рабочей площадке уступа. Для этих условий ширина заходки (А) определяется по формуле, (м)

$$A = R_ч - B_р , \quad (1)$$

где Rч – радиус черпания на горизонте размещения развала, м; Вр – дальность отлета породы при взрыве от нижней бровки взрываемого уступа, м.

Эта формула не может быть использована для рассматриваемых условий [1-5], так как при бестранспортной технологии разработка породных междупластий производится с установкой экскаватора не на невзорванном массиве, а на развале. Кроме того, величина радиуса разгрузки не превышает 13 м, что намного меньше, чем необходимо для разворота автосамосвалов-углевозов.

В работе [13] приводятся только числовые значения ширины заходки для условий разработки пород без подготовки их к выемке буровзрывным способом от 6 до 25 м.

В работах [15,16] для условий разработки мягких пород обратной гидравлической лопатой нижним черпанием предлагается следующая формула для определения ширины заходки, м,

$$A = 1{,}7 \cdot (B_x + 3) + H_y \cdot ctg\alpha_п , \quad (2)$$

где B_x - ширина хода экскаватора, м; $\alpha_п$ – угол рабочего откоса уступа, град.; H_y – высота уступа, м.

Однако не представлена расчетная схема, поясняющая место установки экскаватора на уступе. В рассматриваемых условиях этот фактор имеет определяющее значение для осуществления проверок требований, которым должна отвечать ширина буровзрывной заходки.

Таким образом, в опубликованных работах отсутствует методика определения ширины заходки для обратных гидравлических лопат, работающих по бестранспортной технологии при углубочно-сплошной системе разработки [1-5].

Учитывая необходимость нижней погрузки угля, предлагается принять за ширину буровзрывной заходки то ее значение, при котором обеспечивается разворот автосамосвалов-углевозов в забое. При этом необходимо учитывать рациональное сочетание модели обратной гидролопаты и модели углевоза, подобранное по известному соотношению $V_a : E$ [11,17]. Для принятого значения ширины заходки проверяются условия работы обратной гидравлической лопаты при ведении добычных и вскрышных работ в соответствии с необходимыми требованиями. Проверка условий состоит в следующем: рассматривается схема разработки пласта, обеспечивающая полноту его выемки (рис. 1); определяется место размещения экскаватора на развале, обеспечивающая разработку его за один прямолинейный ход; проверяется возможность выполнения экскаватором операции по зачистке откоса массива от возможного вывала камней. Выполнение этой операции связанно с выполнением требований безопасности ведения горных работ при бестранспортной технологии [12]. В работе отмечается следующее. При разработке мелкоблочных и крупноблочных пород на угольных месторождениях уступами высотой $H_y \leq$ 10-12 м (что соответствует высоте уступов при работе обратных гидравлических лопат) возможно применение вертикальных скважин по последнему ряду скважин. Для обеспечения высокого качества дробления породы при обуривании последующих рядов целесообразно наклонное расположение скважин. Однако по предпоследнему ряду необходимо бурить как наклонные, так и вертикальные скважины, расположенные между наклонными.

Для выбора значения ширины заходки по моделям обратных гидравлических лопат определена их комплектация с автосамосвалами-углевозами согласно соотношения V_a:Е (табл. 1).

Из табл.1 видно, что в комплекте с экскаваторами, у которых Е=4 и 6 м^3, должен работать углевоз серии БелАЗ-7555, с Е=8м³ – углевозы серий БелАЗ-7555 (предпочтительно) и БелАЗ-7549, с Е=14м³ – углевозы серий БелАЗ-7549 и БелАЗ-7512.

Анализируя данные табл.1 можно рекомендовать следующее значения ширины буровзрывной заходки для различных моделей обратных гидравлических лопат (табл.2).

При разработке рекомендации приняты следующие положения. Поскольку для различных углов рабочего откоса уступа изменения ширины заходки в пределах 2 м, то целесообразно принимать ее одинаковой для всех углов откоса и по ее максимальному значению, соответствующему наибольшей высоте уступа.

Таблица 1

Соотношение V_a:Е для комплектов обратная гидролопата и углевозы

Емкость ковша (Е), м³	Рациональное соотношение V_a:Е при дальности транспортирования, км		Соотношение V_a:Е для углевозов серий		
	1-2	3-4	БелАЗ-7555 (55т.)	БелАЗ-7549 (80т.)	БелАЗ-7512 (120т.)
4	5,5	6,4	11,1	14,9	22,5
6	5,2	6,2	7,4	10,0	15,0
8	4,7	5,7	5,5	7,5	11,2
14	4,3	5,3	3,2	4,2	6,4

Таблица 2

Рекомендуемые значения ширины буровзрывной заходки Ar, м

Емкость ковша обратной гидравлической лопаты и серия углевоза	Пределы значений высоты уступов Ну, м	Максимальная расчетная ширина заходки Агл, м	Рекомендуемая ширина заходки А, м	Отношение А/Hymax
Е=4м^3, БелАЗ-7555 (55т.)	6,2-8,9	21,4	23	2,6
Е=6м^3, БелАЗ-7555 (55т.)	7,7-10,0	21,9	24	2,4
Е=8м^3, БелАЗ-7555 (55т.) БелАЗ-7549 (80т.)	8,9-12,0	22,3 25,8	25 28	2,1 2,3
Е=14м^3, БелАЗ-7549 (80т.) БелАЗ-7512(120т.)	11,0-14,0	26,2 30,8	29 34	2,1 2,4

Полученные значения ширины заходки для обратных гидравлических лопат, особенно для моделей с Е=8 и 14м^3 близки к ее минимальным значениям для драглайнов (ЭШ 11.70 A_{min} = 0,4*66,5 = 26 м; ЭШ 15.80 – 30 м; ЭШ 20.65–24м).

Поскольку для драглайнов критерием выбора ширины заходки является рациональное использование емкости отвала, соответственно, разгрузочного параметра, то они будут использоваться эффективно в комплекте с обратной гидравлической лопатой.

На рис. 1 представлена технологическая схема добычных работ обратной гидравлической лопатой на момент окончания выемки пласта. По соотношению A/H_y^{max} =

2,1-2,6 заходки можно считать широкими, так как для нормальных заходок это соотношение 0,8-1,2. Широкие заходки, как известно [11,13] отрабатываются механическими или гидравлическими карьерными лопатами с нескольких установок экскаватора по ширине заходки. Поэтому производство добычных работ также принимается по этой схеме. Схема позволяет равномерно по ширине заходки зачистить угольный пласт. Путем маневрирования экскаватор последовательно занимает несколько положений 1, 2, 3, …. . При первом положении экскаватор находится от верхней бровки откоса уступа на расстоянии ширины бермы безопасности. При последнем (положение 5 на рис. 1) минимальное приближение экскаватора к откосу верхнего уступа равно $R_к$. При 4 и 5 положении экскаватор осуществляет оборку откоса уступа.

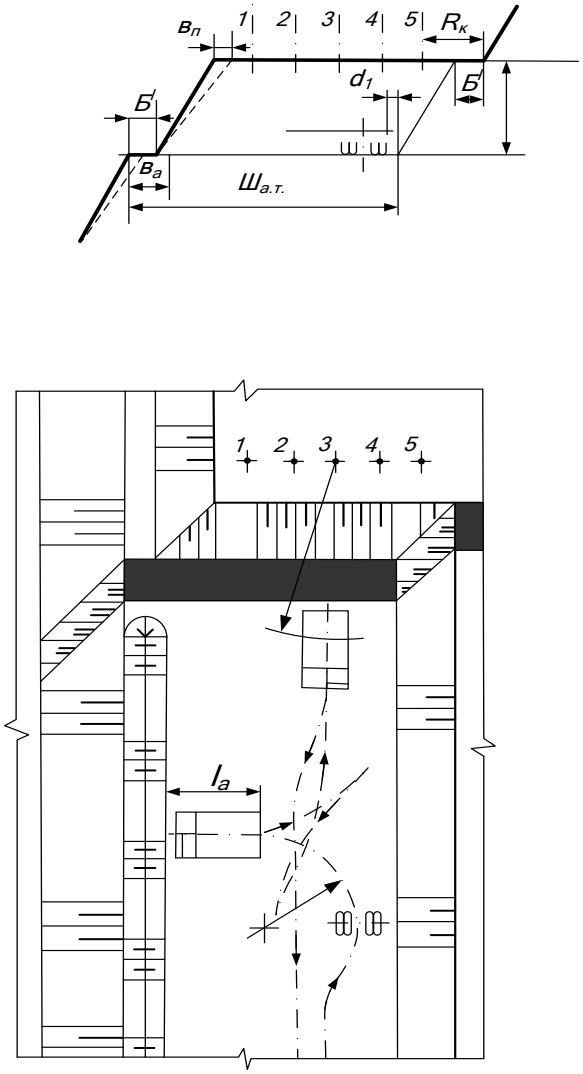


Рис.1. Технологическая схема добычных работ обратной гидравлической лопатой на момент окончания выемки пласта

При такой схеме добычных работ необходимо оценить возможность погрузки угля в автосамосвалы обратной гидравлической лопатой (рис. 2).

На схеме (рис. 2) обозначены: $h_{пс}$ – погрузочная высота автосамосвала, м; $R'_{р.а}$ – максимальный радиус разгрузки на уровне высоты погрузки автосамосвала, м; $R_{р.а}$ – необходимый радиус погрузки на уровне высоты погрузки автосамосвала, м; $R_ч$ – радиус черпания экскаватора по нижней бровке добычного уступа, м. Точка а – положение ковша в начале погрузки породы в кузов. Точка b – пересечение траектории движения зубьев

ковша с поверхностью расположенной на уровне высоты погрузки автосамосвала. Кривая nm – участок траектории движения зубьев ковша. A_1 – положение от задних колес автосамосвала относительно линии нижней бровке откоса добычного уступа, м; A_2 – смещение точки центра погрузки а относительно середины базы автосамосвала, м. Принимаем $\Delta_1 \approx \Delta_2 = 1{,}4$ м.

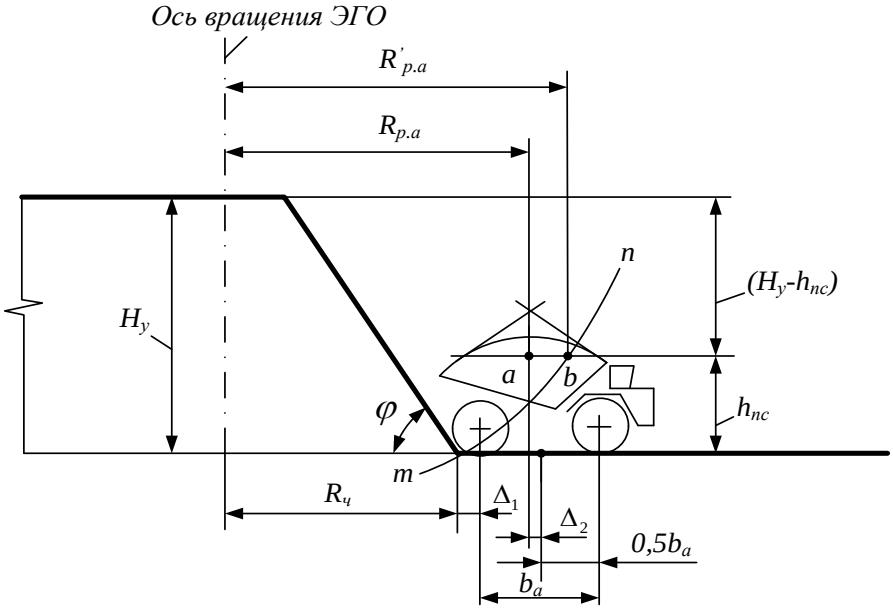


Рис.2. Расчетная схема проверки возможности погрузки угля в автосамосвалы обратной гидравлической лопатой

Проверка на возможность погрузки осуществляется путем сравнения параметров $R_{р.а}$ и $R'_{р.а}$. Если $R_{р.а} \leq R'_{р.а}$, то радиуса разгрузки экскаватора на высоте погрузке автосамосвала достаточно. Если $R_{р.а} > R'_{р.а}$, то автосамосвалы по принятой схеме невозможны.

Параметр $R'_{р.а}$ рассчитывается по уравнению траектории движения зубьев ковша при $H_у = H_у - h_{пс}$, где $H_у$ – максимальная высота уступа, м.

Параметр $R_{р.а}$ определяется по формуле, м

$$R_{р.а} = Rч + \Delta_1 + 0{,}5 * b_а - \Delta_2. \quad (3)$$

Произведены расчеты по проверке возможности обратных гидравлических лопат осуществлять погрузку угля (табл. 3).

Таблица 3

Результаты проверки возможности обратных гидравлических лопат осуществлять погрузку угля по условию $R_{р.а} \leq R_ч > R'_{р.а}$

Параметры	Экскаваторы и автосамосвалы-углевозы			
	Е=4м^3; БелАЗ-7555	Е=6м^3; БелАЗ-7555	Е=8м^3; БелАЗ-7555	Е=14м^3; БелАЗ-7549
Минимальная высота уступа при φ = 36˚				
$H_у$, м	6,2	7,7	8,9	10,3
$R_ч$, м	11,3	13,6	15,8	18,2
$R_{р.а}$, м	13,5	15,6	18,1	20,5
$R'_{р.а}$, м	13,7	16,4	18,7	21,4
Максимальная высота уступа при φ = 60-75˚				
$H_у$, м	8,9	10,0	12,0	14,0
$R_ч$, м	8,1	10,3	11,7	13,1
$R_{р.а}$, м	11,1	13,3	13,8	15,7
$R'_{р.а}$, м	12,4	15,2	16,6	19,1

Проверка показала, что при наименьшей и наибольшей высоте уступов, т.е. в диапазоне залегания пластов 36-90˚, все модели обратных гидравлических лопат обеспечивают погрузку угля в автосамосвале.

Особенно приемлемы по своим рабочим параметрам для бестранспортной технологии экскаваторы с Е=8 и 14м^3 как по ширине заходки соответственно, 24 м и 29 м, так и по параметру сброса 8 и 13 м.

Значения параметров Ну для различных моделей обратных гидравлических лопат приведены на рис. 3.

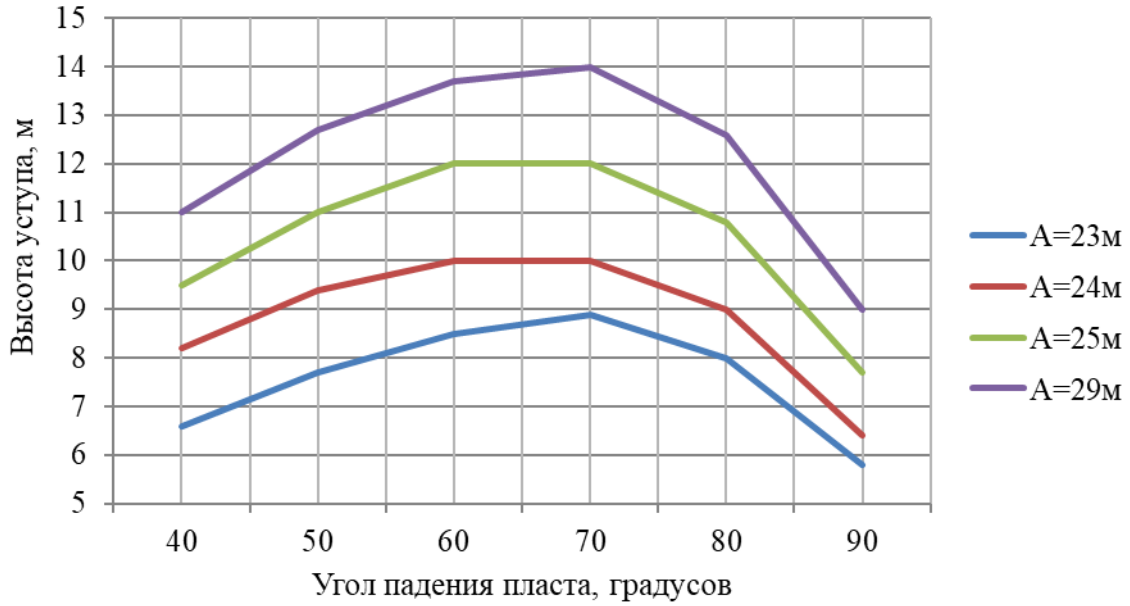


Рис.3. График зависимости высоты уступа от угла падения пласта и ширины экскаваторной заходки обратной гидравлической лопаты

Зависимость, приведенная на рис. 3, свидетельствует, что с увеличением угла наклона (36-55°) возрастает высота уступа, так как при малых значениях требуется максимальное использование радиуса черпания, но, согласно траектории движения зубьев ковша, обеспечивается малая высота забоя. С увеличением угла падения пласта лучше используется параметр по глубине черпания и высота уступа возрастает. Максимальное использование глубины черпания при крутом залегании пластов 60-75°. При дальнейшем залегании пластов снижение высоты уступа связано с конструктивными особенностями обратной гидравлической лопаты.

Выводы. Наиболее приемлемыми для использования при бестранспортной технологии являются экскаваторы с Е=8 и 14м^3, так как при любых углах залегания пластов они обеспечивают достаточную высоту уступов в пределах 9-14м.

Список литературы

1. Ермолаев В.А., Селюков А.В., Литвин Я.О. Об эффективности перехода с блочной продольной на поперечную однобортовую спиральную систему разработки на примере действующего разреза // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 1. – С. 57-60.

2. Макаров В.Н., Корякин А.И., Селюков А.В. Технология ведения открытых горных работ на полях ликвидированных шахт. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2010. – 139 с.

3. Селюков А.В. Определение технической границы бестранспортной рабочей зоны при сплошной поперечной системе открытой разработки месторождений угля // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2017. – Т. 23. – № 2. – С. 44-52.

4. Селюков А.В. Вычисление доли бестранспортной технологии при углубочно-сплошной поперечной системе открытой разработки // Вестник Академии наук республики Башкортостан «Науки о Земле». – 2017. – Т. 25. – № 4(88). – С.40-46.

5. Селюков А.В. Обоснование высоты бестранспортной зоны при разработке наклонных угольных свит по поперечной системе: дисс. канд. техн. наук: спец. 25.00.22. – Кемерово, Изд-во КузГТУ, 2006. – 151 с.

6. Корякин А.И., Селюков А.В. Определение основных технологических параметров карьера при проектировании // Вестник КузГТУ. – 2010. – №2 – С. 66–68.

7. Ермолаев В.А., Селюков А.В. Сравнение горно-геологических условий горных работ карьеров // Техника и технология горного дела. – 2018. – №2(2). – С 50-65.

8. Методические положения по обоснованию критериев оценки сложности отработки карьерных полей угольных месторождений Кузбасса / В.Ф. Колесников, А.И. Корякин, В.Г. Проноза, [и др.] // Уголь. – 2010. – №10. – С. 23-24.

9. Ермолаев В.А., Селюков А.В. Моделирование состава и взаимосвязи элементов производственного процесса карьера // Техника и технология горного дела. – 2019. – № 2(5). – С.42-55.

10. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Часть 1 . Производственные процессы. – М.: Недра, 1985. – 509 с.

11. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Часть 2 . Технология и комплексная механизация. – М.: Недра, 1985. – 549 с.

12. Типовые технологические схемы ведения горных работ на угольных разрезах. – М.: Недра, 1982. – 405 с.

13. Мельников Н.Н., Неволин Д.Г., Скобелев Л.С. Технология применения и параметры карьерных гидравлических экскаваторов. – Апатиты: Кольский научный центр РАН, 1992. – 212 с.

14. Томаков П.И., Ненашев А.С., Рыбаков Б.Н. Гидравлические обратные лопаты для разработки сложноструктурных месторождений Кузбасса: обзор ЦНИЭИуголь. – М., 1984. – 50 с.

15. Открытые горные работы (справочник). – М.: Горное бюро, 1994. – 590 с.

16. Опыт и переспективы внедрения мощных карьерных гидравлических экскаваторов / Н.Н. Мельников, Б.И Сатовский, Л.С Скобелев [и др.] // Горный журнал. – 1979. – № 6. – С. 48-51.

17. Томаков П.И., Наумов И.К. Технология, механизация и организация открытых горных работ. – М.: Изд-во Московского горного института, 1992. – 464 с.

УДК 622.831

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ОТРАБОТКЕ ЗАПАСОВ КРУТОНАКЛОННОЙ ЧАСТИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

[1]к.т.н. Риб С.В., [1]к.т.н. Волошин В.А., [1]к.т.н. Петрова О.А., [1]д.т.н. Домрачев А.Н., [2]Полошков С.И., [2]к.т.н. Басов В.В.

1 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

2 – АО «Шахта «Большевик», г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье описано создание и реализация численных геомеханических цифровых моделей массива горных пород с адаптацией их к условиям угольной шахты для обоснования геомеханических и технологических параметров и направлений развития горно-подготовительных и очистных работ на крутонаклонных участках угольного пласта. Обоснована ширина угольного целика между выемочными столбами.

Ключевые слова: крутонаклонный угольный пласт, целик, цифровая модель геомассива, численное моделирование, напряженно-деформированное состояние, смещения, подготовительные и очистные выработки, шахта.

В настоящее время пологие части пластов в пределах шахтного поля на АО «Шахта «Большевик» отработаны, горные работы ведутся на крутонаклонных частях, что создает определенные трудности в части управления массивом горных пород, пространственным расположением горных выработок для их эксплуатации, управления механизированном комплексом на предельных углах наклона пластов.

Опыт отработки наклонных и крутонаклонных угольных пластов средней мощности в России и зарубежом показывает, что применение в таких условиях очистных механизированных комплексов с традиционным построением, предназначенных для работы в условиях пологих пластов, связано с рядом особенностей и проблем:

– повышенный отжим пласта угля;

– сползание и разворот секций механизированной крепи и базы забойного конвейера с формированием нависающего забоя угольного пласта и снижением устойчивости призабойной кровли;

– повышенная частота геологических нарушений и переменный угол падения пластов;

– сложность управления комплексом;

– проблемы монтажно-демонтажных работ;

– частые простои оборудования и др.

Для снижения влияния угла падения на работу оборудования разработаны различные средства компенсации сползания оборудования или удержания его на месте [1].

Создание и реализация численных геомеханических цифровых моделей массива горных пород с адаптацией их к условиям АО «Шахта «Большевик» для прогноза потенциально опасных проявлений горного давления при изменчивых горно-геологических и горнотехнических условиях является целью работы.

Для обоснования технологических и технических решений по обеспечению стабильной и безопасной работы очистных забоев при отработке запасов крутонаклонной части пласта 29а АО «Шахта «Большевик» применён метод конечных элементов с использованием комплексов объектно-ориентированных программ, созданных в СибГИУ [2,3] и адаптированных к горно-геологическим и горнотехническим условиям шахт Кузбасса. В виду сложности горно-геологических условий залегания угольных пластов в горном отводе АО «Шахта «Большевик» адаптирован вариант решения геомеханической задачи построения двумерной модели массива горных пород и расчёт параметров напряжённо-деформированного состояния в плоском вертикальном сечении.

Решения двумерной (плоской) задачи геомеханики с учётом влияния природных и техногенных фактов в горной науке известны давно [4-6]. Как правило рассматриваются плоские сечения массива горных пород, включающего одну или несколько выработок [7, 8]. В соответствии с требованиями постановки плоско-деформированной задачи геомеханики [6, 9] необходимо, чтобы на боковых гранях вертикального сечения горизонтальные смещения были одинаковыми, а напряжения равны напряжениям в нетронутом горном массиве. В виду сложной топологии горных выработок свиты пластов АО «Шахта «Большевик» таким условиям соответствуют вертикальные сечения по падению пласта в середине выемочной панели. Поэтому для вычислительного эксперимента в качестве геометрической модели горного массива выбрано вертикальное сечение по разведочной линии 53, в том числе опорными приняты скважины №№1664, 2257.

Для прогноза напряжённо-деформированного состояния (НДС) массива горных пород в вертикальном сечении, включающем угольные пласты и вмещающие их породы, очистные и подготовительные выработки, геологические нарушения разрывного и

пликативного типов за основу принят разработанный в СибГИУ авторский пакет компьютерных программ [2]. В этот пакет были включены программные модули, позволяющие решать следующие задачи: расчёт НДС в упругой и нелинейной постановках; прогноз остаточной прочности пород для определения границ структурных блоков и участков вероятных разрушений угля и пород; расчёт давления метана; расчёт суммарных напряжений в углепородном массиве под влиянием давления метана, гравитационного, геотектонического и техногенного полей напряжений; прогнозирование пространственного положения опасных зон. В пакете программ реализован алгоритм метода конечных элементов (МКЭ).

Исследуемая область в виде вертикального сечения по линии падения пласта 29а автоматически разделяется на конечные элементы (рис. 1).

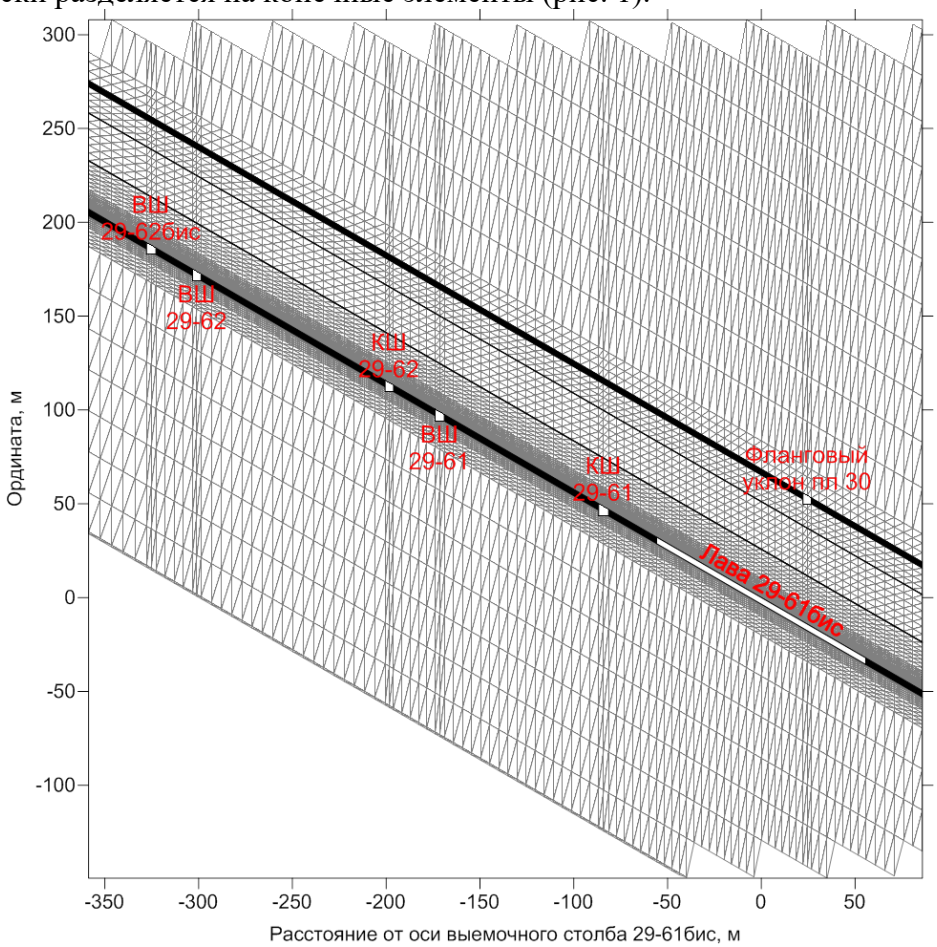


Рис. 1. Схема дискретизации на конечные элементы двумерной модели массива горных пород АО «Шахта «Большевик» на крутонаклонном участке залегания пластов

В адаптированном к условиям АО «Шахта «Большевик» пакете компьютерных программ учтены размеры и типы крепи подземных горных выработок, влияние обрушенных в очистном выработанном пространстве горных пород, а также деформационные и прочностные характеристики угля, пород в зонах геологических нарушений. Шахтное поле АО «Шахта «Большевик», в виду сложности геологического строения и топологии горных выработок, разделено на структурные блоки. Адаптированный к условиям АО «Шахта «Большевик» вариант численного моделирования с помощью МКЭ позволяет определить полный вектор напряжений и деформаций, размеры зон полного или частичного повреждения пород в окрестности горных выработок, устойчивость угольных целиков и подземных выработок, то есть прогнозировать положение участков с повышенной концентрацией линеаментов и блочной структурой угольного массива [10].

Тестирование адаптированного к условиям АО «Шахта «Большевик» комплекса проблемно-ориентированных программ осуществлялось посредством верификации результатов численного моделирования с результатами, полученными аналитическим решением распределения НДС в окрестности круглой выработки в упругой линейной постановке задачи, а также по результатам шахтного эксперимента.

Практика показывает, что расчётные упругие смещения пород в окрестности горных выработок в 3-5 раз меньше фактических, то есть требуется решение нелинейных задач геомеханики. Актуальность решения нелинейной задачи реализована в программном комплексе с помощью алгоритма расчёта неупругих параметров НДС, учитывающего изменения реологических свойств, прочности и деформационных свойств пород. Соответствие вычисленных численным методом геомеханических параметров оценивалась посредством сравнения с рекомендациями нормативных документов, например [11], и результатами натурных измерений.

Соответствие полученных при моделировании расчётных и фактических деформаций горных выработок подтверждено в работе [12].

Согласно результатам численного моделирования напряжённо-деформированного состояния массива горных пород, требованиям нормативных документов и натурным измерениям обоснованы параметры элементов очистных и подготовительных выработок: ширина угольных целиков, форма и размеры зон разрушения угля и пород, в том числе на сопряжениях лавы и выемочной выработки при разных углах падения пласта.

Исследование изменений прочности угольного пласта и вмещающих его пород в окрестности очистных и подготовительных выработок. В ходе моделирования геомеханического состояния массива горных пород с использованием теории Кулона-Мора выявлены закономерности изменения прочности угольного пласта и вмещающих его пород.

На рис. 2 показаны изолинии изменения отношения остаточной прочности к исходной угля и пород в окрестности целиков ВШ 29-61бис – КШ 29-61 и ВШ 29-61 – КШ 29-62 при отработанном выемочном столбе 29-61бис. В качестве критерия разрушения принято отношение остаточной прочности к исходной $R \leq 0,5$. При изменении R в пределах 0,5-0,8 в пласте или породе формируются трещины и блоки.

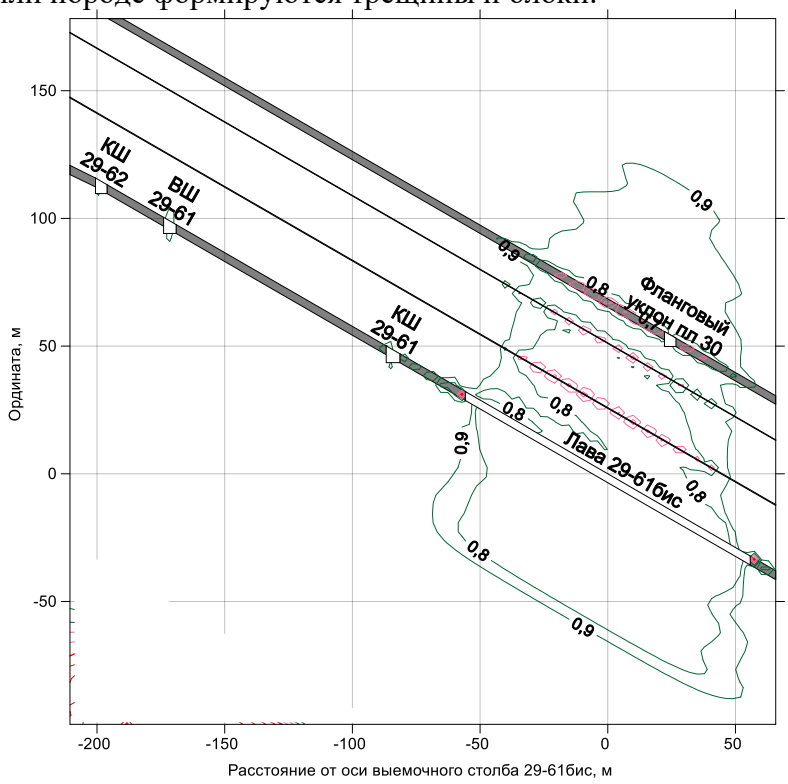


Рис. 2. Отношение остаточной прочности к исходной после отработки выемочного столба 29-61бис

Согласно принятым критериям, подработанные породы кровли между пластами 29а и 30 разрушены. Пласт 30 в окрестности флангового уклона частично разрушен. Показана зона изменения (уменьшения) прочности боковых пород в вентиляционном штреке 29-61бис. Выработка разрушена, зона распределения остаточной крепости пород больше глубины анкерования по кровле и бокам выработки, однако целик сохраняет несущую способность, ядро находится вне зоны снижения прочности пород до разрушаемых значений.

Исследование изменения отношения остаточной прочности пород к исходной в окрестности целиков ВШ 29-61бис – КШ 29-61 и ВШ 29-61 – КШ 29-62 при отработанных выемочных столбах 29-61бис и 29-61. На рис. 3 показана зона изменения (уменьшения) прочности боковых пород в целике угля между выемочными участками 29-61бис и 29-61. Выработки разрушены, зона распределения остаточной крепости пород больше глубины анкерования по кровле и бокам выработки, с высокой вероятностью теряет несущую способность, несущее ядро отсутствует.

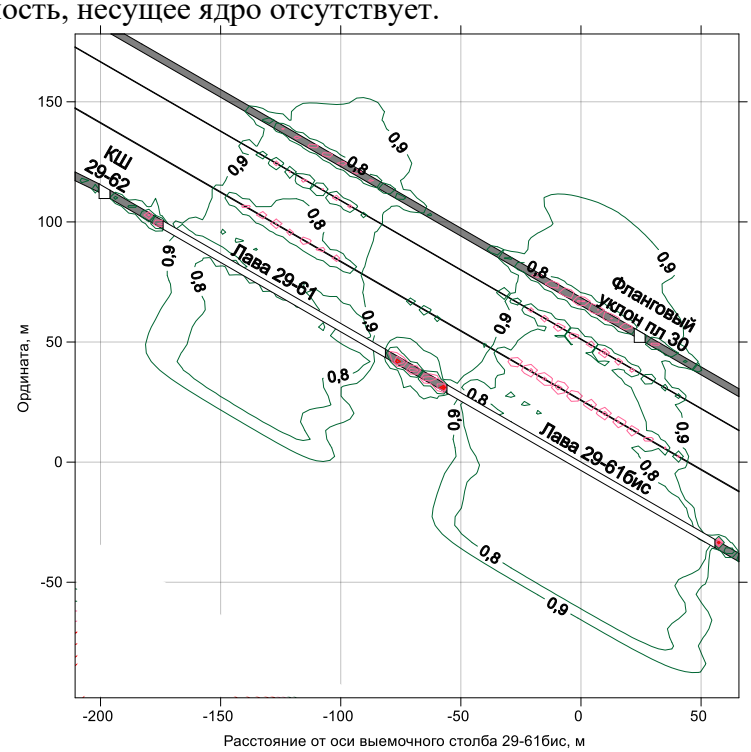


Рис. 3. Отношение остаточной прочности к исходной после отработки выемочных столбов 29-61бис и 29-61

На рис. 4 показана зона изменения прочности боковых пород в конвейерном штреке 29-62 при отработке выемочного участка 29-61. Выработка сохраняет устойчивость при анкерном креплении. Несущее ядро целика находится вне зоны снижения прочности пород до разрушаемых значений.

На рис. 5 показана зона разрушения боковых пород в целике угля между выемочными участками 29-61бис и 29-61. Выработки разрушены, зона распределения остаточной крепости пород больше глубины анкерования по кровле и бокам выработки, с высокой вероятностью теряет несущую способность, несущее ядро отсутствует.

Выводы. Таким образом, для безопасной отработки крутонаклонных участков угольных пластов на шахтах обоснованы следующие рекомендации.

Необходимо заблаговременно выделять осложняющие факторы отработки выемочных участков в крутонаклонной части угольного пласта, такие как повышенная трещиноватость пород кровли (изменчивость угла падения пласта, наличие геологических нарушений разрывного типа и непрямолинейности подземных выработок).

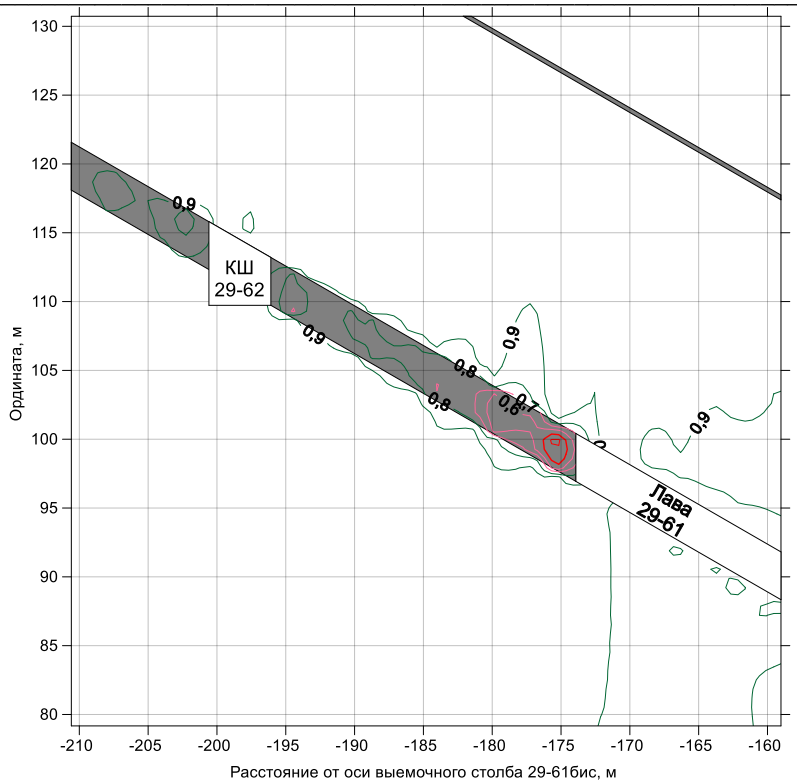


Рис. 4. - Отношение остаточной прочности к исходной в угольном целике между штреками 29-61бис и 29-62

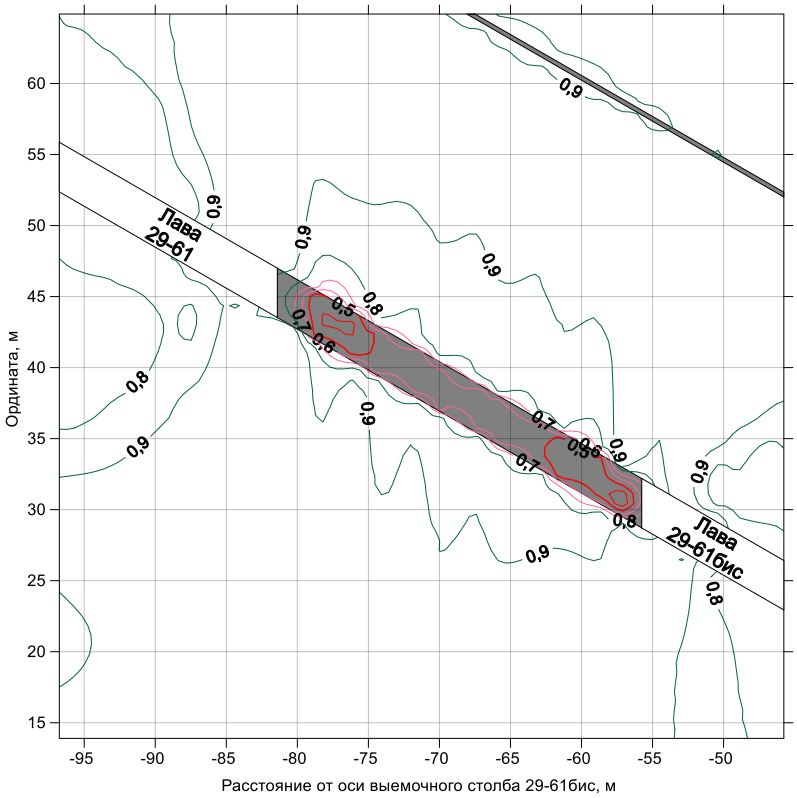


Рис. 5. - Отношение остаточной прочности к исходной в угольном целике после отработки выемочных столбов 29-61бис и 29-61

В ходе выполнения расчетов моделирования методом конечных элементов напряжённо-деформированного состояния массива горных пород при последовательной отработке выемочных участков 29-61бис и 29-61 установлено соответствие принятой

ширины целика между конвейерным штреком 29-61 и вентиляционным штреком 29-61бис требованиям безопасной отработки выемочных участков по схеме с целиками. Принятая ширина угольного целика между выемочными участками обеспечит его устойчивость и работоспособность крепи конвейерного штрека 29-61 после отработки выемочного участка 29-61бис при соответствующем паспорте крепления и контроле состояния крепи.

После отработки выемочного участка 29-61 угольный ленточный целик между выемочными участками сохраняет устойчивость на непродолжительное время и саморазрушается под давлением вмещающих пород выработанного пространства за лавой 29-61. Угроза горного удара по целику между лавами 29-61 и 29-61бис отсутствует.

Список литературы

1. Анферов Б.А., СтанкусВ.М., Кузнецова Л.В. Проблемы добычи коксующихся углей из крутонаклонных пластов и способы их решения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2007. – Вып.10. – №12. – С. 256-266.

2. Комплекс проблемно-ориентированных программ для моделирования формирования и распределения опасных зон в газоносном геомассиве / В.Н. Фрянов, О.А. Петрова, Т.В. Петрова // Свидетельство о регистрации электронного ресурса. – № 21123; зарегистрировано 03.08.2015.

3. Риб С.В., Фрянов В.Н. Разработка комплекса проблемно-ориентированных программ для численного моделирования напряженно-деформированного состояния неоднородных угольных целиков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 3. – С. 367-371.

4. Курленя М.В., СеряковВ.М., Ерёменко А.А. Техногенные геомеханические поля напряжений. – Новосибирск: Наука, 2005. – 264 с.

5. Нелинейная механика геоматериалов и геосред / П.В. Макаров [и др.]; под ред. Л.Б. Зуева. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2007. – 235 с.

6. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

7. Серяков В.М. Обоснование геомеханических параметров разработки свиты пологих пластов // Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. ст. – Новокузнецк: СибГИУ, 2017. - С. 47 - 51.

8. Серяков В.М. Особенности формирования зон опорного давления и разгрузки при ведении очистных работ на сближенных угольных пластах // Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. ст. – Новокузнецк: СибГИУ, 2019. – С. 52 - 55.

9. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221с.

10. Модель формирования напряжений, деформаций и повреждений в углепородном массиве при интеграции гравитационного и геотектонического полей напряжений / О.А. Петрова, П.В. Васильев, О.В. Фрянова [и др.] // Новината за напреднали наука: материали за VIII международна научна практична конференция. Том 26. Технологии. – София: «БялГрад-БГ» ООД, 2012. – С. 10-19.

11. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 216 с.

12. Басов В.В. Геомеханическое обоснование параметров сопряжений подземных горных выработок в зоне влияния очистного забоя: дис. … канд. техн. наук. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2021. – 157с.

УДК 622.817.3:234.573

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДОСТАВКИ И МОНТАЖА ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ПОМОЩИ САМОХОДНЫХ МАШИН

[1]Дадынский Р.А., [2]к.т.н. Никитина А.М., [2]к.т.н. Риб С.В.
1 – ООО «УМГШО», г. Новокузнецк, Россия,
2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Обозначено, что выполнение доставочных работ для монтажа и демонтажа очистного оборудования часто связано с трудностями, приводящими к непредвиденному увеличению времени этого процесса. Новая технология позволит избежать дополнительных работ по разборке и сборке секций, рештаков лавного конвейера и тем самым сократить время на выполнение работ по монтажу и демонтажу механизированного комплекса в два раза.

***Ключевые слова*:** монтаж элементов, технология доставки, монтажная машина, технология монтажа, секция крепи, лавный конвейер.

На угольных шахтах ООО «Распадская угольная компания» при отработке угольных пластов применяется наиболее производительная система разработки - длинными столбами по простиранию с полным обрушением пород кровли. При этом длина выемочного столба может достигать 3000 м, длина лавы – 350 м, а месячная производительность забоя – до 450 тысяч тонн.

Обеспечение высокого уровня нагрузок на комплексно-механизированный очистной забой является важной задачей для подземной угледобычи. Для этого необходима стабильная работа всех шахтных подсистем, обеспечивающих своевременное воспроизводство фронта очистных работ [1-4].

Однако при оценке производительности очистного забоя и шахты в целом следует учитывать, что началу работы механизированных комплексов предшествует монтаж оборудования, доставленного в забой с поверхности или из демонтажной камеры, а по окончании отработки выемочного столба механизированный комплекс следует демонтировать для отработки последующего столба. Как показывает практика, выполнение доставочных работ для монтажа и демонтажа очистного оборудования часто связано с трудностями, приводящими к непредвиденному увеличению времени этого процесса, что соответственно, влечет за собой снижение экономической эффективности работы шахты в целом [5-8].

Классическая схема доставки и монтажа элементов механизированного комплекса предусматривает наличие подвесного монорельсового пути по вентиляционному и конвейерному штрекам, а также по монтажной камере (рис. 1, 2).

Чтобы избежать дополнительных работ по разборке и сборке секций предложено доставлять все элементы комплекса с поверхности при помощи самоходных машин на пневмоходу Sandvik с тралами.

Данная технология была опробована на ПАО «Распадская» для спуска нового механизированного комплекса ZY10900/22/47 в монтажную камеру 4-6-39, где все элементы комплекса были доставлены с поверхности при помощи самоходных машин.

Рассмотрим новую технологию монтажа элементов лавного конвейера SGZ1000/2100 при помощи машины Sandvik с вилочным захватом (рис. 3, 4).

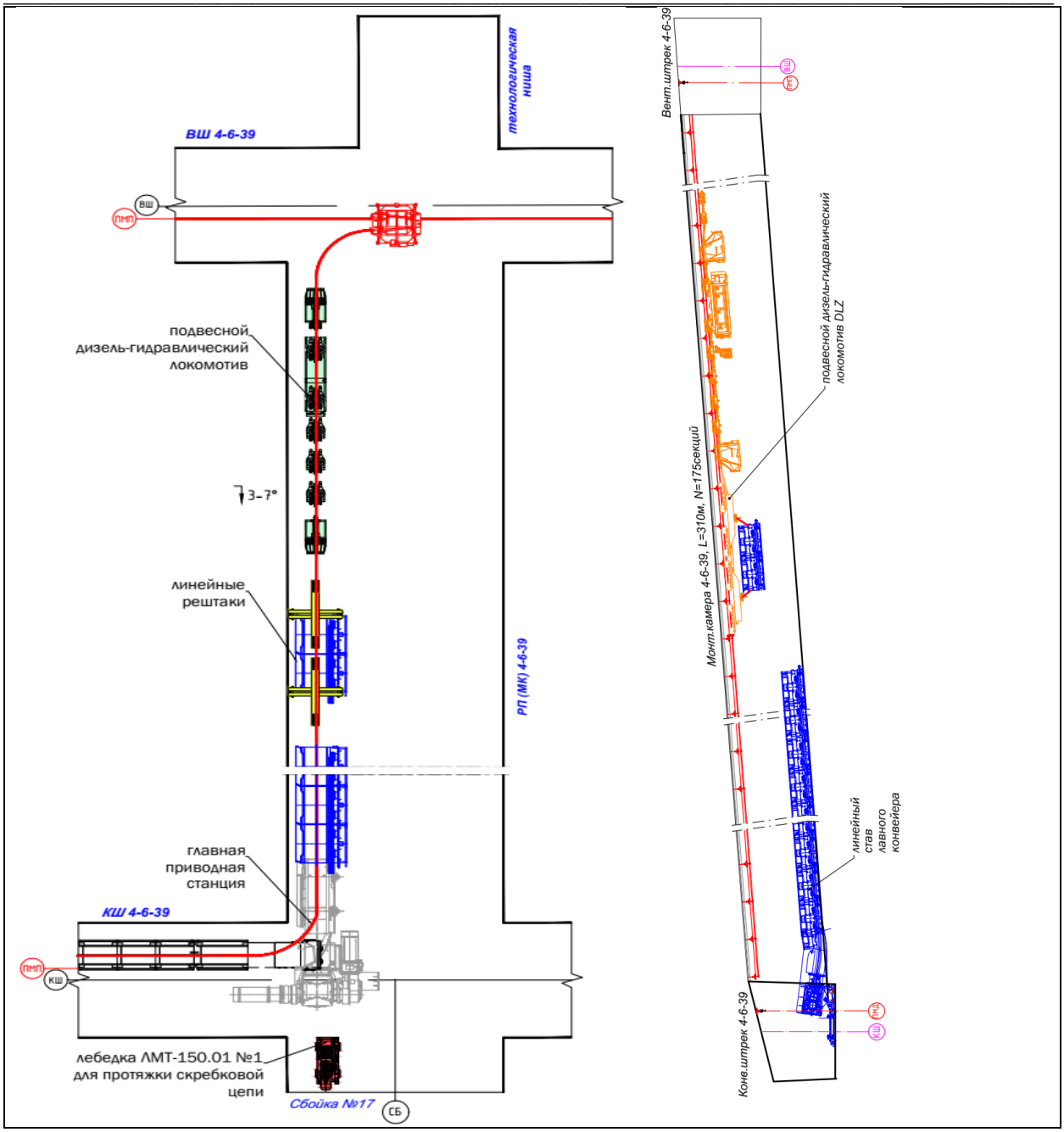


Рис. 1. Типовая технологическая схема монтажа рештаков при помощи монорельсового транспорта DLZ

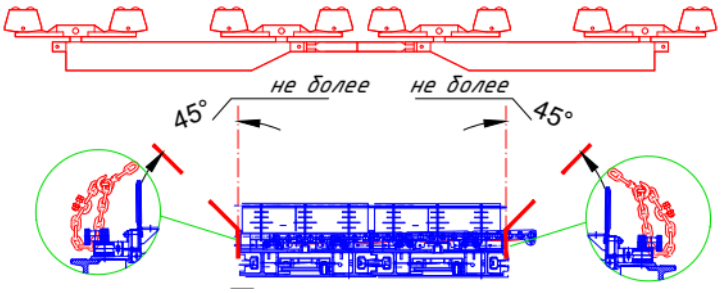


Рис. 2. Схема строповки элементов лавного конвейера (пара рештаков) к грузоподъёмному устройству дизелевоза

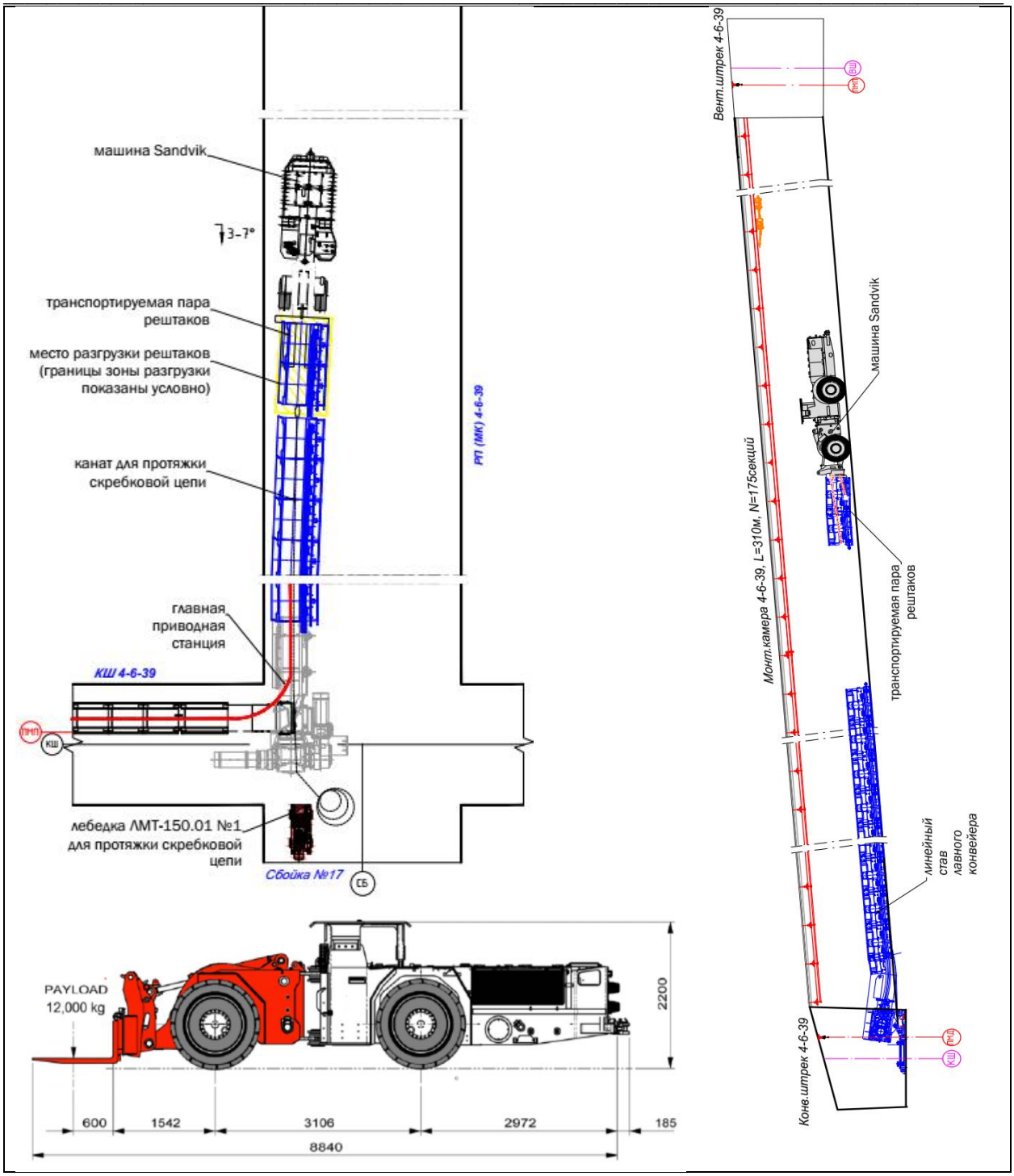
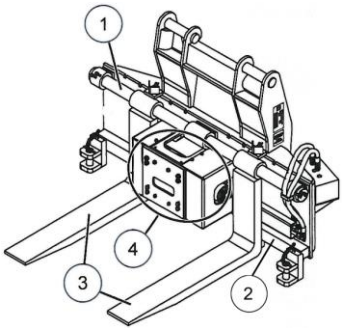


Рис. 3. Технология доставки рештаков машиной Sandvik



1, 2 – рейка скольжения; 3 – вилочный захват; 4 - гидравлическая лебедка

Рис. 4. Конструкция вилочного захвата машины Sandvik

Перегрузка горношахтного оборудования производится на вентиляционном штреке 4-6-39 в 5-10 метрах перед монтажной камерой, рис. 5. В момент разгрузки горношахтного оборудования с дизель-гидравлического локомотива, монтажная машина с вилочным захватом находится на вентиляционном штреке 4-6-39 в 15-20 метрах за монтажной камерой, рис. 5, а.

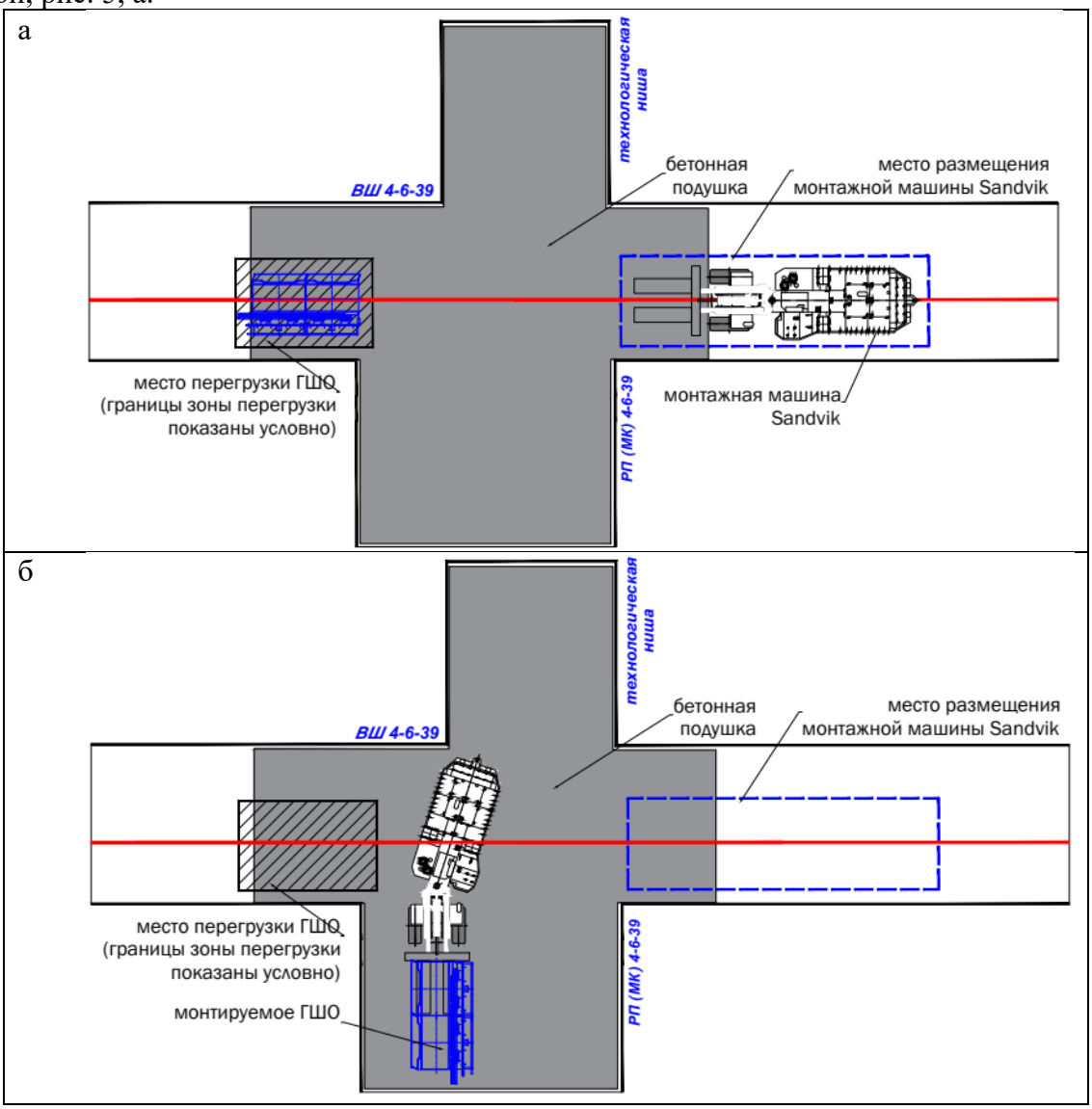


Рис. 5. Технология перегрузки горношахтного оборудования на сопряжении ВШ 4-6-39 с МК в условиях ПАО «Распадская»: а – монтажная машина расположена в 15-20 метрах за монтажной камерой б – доставка горношахтного оборудования в монтажную камеру машиной Sandvik с вилочным захватом

Способ крепления пары рештаков лавного конвейера на вилочном захвате представлен на рис. 6.

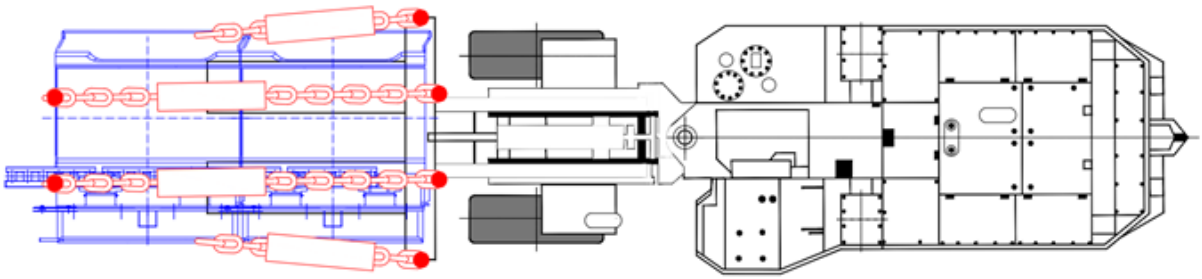


Рис. 6. Крепление пары рештаков лавного конвейера на вилочном захвате

Разгрузку рештаков с монтажной машины Sandvik предлагается выполнять в следующей последовательности (рис. 7):

– полностью опустить вилочный захват с рештаками на почву выработки;

– отсоединить страховочные цепи от рештаков;

– приподнять вилочный захват, выгрузить рештаки на почву;

– отъехать на безопасное расстояние и заглушить двигатель машины;

– рабочим пропустить канат в нижний ручей рештаков.

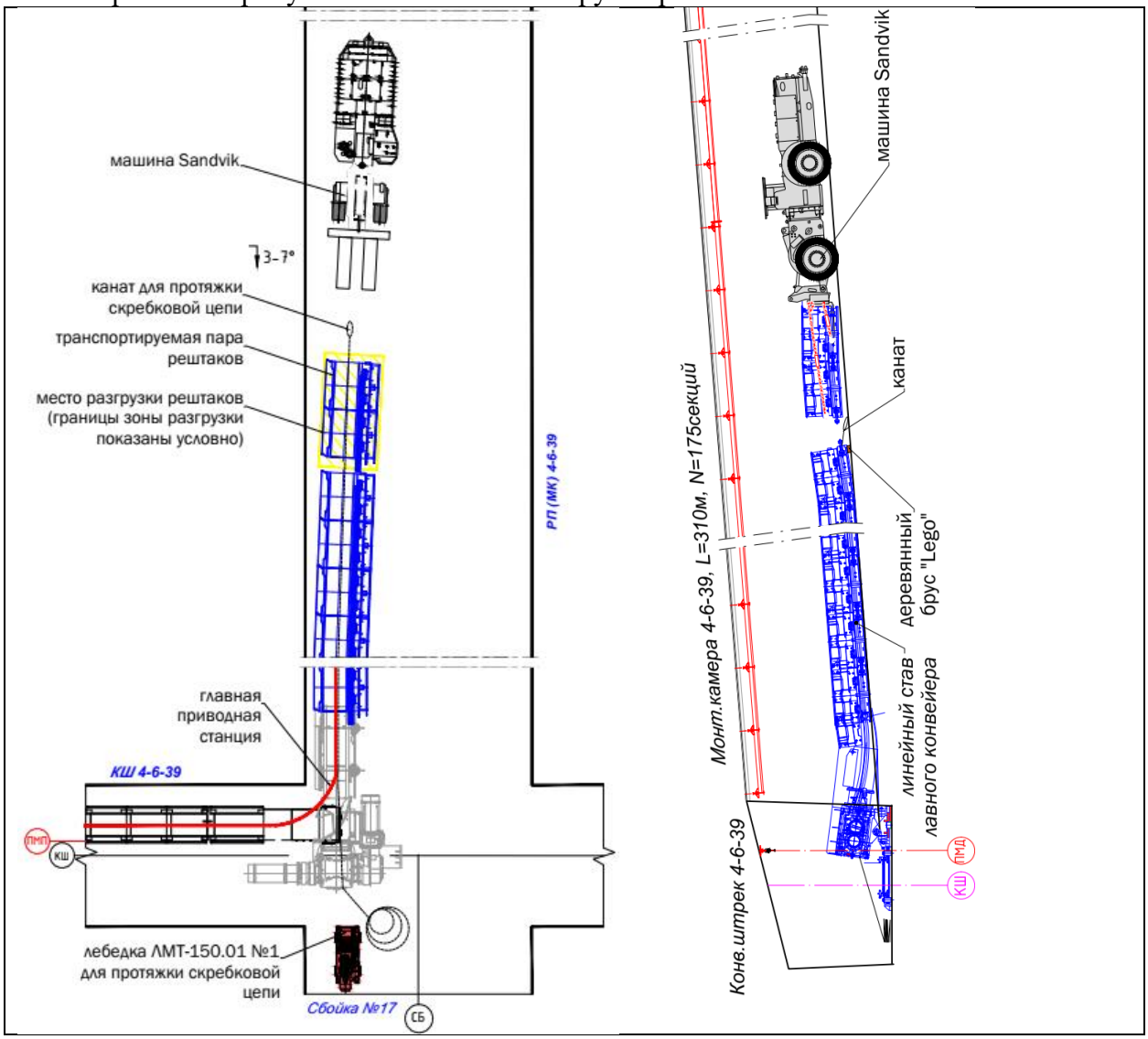


Рис. 7. Технология разгрузки рештаков с машины Sandvik

Технология монтажа рештаков машиной Sandvik представлена на рис. 8.

Монтаж рештаков монтажной машиной Sandvik рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

– запустить двигатель, подъехать машиной и погрузить рештаки на вилочный захват;

– произвести стыковку рештаков, убрать деревянный брус и полностью опустить вилочный захват с рештаками на почву выработки;

– установить соединительные элементы;

– работой машины двинуть лавный конвейер на забой.

Апробированная новая технология выполнения вспомогательных работ на ПАО «Распадская» является эффективным мероприятием для снижения временных затрат на монтаж и демонтаж оборудования.

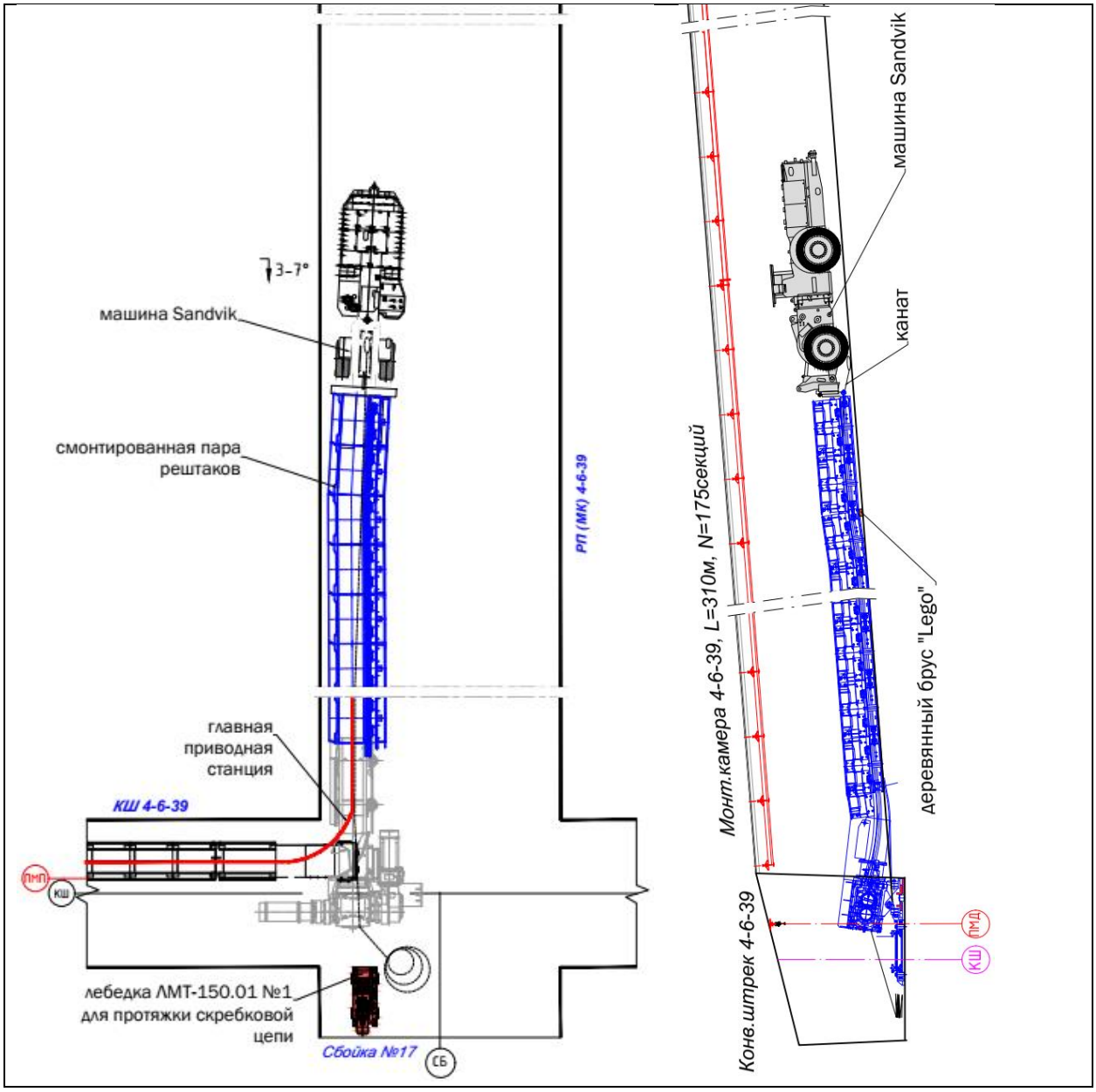


Рис. 8. Технология монтажа рештаков машиной Sandvik

Выводы. Анализ состояния демонтажных работ на шахтах ООО «РУК» показал, что снижение временных затрат на перемонтаж оборудования в лавах является актуальной проблемой. Новая технология доставки всех элементов механизированного комплекса с поверхности, а также его монтаж с использованием самоходных машин на пневмоходу Sandvik с тралами позволит избежать дополнительных работ по разборке и сборке секций, рештаков лавного конвейера и тем самым сократить время на выполнение работ по монтажу и демонтажу механизированного комплекса в два раза.

Список литературы

1. Казанин О.И., Мешков А.А., Сидоренко А.А. Перспективные направления развития технологической структуры угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 6-1. – С. 35-53.

2. Мешков А.А., Казанин О.И., Сидоренко А.А. Повышение эффективности технологии и организации монтажно-демонтажных работ при интенсивной разработке

пологих угольных пластов на шахтах Кузбасса // Записки Горного института. 2021. – Т. 249. – С. 342-350.

3. Ермакова И.А., Федусов В.А. Состояние демонтажных работ на шахтах АО «СУЭК-КУЗБАСС» // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2019. – № 4. – С. 123-130.

4. Дадынский Р.А., Никитина А.М., Риб С.В. Цифровые технологии вспомогательных процессов в горном производстве // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2023. – № 9. – С. 189-192.

5. Совершенствование технологии вспомогательных работ для обеспечения эффективной работы длинных очистных забоев / А.М. Никитина, С.В. Риб, Д.М. Борзых [и др.] // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – № 6. – С. 113-118.

6. Remounting of a mechanized complex using Petitto Mule equipment in the conditions of mines in the south of Kuzbass / A.M. Nikitina, S.V. Rib, D.M. Borzykh [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Novokuznetsk, 05–08 июня 2018 года. Vol. 206. – Novokuznetsk: Institute of Physics Publishing, 2018. – P. 012025.

7. Оценка эффективности управления монтажно-демонтажными работами на шахтах "ОАО СУЭК-Кузбасс" на основе сценарного подхода / В.А. Скукин, А.Н. Супруненко, А.А. Мешков [и др.]. – Кемерово: ИНТ, 2015. – 195 с.

8. Демченко А.Г. Перемонтажи лавных комплексов в России стали быстрее и безопаснее // Уголь. – 2022. – № 7 (1156). – С. 34-37.

УДК 622.243.2

ЭФФЕКТИВНОСТЬ БУРЕНИЯ НАПРАВЛЕННЫХ СКВАЖИН ИЗ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА ШАХТАХ КУЗБАССА

[1]к.т.н. Волошин В.А., [1]к.т.н. Риб С.В., [2]Рахимкулов И.Р., [2]Гончаров Р.С., [3]к.т.н. Розонов Е.Ю., [4]Бабичук А.В.

1 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

2 – ООО «ДМТехнологии», г. Новокузнецк, Россия

3 – ООО «ММК-Уголь», г. Белово, Россия

4 – ООО «ММК-Уголь» «Шахта «Костромовская», г. Ленинск-Кузнецкий, Россия

Аннотация. Описан положительный опыт применения технологии направленного бурения компании ООО «ДМТехнологии» на угольных шахтах Кузбасса. Для расширения области применения технологии направленного бурения скважин специалистами компании на постоянной основе для каждой уникальной задачи разрабатываются новые методы бурения и рабочие параметры. Показана эффективность бурения направленных дегазационных скважин при работе очистного забоя.

Ключевые слова: направленное бурение, дегазация, скважина, угольный пласт, шахта, горная выработка, буровой станок.

На шахтах Кузбасса и мира широкое применение получили такие способы бурения дегазационных скважин как станками роторного действия (традиционное бурение), так и направленного бурения. Инновационный и прогрессивный способ направленного бурения уже зарекомендовал себя с лучшей стороны, несмотря на относительно высокую эксплуатационную стоимость. Метод направленного бурения имеет существенные преимущества над традиционным способом [1-4]:

– возможность проведения эксплуатационной доразведки на участках, где прогнозируются дизъюнктивные и пликативные нарушения;

– бурение разнонаправленных скважин с одного места установки бурового станка;

– высокая точность определения положения скважины в пространстве;

– способность оперативной корректировки направления бурения в случае встречи с геологическим нарушением, переслаивания твердых и мягких пород, обводненных (затопленных) зон.

– возможность проведения одной скважины по пласту, в почве и кровле выработки.

Метод направленного бурения эффективно развивается. Специалистами компании ООО «ДМТехнологии» продолжается внедрение целого ряда мероприятий, имеющий практическую ценность. Эффективность схем направленного бурения технологических скважин, предлагаемых специалистами компании, доказана производственным опытом шахт Кузбасса (снижение газовыделения до пороговых значений, спуск воды и др.).

Основываясь на достигнутом практическом опыте в целях расширения области применения технологии направленного бурения скважин специалистами компании на постоянной основе для каждой уникальной задачи разрабатываются новые методы бурения и рабочие параметры. В компании применяются буровые комплексы направленного бурения производства «Группа ФИД. Инновационное оборудование», республика Беларусь.

Разведка геологического нарушения в опасной зоне. Детально выявлены параметры нарушения (рис. 1):

– амплитуда и расстояние смещения;

– углы падения и простирания.

По результатам были разработаны мероприятия по прохождению нарушения.

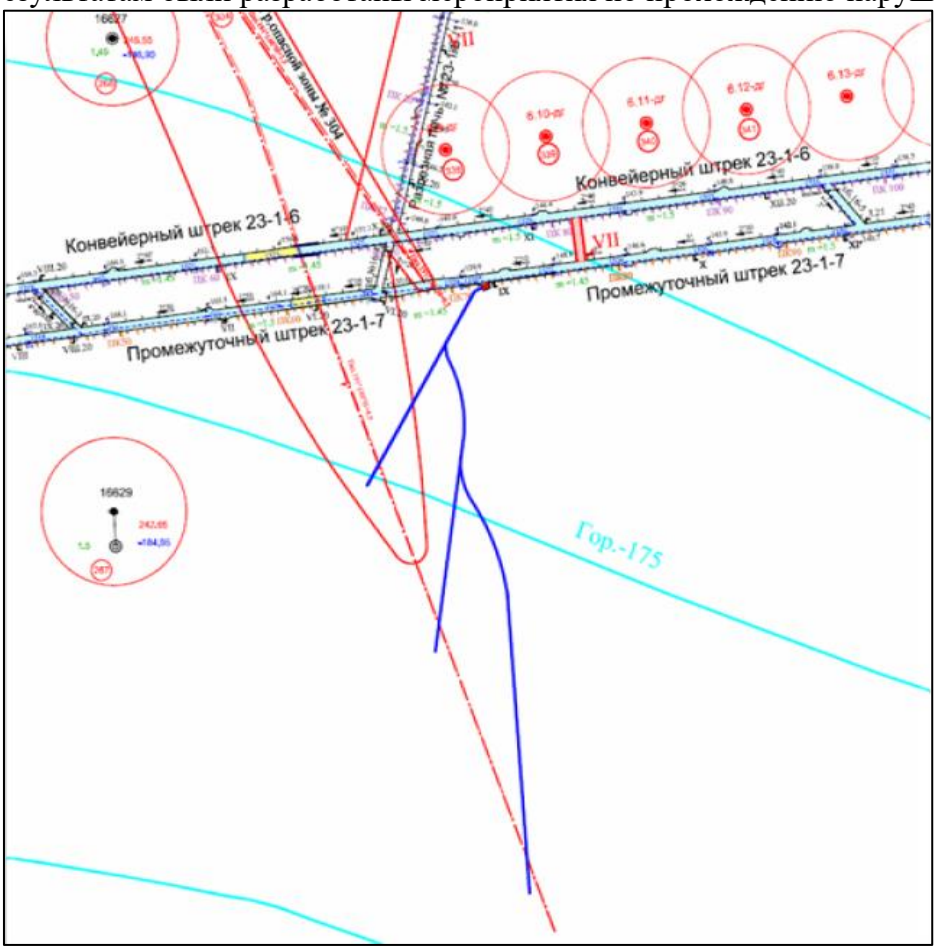


Рис. 1. Траектории скважин направленного бурения при разведке геологического нарушения

Дегазация по трассам проведения конвейерного штрека № 23–1-7, магистрального вентиляционного штрека № 1 от центральных уклонов. Параметры газоотдачи скважин направленного бурения (рис. 2) в сравнении со скважинами роторного бурения увеличились:

– в два раза при дегазации по трассе проведения выработки;

– в десять раз при пластовой дегазации;

– дебит метана нисходящих скважин направленного бурения оказался в два раза выше существующих скважин.

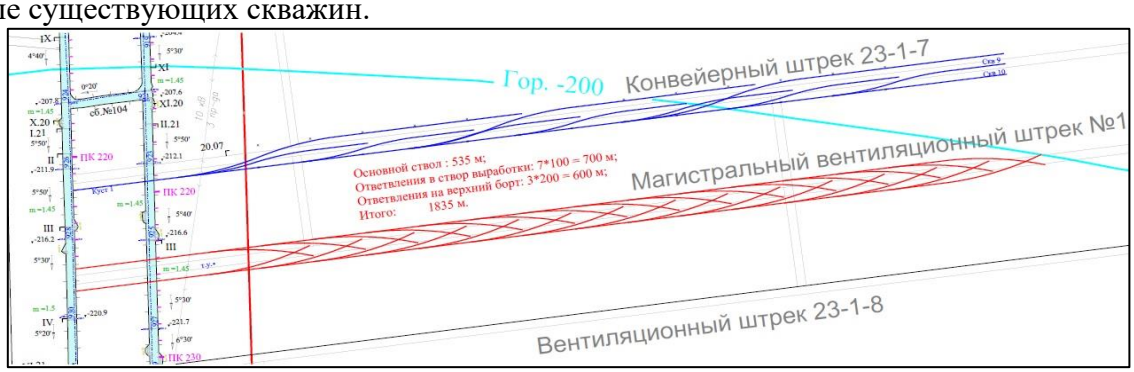


Рис. 2. Расположение скважин направленного бурения

Показатели эффективности бурения направленных скважин из горных выработок шахты «Костромовская» для предварительной дегазации пласта 19. Бурение дегазационных скважин предварительной дегазации пласта столба №19-16 началось в январе месяце 2023г. в вентиляционном штреке 19-16. Количество скважин и места их бурения указаны в сводной табл. 1.

Таблица 1

Количество скважин по месяцам и места их бурения

Показатели	Ед. изм.	2023 год							
		Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Всего
Вентиляционный штрек 19-16	п.м.	114	3556	4504					24547
Разрезная печь 19-16	п.м.				2872	4077	3874	5550	
Количество скважин	шт	0	12	18	9	7	9	14	69

Длинные скважины направленного бурения из вентиляционного штрека 19-16 были отбурены длиной 285м каждая, скважины из разрезной печи 19-16 длиной от 330 до 490м диаметром 98,4мм.

Для отвода метановоздушной смеси из ВШ 19-16, Р/П 19-16 используется дегазационная установка ДУ №7, установленная у устья скважины №444-К. С января по апрель 2023г отвод смеси производился по трубопроводу диаметром 159мм, после был смонтирован, став диаметром 325мм в Р/П 19-16. Переход на дегазационный став Ø325мм отразился на показаниях расхода и концентрации метановоздушной смеси дегазационной установки №7.

Средние показания по дегазационной установке №7 до и после начала работ по бурению длинных направленных дегазационных скважин показаны на рис. 3 и 4.

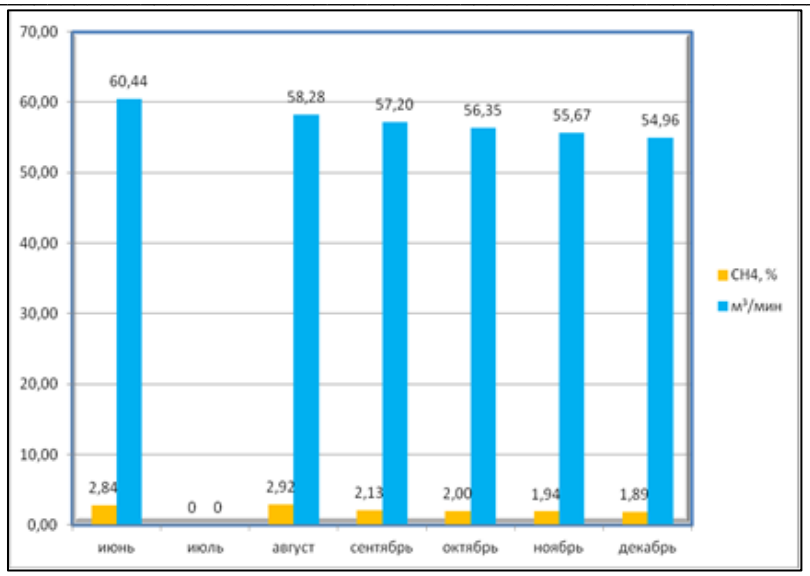


Рис. 3. Средние показания по дегазационной установке №7 до и после начала работ по бурению длинных направленных дегазационных скважин за 2022 год

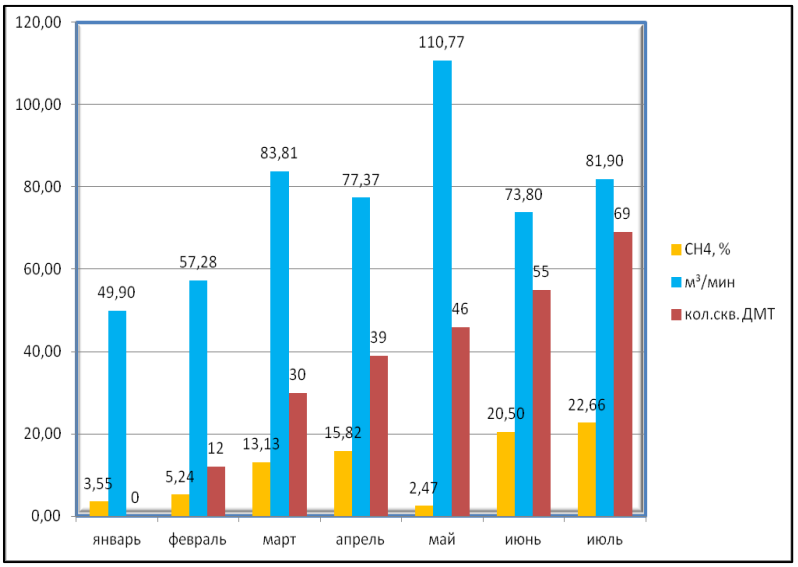


Рис. 4. Средние показания по дегазационной установке №7 до и после начала работ по бурению длинных направленных дегазационных скважин за 2023 год

Стоит учесть, что к дегазационной установке также были подключены короткие скважины, отбуренные роторным способом (барьерные, предварительной дегазации). Их количество и соотношения с длинными направленными скважинами приведены на рис. 5.

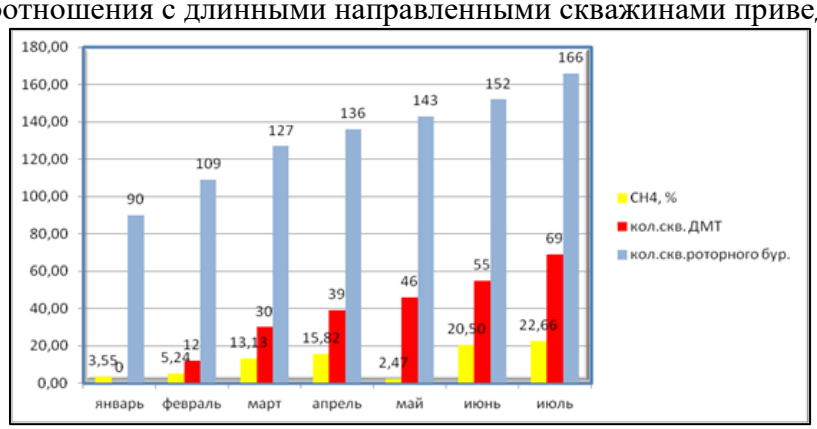


Рис. 5. Количество скважин по виду бурения

Из гистограмм, представленных на рис. 3 и 4, можно сделать вывод, что прирост концентрации метана на показаниях с дегазационной установки №7 за июль 2023 года увеличился в шесть раз по сравнению с данными до начала бурения скважин компанией ООО «ДМТехнологии», а показания расхода на ДУ №7 в два раза.

В период работы лавы 19-07 на очистном участке возникла проблема выделения газа метана из почвы выработки из суфлярных скоплений и выделения газа с пласта спутника 19а, расположенного ниже действующей лавы 19-07 в 20-23м. Для снижения газовыделения был разработан проект скважин направленного бурения в межпластовое пространство для каптажа выделений газа с пласта спутника и суфлярных скоплений.

Для мониторинга дебита газа была выбрана скважина №2 (рис. 6). По окончанию её бурения дебит и концентрация были нулевыми. После того, как очистной забой приблизился к ранее пробуренной скважине, дебит увеличился до 33,3 м³/час, концентрация метана 46,7%. Дебит снизился до 10,7 м³/час, а концентрация повысилась до 97%, когда траектория скважины находилась в завальной части.

Данный метод сократил время простоя лавы из-за остановок Ростехнадзора. Период снижения добычи угля очистным участком был связан с выделением газа метана. После производства работ по бурению направленных дегазационных скважин добыча угля в сутки очистным участком увеличилась более чем в 3 раза.

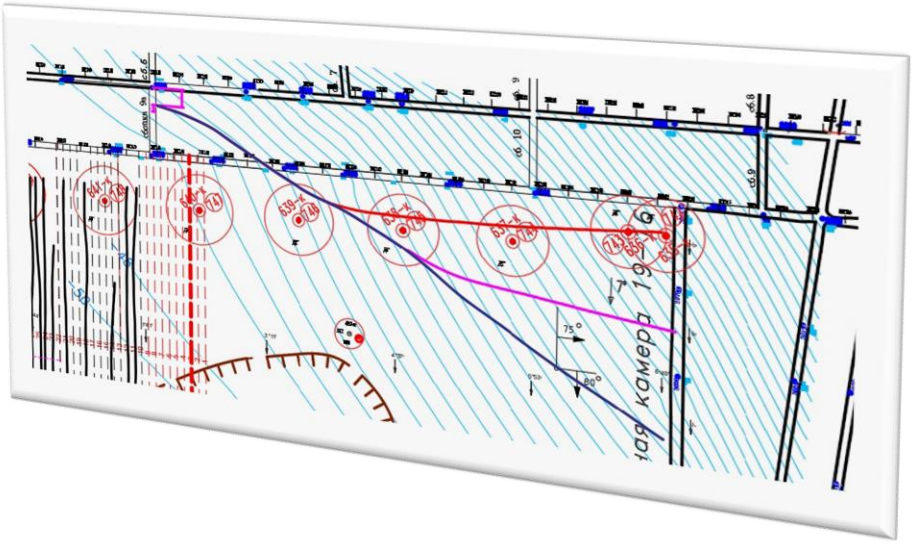


Рис. 6. Выкопировка из плана горных выработок

Выводы. Специалисты ООО «ДМТехнологии» используют на постоянно пополняемую технологическую базу опыта работы отечественных и зарубежных предприятий и постоянно адаптируют передовые схемы направленного бурения скважин к фактическим горно-геологическим условиям угольных шахт Кузбасса с индивидуальным подходом к каждой шахте.

Высококвалифицированные работники способны решать нестандартные задачи с высокими технико-экономическими показателями, обеспечивая при этом выполнение требований промышленной безопасности.

Специалистами ООО «ДМТехнологии» разработаны экспериментальные составы бурового раствора, которые позволяют:

– оптимизировать паспортные характеристики бурового оборудования

– повысить производительность работы бурового станка;

– сократить время бурения скважин направленного бурения.

Эффективное решение сложных производственных задач на горнодобывающих предприятиях России позиционирует ООО «ДМТехнологии» как лидера по внедрению инновационных разработок в области направленного бурения.

Список литературы

1. Применение инновационного оборудования и технологий для шахтного направленного бурения технологических скважин / В.А. Волошин, С.В. Риб, И.Р. Рахимкулов [и др.] // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2023. – № 9. – С. 181-188.

2. Numerical Modeling of Stress–Strain Behavior of Rock Mass in the Course of Mining of Lower Strata in a Series / S.V. Rib, O.A. Petrova, A.M. Nikitina [et al.] // Journal of Mining Science. – 2023. – Vol. 59, No. 6. – P. 930-937.

3. Инновационное оборудование. Шахтное направленное бурение. Эффективно для дегазации угольных пластов // Добывающая промышленность, – 2021. – №3 (27). – С.130-133. – URL: www.dprom.online.

4. Войтов М.Д., Усков А.В. Применение направленного бурения скважин для предварительной дегазации угольных пластов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – №3. – С. 33-34.

УДК 622.831

РАСЧЁТ МИНИМАЛЬНОЙ ШИРИНЫ УГОЛЬНЫХ ЦЕЛИКОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ КРУТОНАКЛОННОЙ ЧАСТИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

[1]к.т.н. Риб С.В., [1]к.т.н. Волошин В.А., [1]к.т.н. Петрова О.А., [1]д.т.н. Домрачев А.Н., [2]Полошков С.И., [2]к.т.н. Басов В.В.

1 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

2 – АО «Шахта «Большевик», г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В работе произведен расчёт минимальной ширины устойчивого угольного целика между выемочными столбами для условий крутонаклонной части угольного пласта. Использован нормативно-методический документ ВНИМИ, в котором приведена методика определения несущей способности угольных целиков с учётом строения и свойств пласта в массиве, соотношения размеров целиков в плане и разрезе, наличия в пласте пластичных прослойков, ослабления целика выработками и реологических свойств пород. Проведено моделирования методом конечных элементов напряжённо-деформированного состояния массива горных пород. По результатам сравнения полученных параметров целиков, установленных двумя методами, рекомендован оптимальный вариант, обеспечивающий эксплуатационную устойчивость угольных целиков на крутонаклонной части пласта.

***Ключевые слова*:** крутонаклонный угольный пласт, угольный целик, устойчивость, выработанное пространство, шахта.

Сложившиеся основные тенденции развития технологии добычи угля на шахтах подразумевают первоочередное извлечение запасов угля, залегающих в наиболее благоприятных горно-геологических условиях, пригодных для комплексной механизации. Но объем этих запасов ограничен, особенно ценных коксующихся углей. К неблагоприятным запасам относят, в том числе, и крутонаклонные части угольных пластов технологичных по мощности.

Возникает актуальная задача – эффективно разрабатывать эти запасы традиционными средствами комплексной механизации по системе разработки «Длинные столбы по простиранию» со снижением влияния угла падения на показатели работы забоев, в том числе за счет правильного выбора ширины угольных целиков между выемочными столбами [1].

Расчёт минимальной ширины устойчивого угольного целика осуществлён по нормативно-методическому документу ВНИМИ [4], в котором приведена методика определения несущей способности угольных целиков с учётом строения и свойств пласта в массиве, соотношения размеров целиков в плане и разрезе, наличия в пласте пластичных прослойков, ослабления целика выработками и реологических свойств пород. При расчёте минимальной ширины устойчивых угольных целиков учтены результаты исследований научных организаций [2.3], рекомендации ВНИМИ [4] и опыт отечественных и зарубежных шахт [5-7].

Согласно [4] нагрузка на ленточные целики пласта 29а (угол падения достигает 43 град) АО «Шахта «Большевик», оконтуренные с одной стороны очистным выработанным пространством, определяется в соответствии с классической схемой сдвижения подработанных пород [7]. При системах разработки с полным обрушением пород кровли образуются поверхности излома, параллельные границе целика и наклоненные от нормали к напластованию в сторону выработанного пространства под углом V=25-35° (рис. 1). Породы непосредственной кровли в очистном выработанном пространстве при расчёте нагрузки на целик не учитываются, так как они разрушаются и ложатся на почву пласта. Слои основной кровли разрушаются на блоки, частично зависают на краевой части угольного целика и их вес передаётся на целики и обрушенные породы непосредственной кровли.

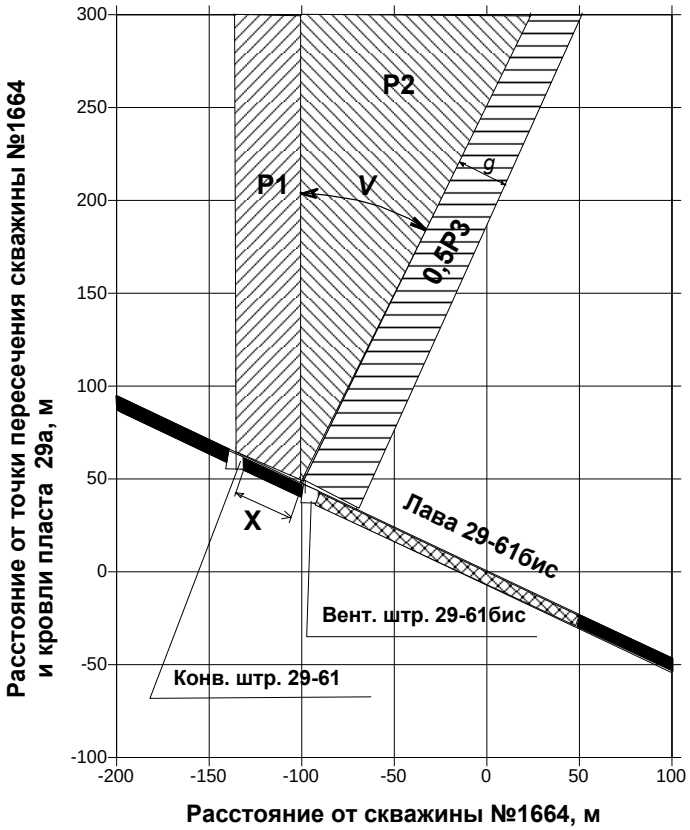


Рис. 1. Расчётная схема нагружения ленточных целиков при подготовке и отработке угольного пласта 29а

На рис. 1 в вертикальном сечении по падению пласта показано выработанное пространство выемочного столба 29-61бис, погашенный вентиляционный штрек 29-61бис и конвейерный штрек 29-61. Между штреками оставлен угольный целик, ширину которого X надо определить.

В основу методики [4] заложено балансовое уравнение вида:

$$n_{ц} P_{ф} = P_{н}, \quad (1)$$

где $P_{ф}$ – фактическая нагрузка на целик; $P_{н}$ – длительная несущая способность целика; $n_{ц}$ – коэффициент запаса.

В соответствии с приведённой на рис. 1 схемой, полная нагрузка P на единицу длины целиков будет складываться из веса P_1 породного столба над целиком между конвейерным штреком 29-61 и вентиляционным штреком 29-61бис, веса P_2 породного столба треугольной формы над очистным выработанным пространством выемочного столба 29-61, веса призмы P_3 пород основной кровли, частично опирающихся на обрушенные породы.

С учётом принятых обозначений, балансовое уравнение (1) можно записать в виде:

$$P = P_1 + P_2 + k_н P_3 \,, \tag{2}$$

где $k_н$ – коэффициент, показывающий, какая часть веса P_3 принимает участие в нагружении целика.

Для труднообрушаемых пород кровли рекомендуется принимать $k_н = 0{,}6$; для среднеобрушаемых $k_н = 0{,}5$; легкообрушаемых $k_н = 0{,}4$. Для пласта 29а принято $k_н = 0{,}5$.

Величина P_1 зависит от ширины целика X, глубины разработки H и усреднённого объёмного веса пород веса γ, то есть:

$$P_1 = \gamma H. \tag{3}$$

Вес P_2 вычисляется в соответствии с величиной угла V и глубиной разработки H по схеме рис. 1, то есть:

$$P_2 = 0{,}5\gamma H^2 tgV, \tag{4}$$

где V – угол обрушения пород, V =25-35° согласно [4].

Нагрузка P_3 зависит от длины g шага установившегося обрушения пород основной кровли и угла поворота блоков, величина которого составляет 5-8°. Учитывая несущественное влияние угла поворота блоков в [4], рекомендуется рассчитывать вес обломившихся консолей по формуле:

$$P_3 = \gamma H g. \tag{5}$$

После подстановки полученных частных нагрузок на целики в формулу (2) при $k_н = 0{,}5$ окончательно получена нагрузка на угольные целики в виде:

$$P_ф = \gamma HX + 0{,}5\gamma H^2 tgV + 0{,}5\gamma Hg. \tag{6}$$

Или после преобразования

$$P_ф = n_ц \gamma H(X + 0{,}5HtgV + 0{,}5g), \tag{7}$$

где $n_ц$ – коэффициент запаса прочности угля в целике, для пласта 29а $n_ц$=1.2.

Длительную несущую способность угольного целика $P_н$ в формуле (1) согласно [4] рекомендуется определять по следующей формуле:

$$P_н = k_s k_t R_o (X - a) e^{r\left(\frac{X-a}{m} - 1\right)}, \tag{8}$$

где k_s – коэффициент структурного ослабления угля, согласно [8] k_s=0,2-0,5; k_t – коэффициент длительной прочности угля, согласно [4] k_t=0,6-0,8; R_o – кубиковая прочность угля по результатам лабораторных испытаний; m – высота целика, m=3,5 м; r – параметр, зависящий от свойств пород в целиках, согласно [4] рекомендуется принимать r=0,17; a – ширина подготовительной выработки, a=5м.

После подстановки в уравнение (1) формул (7) и (8) получено следующее уравнение в общем виде:

$$n_ц \gamma H(X + 0{,}5HtgV + 0{,}5g) = k_s k_t R_o (X - a) e^{r\left(\frac{X-a}{m} - 1\right)}. \tag{9}$$

Уравнение (9) решено методом итерации по компьютерной программе, разработанной на кафедре геотехнологии СибГИУ. По результатам итерационного моделирования минимальная наклонная ширина целика между вентиляционным штреком 29-61бис и конвейерным штреком 29-61 должна быть 25 м, что соответствует фактическим значениям.

Вывод. Таким образом, для оценки адекватности ширины устойчивых угольных целиков, установленной по методике ВНИМИ [4], проведено моделирования методом конечных элементов напряжённо-деформированного состояния массива горных пород. По результатам сравнения полученных параметров целиков, установленных двумя методами,

рекомендован оптимальный вариант, обеспечивающий эксплуатационную устойчивость угольных целиков на пласте 29а.

Список литературы

1. Анферов Б.А., Кузнецова Л.В. Геотехнологическое обоснование эффективной комплексно-механизированной разработки крутонаклонных угольных пластов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2008. – №1. – С. 15-19.

2. Геомеханическое обоснование параметров технологии отработки угольных пластов в зоне взаимовлияния очистного пространства и передовой выработки / В.М. Серяков, С.В. Риб, В.В. Басов [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – № 6. – С. 21-29.

3. Риб С.В., Басов В.В. Методика численного исследования напряженно-деформированного состояния неоднородных угольных целиков с применением современных компьютерных технологий // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2015. – № 4(14). – С. 22-26.

4. Методическое руководство по выбору геомеханических параметров технологии разработки угольных пластов короткими забоями / Кол. авторов. – СПб.: ВНИМИ, 2003. – 30 с.

5. Охрана подготовительных выработок целиками на угольных шахтах: [монография] / В. Б. Артемьев, Г.И. Коршунов, А.К. Логинов [и др.]; под ред. Ю. В. Шувалова; Сибирская угольная энергетическая компания. – СПб.: Наука, 2009. – 230 с.

6. Геомеханические принципы подготовки горного производства на угольных шахтах: пер. с англ. В.М. Шика. – М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2015. – 256 с.

7. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. – С-Пб.: ВНИМИ, 1998. – 291 с.

8. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 216 с.

УДК 622.83:004.42

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕХОДА РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ ДЛЯ ОБУЧАЮЩЕ-ТЕСТИРУЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ «ТЕХНОЛОГИЯ ОТРАБОТКИ ПОЛОГИХ ПЛАСТОВ»

д.т.н. Домрачев А.Н., к.т.н. Коряга М.Г.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В данной статье рассматривается дальнейшее развитие обучающе-тестирующей программы в части реализации модуля выбора оценки параметров технологии перехода разрывных нарушений. Для нового модуля разработана методика оценки решений по переходу разрывных нарушений на основе существующих критериев влияния горно-геологических условий на показатели очистных работ.

Ключевые слова: разрывное нарушение, методика оценки, обучающе-тестирующая программа, критерий эффективности решений.

Опыт массового применения дистанционного образования в годы пандемии выявил целый ряд проблем, связанных как с оценкой объективности результатов обучения, так и с эффективностью самого обучения.

Классическая аудиторная подача учебного материала преподавателем позволяет при работе с группой решать сразу несколько задач: собственно, доводить лекционный материал, отвечать на вопросы обучающихся и задавать наводящие вопросы для размышления в формате лекционного занятия.

Ответы на вопросы преподавателем на лекции позволяют оценить уровень усвоения выдаваемого материала. Разъяснение сложных фрагментов материала для всей группы, при ответе на вопрос одного обучающегося дает возможность оценить в целом восприятие аудиторией частей лекции по количеству и видам вопросов.

Наиболее распространенным способом проверки знаний при дистанционном обучении стало тестирование. При прохождении теста необходимо ответить на ряд вопросов, причем ответы могут быть представлены в виде списка, из которого необходимо выбрать один иди несколько пунктов. Существуют формы с записью цифрового ответа или в виде текста.

Общим недостатком тестов является только оценка фиксированного среза знаний обучающегося. Механическое заучивание ключевых ответов для прохождения тестирования, даже при увеличении базы вопросов, не формируют у тестируемого склонности к аналитическому мышлению и самостоятельному принятию решений.

Создание качественного образовательного контента возможно только посредствам реализации обучающих программ, в которых обучающийся может решать задачи с исходными данными, максимально приближенными к реальным ситуациям.

При этом программа должна обладать не только вычислительными функциями, позволяющими видеть конечный ответ, но и проверочными, указывающими на ошибки и задающими направление поиска правильного ответа.

Особенно актуально это при подготовке инженерных кадров, решающих различные технологические задачи на практике.

С целью повышения качества подготовки горных инженеров кафедра геотехнологии СибГИУ для отработки навыков принятия решений в условиях, близких к функционированию реального производства, с 2018 года реализует разработку и внедрение обучюще-тестирующей программы «Технология отработки пологих пластов» [1]. Программа является модульной системой, в которой для обучения по теме «Технология отработки мощных пластов» реализованы четыре самостоятельных модуля [2,3]:

– отработка пласта средней мощности с комбайновой выемкой угля;
– отработка пласта средней мощности со струговой выемкой угля;
– отработка мощного пласта по слоевой системе разработки;
– отработка мощного пласта с выпуском угля из подкровельной пачки.

Действия обучаемого состоят в анализе исходных данных, выполнении промежуточных расчетов и выборе необходимых технических решений [3, 4].

На текущем этапе развития обучающе-тестирующей программы, возникла потребность в ее детализации для более полного учета особенностей горно-геологических условий шахт юга Кузбасса, в том числе за счет разработки и внедрения модуля определения и оценки параметров перехода разрывного нарушения, При разработке алгоритма оценки принимаемых решений были определены основные влияющие факторы и выбраны методики для расчета параметров и оценки эффективности принимаемых обучаемыми технических решений по переходу разрывного нарушения (табл. 1).

На основе выполненного анализа был выделен ряд факторов, которые использованы при оценке обоснованности решений по переходу разрывного нарушения (табл. 2). Реализованный для эффективного использования модуля специальный интерфейс приведен на скриншоте (рис. 1).

Для оценки эффективности мероприятий по переходу разрывного нарушения был разработан критерий, основанный на оценке соответствия параметров горно-геологических условий (табл. 2) диапазонам эффективной реализации тех или иных мероприятий.

$$S = S_o - \sum_{j=1}^{M\sum} \frac{\sum_{i=1}^{N\sum}\left[\left(1-\left\langle p^i \in \left\{ p_{min}^{i^{ma[}} \{\} \right\} \langle\rangle \right\rangle ()\right) \frac{k_j}{K_{геол\,j}}\right]}{N}, \quad (1)$$

где k_i – коэффициент влияния j-го мероприятия; w_i – весовой коэффициент j-го мероприятия; $k_{геол}$ – интегральный коэффициент влияния горно-геологических условий [5]; M – число мероприятий по переходу нарушения; N – число показателей, характеризующих горно-геологические условия; S_o – базовая (высшая) оценка; p^i – значение i-го параметра горно-геологических условий.

Таблица 1

Матрица формализации влияющих факторов

Области решений / Факторы	Методы и критерии оценки принимаемых решений в части		
	Маневрирования ОМК	Упрочнения кровли и поверхности забоя	Крепление кровли/ заделки вывалов
Амплитуда нарушения	Угол подъема мех-комплекса и длина участка перехода [10]	нет данных	нет данных
Повышенный отжим угля	нет данных	Глубина отжима [9]	нет данных
Дополнительное обнажения кровли	Объем дополнительной присечки породы [10]	Коэффициент перетяжки кровли [5] Коэффициент устойчивости незакрепленной кровли [6-8]	Доля секций с дополнительным обнажением [11] Критерий Ю.Б. Грядущего [6-8]
Наличие/объем вывалов	нет данных	нет данных	Коэффициент заполнения вывалов [5]
Параметры механизированной крепи	Угол подъема механизированного комплекса [10]	Глубина отжима [9]	нет данных

Таблица 2

Влияние значимых факторов

Параметры / Решения	Параметры нарушения				
	Амплитуда h,м	Угол встречи с лавой, $a_{нар}$, град	Глубина отжима, $b_{от}$, м	Относи-тельные коэффи-циенты влияния условий, $k_i/K_{геол}$	Вероятность вывало-образования (критерий Грядущего Ю.Б. и др.)
Укрепление кровли анкерами	<1.9	–	>1,5	$k_{зат}$ / $K_{геол}$ <0,4	>0,15
Укрепление кровли перетяжзкой	>1.9	–	>1,5	$k_{зат}$ / $K_{геол}$ <0,4	–

Укрепление кровли рудстойками	>1.9	–	–	–	–
Использование каркасной крепи («проколотов»)	–	< 10	<2,5	–	–
Химическое упрочнение кровли	–	–	>2,5	–	–
Анкерование поверхности забоя	–	–	>1,5	–	–
Химическое упрочнение поверхности забоя	–	–	–	–	–
Заполнение вывалов деревянными клетями	<3,5	–	>10	$k_{пол}$ / $K_{геол}$ >0,4	>0,25
Заполнение вывалов полимерными материалами	–	–	< 10	$k_{пол}$ / $K_{геол}$ >0,4	>0,25

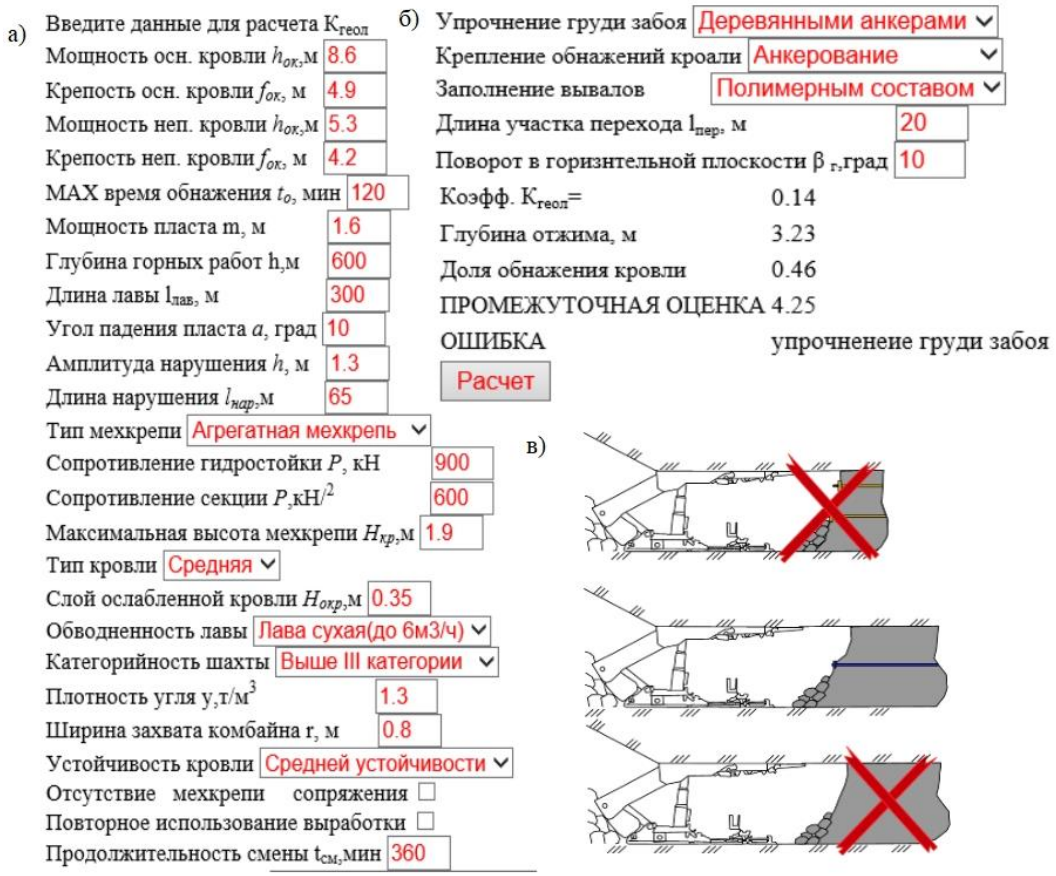


Рис. 1. – Интерфейс модуля оценки технических решений по переходу разрывных нарушений: а – исходные данные; б – принятие решений; в – графическое пояснение

Выводы. Использование в образовательном процессе обучюще-тестирующей программы, позволяет обучающимся быстро решать задачи с большим набором исходных данных и с возможностью программной оценки принимаемого ими решения.

Реализация модуля оценки эффективности технических решений при переходе разрывных нарушений позволит существенно расширить диапазон решаемых задач при использовании обучюще-тестирующей программы в курсе дисциплины «Технология отработки пологих пластов».

Список литературы

1. Домрачев А.Н. Подземная отработка пологих пластов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021613518; дата гос. регистр. 10 марта 2021 г.

2. Домрачев А.Н. Разработка междисциплинарных компьютерных лабораторных работ как основа массового внедрения обучающе-тестирующих систем по направлению подготовки 21.05.04 «Горное дело» // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2018. – №3(25). – С. 18-21.

3. Говорухин Ю.М., Домрачев А.Н. Разработка и внедрение в учебный процесс системы поддержки принятия решений при разработке технологической схемы очистного участка // Известия Тульского государственного университета. – 2018. – Вып. 1. – С.159-165.

4. Домрачев А.Н., Риб С.В. Совершенствование критерия оценки компьютерных лабораторных работ по курсу «Технология отработки пологих пластов» специальности 21.05.04 «Горное дело» // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2018. – № 4 (26). – С.63-65.

5. Нагрузки на очистные забои действующих угольных шахт при различных горно-геологических условиях и средствах механизации выемки. – Люберцы: ИГД им. А.А. Скочинского, 1996. – 48 с.

6. Кравченко В.И. Предупреждение завалов очистных забоев. − М.: Недра, 1970. − 200 с.

7. Белогуб О.Ю., СоловьевГ.И., Ляшок Я.О. Критерій вивалонебезпечності порід покрівлі очисних вибоїв глибоких шахт / Зб. матеріалів V регіональної наук.-практ. конф. «Дні науки-2013», 23 травня 2013. – Красноармійськ: КІІ ДонНТУ, 2013. – Т.1. – С. 52-55.

8. Грядущий Ю.Б. Геомеханические основы управления вывалоопасными кровлями в очистных забоях: автореф. дис. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук. − Днепропетровск, 1997. – 35 с.

9. Временные указания по управлению горным давлением в очистных забоях на пластах мощностью до 3,5 м с углом падения до 35°. – Л., 1982. – 136 с.

10. Руководство по переходу геологических нарушений механизированными комплексами. – Прокопьевск, 1982. – 78 с.

11. Домрачев А.Н., Риб С.В., Никитина А.М. Адаптация методики оценки риска обрушения выработок к условиям шахт юга Кузбасса // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2016. – Вып. 4. – С.81 — 89.

ГОРНЫЕ МАШИНЫ И ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

УДК 681.518.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕДИНОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

[1]к.т.н. Герике П.Б., [1]д.т.н. Герике Б.Л., [2]д.т.н. Никитин А.Г.
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия
2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В настоящей работе приводятся некоторые результаты прогнозирования развития деградационных процессов изменения технического состояния приводов щековых дробилок, полученные с использованием принципов адаптивного прогнозного моделирования величин новых единых диагностических критериев, основанных на результатах комплексного анализа параметров вибрации, генерируемой при работе энерго-механического оборудования горных машин.

Ключевые слова: единый диагностический критерий, вибродиагностика, прогнозное моделирование, деградация технического состояния, горное оборудование, щековые дробилки.

Введение. Результаты контроля фактического состояния дробильно-сортировочного оборудования (ДСО), полученные в рамках экспертизы промышленной безопасности технических устройств, эксплуатируемых на опасных производственных объектах, свидетельствуют о том, что значительная доля обследованных технических устройств находится либо в предельно допустимом, либо в недопустимом техническом состоянии. Особого внимания заслуживают факторы, сочетание которых, порой, может приводить к резкому росту параметров вибрации, что может послужить причиной аварийного выхода из строя эксплуатируемого оборудования. К таким факторам однозначно следует отнести наиболее энергоемкие процессы, развивающиеся на эксплуатируемом энергомеханическом оборудовании горной техники, такие как неуравновешенность роторных машин и нарушение жесткости системы, признаки наличия которых повсеместно встречаются на диагностируемом оборудовании. В свою очередь, все это может оказывать влияние как на технико-экономические показатели угольных предприятий, так и на безопасность работы обслуживающего и ремонтного персонала.

Именно поэтому в создавшихся условиях наибольший интерес представляют результаты анализа исходной диагностической информации с применением комплексного подхода к вибродиагностике и использованием новых единых диагностических критериев и методов машинного обучения. В качестве объекта исследований в рамках настоящей работы использовалась выборка из шести единиц щековых дробилок типа СМД (рис. 1), получивших (благодаря относительной простоте конструкции и высокому КПД) широкое распространение на предприятиях угольной и горнорудной промышленности Кузбасса. Малый объем выборки, конечно, повлиял на результаты расчетов, однако общие требования по обеспечению корректности результатов прогнозирования технического состояния объектов диагностирования были соблюдены [1].

Постановка задачи. В настоящей статье, без претензий на полноту освещения, рассмотрены некоторые вопросы специфики анализа параметров механических колебаний, генерируемых при работе щековых дробилок, а также приведены результаты прогнозирования технического состояния привода дробилки СМД с применением новых единых диагностических критериев (ЕДК), основанных на принципах адаптивного

моделирования результатов скаляризации экспериментально полученных диагностических данных [1].

Рис. 1. Общий вид щековой дробилки СМД-108

Первые же результаты анализа параметров вибрации позволили выявить наиболее распространенные дефекты оборудования щековых дробилок, среди которых – нарушение жесткости опорной системы; расцентровка привода, дефекты подшипников качения, в.т.ч. нарушение режима их смазки; дисбаланс ротора электродвигателя; нарушение соосности шкивов и износ ременной передачи; дефекты двигателей электромагнитного происхождения (такие, как: замыкание обмоток, смещение магнитного поля и т.д.).

Особенностью сбора диагностической информации на щековых дробилках является то, что в силу конструктивных особенностей (особенно на дробилках тяжелого класса) процесс диагностирования затрудняет ограниченный доступ к точкам проведения измерений, в т.ч. из-за наличия массивных вращающихся элементов [2]. В связи с этим не всегда представляется возможным провести измерения на подшипниках главного вала с соблюдением требований правил безопасности, из-за чего на практике иногда ограничиваются регистрацией характеристик в безопасном месте (на корпусе, или даже на фундаменте дробилки). Однако, практикующему вибродиагносту следует учесть, что при этом теряется большая часть ценной информации о содержании высокочастотных составляющих механических колебаний, а низко- и среднечастотные гармоники регистрируемых спектров при этом значительно искажаются. Все это потребует при анализе исходных диагностических данных применения алгоритмов фильтрации, позволяющих отсечь результаты некорректных замеров и отделить, при необходимости, спектральные составляющие по признаку причин их появления (произвести фильтрацию данных по типу содержащихся в них диагностических признаков, выделив частотные признаки одних групп дефектов, и подавив другие).

Анализ результатов. Среди всех дефектов оборудования щековых дробилок, выявленных в ходе выполнения настоящей работы, наиболее распространенным оказалось нарушение жесткости опорной системы (> ¾ от всей выборки данных). Практически повсеместно регистрируются признаки ослабления крепежа, нарушение жесткости силовых рам и анкеров.

Чуть в меньшем количестве случаев встречаются признаки расцентровки привода и нарушения соосности шкивов ременных передач, а также дисбаланса ротора приводных электродвигателей (см. примеры спектров на рис. 2).

Довольно часто диагностические признаки нарушения жесткости могут практически полностью (вплоть до 0,1Гц) совпадать со значащими гармониками спектра, отвечающими за совершенно иные дефекты [3…8]. Это заметно усложняет интерпретацию полученных данных, поэтому в реальных условиях эксплуатирующих предприятий вибродиагностику

часто дополняют результатами визуально-измерительного контроля с целью получения дополнительной информации о состоянии обследуемого объекта.

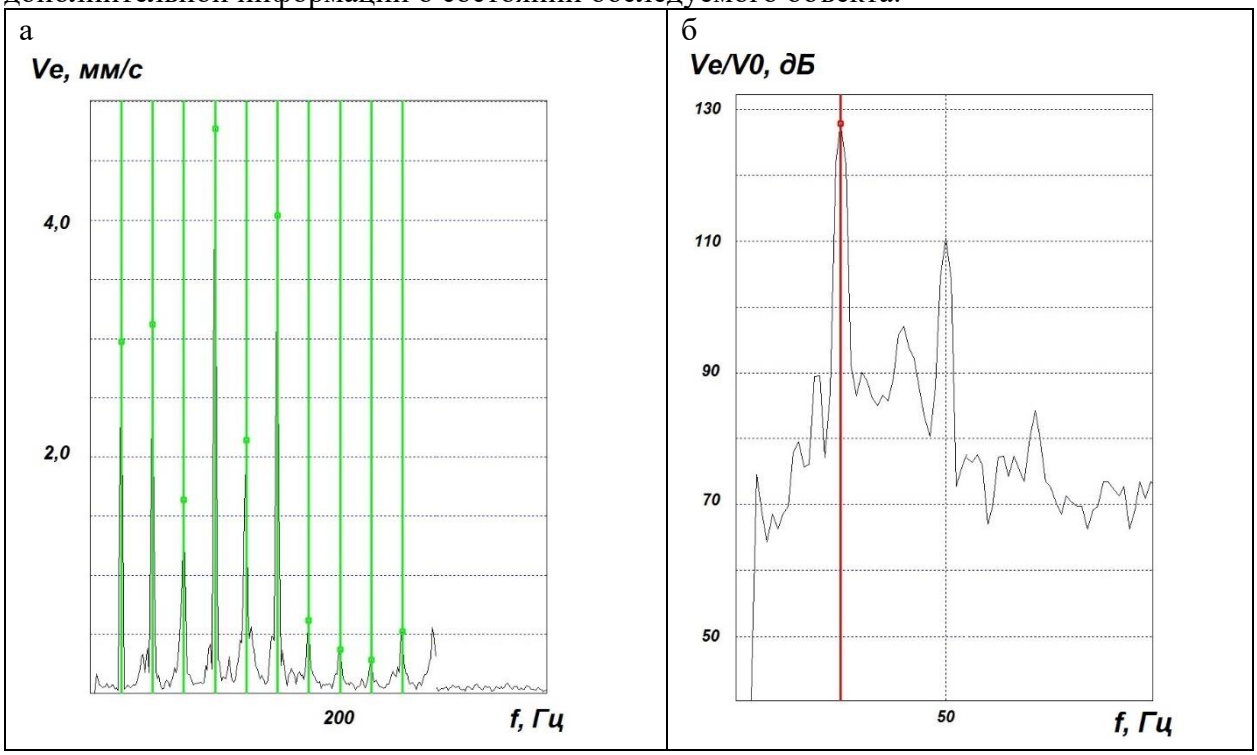


Рис. 2. Базовые диагностические признаки некоторых основных дефектов щековой дробилки СМД-108: а – нарушение жесткости системы; б – дисбаланс ротора двигателя

Все вышесказанное засвидетельствовало появление насущной необходимости в алгоритмах фильтрации исходных диагностических данных, предназначенных для поиска и выделения из общей выборки данных разнородных по своей природе диагностических признаков. Кроме того, использование алгоритмов клиппирования позволит очистить выборку от некорректных замеров, вызванных ошибками при установке датчиков вибрации и т.п. причинами [3, 9, 10].

Новые критерии, созданные с использованием принципов оптимальной скаляризации экспериментально полученных данных вибрации, были апробированы на энерго-механическом оборудовании электрических карьерных экскаваторов и доказали свою принципиальную работоспособность и эффективность при выполнении оценки и прогнозировании технического состояния горных машин [1]. В рамках выполнения исследований было создано восемь новых критериев, по одному для каждой базовой группы дефектов диагностируемого горного оборудования – от подшипников качения до дефектов зубчатых передач в составе редукторов карьерной техники.

Основная идея настоящей работы заключалась в попытке распространить имеющийся опыт применения единых критериев на новый объект, и тем самым проверить их работоспособность в различных условиях и областях применения. В настоящем исследовании не затрагивались вопросы специфики анализа виброакустических характеристик, имеющих признаки наличия дефектов ременных передач (таких, как: биение, растрескивание, повреждение ремней и т.п.). Это упущение объясняется отсутствием на сегодняшний день единого критерия для диагностики состояния шкивов и ременных передач в составе дробильно-сортировочного оборудования [11]. Именно поэтому вопросы диагностики технического состояния ременных передач щековых дробилок остались за рамками настоящей работы.

Таким обратом, наибольшую диагностическую ценность в текущих условиях может предоставить информация о наличии на диагностируемом оборудовании щековых дробилок таких дефектов, как дисбаланс и нарушение жесткости системы. Развитие этих

процессов может привести, и нередко приводит к самым опасным последствиям, включая значительный рост вероятности возникновения аварийных ситуаций, что делает актуальным прогнозирование развития именно этих дефектов (см. пример на рис. 3).

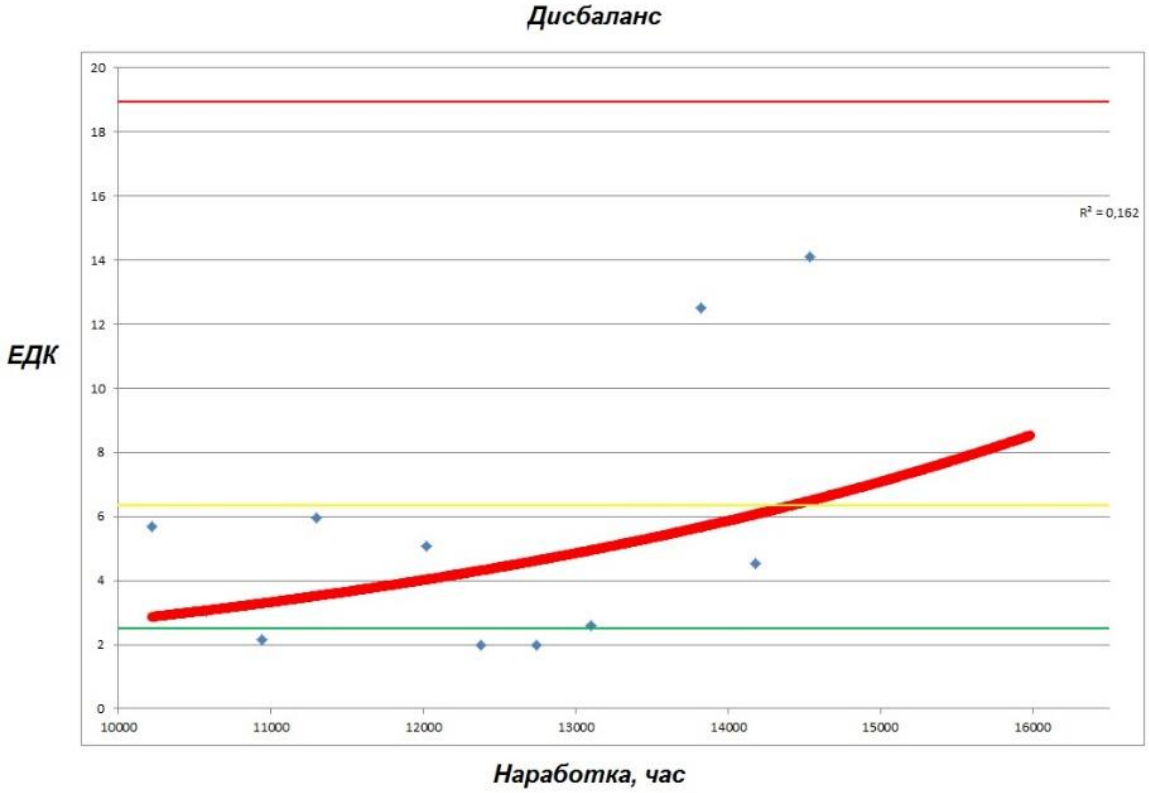


Рис. 3. Среднесрочный прогноз для дисбаланса приводного электродвигателя в зависимости от наработки

При создании ЕДК использовался принцип комплексного подхода к анализу параметров вибрации, это позволило выбрать и обосновать эффективность индивидуальных наборов диагностических признаков для каждой отдельной группы дефектов. Большинство используемых признаков сосредоточено в области спектрального анализа, но кроме того использовались диагностические признаки эксцесса, анализа огибающей и некоторых других вибродиагностических методов [1]. Диагностические данные, сгруппированные по выбранным признакам, были подвергнуты анализу с применением принципов «оптимальной скаляризации» и клиппирования исходной информации. Созданные по данному принципу ЕДК были пронормированы и использовались в качестве параметров адаптивной прогнозной математической модели, позволяющей оценить скорость деградации технического состояния объектов исследования и спрогнозировать момент их выхода из строя в кратко- и среднесрочной перспективе (период моделирования составил до двух интервалов диагностирования, т.е. до 60 календарных дней).

Как следует из анализа проведенных расчетов и графика (см. рис. 3), на заданном интервале диагностирования (Т=60 календарных дней) уровень авария не будет достигнут. Уровень ЕДКАВАРИЯ_ДИСБАЛАНС=18,94, доверительные границы прогноза уровня АВАРИЯ - пессимистическая 14,58 и оптимистическая 23,30 (методику расчета предельных значений см. в [1]), при прогнозе на 60 суток в момент наработки 15980 часов ЕДК=8.35. Величина достоверности аппроксимации R2=0.162. Рекомендовано продолжить дальнейшую эксплуатацию дробилки с соблюдением режимных параметров. Низкий уровень R2 обусловлен недостаточным объемом диагностических данных, увеличить достоверность аппроксимации можно путем увеличения выборки диагностических данных.

На рис. 3 отображен допустимый результат прогноза фактического состояния дробилки на ближайшие два месяца, однако, если не отслеживать изменение параметров вибрации, влияющих на её техническое состояние, довольно скоро могут начаться деградационные изменения технического состояния, начало которым, как видно из анализа первичных диагностических данных, уже положено.

Повысить точность анализа можно увеличением объема диагностической информации, повышением достоверности аппроксимации данных и совершенствованием самих критериев, в т.ч. в области нормирования предельных значений ЕДК для разных типов горного оборудования, что позволит существенно расширить область применения разработанных диагностических критериев. Существующие на сегодняшний день ЕДК предназначены для диагностики оборудования карьерных экскаваторов и применять их без соответствующей корректировки на другом оборудовании затруднительно. Однако, в случае с использованной в рамках настоящей работы выборкой диагностических данных, содержащей информацию по вибрации щековых дробилок СМД-108 и СМД-110, для осуществления приближенного расчета допустимо использовать ЕДК для оценки дисбаланса, т.к. в соответствии с действующей нормативной документацией (например, РД 15-14-2008, ГОСТ 10816-3-2002) по установленной мощности привода оборудование щековых дробилок и часть оборудования карьерных экскаваторов относится к одному и тому же классу, для которого допустимо применять одни и те же нормы вибрации.

Недопустимый уровень дисбаланса ротора (см. рис. 2б) – это серьезный дефект энергомеханического оборудования, на который, впрочем, иногда закрывают глаза эксплуатирующие и ремонтные подразделения угольных предприятий, т.к. устранение этого дефекта потребует, в ряде случаев, вывода агрегата в ремонт, при этом не всегда есть в наличии резервные агрегаты, что может повлечь за собой рост непроизводительных простоев техники, невыполнение производственного плана и т.п. Однако, отмахнуться от этой проблемы может стать себе дороже, т.к. при совпадении определенных условий (например, при появлении резонанса на рабочих частотах агрегата, вызванного недопустимым нарушением жесткости опорной системы и значительной расцентровкой привода), влияние этих дефектов в совокупности приведет к значительному росту величин вибрации, что создаст угрозу отрыва вращающихся элементов (или всего агрегата от опор) и представит реальную опасность для жизни и здоровья обслуживающего персонала [12…14]. Именно поэтому прогнозирование развития дисбаланса является важной практической научной задачей, и исследования в области совершенствования ЕДК должны быть продолжены.

Продвинуться в решении этого вопроса можно путем адаптации ЕДК к особенностям конструкции и специфике условий эксплуатации широкого спектра горношахтного, дробильно-сортировочного и углеобогатительного оборудования [15].

Очевидно, что для этого потребуется увеличение объемов выборки технических устройств и дальнейший сбор диагностических данных по параметрам вибрации, что является совершенно необходимым для корректировки существующих и разработки новых критериев предельного состояния данного типа оборудования (например, настоящая работа выявила наличие потребности в использовании единого критерия для диагностики ременных передач по параметрам вибрации, которого на сегодняшний день не существует). Дополнительные диагностические данные по вибрации ДСО также потребуются для корректировки границ предельных значений ЕДК, которые изначально разрабатывались для совсем иного оборудования, с другой мощностью и иными рабочими характеристиками. Кроме того, для подтверждения результатов прогнозирования, потребуется сбор дополнительных диагностических данных, полученных по результатам проведенных ремонтов оборудования, для которого был получен негативный прогноз развития недопустимого технического состояния.

Вместе с тем, становится очевидным, что созданная сегодня методология разработки единых диагностических критериев доказала свою принципиальную эффективность и

возможность ЕДК приспосабливаться под новые для них типы объектов. В рамках настоящей работы была проведена апробация критериев, разработанных для диагностики энергомеханического оборудования карьерных экскаваторов на дробильно-сортировочном оборудовании с применением подходов адаптивного прогнозного моделирования. Полученные результаты можно использовать в качестве дополнительного инструмента при внедрении на предприятиях элементов системы «бережливого производства» и управления техническим обслуживанием эксплуатируемой техники по ее фактическому техническому состоянию.

Выводы. Разработанные единые диагностические критерии, основанные на результатах комплексного подхода к анализу параметров вибрации, доказали свою эффективность при решении задач оценки фактического состояния и прогнозирования деградации оборудования щековых дробилок.

По результатам выполненных исследований создана база данных по параметрам вибрации и специализированное программное обеспечение, предназначенное для прогнозирования процессов деградации оборудования горных машин с применением новых ЕДК, в настоящее время подготавливаются заявки на получение свидетельств о государственной регистрации разработанной программы и базы данных.

Реализация на практике результатов контроля технического состояния дробильно-сортировочного оборудования с помощью ЕДК позволит минимизировать непроизводительные аварийные простои эксплуатируемой техники, а также оптимизировать издержки, связанные с ремонтами щековых дробилок.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0024 «Разработка эффективных технологий добычи угля роботизированными горнодобывающими комплексами без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ, систем управления и методов оценки технического состояния и диагностики их ресурса и обоснование обеспечения воспроизводства минерально-сырьевой базы. 2024-2025 гг.» (рег. № 1022041500010-0-1.5.1;2.7.5).

The work was performed within the framework of the state assignment of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, : Project FWEZ-2024-0024 «Development of efficient technologies of coal mining by robotic mining complexes operating without permanent presence of personnel in mining zones, design of control systems and methods to assess their technical condition and operating life as well as justification of the mineral resource base reproduction. 2024-2025» (Reg. No. 1022041500010-0-1.5.1;2.7.5).

Список литературы

1. Исследование процессов формирования и распространения виброакустических волн для создания единых диагностических критериев оценки технического состояния горных машин: отчет НИР / Герике П.Б.: грант № 20-48-420010. – Российский фонд фундаментальных исследований, 2020.

2. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах. Т.7 / Под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Клюева, – Москва, 2005. – 828 с.

3. Краковский, Ю. М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. – Новосибирск: Наука, 2006. – 227 с.

4. Vibration based condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox / T. Wang, Q. Han, F. Chu, [et al.] // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2019. – V.126. – Pp. 662-685. – URL https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.051

5. Tse P., Peng Y., Yam R. Wavelet Analysis and Envelope Detection For Rolling Element Bearing Fault Diagnosis // Their Effectiveness and Flexibilities. Journal of Vibration and Acoustics. – 2001. – Vol. 123. – PP 303-310. – URL: https://doi.org/10.1115/1.1379745

6. Crack diagnostics in a large-scale reinforced concrete structure based on the analysis of vibration processes / I. Shardakov, A. Shestakov, R. Tsvetkov [et al.] // AIP Conference Proceedings – 2018. – 2053. – 040090. URL: https://doi.org/10.1063/1.5084528

7. Основы диагностики технических устройств и сооружений. / Г.А. Бигус, Ю.Ф. Даниев, Н.А. Быстрова [и др.]. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 445 с.

8. Puchalski A., Komorska I. Stable distributions and fractal diagnostic models of vibration signals of rotating systems // Applied Condition Monitoring. – 2018. – Vol. 9. – Pp 91-101. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-61927-9_9

9. Schreiber R. Induction motor vibration diagnostics with the use of stator current analysis // Proceedings of the 2016 17th International Carpathian Control Conference, ICCC. – 2016. – PP. 668-672. – URL: https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2016.7501179

10. Liu G., Parker R. Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration. // Journal of Mechanical Design. – 2008. – Vol. 130. – PP. 121402/1 - 121402-13. – URL: https://doi.org/10.1115/1.2976803

11. Никитин А.Г., Герике П.Б., Абрамов А.В. Расчет производительности одновалковой дробилки с принудительной подачей разрушаемого материала // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2024. – №1. – С. 70-73.

12. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений / В.И. Клишин, Л.В. Зворыгин, А.В. Лебедев [и др.]. – Новосибирск, 2011. – 524 с.

13. Huňady R., Pavelka P., Lengvarský P. Vibration and modal analysis of a rotating disc using high-speed 3D digital image correlation // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2019. – Vol.121. – PP. 201-214. URL: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.11.024

14. Gertsbakh I. Models of Preventive Maintenance. – North-Holland: Amsterdam – New York – Oxford, 1977.

15. Герике П.Б. Виброанализ тяговых и подъемных лебедок экскаваторов – драглайнов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. - № S38. – С. 344 – 349.

УДК 622.232:681.518.5

ОЦЕНКА РЕСУРСА РАБОТОСПОСОБНОГО СОСТОЯНИЯ РЕДУКТОРОВ ГОРНЫХ МАШИН

[1, 2]д.т.н. Герике Б.Л., [3]к.т.н. Кузин Е.Г., [1]к.т.н. Герике П.Б.

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

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

3 – Прокопьевский филиал КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева», г. Прокопьевск, Россия

Аннотация. В статье приводится обоснование перехода на интеллектуальное обслуживание приводов шахтных ленточных конвейеров по их техническому состоянию на основе методов диагностики вместо системы планово-предупредительных ремонтов (ППР). Показаны результаты диагностики состояния редукторов привода конвейера по совокупности диагностических признаков с учетом параметров смазочного масла, вибрации и температуры.

Ключевые слова: ленточный конвейер, оценка технического состояния, вибродиагностика, тепловизионный контроль, анализ смазочных материалов.

Введение. Тяжелые условия эксплуатации горных машин, а также высокий уровень динамической нагруженности приводят к снижению их срока эксплуатации. Количественная оценка надежности машин по одному из показателей – ресурсу, получила широкое распространение во всех отраслях техники. Одним из важных методов повышения надежности в условиях эксплуатации является техническое диагностирование.

При этом задачами технического диагностирования являются [1-3]:

– контроль технического состояния (то есть проверка соответствия значений параметров объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов технического состояния на данный момент времени);

– поиск места и определение причин отказа (неисправности);

– прогнозирование технического состояния.

В соответствии с НПАОП-10.0-3.01-90 «Нормативы по безопасности забойных машин, комплексов и агрегатов» определены следующие требования к технической диагностике:

– горные машины и оборудование должны включать в себя подсистему диагностического обеспечения, выполняющую безопасный контроль технического состояния путем измерения и индикации параметров машин, устройств автоматики, электрических, гидравлических и пневматических систем, систем смазки, а также подшипниковых узлов;

– в подсистеме диагностического обеспечения, как правило, должно предусматриваться: неразрушающий контроль технического состояния объектов, определение внезапных и параметрических отказов горных машин и их систем, обнаружение постепенных отказов путем прогнозирования изменения контролируемых параметров, непрерывный и периодический контроль технического состояния.

Все детали горных машин и оборудования, в зависимости от условий работы и вида изнашивания, могут быть разделены на следующие группы:

в первую группу входят зубья и режущие кромки ковшей экскаваторов; основания крепи; перекрытия крепей; шнеки; бары, отвалы бульдозеров; траки, опорные ролики, пальцы, втулки, звездочки ходовой части машин на гусеничном ходу и др., долговечность деталей которой обусловливается абразивным износом;

во вторую группу входят детали со шлицами и резьбами, зубчатые муфты, посадочные места под подшипники качения валов, станков, поверхности зубчатых передач и др., долговечность которых определяется механическим износом поверхностей деталей;

в третью группу входят детали двигателей внутреннего сгорания автосамосвалов, бульдозеров, скреперов, дизелевозов, устройства для термического разрушения горных пород и огневого бурения и др., долговечность которых лимитируется молекулярно-химическим или коррозионно-механическим износом;

в четвертую группу входят подшипники качения и скольжения, рессоры, пружины, шатуны, шатунные болты и др., долговечность которых зависит от усталостной прочности металла.

Постановка задачи. В настоящее время на угольных предприятиях эксплуатируется значительное количество ленточных конвейеров [4], от работоспособного состояния которых зависят показатели работы всей угольной промышленности Кузбасса. В ближайшее время ожидается увеличение энерговооруженности и технической оснащенности ленточных конвейеров, производительности и длины транспортирования горной массы, широко внедряется частотно-регулируемый электропривод [5, 6].

Повышающиеся объемы добычи угля подземным способом требуют создания надежных транспортных систем – основная задача, стоящая перед производителями поточных линий шахтных ленточных конвейеров. Другой, не менее важной задачей, является сокращение затрат на их техническое обслуживание и ремонт [7, 8]. Для обеспечения безотказности работы ленточного конвейера в течение как можно более продолжительного времени необходимо определить причины выхода из строя различных

составляющих элементов [3, 9], и в первую очередь зубчатых зацеплений и подшипниковых узлов, долговечность которых определяется механическим износом трущихся поверхностей.

Анализ простоев, вызванных отказом редукторов магистральных и забойных конвейеров [3, 10], показывает, что их доля колеблется от 7% до 18%, при этом среднее время восстановления работоспособного состояния составляет от 24 до 48 часов, что свидетельствует об актуальности исследований.

Методы исследования. Для контроля технического состояния механического оборудования хорошо зарекомендовал себя метод вибрационного контроля [3, 11, 12]. Вибрационная диагностика применяется для:

– контроля текущего состояния оборудования;

– разделения множества возможных технических состояний агрегата на два подмножества – исправных и неисправных;

– постановки диагноза, состоящего в определении характера и локализации одного или группы дефектов, соответствующих вибрационному состоянию агрегата;

– обнаружения возможного дефекта на ранней стадии и прогнозирование его развития во времени;

– оценки остаточного ресурса;

– определения сроков и объемов ремонтных работ;

– снижения риска возникновения аварийной ситуации.

Как показывает опыт контроля технического состояния горного оборудования, для обнаружения возможных износовых отказов наиболее эффективен (до 77%) контроль по параметрам вибрации [11], а с привлечением других методов функциональной диагностики – спектрального анализа масла [13] и тепловизионного контроля [14], достоверность распознавания причин возникновения дефекта возрастает до 95%.

Результаты исследования. Полный анализ технического состояния редуктора после сборки и обкатки на испытательном стенде (рис. 1) позволит не только выявить и локализовать дефекты изготовления, но и исключит возможность поставки потребителю некачественной продукции. Помимо этого, полученные данные могут лечь в основу разработки системы автоматизированного контроля качества.

Анализ методов вибрационного контроля позволяет сделать вывод, что для автоматизации контроля выпускаемой продукции предназначенной для угольной отрасли целесообразно применять метод опорных масок. Этот метод основан на том, что дефекты, которые закладываются в результате изготовления и сборочных работ, генерируют вибрацию в определенных частотных полосах с определенным соотношением величин контролируемых параметров.

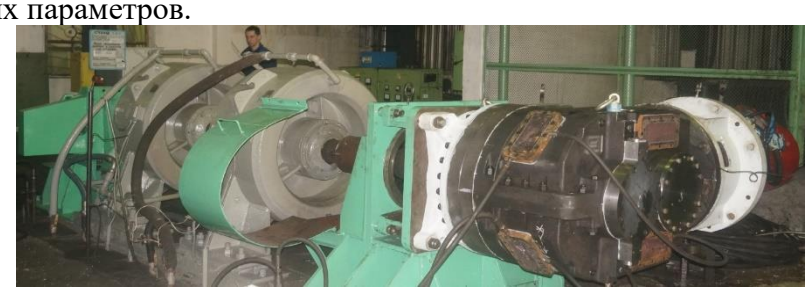


Рис. 1. Общий вид испытательного стенда на ОАО «АНЖЕРОМАШ»

Метод опорных масок дает возможность устанавливать ширину частотной полосы, её положение и значения критериев оценки, которые сравниваются с текущими значениями в произвольном порядке. Анализируя изменения контролируемого параметра в частотной полосе (число полос может изменяться от 6 до 30), осуществляется оценка и прогноз состояния оборудования [16].

Частотные диапазоны спектральной маски (ширина полос) обычно принимают значения исходя из следующих условий [12, 16]:

– «высокоэнергетические» составляющие спектра, сопровождающие дисбаланс или расцентровку– (0,5...1,5)×f_r и (l,5...2,5)×f_r;

– «низкоэнергетические» составляющие колебаний, сопровождающие дефекты подшипника качения – (7,5...15,5)×f_r;

– (2,5...10,5)×f_r — общее нарушение жесткости системы;

– первая среднечастотная полоса (3... 15)×f_r;

– вторая среднечастотная полоса (15...40)×f_r;

– первая высокочастотная полоса 40×f_r...20 кГц;

– (n±1)×f_r – для повреждения элементов соединительных муфт, где f_r – частота вращения приводного двигателя.

Применение современных технологий автоматизации контроля технического состояния оборудования позволяет осуществлять индивидуальный подход к каждому выпускаемому агрегату при оценке его технического состояния и устанавливает пороговые значения исходного, работоспособного и предельного состояния.

В качестве примера на рис. 2 приведены контрольные точки на редукторе РКЦ-400 производства ОАО «АНЖЕРОМАШ». Замеры производились виброанализатором «Corvet», а обработка сигнала на программной платформе «Safe Plant», разработанной НПО «Диатех».

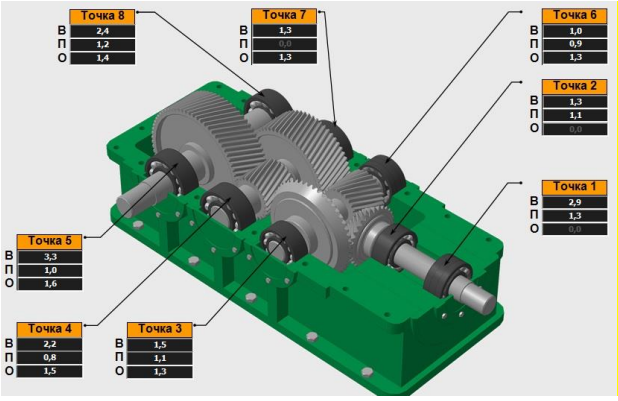


Рис. 2. Контрольные точки измерения вибрации на редукторе РКЦ-400

На представленном примере частотный диапазон (2; 3000 Гц) разделен на 27 полос, каждая из которых нормируется по среднеквадратическому значению виброскорости $V_{СКЗ}$, определенному при прямом и реверсивном вращении выходного вала.

Основные проблемы механических неисправностей горношахтного оборудования (дисбаланс, расцентровка, дефекты зубчатых передач и т.п.) приводят, как правило, к возникновению проблем функционирования опорных элементов во всевозможных приводных, преобразующих и исполнительных механизмах – подшипников качения.

В настоящее время наиболее полное представление о возможных дефектах подшипников качения приведено в [17, 18], которое, по мнению авторов [17], не является исчерпывающим, а содержит только основные встречающиеся повреждения, причины их вызывающие, и локализации повреждений.

В промышленных условиях (шахта Талдинская-Западная ОАО «СУЭК-Кузбасс») был апробирован комплексный метод оценки технического состояния приводов шахтного ленточного конвейера 3ЛЛ1600 по параметрам вибрации, смазочного масла и тепловому контролю.

В течение двух месяцев после запуска конвейера в работу производились замеры параметров вибрации редукторов P_1 - P_3 в зависимости от загрузки и скорости движения ленты конвейера (см. рис. 3, 4). Данные о загрузке и скорости записывались по показаниям мониторов частотно-преобразовательной станции, предназначенной для бесступенчатого

электрического регулирования скорости и крутящего момента одно или многодвигательного привода ленточного конвейера, а общий уровень вибрации контролировался виброанализатором «Агат-М» и анализировался с помощью программного обеспечения «Диамант».

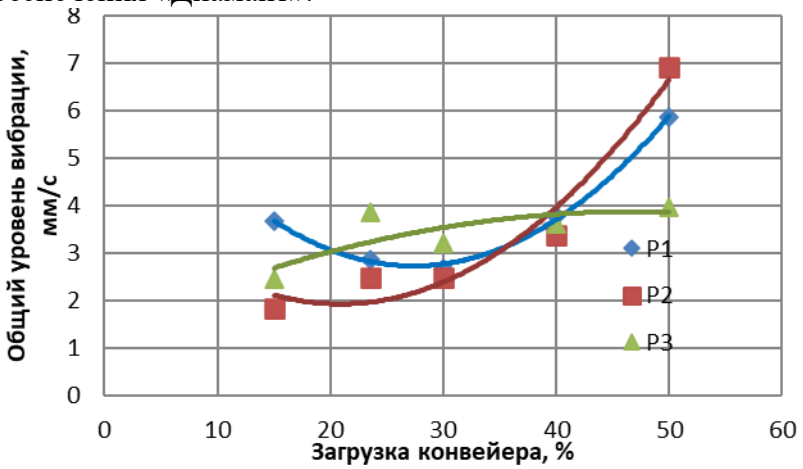


Рис. 3. График зависимости общего уровня вибрации в диапазоне 100-2000 Гц от загрузки конвейера

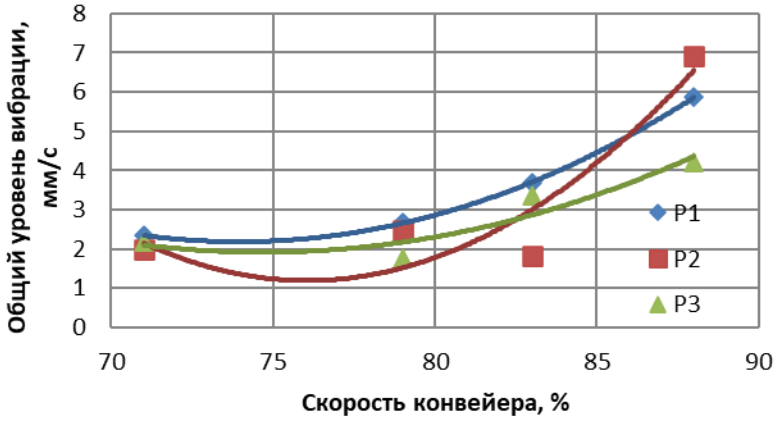


Рис. 4. График зависимости общего уровня вибрации в диапазоне 100-2000 Гц от скорости движения ленты конвейера

Особенностью приводов с регулируемой частотой вращения является зависимость уровней вибрации от частоты вращения приводного двигателя. Для стадии приработки минимальные уровни вибрации наблюдаются для уровней загрузки 25-30%.

Параллельно с анализом вибрационной нагрузки проводился анализ параметров работающего масла в зависимости от наработки ленточного конвейера.

В табл. 1-3 приведены данные о накоплении продуктов износа в масле редукторов Р1 – Р3 и предельно допустимые значения их содержания, из анализа которых следует, что практически во всех пробах содержание кремния превышает предельно допустимое значение и свидетельствует о недостаточной работоспособности применяемых в редукторах уплотнениях.

Сводные данные о температуре, вязкости и общем уровне вибрации представлены в табл. 4.

Анализируя термограммы, снятые при эксплуатационной нагрузке (рис. 5), можно сделать вывод, что наибольший нагрев отмечается в нижней части крышки выходного вала, а температуры редукторов отличаются. На основании результатов этих измерений можно получить эксплуатационную вязкость масла.

На рис. 6 приведены зависимости изменения кинематической вязкости, скорректированной с учетом температуры корпуса, от наработки приводов.

Таблица 1

Продукты износа в пробах масла редуктора Р1, г/т

Элемент	Максимально допустимое значение	Проба				
		29.08.20	19.02.21	12.03.21	06.07.21	20.11.21
Fe	200	40,34	160,12	204,8	171,52	326,32
Si	35	37,64	33,88	44,55	39,83	43,29
Cu	150	5,53	0,48	8,96	1,65	2,16
Al	7	1,52	1,54	2,38	2,00	2,09
Cr	5	0,68	1,30	1,07	1,15	1,62
Pb	-	2,55	3,45	4,23	2,48	3,44
Sn	-	5,78	9,34	7,90	6,98	10,52

Таблица 2

Продукты износа в пробах масла редуктора Р2, г/т

Элемент	Максимально допустимое значение	Проба				
		29.08.20	19.02.21	12.03.21	06.07.21	20.11.21
Fe	200	26,85	30,5853	32,3602	32,50	55,04
Si	35	33,11	31,0649	37,1218	39,42	39,64
Cu	150	7,07	2,8362	2,1811	6,42	14,75
Al	7	1,10	1,2960	1,7622	1,79	1,67
Cr	5	0,95	0,5097	0,7743	1,03	1,34
Pb	-	2,63	2,5013	2,8376	4,14	2,60
Sn	-	7,94	6,0796	7,0574	5,68	7,65

Таблица 3

Продукты износа в пробах масла редуктора Р3, г/т

Элемент	Максимально допустимое значение	Проба				
		29.08.20	19.02.21	12.03.21	06.07.21	20.11.21
Fe	200	73,17	314,64	384,1	322,45	876,71
Si	35	36,07	34,49	38,66	40,81	40,77
Cu	150	13,67	11,98	15,7125	9,81	30,63
Al	7	1,43	1,76	2,4578	2,50	2,48
Cr	5	0,87	2,54	3,1097	2,19	10,50
Pb	-	1,75	3,69	1,7229	3,46	2,28
Sn	-	6,89	10,99	12,88	13,31	27,97

Таблица 4

Показатели температуры, вязкости масла и общего уровня вибрации

№ редуктора	Температура корпуса, °С		Кинематическая вязкость, мм^2/с при 40°С,	Эксплуатационная вязкость, мм^2/с при максимальной T_{max} масла, °С	Общий уровень вибрации, мм/с
	T_{max}	$T_{ср}$			
Р1	47,0	35,6	345	290	5,9
Р2	50,7	42,0	353	270	7,2
Р3	44,2	37,4	329,7	300	4,2

а б

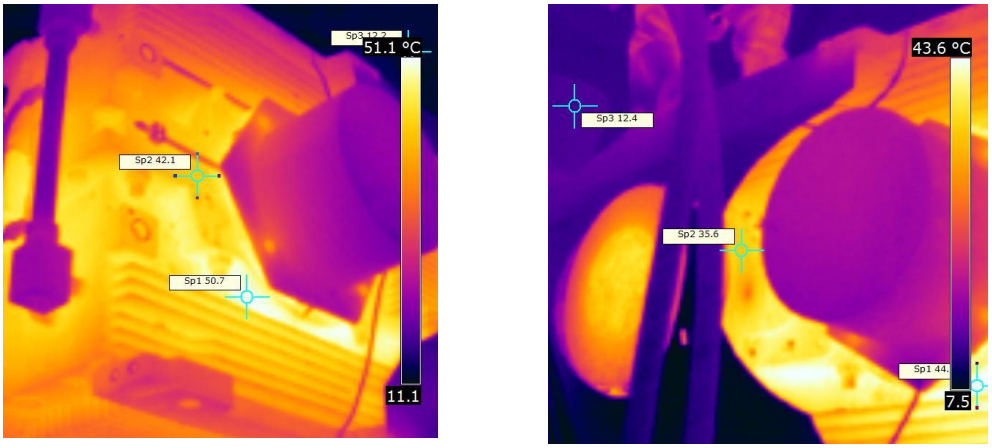


Рис. 5. Термограммы редукторов ленточного конвейера: а) редуктор Р2, б) редуктор Р3

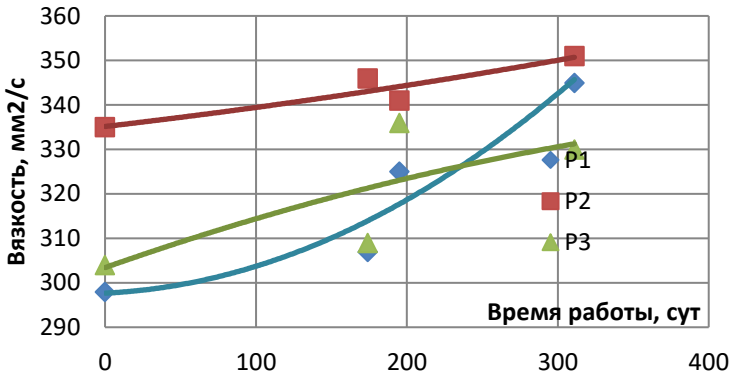


Рис. 6. Графики эксплуатационного изменения кинематической вязкости масла от наработки приводов

Сравнение результатов комплексного обследования технического состояния редукторов привода шахтного ленточного конвейера 3ЛЛ1600 можно утверждать следующее:

– по общему уровню вибрации техническое состояние привода Р1 оценивается как удовлетворительное;

– техническое состояние редуктора Р2 оценивается как допустимое (по общему уровню вибрации, по высокой температуре нагрева корпуса и низкой эксплуатационной вязкости масла). При этом нормированное значение вязкости масла самое высокое в редукторе Р2, что говорит об испарении легко кипящих фракций;

– по общему уровню вибрации техническое состояние привода Р3 оценивается как предельно допустимое, в спектре вибрации прослеживается выраженный износ элементов подшипников быстроходного вала, что подтверждается большим количеством механических примесей.

Завод изготовитель редукторов Moventas Santasalo рекомендует производить первую замену масла через 800 – 1000 часов работы, а далее через каждые 10000 часов работы или один раз в год. Фактически первая замена масла не производилась, была произведена только доливка масла через 5000 часов работы. Состояние масла в данный момент неудовлетворительное, кроме редуктора Р2. Службе главного механика шахтоуправления выданы рекомендации о необходимости замены масла в редукторах Р1 и Р3, а также подшипника на быстроходном валу.

Выводы. Предложенный подход к нормированию параметров механических колебаний может быть использован на практике, при разработке стандарта предприятия по нормированию вибрации выпускаемой продукции для включения в паспорт изделия.

Разработка большого числа спектральных масок для широкого типового ряда горной техники является одним из условий выпуска заводами горного машиностроения качественной продукции и осуществления перехода на новые формы технического обслуживания и ремонта горных машин.

Результаты оценки технического состояния приводов конвейера 3ЛЛ1600 комплексным методом, на основе мониторинга параметров виброакустических сигналов, эмиссионно-спектрального состава работающего масла и тепловизионного контроля опорных узлов подшипников качения, разрешают отследить изменение технического состояния элементов редуктора в зависимости от его нагрузки и скорости. Предложенный подход позволит не только увеличить достоверность оценки технического состояния редукторов горношахтного оборудования, но и организовать работу по созданию нормативно-методической базы для построения прогностических моделей изменения технического состояния на основе значительного объема накопленной статистической информации о развитии тех или иных дефектов редукторов ленточных конвейеров.

Список литературы

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии. Кн. 2: Вибродиагностика / Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова [и др.]. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 829 с.

2. Смирнов А. Н. Герике Б.Л., Мурвьев В.В. Диагностика технических устройств опасных производственных объектов. – Новосибирск: Наука, 2003. – 248 с.

3. Герике Б.Л., Хорешок А.А., Дрозденко Ю.В. Обеспечение качества выпускаемой продукции заводов горного машиностроения // Вестник КузГТУ. – №5. – 2016. – С. 33 – 40.

4. Гаммершмидт А. А. Состояние и перспективы развития угольной промышленности Кузбасса // Уголь. – 2015. – №5. – С. 14-15.

5. Галкин В.И., Шешко Е.Е. Транспортные машины: Учебник для вузов. – М.: Издательство «Горная книга», 2010. – 588 с.

6. Клишин В. И., Писаренко М. В. Научное обеспечение инновационного развития угольной отрасли // Уголь. – 2014. – № 9. – С. 42-46.

7. One Estimation of the Technical Condition of the Selective / V. Kovalev, A. Khoreshok, B. Gerike [et al.] // Regarding One Estimation of the Technical Condition of the Selective Headers: The conferece was funded by RFBR according to the research project, 16-05-20506. – October, 10-12, 2016, Kemerovo, Russia. – Amsterdam, Paris, Beijing: Atlantis Press, 2016. – P. 291-296.

8. Кузин Е.Г., Герике Б.Л. Мониторинг технического состояния редукторов частотно-регулируемого электропривода шахтных ленточных конвейеров. – М.: Горные науки и технологии. – 2016. – №1. – С. 13 - 19.

9. Захаров А.Ю., Ширямов Д.В. Определение критической величины сопротивления вращению конвейерных роликов // Горное оборудование и электромеханика. – 2016. – № 1. – С. 3 - 8.

10. Распознавание дефектов подшипников качения в редукторах горных машин по параметрам вибрационного сигнала / Б.Л. Герике, Ю.В. Дрозденко, П.Б. Герике [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – № 5. – С. 43 – 48.

11. Краковский Ю. М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. – Новосибирск: Наука, СО, 2005. – 200 с.

12. Kelly S. Graham. Advanced vibration analysis, 2013. – 637 p. — (Dekker mechanical engineering).

13. Капранов Б.И., Короткова И.А. Спектральный анализ в неразрушающем контроле. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 122 с.

14. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 5: В.П. Вавилов. Тепловой контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2005. – С. 9-361.

15. Профилактическое обслуживание оборудования с применением виброанализа – CSI, 1990. – 252 с.

16. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. – М., 1996 – 276 с.

17. Диагностика неполадок подшипников. – NSK Motion & Control, 2009. – 42 p.

18. Повреждения подшипников качения и их причины. – SKF AB, 2002. – 46 p.

УДК 624.138.22

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЕЙ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ НАСЫПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

к.т.н. Ланцевич М. А., к.т.н. Левенсон С.Я., Морозов А.В.
Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. Разработана и исследована установка для эффективного уплотнения насыпных материалов, оборудованная компактным виброблоком. Предлагается в качестве виброисточника использовать пневматический вибровозбудитель, обеспечивающий ассиметрично направленную регулируемую по величине и частоте вынуждающую силу.

Ключевые слова: насыпные материалы, статическое уплотнение, динамическое уплотнение, виброблок, вибровозбудитель.

Процесс получения высокоплотных упаковок насыпных материалов представляет собой важный этап в технологических процессах, применяемых в настоящее время в шахтном, дорожном, гражданском и промышленном строительстве, машиностроении, металлургии и других отраслях.

В нынешних условиях предприятия в борьбе за достижение больших выгод стремятся к сокращению затрат, в связи с этим, требования к устройствам, осуществляющим уплотнение различных материалов, становятся жестче, что, в свою очередь, стимулирует создание новых эффективных машин и развитие исследований в этом направлении [1, 2].

На сегодняшний день разработано много различных способов и технических средств, которые предназначены для уплотнения насыпных материалов, тем не менее получить максимально возможную плотность различных сыпучих материалов при сравнительно невысоких энергетических затратах не удается.

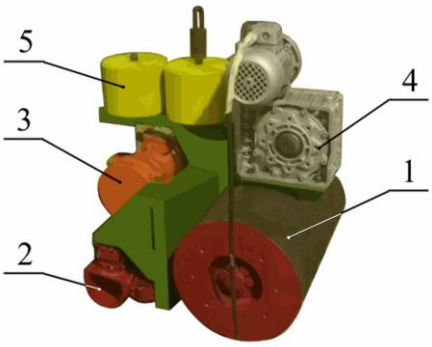
Среди уплотняющих машин и устройств наибольшее распространение получили катки и вибрационные плиты. Их конструкции все время модернизируются, разрабатывают более эффективные режимы их воздействия на уплотняемый материал, и все же избавиться от присущих им недостатков не удается. Катки обеспечивают достаточную плотность насыпных материалов за 6 – 10 проходов, а попытки создать однопроходный каток не дали ожидаемого результата [3].

Исследования подтверждают, что вибрационное воздействие дает возможность существенно повлиять на процесс уплотнения сыпучих сред и повысить его эффективность. По сравнению со статическим катком виброкаток более производителен и уменьшает количество проходов от 1,5 до 3 раз в зависимости от свойств материала уплотняемого слоя. Однако, чтобы заставить вибрировать катки большой массы, необходимо затратить значительное количество энергии, а это приводит к низкой удельной эффективности.

Сотрудниками Института горного дела СО РАН ведутся научно-исследовательские работы, устанавливающие влияние вибрационного воздействия на сыпучие материалы с целью их уплотнения. По результатам исследований разработан новый метод уплотнения различных сыпучих сред и создано устройство для его осуществления [4, 5]. Оценка

возможностей этого метода осуществлялась с помощью экспериментального модуля вибрационного устройства (рис. 1), в котором предварительное (статическое) уплотнение производилось катком 1, динамическое воздействие генерировалось виброблоком 2, масса которого и контактная площадь рабочего органа с поверхностью уплотняемого материала относительно малы, что обеспечивает высокую удельную эффективность.

Характер колебаний и амплитудно-частотная характеристика виброблока задавались маятниковым электрическим вибровозбудителем 3, реализующим направленную вынуждающую силу, действующую по нормали к поверхности уплотняемой среды. Однако изменение нагрузки на виброблоке, вызванное различными причинами (неравномерностью высоты уплотняемого слоя и насыпной плотности материала), может стать предпосылкой для существенного увеличения амплитуды его колебаний, что негативно сказывается на работе электрического вибровозбудителя и является одной из причин выхода его из строя.



1 – каток; 2 – виброблок; 3 – маятниковый электрический вибровозбудитель;
4 – привод вращения катка; 5 – пригруз

Рис. 1. Экспериментальный модуль вибрационного устройства для уплотнения насыпных материалов

Данные экспериментов представлены в виде графиков (рис. 2). Исследования проводились на сыпучей барьерной смеси (СБС), состоящей в основном из оксида кремния – 57… 60 % и оксида алюминия – 30…35 %, используемой в алюминиевой промышленности. Величина уплотнения дисперсной среды определялась измерителем плотности грунта HMR LFG.

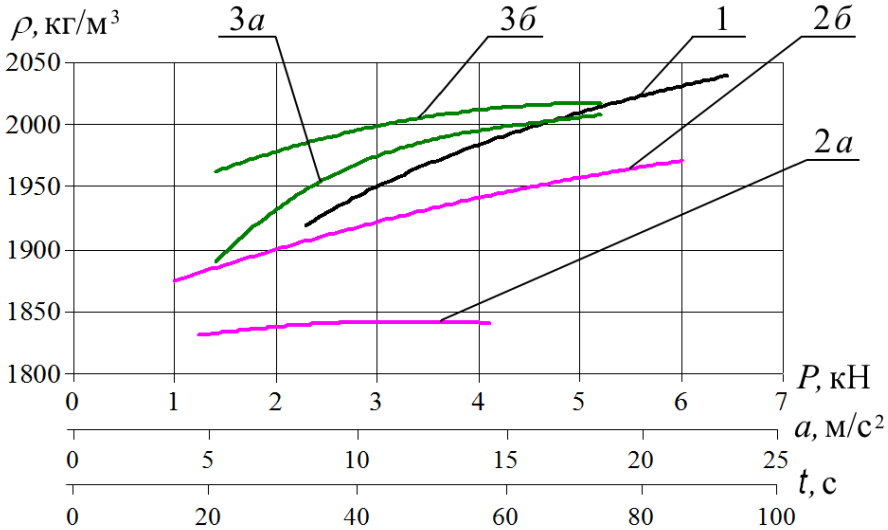


Рис. 2. Зависимость плотности материала от исследуемых параметров:
1 – вибрационного ускорения ***a***; 2 – вибрационной нагрузки ***P*** с частотами:
2*а* – ***f*** = 32 Гц; 2*б* – ***f*** = 50 Гц; 3 – времени ***t*** вибрационного воздействия:
3*а* – ***P*** = 3 кН, ***f*** = 50 Гц; 3*б* – ***P*** = 6 кН, ***f*** = 50 Гц

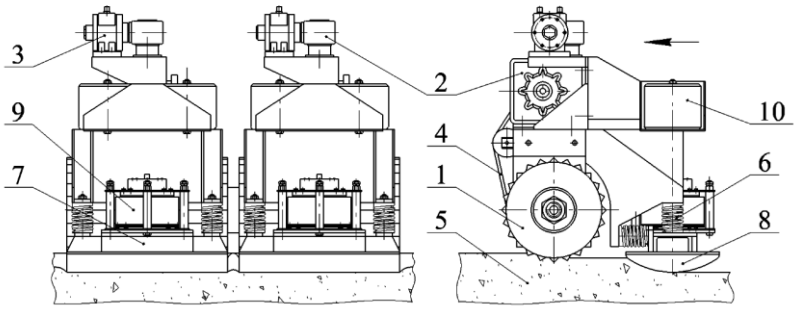
Были найдены рациональные параметры вибровоздействия и определена связь между плотностью упаковки и характеристиками режима уплотнения. Установлено, что на плотность насыпного материала при вибрационном воздействии основное влияние оказывает ускорение колебаний (рис. 2, кривая 1), передаваемых сыпучей среде, причем доминирующее значение имеет частота, при величине которой ниже 32 Гц резко снижается эффективность вибровоздействия. Увеличение же частоты вибрации от 35 до 50 Гц при прочих равных условиях позволяет повысить плотность на 5 – 8 % (рис. 2, кривые 2*а*, 2*б*). Показано, что режимы вибрационного нагружения материала характеризуются пороговым временем воздействия, дальнейшее увеличение которого не приводит к изменению плотности (рис. 2, кривые 3*а*,3*б*).

Необходимо отметить, что количественные данные относятся только к СБС, однако качественные зависимости справедливы и для других сыпучих материалов.

Как показывают исследования, за один проход экспериментального модуля вибрационного устройства можно получить упаковку высокой плотности, величина которой в основном зависит от амплитудно-частотной характеристики вибрационного воздействия на уплотняемый насыпной материал.

В Институте горного дела СО РАН для эффективного уплотнения насыпных материалов предложено устройство (рис. 3) с пневматическим приводом. Установка состоит из двух одинаковых модулей, катки 1 которых посажены на одну ось. Каждый модуль имеет свой привод 2 с пневмодвигателем 3, обеспечивающим с помощью цепной передачи 4 вращение катка, обладающего относительно большой массой, и осуществляющего предварительное статическое уплотнение насыпного материала 5. К корпусу модуля на упругих элементах 6 подвешен виброблок 7, имеющий рабочую плиту 8. Направление движения установки корректируется изменением подачи сжатого воздуха в пневмодвигатели вращения катков. При включении реверса одного из пневмодвигателей возможен разворот на любой угол, вплоть до 360°.

Для реализации динамического уплотнения в установке вместо маятникового электрического вибровозбудителя используется разработанный в ИГД СО РАН пневматический вибровозбудитель 9 (рис. 3) [6].



1 – каток; 2 – привод; 3 – пневмодвигатель; 4 – цепь; 5 – уплотняемый материал;
6 – упругая подвеска; 7 – виброблок; 8 – рабочая плита;
9 – пневматический вибровозбудитель; 10 – пригруз

Рис. 3. Установка для уплотнения насыпных материалов, разработанная в ИГД СО РАН

Схема пневматического вибровозбудителя приведена на рис. 4. Он представляет собой корпус, содержащий нижнюю плиту 1 с закрепленной на ней наковальней 2, и верхнюю плиту 3 с крышкой 4, стянутых между собой болтами через стойки 5. Между плитами расположен ударник 6, на котором с нижней стороны по периферии болтами закреплен клапан 7 с выхлопными отверстиями 8, выполненный из эластичного материала, например, конвейерной ленты, прижимающийся ударником к поверхности наковальни и закрепленной к ней в центре.

Сверху манжета 9 центральным отверстием плотно охватывает седло 10, запрессованное в ударник, с воздухоподводящим каналом 11. Манжета прикреплена по

периметру болтами к верхней плите 3. Крышка 4 представляет собой регулировочную гайку с воздухоподводящим штуцером 12, в ней с возможностью свободного осевого перемещения между ее заплечиками и упором 13, жестко связанным с ней, установлен клапан 14 с воздухоподводящими отверстиями 15.

Нижняя поверхность ударника 6 и клапан 7 образуют камеру ***А*** обратного хода, а верхняя плита 3, мембрана 9 и седло 10 – камеру ***Б*** прямого хода. Крышкой 4 и клапаном 14 образована полость ***В***.

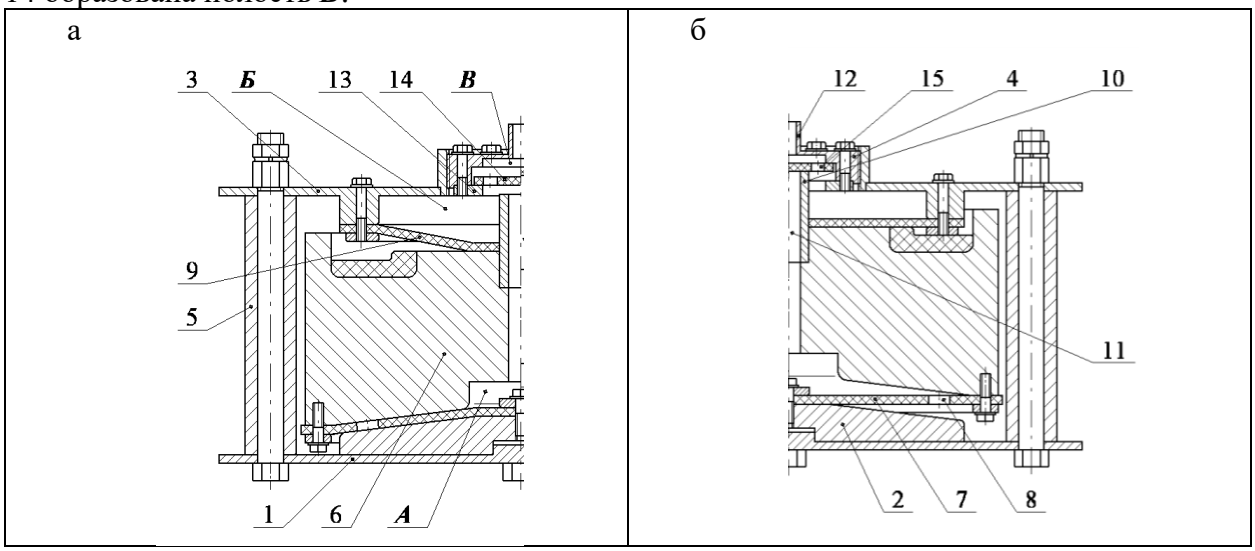


Рис. 4. Схема пневматического вибровозбудителя: а – крайнее нижнее положение ударника; б – крайнее верхнее положение ударника

В исходном состоянии ударник 6 занимают крайнее нижнее положение (рис. 4*а*), при этом он прижимает клапан 7 к наковальне 2, то есть выхлопные отверстия 8 закрыты, следовательно, камера ***А*** не сообщается с атмосферой. В то же время крышка 4 завинчена таким образом, чтобы клапан 14, удерживаемый упором 13, не прилегал к седлу 10 и, соответственно, не перекрывал воздухоподводящий канал 11.

При подаче сжатого воздуха он через штуцер 12 поступает в полость ***В***, далее через воздухоподводящие отверстия 15 клапана 14, прижатого сжатым воздухом к упору 13, в камеру ***Б*** прямого хода и через воздухоподводящий канал 11 в камеру ***А*** обратного хода. Активная поверхность ударника со стороны камеры ***А*** больше, чем со стороны камеры ***Б***, поэтому ударник под действием сжатого воздуха в камере ***А***, получая импульс силы, начинает с ускорением двигаться вверх и, увлекая за собой клапан 7, открывает выхлопные отверстия 8, выбрасывая отработанный сжатый воздух в атмосферу. При этом ударник по инерции продолжает двигаться вверх, седло 10 упирается в клапан 14, который прижимается к нему сжатым воздухом со стороны камеры ***В*** и подача сжатого воздуха в камеру ***А*** прекращается. Одновременно сжатый воздух, постоянно поступающий в камеру ***Б*** через воздухоподводящие отверстия 15, воздействует через манжету 9 на ударник 6 и плавно без удара останавливает его в крайнем верхнем положении (рис. 4*б*). Затем ударник начинает с ускорением двигаться вниз. Седло 10 отрывается от клапана 14, удерживаемого упором 13 крышки 4, открывается воздухоподводящий канал 11 и сжатый воздух поступает в камеру ***А*** обратного хода. Ударник 6 при движении вниз через клапан 7 наносит удар по наковальне 2, выхлопные отверстия 8 при этом закрываются (рис. 4*а*). Таким образом, импульс силы через корпус вибровозбудителя 9 (рис. 3.) передается на рабочую плиту 8 виброблока 7, воздействуя на уплотняемый материал 5. Далее цикл работы пневматического вибровозбудителя повторяется.

Вибровозбудитель дает возможность реализовать асимметрично направленную силу с ударом или без него с частотой от 35 до 45 Гц, интенсивно уплотняя насыпной материал на значительную глубину за один проход установки. Величина вынуждающей силы, ее

частота и асимметричность зависят от давления подводимого сжатого воздуха и положения клапана 14 относительно седла 10 путем завинчивания или отвинчивания крышки 4 (регулировочной гайки). Изменение нагрузки не оказывает какого-либо негативного влияния на работу этого источника интенсивных колебаний, что говорит о его надежности.

Выводы. Для однопроходного уплотнения насыпных материалов целесообразно использовать двухмодульную установку, обеспечивающую максимально плотную упаковку.

В результате использования в виброблоке пневматического вибровозбудителя, способного реализовать ассиметричную ударную вынуждающую силу, направленную по нормали к поверхности материала, с частотой до 45 Гц, то есть близкой к оптимальной, позволяет обеспечить эффективное уплотнение сыпучей среды.

Возможность реализации плавной регулировки величины и частоты вынуждающей силы и ее асимметричность позволяют осуществлять настройку пневматического вибровозбудителя и устройства в целом на режим, обеспечивающий требуемые параметры уплотнения, что повышает его эффективность.

Список литературы

1. Бауман В.А., Быховский И.И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. – М.: Высшая школа, 1977.– 255 с.

2. Захаренко А.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов уплотнения катками грунтов и асфальтобетонных смесей: автореферат дисс. докт. техн. наук: 05.05.04 Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия. – Омск, 2005. – 48 с.

3. Зубкин В.Е., Коновалов В.М., Королев Н.Е. Способ нагнетающей укатки и классические дорожные катки // Строительные и дорожные машины. – 2001. – № 3. – С. 12–14.

4. Результаты исследования процесса уплотнения дисперсных материалов вибрационным способом / Л.И. Гендлина, С.Я. Левенсон, Ю.И. Еременко [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 8.– С. 255–259.

5. Патент на изобретение RU № 2296819, МПК C25C 3/06 (2006.01) Способ формирования бесшовных футеровачных слоев в алюминиевых электролизерах и устройство для его осуществления / А.В. Прошкин, В.В. Пингин, В.С. Тимофеев [и др.]. – № 20051266100/02; заявл. 17.08.2005 опубл. 10.04.2007, Бюл. № 10, – 8 с.

6. Патент на изобретение RU № 2666831, МПК F15B 21/12 (2006.01) Пневматический вибратор (варианты) /М.А. Ланцевич, С.Я. Левенсон. – № 2017134233; заявл. 02.10.2017; опубл. 12.09.2018, Бюл. № 26. – 15 с.

УДК 622.646

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ДВУХПРИВОДНОГО ТРАНСПОРТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С КРИВОЛИНЕЙНЫМ УПРУГИМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ

[1,2]к.т.н. Куликова Е.Г.

1 – Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

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

Аннотация. Приведены результаты численных исследований влияния второго источника колебаний на равномерность вибрационного поля вдоль криволинейного упругого рабочего органа и величину напряжения последнего. Рассмотрены варианты работы вибровозбудителей в синхронном режиме и режиме биений. Установлено

рациональное расположение второго виброисточника относительно грузонесущей поверхности устройства.

Ключевые слова: вибрационный питатель, упругий рабочий орган, амплитуда колебаний, синхронный режим, режим биений.

Разработка прогрессивных геотехнологий с целью увеличения объемов добычи полезных ископаемых связана с созданием новой техники и повышением эффективности существующей. Среди оборудования горных предприятий, используемого в технологиях открытой и подземной добычи полезных ископаемых, существует большой ряд машин – питателей [1–3], разработанных для организации перегрузочных пунктов и безперебойной связи различных видов транспорта.

Вибрационные питатели [4–10] отличаются простотой конструкции и обслуживания, а также имеют возможность автоматизации процесса перемещения сыпучих материалов. Вибропитатели с упругим рабочим органом, созданные в лаборатории вибротехники ИГД СО РАН, [11–13] имеют рабочий орган малой изгибной жесткости, свободно укладываемый на раму и при работе совершающий волновое движение под действием вынуждающей силы виброисточника, закрепленного на его разгрузочном участке. Несмотря на компактность, малую массу и возможность реализации различных режимов транспортирования при работе такой машины под завалом фиксируется интенсивное затухание колебаний, передаваемых от виброисточника вдоль грузонесущей поверхности, что может быть причиной трубо- и сводообразования сыпучего материала в сходящихся каналах накопительных емкостей и выработок.

Замена прямолинейного рабочего органа на криволинейный позволила частично решить эту проблему [14–17] за счет создания искусственной поверхности, приближенной к естественным поверхностям скольжения отдельных слоев сыпучего материала друг относительно друга при свободном истечении. Благодаря этому движение породы из области отбойки в область складирования становится равномернее, без перемешивания отдельных слоев руды и пустой породы, что исключает сводообразование в сходящемся канале рудоспуска или выпускной воронки накопительной емкости и предотвращает перемешивание отдельных слоем выпускаемой сыпучей массы и разубоживание породы. Однако кривизна рабочего органа может стать причиной появления дополнительного сопротивления распространению изгибных колебаний вдоль его поверхности и усиления их затухания при передаче на загрузочный участок грузонесущего органа. Результаты ранее проведенных исследований влияния формы упругого рабочего органа на амплитуду его колебаний пока не дали окончательного решения описываемой проблемы.

Для выравнивания вибрационного поля вдоль прямолинейной грузонесущей поверхности питателя было предложено использовать несколько дебалансных вибровозбудителей. Их способность к самосинхронизации позволяет добиться поставленной цели без усложнения конструкции и увеличения металлоемкости устройсва. Исследования устойчивости синхронного вращения всех дебалансов позволили установить необходимые соотношения расстояния между виброисточниками, амплитудой и частотой создаваемой ими вибрации [18, 19]. Динамика криволинейного рабочего органа, оборудованного дополнительным виброисточником исследована, не была.

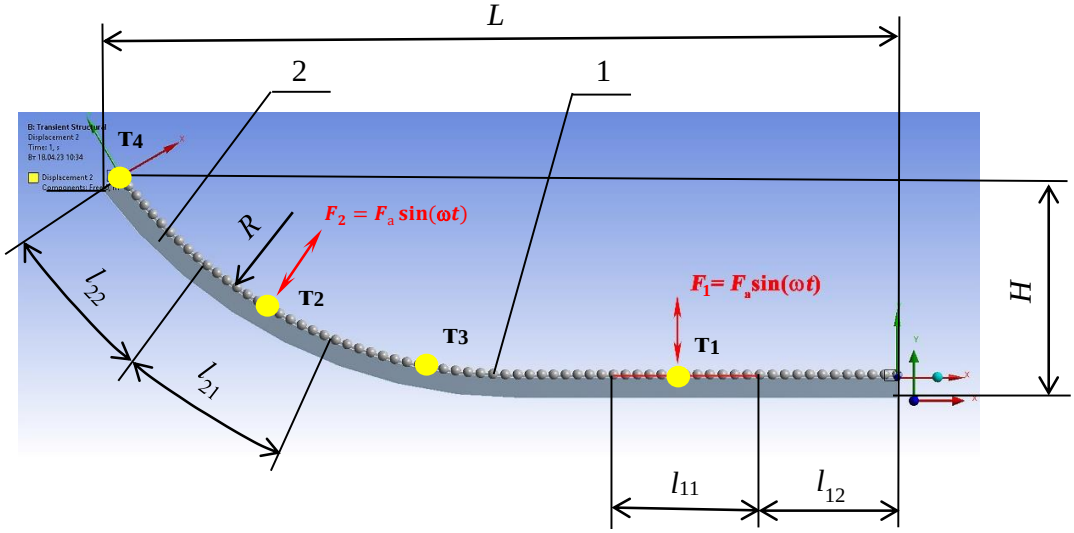
Кроме того, в результате лабораторных исследований было установлено, что малая изгибная жесткость прямолинейного упругого рабочего органа позволяет эффективно реализовывать не только синхронный режим работы вибровозбудителей, но и режим биений [20, 21]. В последнем случае усиливается волновой характер движения рабочего органа, устраняются участки транспортирующей поверхности с амплитудой колебаний близкой к нулю и застоем сыпучего материала без увеличения вынуждающей силы вибровозбудителей и роста напряжения как в самом рабочем органе, так и в его опорной

раме. Подобные исследования динамики криволинейного рабочего органа также пока не проводились.

Поэтому целью выполненных исследований являлась проверка возможности использования дополнительного виброисточника для привода криволинейного упругого рабочего органа. Решаемые задачи включали в себя определение рационального расположения второго источника колебаний и выбор режима совместной работы вибровозбудителей.

Физический эксперимент – трудоемкий и дорогостоящий процесс. Современное развитие вычислительных комплексов позволило для решения поставленных задач заменить его численным моделированием с помощью программного комплекса ANSYS.

Исследования динамики системы «рабочий орган – сыпучий материал – упругое основание» в установившемся режиме вынужденных колебаний выполнялись с помощью доработанной расчетной схемы [17] (рис. 3).



1 – рабочий орган; 2 – упругое основание

Рис. 1. Расчетная схема вибрационного транспортирующего устройства

Рабочий орган представлял собой балку, состоящую из прямолинейного разгрузочного и криволинейного загрузочного участка, описываемого дугой с радиусом R, равным 37% от габаритной длины балки L. Площадка крепления одного из вибровозбудителей была принята в виде участка длиной l_{11}, находящегося на расстоянии l_{12} от правого конца балки. Площадка крепления второго вибровозбудителя – участка длиной l_{21}, находящегося на расстоянии l_{22} от левого конца балки. Нижней кромкой по всей длине балка свободно контактировала с упругим основанием, профиль которого повторял ее форму.

Толщина балки равнялась 0,004L. Ее габаритные высота H и длина L, радиус кривизны загрузочного участка R, длины участков l_{11}, l_{21} и l_{12} принимались постоянными. Расстояние l_{22} имело переменное значение в диапазоне (0,15 – 0,35)L.

Задача решалась в плоской постановке.

Для удобства вычислений помимо глобальной было введено две локальных системы координат, начала которых совпадало с левой точкой участка l_{21} и крайней левой точкой балки соответственно, а оси абсцисс направлены по касательным к дугам кривых, описывающих соответствующе участки.

В качестве граничных условий было принято жесткое закрепление нижней линии основания и фиксация правого конца балки по оси абсцисс.

Колебания балки создавались вынуждающими силами F_1 и F_2 , прикладываемыми к участкам l_{11} и l_{21} соответственно по нормали и изменяющимися по гармоническому закону:

$$F = F_a \sin\omega t,$$

где $F_а$, ω – амплитуда и круговая скорость вынуждающей силы соответственно; t – время.

Рассматривались варианты приложения сил по-отдельности и совместно. Во всех экспериментах принималось фиксированное значение силы $F_а$. Круговая скорость вибрации первого виброисточника ω_1 была равной 110, 200 или 314 рад/с, ω_2 варьировалась относительно ω_1 в диапазоне от 0 до ± 20 рад/с.

Влияние сыпучего материала на динамику упругого рабочего органа моделировалось в виде присоединенной массы, равномерно распределенной по всей длине балки.

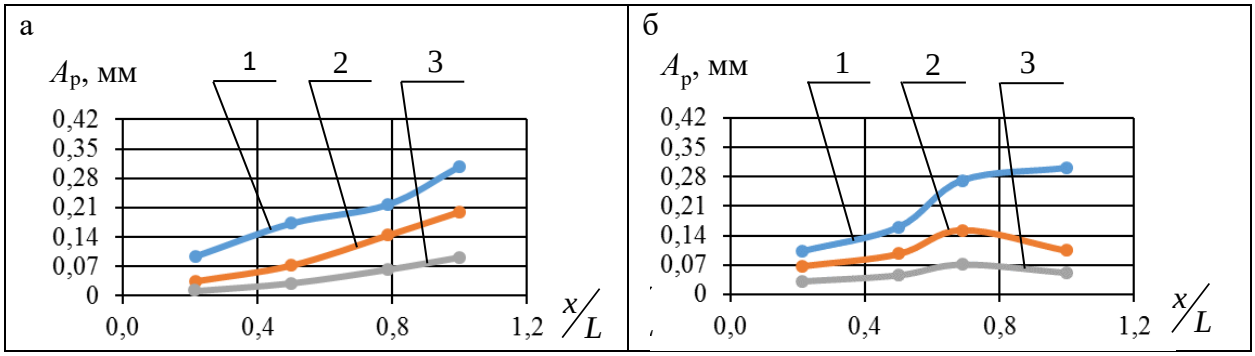
Собственный вес колебательной системы не учитывался.

При использовании программного комплекса ANSYS модель была разбита на 4-узловые элементы Plane 42. Присоединенная масса сыпучего материала была введена с помощью элементов Mass21, сосредоточенных в верхних узлах упругой балки. В качестве материала балки из стандартной библиотеки выбрана сталь (Structural Steel) с модулем упругости $E = 2\cdot10^{11}$ Па, коэффициентом Пуассона μ = 0,3 и пределом прочности $[\sigma_{доп}]$ = 175 МПа, упругого основания – модель материала с нелинейной характеристикой Elastomer Sample (Mooney-Rivlin) с плотностью 1720 кг/м^3, экспериментально определенными коэффициентами $C10 = 1{,}839\cdot10^7$ Па, $C01 = -1{,}3475\cdot10^7$ Па и параметром несжимаемости $D1 = 4{,}8865\cdot10^5$ Па$^{-1}$, а также пределом прочности при сжатии $[\sigma_{сж}]$ = 54 МПа (принят по аналогии с природным каучуком).

По результатам каждого эксперимента рассчитывался размах виброперемещения в точках **т1** и **т2** на участках приложения вынуждающих сил (рис. 1), в центральной точке **т3** и крайней левой точке **т4** балки, а также наибольшие напряжения по Мизесу в балке $\sigma_{ро}$ и упругом основании $\sigma_{уо}$. Координаты контрольных точек откладывались от правого конца балки и принимались относительно полной длины балки. Размах виброперемещения в каждой из них $A_р$ рассматривался по абсолютной величине и относительно размаха в точке **т1** $A_{р1}$.

В начальный момент времени все перемещения и скорости вибросистемы были приняты равными нулю.

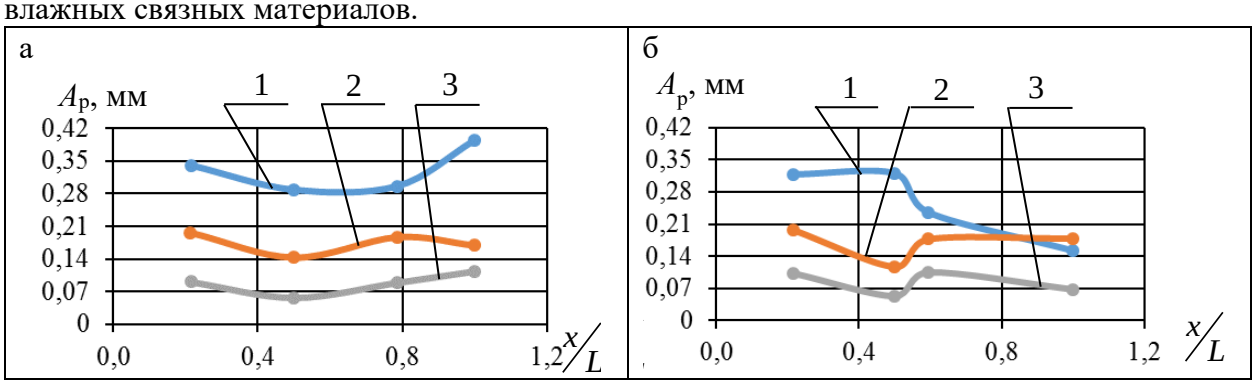
Анализ действия только силы F_2 показал, что ее приложение целесообразно на расстоянии не более 0,29L от загрузочной кромки рабочего органа (рис. 2). При угловой скорости ω более 200 рад/с создаются колебания криволинейного участка, размах которых практически равен размаху колебаний прямолинейного участка в точке **т1**, возникающих под действием только F_1 (рис. 2, *а*). Затухание вибрации, передаваемой при этом из **т2** в **т2** составляет 2,3 – 5,2 раза. Удаление вибровозбудителя от загрузочной кромки рабочего органа к центру приводит к уменьшению затухания до 2,2 – 2,6, однако и к снижению размаха колебаний загрузочного участка (рис. 2, *б*).



относительная координата приложения вынуждающей силы F_2 на загрузочном участке: *а* – $l_{22} = 0{,}15L$, *б* – $l_{22} = 0{,}29L$;
угловая скорость вынужденных колебаний: 1 – 110 рад/с; 2 – 200 рад/с; 3 – 314 рад/с

Рис. 2. Распределения амплитуд вибрации вдоль рабочего органа, создаваемой только силой F_2

В следствие этого при угловой скорости вибрации ω до 100 – 120 рад/с совместное действие виброисточников, работающих в синхронном режиме, позволяет выровнять амплитуду колебаний на загрузочном и разгрузочном участках рабочего органа. С увеличением ω снижается интенсивность колебаний на центральном участке в точке **т2** (рис. 3,*а*). В реальных условиях это может привести снижению скорости перемещения сыпучего материала, перемешиванию отдельных слоев и разубоживанию выпускаемой руды, скоплению и налипанию на транспортирующую поверхность при перемещении влажных связных материалов.



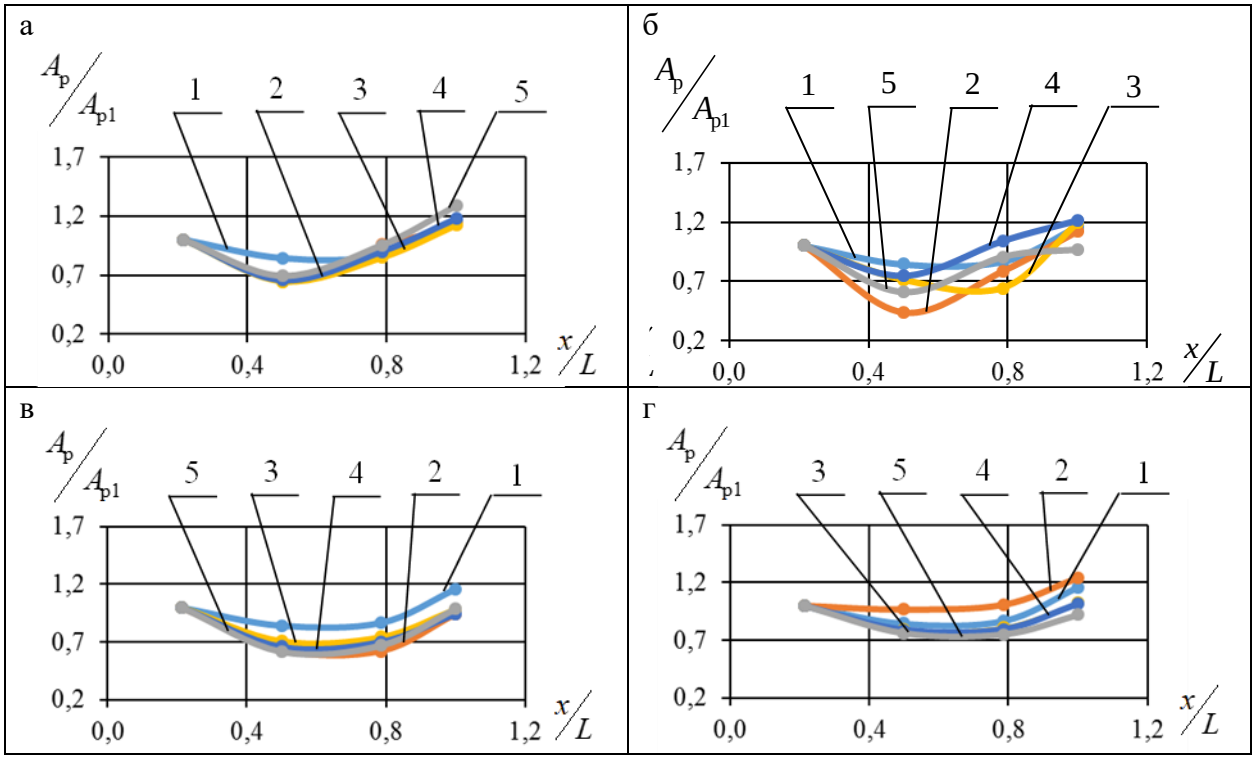
относительная координата приложения вынуждающей силы F_2 на загрузочном участке: *а* – l_{22} = 0,15*L*, *б* – l_{22} = 0,29*L*;
угловая скорость вынужденных колебаний: 1 – 110 рад/с; 2 – 200 рад/с; 3 – 314 рад/с
Рис. 3. Распределение амплитуд вибрации вдоль рабочего органа, создаваемой синхронно действующими силами F_1 и F_2

Увеличение расстояния l_{22} до 0,29*L* приводит к небольшому росту размаха виброперемещения в точке **т2** при угловой скорости вынуждающей силы 110 рад/с, но дальнейшее повышение ω не дает роста амплитуды (рис. 3,*б*). Кроме того, при угловой скорости ω менее 314 рад/с удаление точки приложения F_2 от загрузочной кромки сопровождается снижением размаха колебаний криволинейного участка.

Таким образом, в рассматриваемом частотном диапазоне целесообразно, чтобы дополнительный вибровозбудитель крепился на расстоянии не более l_{22} = 0,29*L* от загрузочной кромки рабочего органа. И даже в этом случае использование двух синхронно работающих виброисточников не обеспечивает равномерного распределения вибрационного поля вдоль криволинейного рабочего органа. Также стоит отметить, что достижение самосихранизации дебалансных виброисточков в таких условиях при переменной нагрузке выпускаемого сыпучего материала – сложная инженерная задача.

В случае реализации режима биений при l_{22} = 0,15*L* изменение угловой частоты ω_2 относительно ω_1 = 314 рад/с как в меньшую, так и в большую сторону не дало необходимого выравнивания вибрационного поля, что объясняется малой длиной и быстрым затуханием изгибных волн, распространяемых от виброисточников в направлении друг друга (рис. 4, *а* и *б*).

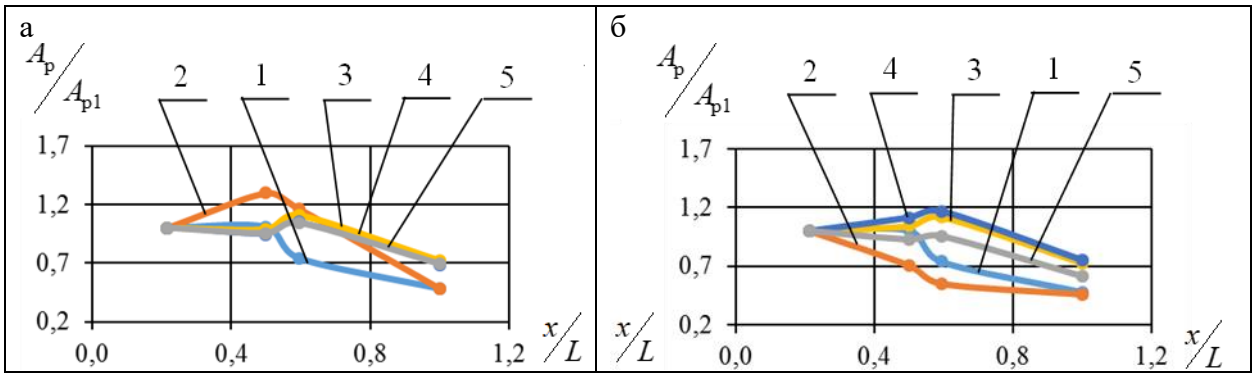
При работе в частотном диапазоне ω_2, близком к ω_1 = 110 рад/с, снижение угловой скорости ω_2 в пределах 20 рад/с приводит к уменьшению виброперемещения на 10 – 30 % в зависимости от рассогласования угловых скоростей. В связи с этим амплитуда колебаний в центральной точке т3 также ниже, чем в точке **т1** (рис. 4, *в*). Рост частоты приложения вынуждающей силы в точке **т2** в пределах 1 рад/с позволяет не только увеличить размах виброперемещения в этой точке, но и обеспечивает более равномерное распределение вибрации вдоль транспортирующей поверхности виброустройства. Однако дальнейшее увеличение разницы $\omega_2 - \omega_1$ несколько снижает интенсивность вибрации по длине рабочего органа. Распределение вибрационного поля становится схожим с распределением, создаваемым при работе вибровозбудителей в синхронном режиме (рис. 4, *г*).



фиксированное значение ω_1 : *а*, *б* – 314 рад/с, *в*, *г* – 110 рад/с;
разница угловых скоростей $\omega_1 - \omega_2$ (*а*, *в*) и $\omega_2 - \omega_1$ (*б*, *г*):
1 – 0 рад/с, 2 – 0,5 рад/с, 3 – 5,0 рад/с, 4 – 10 рад/с, 5 – 20 рад/с;

Рис. 4. Зависимость отношения размаха виброперемещения $A_р$ к размаху в точке **т1** $A_{р1}$ от относительной координаты каждой контрольной точки при приложении вынуждающей силы F_2 на расстоянии $l_{22} = 0{,}15L$

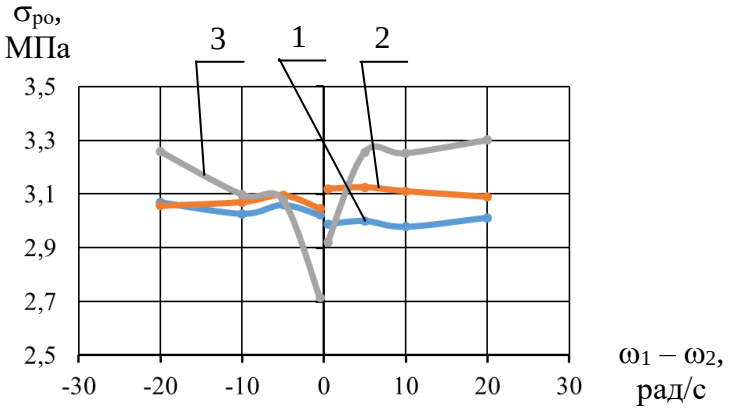
Смещение точки приложения вынуждающей силы F_2 к центру рабочего органа на расстояние $l_{22} = 0{,}33L$ привело к тому, что даже снижение угловой скорости ω_1 до 110 рад/с и реализация различных режимов биений с разницей угловых скоростей $\omega_1 - \omega_2 = -20\ldots +20$ рад/с не предотвращает резкого падения интенсивности колебаний криволинейного загрузочного участка рабочего органа (рис. 5).



разница угловых скоростей $\omega_1 - \omega_2$ (*а*, *в*) и $\omega_2 - \omega_1$ (*б*, *г*):
1 – 0 рад/с, 2 – 0,5 рад/с, 3 – 5,0 рад/с, 4 – 10 рад/с, 5 – 20 рад/с;

Рис. 5. Зависимость отношения размаха виброперемещения $A_р$ к размаху в точке **т1** $A_{р1}$ от относительной координаты каждой контрольной точки при приложении вынуждающей силы F_2 на расстоянии $l_{22} = 0{,}33L$ и фиксированном значении $\omega_1 = 110$ рад/с

Расчет напряжений, возникающих в рабочем органе, показал, что основное значение имеет взаимное расположение двух виброисточников, работающих в режиме биений. С приближением точки приложения дополнительной вынуждающей силы к центру, и соответственно, к точке приложения основной силы F_1 на расстояние 0,17L напряжение рабочего органа возросло в 1,06…1,10 раза (рис. 6) в независимости от того, какая из двух угловых скоростей больше. Наименьшее напряжение создается при наиболее удаленном приложении сил F_1 и F_2 друг от друга, практически не зависит от разницы угловых скоростей.



относительное расстояние приложения вынуждающей силы F_2 на загрузочном участке l_{22}: 1 – 0,15L, 2 – 0,29L, 3 – 0,33L

Рис. 6. Зависимость наибольшего напряжения, возникающего в рабочем органе в процессе вынужденных колебаний от разницы угловых скоростей с фиксированным значением ω_1 = 110 рад/с

Полученные значения напряжения в упругом основании составили не более 0,1 от напряжений в рабочем органе в независимости от рассматриваемого режима колебаний.

Выводы. Использование вибропитателей с криволинейным упругим рабочим органом позволяет создавать поверхности, близкие к естественным поверхностям скольжения, возникающим между слоями сыпучего материала при гравитационном истечении, и тем самым улучшать условия вибрационного выпуска сыпучих материалов.

Для уменьшения затухания колебаний загрузочного участка такого рабочего органа длиною L может быть использован дополнительный виброисточник. При угловой скорости вибрации 100 – 120 рад/с он должен быть закреплен на расстоянии (0,15 – 0,25)L от загрузочной кромки.

Предпочтительно, чтобы вибровозбудители работами в режиме биений с разницей угловых скоростей 0,5 – 1,0 рад/с.

Предлагаемое расположения дополнительного вибровозбудителя позволяет реализовать режим биений без увеличения напряжения как в рабочем органе, так и в упругом основании в сравнении с работой в синхронном режиме.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта НИР (№ государственной регистрации 121052600390-5).

Список литературы

1. Власов В.Н., Клишин В.И. Способы разработки месторождений с обрушением и одновременным дозированным вибровыпуском руды под покрывающими породами // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 7. – С. 248–254.

2. Устройство для выпуска угля на конвейер / С.М. Никитенко, Е.А. Худынцев, С.А. Кизилов [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2020. – № 3 (149). – С. 55-61.

3. Интенсификация погрузочно-транспортных работ на карьерах / С.Г. Молотилов, Е.И. Васильев, О.Б. Кортелев [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 208 с.

4. Денцов Н.Н. Экспериментальное исследование технических характеристик вибрационного питателя с параметрическим возбуждением // Вестник Башкирского университета. – 2020. – Т. 25. – № 2. – С. 232–238.

5. Electric vibrating feeders (vibrating feeders). – Site access mode: http://www.mtspb.com//production_current.php?id=4&id_group=22.

6. Vibrating feeder. – Site access mode: http://www.break-day.com/ru/vibrating_feeder.htm.

7. Vibratory Rock Screens / Feeders. – Site access mode: http://www.generalkinematics.com/mining/proddesc.cfm/productid/94.

8. Бауман В.А., Быховский И.И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. – М., 1977. – 255 с.

9. Dey K., Gobetti A., Ramorino G. Advances in understanding of multiple factors affecting vibra-tion weld strength of thermoplastic polymers // Journal of Advanced Joining Processes. – 2023. – № 8. – 20 pp.

10. Suaza-Montalvo A., Cares-Pacheco V.G., Falk V. Time-dependent behaviour of industrial granu-lar materials under vibration: Modelling and phenomenology // Chemical Engineering Science. – 2023. – № 271. – 13 pp.

11. Вибрационное воздействие на сыпучую среду при выпуске ее из емкости / А.Я. Тишков, Л.И. Гендлина, Ю.И. Еременко [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2000. – №1. – С. 55-60.

12. Гендлина Л.И., Левенсон С.Я. К проблеме выпуска связных материалов вибрационным способом // Интерэкспо ГЭО-Сибирь-2017. XIII междунар. науч. конгр.: междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов. – Новосибирск: СГГА, 2017. – Том 2. – № 2. – С. 154–158.

13. Левенсон С.Я., Гендлина Л.И., Куликова Е.Г. Условия реализации эффективного вибровыпуска материалов в современных технологиях добычи и переработки полезных ископаемых // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. Новосибирск. – 2017. – Т.4. – С. 28–33.

14. Зимонин Л.В. Разработка вибропитателей с упругим криволинейным рабочим органом. Диссертация канд. техн. наук по специальности 05.05.06. Новосибирск. 1986. 164 с.

15. Зимонин Л.В. Исследование производительности криволинейной виброленты // Виброударные процессы в строительном производстве: сб. – Новосибирск, 1986. –С. 23–27.

16. Зимонин Л.В. Повышение эффективности выпуска руды с использованием вибролент // Научные основы механизации открытых и подземных горных работ: сб. – Новосибирск, 1983. – С. 17–21.

17. Куликова Е.Г. Результаты исследования влияния кривизны упругого рабочего органа вибропитателя на параметры его колебаний // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2023. – № 9. – С. 162–168.

19. Левенсон С.Я., Куликова Е.Г. К вопросу обеспечения самосинхронизации дебалансных вибровозбудтелей транспортирующих устройств карьерного отвалообразователя // Интерэкспо ГЭО-Сибирь-2019. XV междунар. науч. конгр.: междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разра-ботки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов. – Новосибирск: СГУГиТ, 2019. – Т. 2. – № 4. – С. 146–154.

19. Куликова Е.Г., Усольцев В.М. К вопросу обеспечения стабильности синхронной работы инерционных вибровозбудителей вибрационных устройств для выпуска и перемещения горной породы // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Том 6. – № 2. – С 164–170.

20. Куликова Е.Г., Левенсон С.Я. Определение режима работы вибрационных устройств с упругим рабочим органом при просушивании сыпучих геоматериалов // ФТПРПИ. – 2021. – № 3. – С. 110–121.

21. Куликова Е.Г., Усольцев В.М. Некоторые результаты экспериментальных исследований динамики двухприводного вибрационного устройства для транспортирования геоматериалов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2022. – Том 9. – № 1. – С 155–161.

УДК 621.225.2 + 622.236

РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ СМЕННОГО ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО КОВШОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭКСКАВАТОРОВ

Городилов Л.В., Коровин А.Н.
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. Выбрана конфигурация размещения гидроударного оборудования в ковше активного действия гидравлического экскаватора. Разработана 3D модель ковша активного действия. Разработана принципиальная схема управления СГУ с редукционным клапаном, с обоснованием выбранной комплектации и компановки.

Ключевые слова: гидравлический экскаватор, ковш активного действия, гидроударное устройство, рабочий цикл, высокопроизводительное оборудование.

В области открытых горных работ при добычи полезных ископаемых помимо производственных задач и планов, острыми вопросами стоят необходимость в снижении эксплуатационных потерь полезных ископаемых и снижении уровня загрязнения окружающей среды в процессе добычи.

Эксплуатационные потери образуются в основном при отбойке и выемке вследствие того, что некоторая часть полезного ископаемого оказывается примешанной к вмещающим породам и отгружается вместе с ними в породные отвалы.

Таким образом, эксплуатационные потери приходится компенсировать за счет увеличения мощностей по добыче и переработке, что ведет к отторжению новых земель и загрязнению окружающей среды отвалами. Наряду с высоким уровнем потерь горнодобывающая промышленность характеризуется также и высоким уровнем загрязнения окружающей среды. Особенно четко это проявляется на открытых горных работах, проводимых с использованием буровзрывной технологии. При проведении массового взрыва на карьере в атмосферу выделяются CO, H_2O_5, причем загрязнения носит как местный, так и общий характер. При бурении скважин выделяется большое количество пыли. Кроме этого, нельзя не отметить негативного сейсмического эффекта взрыва и сопровождающего его шума.

В зарубежной практике горного производства все большее распространение находит безвзрывной способ, при котором разрушение обрабатываемой среды из крепкого материала осуществляется путем нанесения на него ударных импульсов различной частоты и мощности. [1]

В ИГД СО РАН в 80-90-е годы прошлого века были созданы ковши активного действия (КАД) для экскаваторов строительного и карьерного классов [2-6]. В первых образцах экскаваторных ковшей активного действия в качестве привода ударных зубьев использовали пневмомолоты ПН1300 и ПН1700 с энергией удара соответственно 1,3 и 1,7 кДж. Как показали испытания, сменное рабочее оборудование к строительному экскаватору ЭО-4121 (ковш активного действия, оснащенный 3-я пневмомолотами ПН1300) позволяло

эффективно разрабатывать без предварительного рыхления мерзлые грунты V-VIII категорий, а также горные породы (сланцы и мелкотрещиноватые граниты) прочностью до 60 МПа [5, 6].

В настоящее время этот опыт остался в прошлом, что в определенной степени обусловлено недостаточной мощностью и технологичностью, применявшейся в ковше ударной системы, оснащенной пневмомолотами. Устранение этих недостатков возможно с применением гидроударных устройств (ГУ) [7, 8], которые позволяют обеспечить требуемую энергонасыщенность КАД и использовать в качестве источника рабочего тела маслостанцию экскаватора. Поэтому создание систем гидроударных устройств (СГУ) для ковшей строительных гидравлических экскаваторов, позволяющих разрабатывать прочные горные породы, представляется перспективным направлением развития открытых горных технологий и может быть отнесено к разряду прорывных технологий.

В связи с использованием в качестве динамических зубьев гидроударных устройств (ГУ), встает вопрос о параметрах и характеристиках последних. Так как задача отличается от стандартных, то для ее решения требуется особый подход к выбору ГУ. Необходимо удовлетворить условиям их компактности (чтобы не снижать емкость ковша) и высокую энергонасыщенность (чтобы обеспечить производительность экскаватора по выемке пород) при низком потребляемом расходе рабочей жидкости (чтобы обеспечить привод гидроцилиндров рукояти и ковша в процессе работы). Существующие на рынке предложения гидромолотов не могут в полном объеме удовлетворить этим требованиям.

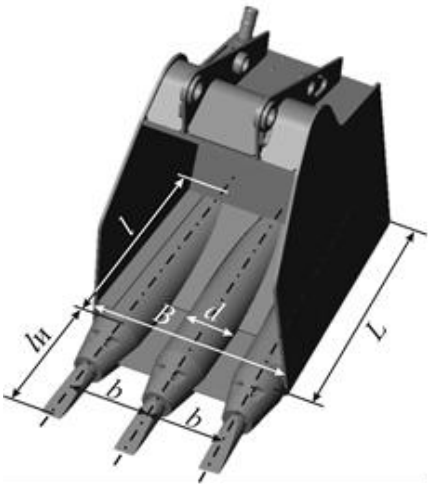
Поэтому была предложена конструкция гидроударного устройства с регулируемой энергией ударов [8]. Она предполагает начало обратного хода бойка после того, как давление в гидросистеме повысится до величины, которая, по нашему мнению, целесообразна в системе ГУ (СГУ) активных исполнительных органов горных машин, так как расход здесь регулируется редукционным клапаном в зависимости от давления за ним и может автоматически изменяться при изменении числа одновременно работающих устройств.

Эта схема предполагает ограничение по давлению в СГУ, которое достигается установкой редукционного клапана (КР) на ее входе. КР предполагает ограничение потока жидкости таким образом, чтобы давление на входе в ударные устройства не превышало заданной величины. При этом потери расхода, при ограничении жидкости, поступающей к ГУ, идущие на управление КР составляют величину, не превышающую 1% от общей подачи жидкости к СГУ.

Представляется, что при такой схеме подключения СГУ расход, поступающий к каждому из работающих устройств, будет определятся настройкой КР вне зависимости от числа одновременно работающих устройств.

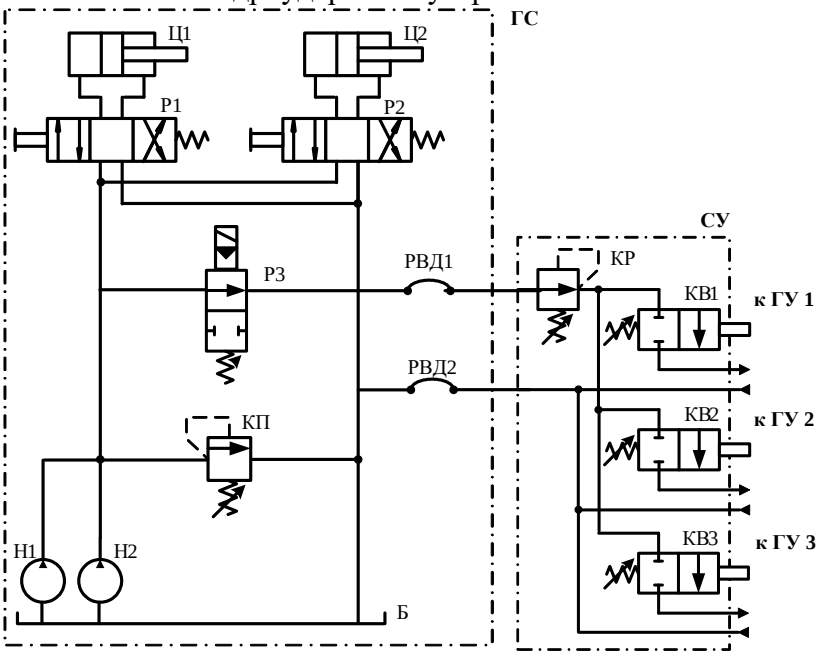
Был проведен обзор конструктивных схем ковшей активного действия карьерных и строительных экскаваторов, предназначенных для разработки прочных материалов (в том числе мерзлых грунтов) и горных пород [9]. Их изучение и анализ позволяет выбрать как показавшую наилучшие результаты при испытаниях и наиболее перспективную схему, в которой активные зубья встраиваются наряду со статическими зубьями в переднюю стенку ковша в специальные гильзы-кожухи. Исходя из размеров ковша экскаватора и планируемых параметров ГУ, рассматривали конструкции КАД с 2-я или 3-я ударными устройствами. На рис. 1 представлена 3D-модель ковша с 3-я ГУ с указанием размеров его передней стенки и кожухов ударных устройств и инструмента.

Данная 3D-модель, по нашему мнению, может быть использован за основу при разработке конструкции КАД и общей гидравлической схемы экскаватора с включением в нее гидроударных устройств (ГУ), схемы управления потоками жидкости, идущими к СГУ и к рабочим цилиндрам экскаватора. Уточнения с учетом имеющихся данных, возможно дополнительных опытов, требует величина энергии удара, необходимая для полного разрушения материала перед кромкой передней стенки ковша.



B и *L* ширина и длина передней стенки ковша; *l* и *d* – длина и диаметр кожуха ГУ;
l – длина инструмента, *b* – расстояние между осями кожухов ГУ
Рис. 1. 3D-модель КАД экскаватора

На рис. 2 представлена упрощенная принципиальная схема гидросистемы экскаватора с насосом, предохранительным клапаном ПК, распределителями Р, гидроцилиндрами Ц, гибкими рукавами высокого давления РВД и подключенной к ним системой ГУ, состоящей из схемы управления СУ с редукционным клапаном КР, клапанами включения/выключения КВ и гидроударными устройствами ГУ.



ГС – гидравлическая система базовой машины (Б – гидробак; Н1, Н2 – насосы;
Р1, Р2, Р3 – гидрораспределители; КП – клапан предохранительный первичной защиты;
Ц1, Ц2 – гидроцилиндры); СУ – схема управления системой гидроударных устройств
(КР - редукционный клапан; КВ1…КВ3 – клапаны включения гидроударных устройств);
ГУ1…ГУ3 – гидроударные устройства; РВД1…РВД2 – рукава высокого давления
Рис. 2. Принципиальная схема управления СГУ с редукционным клапаном

Выводы. Проведен анализ существующих проблем в области открытых горных работ при добыче полезных ископаемых. Разработан и создан прототип гидроударного устройства, конструктивно пригодного для использования в ковше активного действия, проведены его испытания и доводка.

Предложена конструкция ковша активного действия, а также гидроударного устройства с регулируемой энергией ударов. Разработана принципиальная схема управления с учетом установки её на действующие гидравлические экскаваторы с минимальным изменением конструкции основной машины.

Список литературы

1. Половинко А.В. Обоснование малоотходной безвзрывной технологии открытой разработки месторождений скальных горных пород с помощью гидравлических отбойных агрегатов. – Санкт-Петербург: С-Пб ГГУ, 2012. – 135 с.

2. Шишаев С.В., Федулов А.И., Маттис А.Р. Расчет и создание ковша активного действия. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1989. – 115 с.

3. Экскаваторы с ковшом активного действия : опыт создания, перспективы применения / А.Р. Маттис, В.И. Кузнецов, Е.И. Васильев [и др.]. – Новосибирск: Наука, Сиб. издат. фирма РАН, 1996. – 174 с.

4. Безвзрывные технологии открытой добычи твердых полезных ископаемых : монография / А.Р. Маттис [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 335 с.

5. Маттис А.Р., Лабутин В.Н. К созданию ковшей активного действия гидравлических строительных экскаваторов / Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: матер. междунар. науч.-практ. конф. Т. III, г. Новосибирск, 2010 г. – Новосибирск, 2010. – С. 152–159.

6. Городилов Л.В., Лабутин В.Н. Ковш активного действия к строительным экскаваторам // Машиноведение. – 2016. – № 2(4). – С. 45–53.

7. Безвзрывная технология добычи полезных ископаемых: состояние и перспективы. Ч. I. Опыт исследований и разработки экскаваторов с ковшом активного действия / А.Р. Маттис, В.И. Ческидов, В.Л. Яковлев [и др.] // ФТПРПИ. – 2004. – № 1. – С. 90–98.

8. Выбор конструктивной схемы и параметров гидроударного устройства для активного исполнительного органа горной машины / Л.В. Городилов, А.Н. Коровин В.Г. Кудрявцев [и др.] // ФТПРПИ. – 2023. – № 1. – С. 92–102.

9. Городилов Л.В., Коровин А.Н. Анализ конструкций ковшей активного действия карьерных и строительных экскаваторов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – Т. 2. – № 3. – С. 171-179.

УДК 622 + 62-408.66 + 681.518.2

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТЕНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМА ВЫПУСКАЕМОЙ ГОРНОЙ МАССЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ И ПРОЕЦИРОВАНИЯ СЕТКИ ЛАЗЕРНЫХ ЛИНИЙ

[1,2]Черкасов П.В., [1,2]к.т.н. Никитенко М.С., [1,2]Кизилов С.А.

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

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

Аннотация. Показана перспективность технологии отработки мощных пластов с выпуском горной массы на забойный конвейер, в конструкции секции крепи с управляемым выпуском (КУВ). Предложено решение задачи поддержания требуемой производительности группы секций крепей в технологии выпуска угля на забойный конвейер. Приведены конструктивные и функциональные требования к исследовательскому стенду для измерения объёма горной массы с использованием машинного зрения и проецирования лазерных линий. Обоснованы параметры исследовательского стенда. Данные о текущем объёме горной массы на питателе крепи

необходимы для работы автоматизированной системы поддержания требуемой производительности каждого питателя в группе секций в процессе выпуска угля подкровельной толщи.

Ключевые слова: управляемый выпуск, объём горной массы, машинное зрение, система управления, технологический процесс, выпуск угля подкровельной толщи.

Приоритеты освоения технологий добычи угля без постоянного присутствия людей в очистных и подготовительных забоях на базе современной комплексной механизации, а также внедрение автоматизированных систем управления на базе цифровых технологий обозначены в Программе развития угольной промышленности России на период до 2035 года [1]. Кроме того, в связи с исчерпаемостью легкодоступных угольных пластовых месторождений, возрастает актуальность отработки мощных пластов. В работах [2, 3] показана перспективность технологии выпуска угля на забойный конвейер, а также предложена конструкция секции крепи с управляемым выпуском (КУВ) [4, 5]. Такая технология и конструкция крепи предполагает высокую степень автоматизации и минимальное присутствие человека в забое. Для поддержания требуемой производительности группы секций предложено ввести в систему управления секцией автоматизированный контроль объёма выпускаемой горной массы на забойный конвейер [6, 7]. Для транспортировки горной массы подкровельной толщи предполагается применение питателя кареточного типа, при работе которого на лотке образуется порция горной массы некоторого объёма. Измерение и регулирование объёма горной массы лежит в основе автоматизированного управления выпуском.

Ранее авторами был предложен способ измерения объёма объектов [8, 9], основанный на работе системы машинного зрения, дополненной сеткой лазерных линий. Позиционеры проецирования лазерных линий проецируют на поверхность исследуемого объекта контрастную сетку. С использованием камеры машинного зрения определяются высоты объекта в точках пересечения лазерных линий, что позволяет создать двумерный массив данных, на основе которых определяется объём объекта. Данный способ упрощает работу системы машинного зрения, создавая определённую сцену для алгоритмов обработки и снижая требования к качеству первоначального изображения.

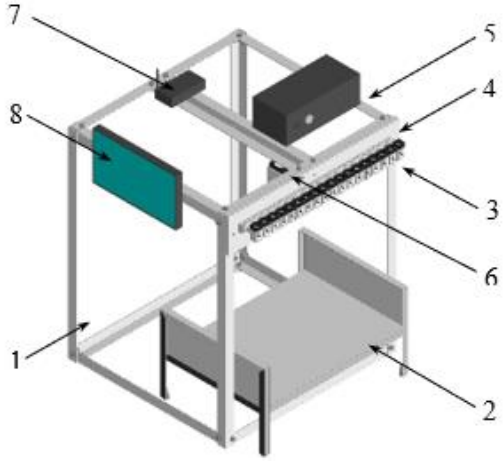
Для решения задачи поддержания требуемой производительности группы секций крепей в технологии выпуска угля на забойный конвейер предложенным способом возникла необходимость разработки исследовательского стенда. К стенду предъявляются конструктивные и функциональные требования, описанные в табл. 1.

Таблица 1

Требования к исследовательскому стенду

Тип	Описание требования
Конструктивные	Наличие измерительного участка, на который укладываются объекты некоторого объёма. Горизонтальная поверхность участка в данном случае должна имитировать поверхность выпускного лотка питателя кареточного типа во время обеспечения выпуска.
	Наличие консоли блока позиционеров проецирования сетки лазерных линий на объекты. Должна быть предусмотрена возможность настройки углов поворота корпуса позиционера в горизонтальной и вертикальной плоскостях.
	Наличие камеры машинного зрения в корпусе (должна быть направлена перпендикулярно к горизонтальной поверхности измерительного участка).
Функциональные	Возможность дистанционного измерения объёма объектов. В данном исследовании – измерение объёма неоднородной массы сыпучего материала разной фракции.

Основываясь на вышеописанные требования, предложена конструкция стенда для измерения объёма горной массы с использованием машинного зрения и проецирования лазерных линий (далее по тексту – стенд). Цифровая модель стенда представлена на рис. 1.



1 – рама; 2 – измерительный участок; 3 – позиционер проецирования лазерной линии; 4 – консоль блока позиционеров; 5 – блок питания лазерных модулей; 6 – камера машинного зрения;7 – ЭВМ управления; 8 – монитор оператора

Рис. 1. Модель исследовательского стенда «Измерения объёма горной массы с использованием машинного зрения и проецирования лазерных линий»

Далее описаны и обоснованы ключевые параметры для измерительного участка, консоли блока позиционеров и камеры машинного зрения.

Измерительный участок стенда (см. рис. 1, позиция 2) характеризуется следующими параметрами: высота боковых стенок, предотвращающих просыпание измеряемого материала, ширина и длина горизонтальной поверхности. Обоснование значений параметров представлены в табл. 2.

Таблица 2

Обоснование значений параметров измерительного участка

Параметр	Значение	Обоснование значения
Высота боковых стенок	0,2 м	Значение обусловлено высотой выпускного окна между лотком питателя и забойным конвейером и округлено в большую сторону до десятого разряда.
Ширина горизонтальной поверхности	0,85 м	Проектное значение ширины лотка питателя кареточного типа секции крепи КУВ равно 1,075 м, а длины – 0,4 м. Значения ширины и длины измерительного участка стенда обусловлены тем, что площадь измерительного участка стенда близка к проектному значению площади выпускного лотка питателя. Конкретные значения параметров горизонтальной поверхности не влияют на итоговый результат исследования.
Длина горизонтальной поверхности	0,6 м	

Кроме того, отсутствие жёсткого крепления измерительного участка к раме стенда позволит для дальнейших исследований заменить его на действующий масштабный прототип питателя секции крепи КУВ [10], разработанный ранее в ИУ ФИЦ УУХ СО РАН. Это позволит моделировать работу системы измерения объёма неоднородной горной массы в динамике.

Над измерительным участком закреплена консоль блока позиционеров (рис. 1, позиция 4) так, чтобы проекции лазерных линий были сфокусированы на поверхности объекта измерения и в ЭВМ передавалось контрастное изображение проекции. Внутри

корпуса позиционера расположена плата управления, оснащенная драйвером питания лазерного модуля LG-H635-7-5, а также системой регулирования оборотов вентилятора охлаждения.

Ключевыми параметрами консоли позиционеров являются: высота закрепления консоли, размер стороны ячейки проецируемой лазерной сетки и количество позиционеров проецирования лазерных линий. Обоснование значений параметров представлены в табл. 3. Результаты экспериментального определения размера ячеек приведены на рис. 3.

Таблица 3

Обоснование значений параметров консоли позиционеров

Параметр	Значение	Обоснование значения
Высота закрепления консоли	1 м	Значение обусловлено высотой предполагаемой зоны измерения объёма горной массы в секции крепи КУВ.
Размер стороны ячейки проецируемой лазерной сетки	0,05 м	Лазерные модули должны проецировать на измерительный участок контрастные линии, которые формируют сетку с заданным размером ячеек квадратной формы. На рис. 3а представлены результаты [11] экспериментального определения размера ячейки сетки, сторона которой принята 0,05 м. Таким образом будет обеспечена относительная погрешность измерения объёма в зависимости от размера стороны ячейки до 0,95 %.
Количество позиционеров проецирования лазерных линий	29 шт	Один позиционер может проецировать одну контрастную линию. Исходя из значений параметров длины и ширины измерительного участка, а также длины стороны ячейки проецируемой лазерной сетки, количество позиционеров должно быть не менее 29 шт. Согласно рис. 3б, таким образом будет обеспечена относительная погрешность измерения объёма в зависимости от количества позиционеров на консоли до 1 %.

Как уже было сказано, на проекцию лазерной сетки направляется объектив камеры машинного зрения. Изображение проекции сетки на поверхности принимается камерой, оцифровывается и передается в программу обработки. После передачи на ЭВМ изображение обрабатывается специальными функциями системы машинного зрения, определяются высоты объекта в точках пересечения лазерных линий, что позволяет создать двумерный массив данных, на основе которых определяется объём объекта.

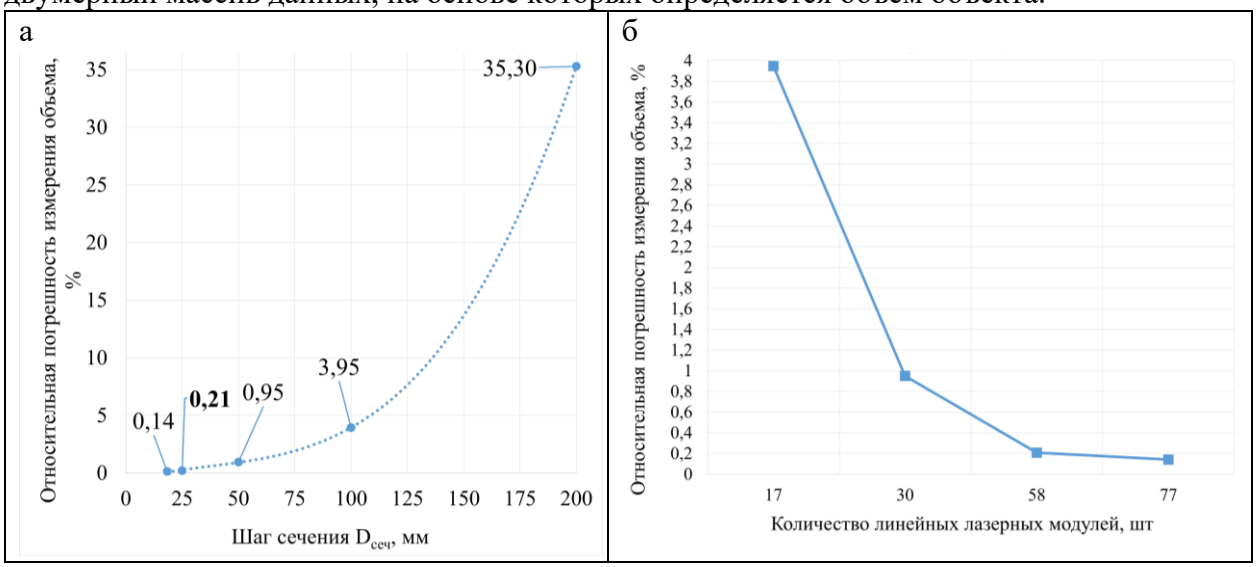


Рис. 3. Результаты экспериментального определения размера ячеек [11]: а – зависимость относительной погрешности от шага сечения; б – соотношение относительной погрешности измерений объёма с количеством позиционеров с лазерными модулями

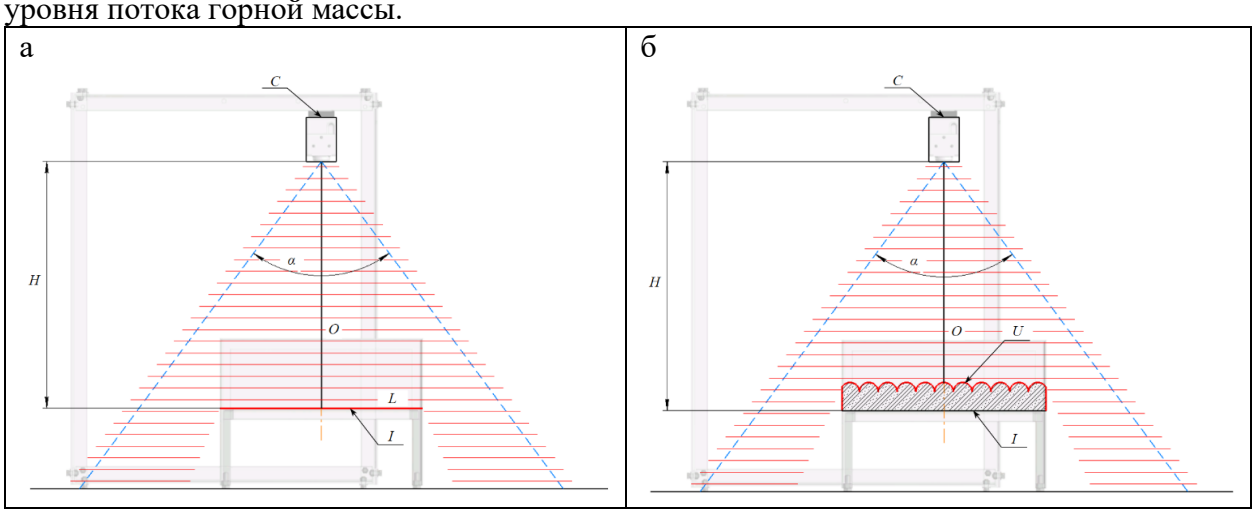
Для камеры машинного зрения выделены следующие параметры: высота закрепления корпуса камеры и угол, под которым объектив камеры направляется на проекцию лазерной сетки. Обоснование значений параметров представлены в табл. 4. Конструктивные решения для камеры на стенде в разрезе приведены на рис. 5.

Таблица 4

Обоснование значений параметров камеры машинного зрения

Параметр	Значение	Обоснование значения
Высота закрепления корпуса камеры	1 м	Как и в случае высоты закрепления консоли блока позиционеров, значение обусловлено высотой предполагаемой зоны измерения объёма горной массы в секции крепи КУВ.
Угол направления объектива камеры на проекцию лазерной сетки	90°	Значение обусловлено отсутствием возможных «слепых» зон деформированной лазерной сетки для камеры машинного зрения. Для решения задачи измерения объёма используется одна камера, которая захватывает одну линию пикселей. Схема расположения камеры на стенде показана на рис. 5.

Как уже отмечалось, в основе автоматизированного управления выпуском лежит измерение и регулирование объёма горной массы. Горная масса, которая поступает на лоток питателя, характеризуется прогнозируемым объёмом. При равномерном потоке высота слоя горной массы на лотке соответствует высоте выпускного окна между лотком и забойным конвейером. Принимая, что насыпная плотность каменного угля равна 850 кг/м^3 [12], проектная длина лотка – 0,4 м, ширина лотка – 1,075 м, высота слоя измеряемой горной массы – 0,12 м, единичный объём горной массы на лотке питателя крепи КУВ равен 0,05 м^3 или 42,5 кг. В зависимости от того, какой объём горной массы находится на лотке, принимаются управляющие воздействия автоматизированной системой управления выпуском: изменение положения шиберной заслонки крепи для снижения или увеличения уровня потока горной массы.



C – камера машинного зрения; *O* – направление оси объектива камеры; *α* – угол захвата камеры (73°); *I* – горизонтальная плоскость измерительного участка; *H* – высота между объективом камеры и измерительным участком (1 м); *L* – эталонная проекция лазерной сетки; *U* – тестовая порция горной массы;
красным цветом – искажённая проекция лазерной сетки

Рис. 5. Конструктивные решения для камеры на стенде в разрезе: а – объекты на измерительном участке отсутствуют; б – наличие объектов на измерительном участке

На основе вышесказанного, стенд позволяет обеспечить автоматизированное измерение объёма объектов до 0,1 м^3 в зоне действия камеры машинного зрения с регистрацией результатов измерений текущего объёма и их хранением в памяти ЭВМ.

Вывод. Таким образом, представлены требования и обоснованы параметры исследовательского стенда для измерения объёма горной массы с использованием машинного зрения и проецирования лазерных линий. Данные о текущем объёме горной массы на питателе крепи необходимы для работы автоматизированной системы поддержания требуемой производительности каждого питателя в группе секций в процессе выпуска угля подкровельной толщи.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0025 «Разработка научных основ создания автономных и автоматизированных горных машин, оборудования, технических и управляющих систем на базе перспективных цифровых и роботизированных технологий» (рег. №1023033000581-6).

Список литературы

1. Об утверждении Программы развития угольной промышленности России на период до 2035 года: распоряж. Правительства РФ от 13 июня 2020 года.

2. Клишин В.И., Клишин С.В. Состояние и направление развития технологии разработки мощных угольных пластов механизированными крепями с выпуском // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – № 1. – С. 162-174.

3. Применение имитационного моделирования для исследования режимов выпуска угля подкровельной толщи / А.Н. Стародубов, В.В. Зиновьев, В.И. Клишин [и др.] // Девятая всерос. науч.-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности : труды конференции, Екатеринбург, 16–18 октября 2019 года. – Екатеринбург: Изд-во УГПУ, 2019. – С. 540-547.

4. Патент № 210254 U1 Российская Федерация, МПК E21D 23/04. Секция механизированной крепи очистного забоя с устройством регулируемого выпуска угля: № 2021131401: заявл. 26.10.2021: опубл. 04.04.2022 / В.И. Клишин, Б.А. Анферов, Л.В. Кузнецова [и др.]. – 6 с.: ил.

5. Клишин В.И., Худынцев Е.А. Создание механизированных комплексов с выпуском для подземной разработки мощных угольных пластов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2022. – № 6(154). – С. 96-106. – DOI 10.26730/1999-4125-2022-6-96-106.

6. Клишин В.И., Анферов Б.А., Кузнецова Л.В. Направления совершенствования разработки мощных пластов с выпуском угля подкровельной толщи // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК-2017): сб. трудов межд. науч.-практ. конф. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева; 2017. – С. 57–63.

7. Технология разработки запасов мощных пологих пластов с выпуском угля / В.И. Клишин, И.А. Шундулиди, А.Ю. Ермаков [и др.]. – Новосибирск: Наука, 2013. – 248 с.

8. Подходы к автоматизированной оценке объема и состава горной массы в процессе выпуска угля на забойный конвейер / С.А. Кизилов, Е.А. Баловнев, П.В. Черкасов [и др.] // Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2022 : труды всерос. науч.-практ. конф., Новокузнецк, 15–16 декабря 2022 года. – Новокузнецк: СибГИУ, 2022. – С. 20-25.

9. Патент на полезную модель № 216036 U1 Российская Федерация, МПК G01F 17/00, G01B 11/25. Устройство для измерения объема сыпучего материала разной фракции: № 2022112782 : заявл. 12.05.2022 : опубл. 13.01.2023 / С.А. Кизилов, М.С. Никитенко, Д.Ю. Худоногов [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное

учреждение "Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук". – EDN VNIEAL.

10. Худынцев Е.А., Клишин С.В., Клишин В.И. Исследование питателя механизированной крепи для выемки мощных пологих пластов с управляемым выпуском угля // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 2(160). – С. 31-38. – DOI 10.26730/1816-4528-2022-2-31-38.

11. Кизилов С.А. Разработка системы управления питателем секции механизированной крепи в технологии с выпуском угля подкровельной толщи // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 5.

12. ГОСТ Р 54246–2010 Уголь определение насыпной плотности. – М.: Изд-во стандартов, 2010.

УДК 622 +62-50:550.835.41

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТЕНДА АНАЛИЗА ГОРНОЙ МАССЫ ГАММА-МЕТОДОМ

Баловнев Е.А., Кизилов С.А., к.т.н. Никитенко М.С.
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
г. Кемерово, Россия

Аннотация. В статье обоснованы основные конструктивные и функциональные параметры стенда анализа естественной радиоактивности горной массы для установления глубины чувствительности гамма-метода. Определено наиболее рациональное место расположения дозиметра на стенде, позволяющее проводить исследования влияния элементов конструкции перекрытия секции механизированной крепи на результаты измерения естественной радиоактивности горной массы и установления глубины чувствительности гамма-метода с максимальным попаданием объёма горной массы в зону чувствительности дозиметра.

***Ключевые слова*:** секция крепи, дозиметр, гамма-излучение, естественная радиоактивность, горная масса, анализ горных пород.

В настоящее время происходит исчерпание легкодоступных запасов угля, как в России, так и за рубежом, что заставляет переходить к разработке мощных пластов, залегающих в сложных горно-геологических условиях [1].

Впервые в мире российскими специалистами для разработки мощных пластов угля была предложена технология с выпуском верхней части, в основу которой заложен физический эффект разрушения угольной толщи за счет использования сил горного давления.

В Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН предложено новое направление создания механизированных крепей с регулируемым управляемым выпуском угля из подкровельной толщи, включающее достоинства известных вариантов механизированных крепей и исключающее их недостатки [1]. Для этого в перекрытие секции механизированной крепи предусматривается питатель. Особенностью работы такой крепи является возможность дозированного управления выпуском горной массы. При этом, выпуск осуществляется через 2-3 передвижки, что позволяет увеличить ширину зоны потока. Наличие управляемого механизированного питателя позволяет одновременно задействовать при выпуске группы из 5-7 секций крепи, создавая благоприятные условия для разрушения подкровельной толщи угля, что обеспечивает, так называемую, площадность выпуска, как следствие равномерное опускание контактной границы угля и породы, снижая их перемешивание.

Одним из важных параметров, требующих контроля для обеспечения процесса выпуска угля подкровельной толщи с высокой эффективностью, является регистрация начала подхода пустой породы к выпускному окну секции [2].

В иностранной литературе описан способ автоматического завершения выпуска по времени [3]: экспериментальным путем определяется время, через которое после начала выпускам появляется горная масса со значительным содержанием пустой породы, полученный временной интервал устанавливается как время выпуска. Далее автоматическая система управления очистного комплекса открывает соответствующие выпускные окна на указанное время, по его истечению закрывает.

На данный момент нет действующих автоматизированных систем, способных с достаточной точностью определять подход горной массы, содержащей пустую породу вместо угля к выпускному окну секции механизированной крепи в процессе выпуска [4]. При этом, проблема актуальна как для крепей с выпуском на завальный, так и на забойный конвейер [4]. Согласно [5], регистрация начала подхода пустой породы к выпускному окну секции в современных китайских комплексах занимается рабочий, от опыта которого зависит качество выпускаемого угля.

В литературе описано достаточно большое количество экспериментальных методов разделения породы и угля, основанных на разных физических принципах [4], из которых можно выделить несколько основных направлений, по которым работают учёные: способы выделения породы от угля на основе технического зрения [6-8], способы с использованием нейросетей для распознавания на изображениях по различному отображению теплового рисунка угля и породы на фотографиях, сделанных с помощью тепловизионной камеры [9], с помощью выделения специфического акустического сигнала, создаваемого потоком породы [5, 10, 11]; способы на основе гиперспектрального анализа [12, 13], причём в данном случае может быть использована как гиперспектральная камера [12], так и спектрометр со специально выстроенной схемой освещения исследуемого образца [13], так же выделяется группа способов, где для определения породы используют тепловизионную камеру после воздействия на горную массу микроволновым излучением [4]. Однако все описанные методы являются эффективными, когда горная масса находится в зоне видимости и уложена тонким слоем.

При этом в статье [14], опубликованной в 2022 году, описывается комплексное исследование по применению гамма-метода распознавания границы уголь-порода для задачи автоматизации процесса выпуска угля из подкровельной толщи на завальный конвейер [14]. Сделаны выводы о спорной пригодности данного метода в условиях выпуска угля на завальный конвейер.

Выводы о непригодности гамма-метода для определения подхода пустой породы к выпускному окну секции механизированной крепи с выпуском на завальный конвейер, описанные в [14], показывают, что корректной работе гамма-метода препятствуют конструктивные ограничения секции механизированной крепи. При выпуске на завальный конвейер, в конструкции секции механизированной крепи установить чувствительный элемент дозиметра возможно только в подвижной заслонке над забойным конвейером, и при ее отрывании для выпуска горной массы, чувствительный элемент дозиметра оказывается на значительном удалении от той горной массы, измерение гамма-излучения которой должен производить.

При этом, механизированная крепь, разрабатываемая в ФИЦ УУХ СО РАН, лишена описанного выше недостатка, поскольку выпускное окно в конструкции секции механизированной крепи располагается внутри перекрытия, что позволяет разместить дозиметр (чувствительный элемент) внутри ограждения непосредственно в районе выпускного окна (рис. 1б). Радиус чувствительной зоны дозиметра выходит за границы ограждения (рис. 1а), однако установление глубины чувствительности требует проведения дополнительных исследований, поскольку для установления исследуемого параметра необходимо проведение серии экспериментов.

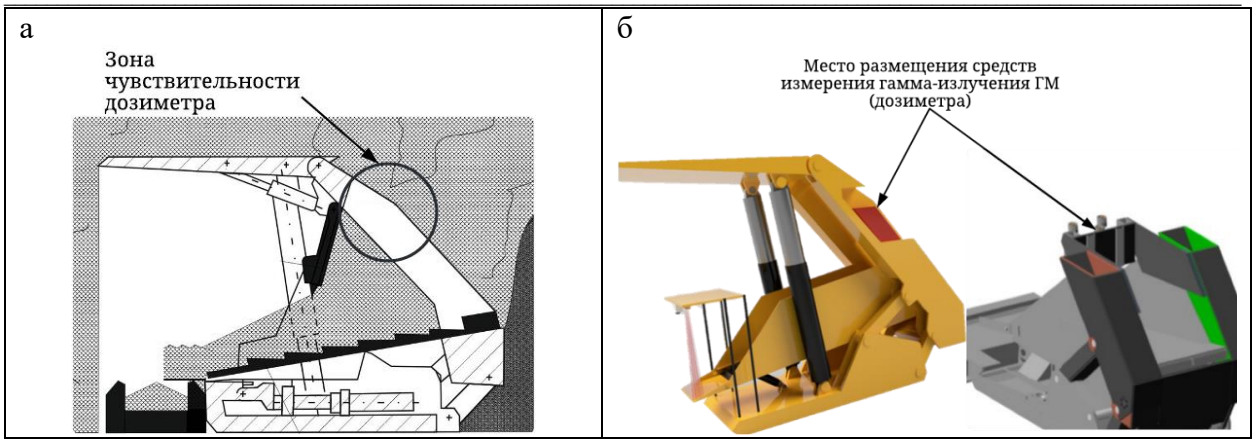


Рис. 1. Предполагаемое расположение дозиметра и его чувствительной зоны внутри конструкционных элементов секции крепи с управляемым выпуском: а – радиус чувствительной зоны дозиметра, б – предлагаемое место размещения чувствительного оборудования

Таким образом, исследования влияния конструкционных элементов секции на глубину чувствительности гамма-метода являются актуальной задачей. А предварительная методика экспериментов предполагает перемещение значительных объемов горной массы (более 100 кг) через чувствительную зону дозиметра, что требует разработки и изготовления специализированной лабораторной установки.

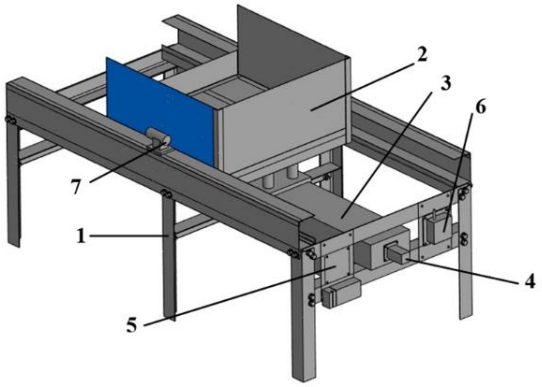
Общие требования к конструкции стенда для моделирования влияния конструкций перекрытия секции механизированной крепи на результаты измерения естественной радиоактивности горной массы были разделены на конструктивные и функциональные, после чего сведены в табл. 1.

Таблица 1

Конструктивные и функциональные требования к стенду

Тип	Требования
Конструктивные	Наличие ёмкости, вмещающей горную массу в количестве не менее 150 кг.
	В емкости для горной массы должна быть предусмотрена сменная стенка между дозиметром и горной массой, позволяющая устанавливать образцы и из различных материалов.
	Конструкция стенда должна обеспечивать перемещение емкости с горной массой через чувствительную зону дозиметра.
Функциональные	Измерение естественного гамма-излучения горной массы должно производиться в автоматическом режиме с дискретностью не более 2 секунд.
	Скорость перемещения емкости с горной массой должна быть регулируемой.
	Регулирование скорости движения емкости с горной массой, вывод результатов измерения естественного гамма-излучения и запись результатов измерения в файл должны выполняться с помощью ЭВМ управления, расположенной не менее, чем в 1 метре от стенда.

Исходя из вышеуказанных требований, предложена конструкция стенда, который представляет собой раму с направляющими для колес емкости, установленную на шесть опор с закрепленными основными элементами. Емкость под горную массу со сменной стенкой сделана подвижной на колесах и устанавливается в верхней части рамы [15-17]. Движение ёмкости обеспечивается линейным модулем перемещения. Регистрацию естественного гамма-излучения сыпучих веществ выполняет дозиметр. Общий вид стенда с указанием основных элементов изображен на рис. 2.



1 – рама; 2 – емкость для загрузки исследуемой горной массы; 3 – линейный модуль перемещения; 4 – шаговый двигатель модуля линейного перемещения с блоком управления; 5 – блок питания шагового двигателя; 6 – контроллер управления устройством линейного перемещения; 7 – дозиметр гамма-излучения

Рис. 2. Трехмерное изображение стенда с обозначением основных конструкционных элементов

После разработки общей конструкции стенда и определения габаритных размеров основных деталей и элементов, определено рациональное место расположения дозиметра на конструкции стенда относительно начала координат (началом координат считается точка, в которой задняя стенка емкости находится в максимально близком положении к заднему концевому выключателю). Критерием являлось максимальное значение объема горной массы, контактирующего с чувствительным элементом дозиметра в емкости при ее перемещении вдоль всего стенда, при этом обеспечивающее возможность выхода экспериментального объема из чувствительной зоны дозиметра или его максимальное снижение.

Для определения наиболее рациональной точки установки дозиметра была разработана методика и проведен виртуальный эксперимент с использованием метода трехмерного моделирования. При проведении эксперимента приняты следующие допущения: весь доступный объем емкости заполняется горной массой (имитируется объемным телом в виде параллелепипеда); зона чувствительности дозиметра условно представлена сферой с радиусом 300, или 400 мм (исходя из данных эксперимента, описанных в [14]); измерения объема горной массы в чувствительной зоне дозиметра производятся через каждые 50 мм продвижения емкости от начала координат к конечной точке. Внешний вид пересекаемых объемных тел показан на рис. 3.

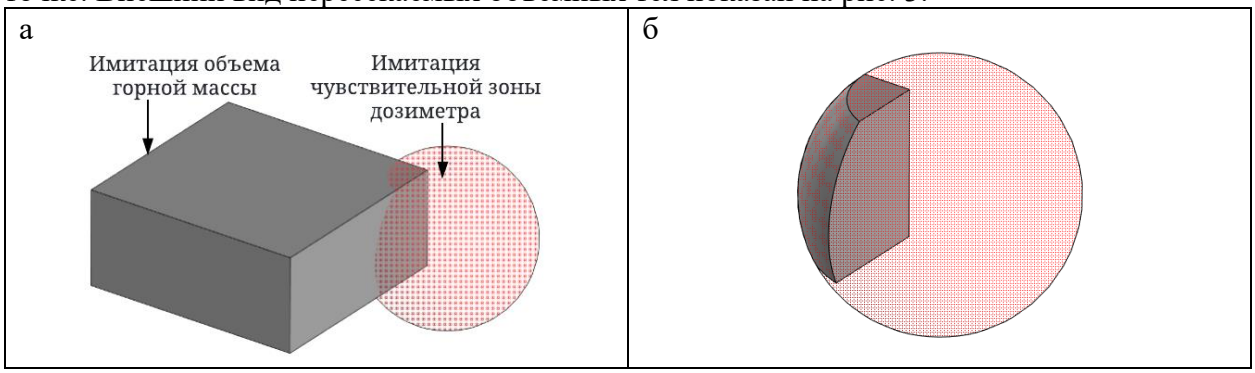


Рис. 3. Трехмерное моделирование пересечения объема горной массы и чувствительной зоны дозиметра, где: а – внешний вид двух пересекаемых тел; б – вид отсеченного объема горной массы, учитываемого при проведении эксперимента

Предварительные измерения показали, что наиболее рациональными местами размещения дозиметра могут обладать две точки на расстоянии 730 и 1000 мм от начала

координат (см. рис. 4). Таким образом, в ходе виртуального эксперимента смоделирован проход емкости непосредственно перед дозиметром, установленным в данных точках и рассчитан объем горной массы, попадающей в чувствительную зону дозиметра. На рис. 4 емкость показана в начальном и конечном положении.

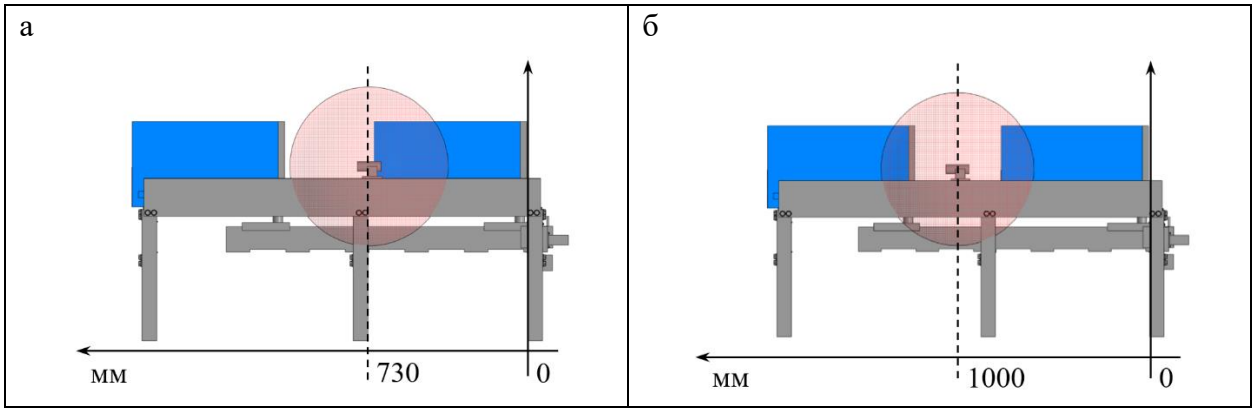


Рис. 4. Положение дозиметра на стенде: а – расстояние 730 мм; б – расстояние 1000 мм

В результате проведенного виртуального эксперимента установлено, что в обоих экспериментах максимальный объём горной массы, попавший в зону чувствительности дозиметра, был достигнут при положении ёмкости на расстоянии 600 мм от начала координат. Результаты измерений представлены на графиках, показанных на рис 5.

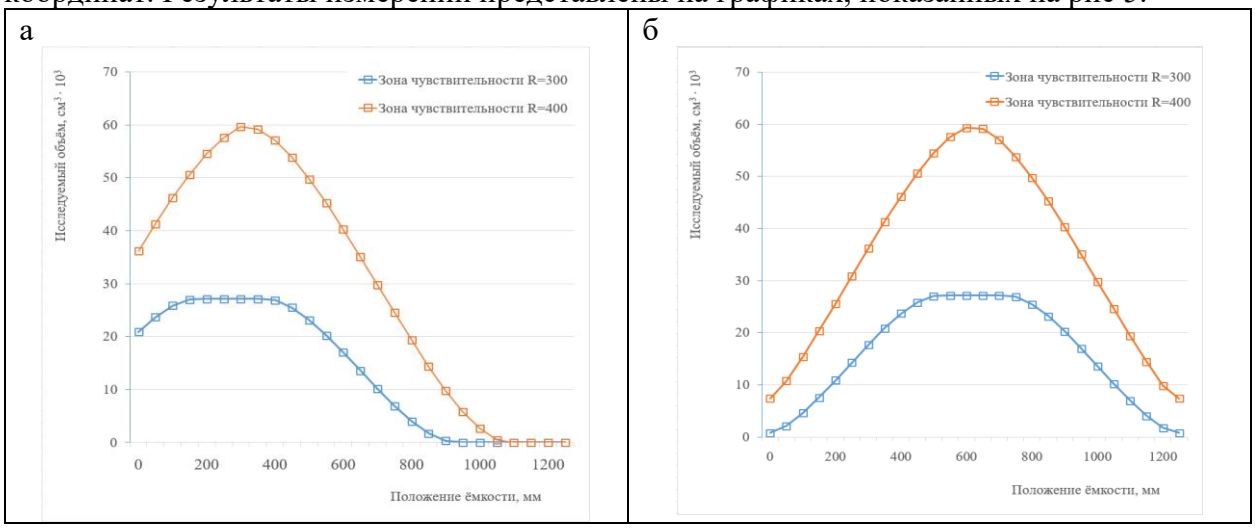


Рис. 5. Зависимость объёма горной массы, попавшей в зону чувствительности дозиметра, от места расположения дозиметра, расстояние от начала координат до дозиметра: а – 730 мм; б – 1000 мм

Графики на рис. 5 показывают, что максимальная зона захвата объема горной массы достигается при установке дозиметра на расстоянии 1000 мм от начала координат. При этом создаются благоприятные условия для «двойного опыта», когда имеется плавное нарастание и убывание количества горной массы в чувствительной зоне дозиметра. Также имеются неблагоприятные условия, при которых нет возможности провести опыт с полным выходом всего объема горной массы из чувствительной зоны дозиметра без перераспределения объема горной массы в емкости. Следовательно, наиболее рациональным местом установки дозиметра является точка, расположенная на расстоянии 730 мм от начала координат.

Вывод. Таким образом, в статье обоснованы основные параметры стенда и наиболее рациональное место расположения дозиметра, позволяющее проводить исследования чувствительности гамма-метода с максимальным попаданием объёма горной массы в зону

чувствительности дозиметра, также имеется возможность полного выхода горной массы из этой зоны.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0025 «Разработка научных основ создания автономных и автоматизированных горных машин, оборудования, технических и управляющих систем на базе перспективных цифровых и роботизированных технологий» (рег. №1023033000581-6).

Список литературы

1. Технология разработки запасов мощных пологих пластов с выпуском угля / В.И. Клишин, И.А. Шундулиди, А.Ю. Ермаков [и др.]. – Новосибирск: Изд-во «Наука». – 2013. –248 с.

2. Lui C., Mitri H.S., Li H. Coal and Gangue Active Identification Method Using Microwave Irradiation-Infrared Detection // Minerals. – 2022. – № 12 (951).

3. Peng S.S. // Longwall Mining. – 2019. – С. 562.

4. Nikitenko M.S., Kizilov S.A. Technical and technological platforms for creating robotized complexes for the development of thick seam deposits // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources, 2019. – С. 012033.

5. He A., Liu N., Wei G. Coal-gangue Acoustic Signal Recognition Based on Sparse Representation // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Т. 333-335. – С. 546-549.

6. Multi-Arm Global Cooperative Coal Gangue Sorting Method Based on Improved Hungarian Algorithm / H. Ma, X. Wei, P. Wang [et al.] // Sensors. – 2022. – 22(20). – С. 7987.

7. Image positioning and identification method and system for coal and gangue sorting robot / M. Li, Y. Duan, X. He [et al.] // International Journal of Coal Preparation and Utilization. – 2020. – Т. 5. – С. 1759-1777.

8. Sun Z., Huang L., Jia R. Coal and Gangue Separating Robot System Based on Computer Vision // Sensors (Basel). – 2021. – Т. 1349.

9. Coal Gangue Recognition Using Convolutional Neural Networks and Thermal Images / M. A. Alfarzaeai, N. Qiang, J. Zhao [et al.] // IEEE Access. – 2020. – Т. 9. – С. 147315-147327.

10. Zeng W. Study on distributing coal and rock in the process of fully_mechanized coal winning sublevel caving coal technology / The mining Engineer. – 2020. – Т. 8. – С. 13-14.

11. Zhang Y., Zhang S. Analysis of coal and gangue acoustic signals based on Hibert-Huang transformation // Journal of China Coal Society. – 2010. – Т. 35(1). – С. 165-168.

12. Coal and rock identification method based on hyper spectral feature absorption peak / R. Wei, L.J. Xu, X.Y. Meng [et al.] // Spectroscopy and Spectral Analysis. – 2021. – Т. 41. – С. 1942-1948.

13. CNN coal and rock recognition method based on hyperspectral data / J. Yang, B. Chang, Y. Zhang [et al.] // International Journal of Coal Science & Technology. – 2022. – Т. 9.

14. Spatial Effect Analysis of Coal and Gangue Recognition Detector Based on Natural Gamma Ray Method / M. Zhao, H. Lui, X. Li [et al.] // Natural Resources Research. – 2022. – Т. 31. – С. 953–969.

15. Патент № 214630 U1 Российская Федерация, МПК G01T 1/166 (2006.01), СПК G01T 1/166 (2022.05). Устройство для регистрации естественного гамма-излучения сыпучих веществ: № 2022109522: заявл. 11.04.2022: опубл. 08.11.2022 / С. А. Кизилов, М. С. Никитенко, Д. Ю. Худоногов [и др.]. – 6 с.

16. Баловнев Е. А. Обоснование параметров стенда по исследованию глубины чувствительности гамма-метода анализа горных пород при выпуске угля // Развитие – 2023: сб. труд. конф., Кемерово, 11–13 мая 2023 года. – Кемерово: ФИЦ УУХ СО РАН, 2023. – С. 8-18.

17. Программная реализация управления стендом для исследования радиационных свойств угля и вмещающих пород / Е. А. Баловнев, Д. Ю. Худоногов, Я. В. Попинако [и др.] // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2023. – № 9. – С. 228-233.

УДК 622.271(73):550.814

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПАРКА ГОРНЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН В КАРЬЕРАХ ПО ДОБЫЧЕ НЕРУДНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

[1]д.т.н. Зеньков И.В., [2]к.т.н. Черепанов Е.В., [3]Терехина К.Ф., [4]к.т.н. Нефедов Б.Н.
1 – ООО «Сибирский научно-исследовательский институт горного и маркшейдерского дела», г. Красноярск, Россия
2 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия
3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия
4 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. В статье на основе данных дистанционного зондирования приведена укрупненная информация о горнопромышленных ландшафтах на месторождениях минерального сырья для производства цемента, щебня, металлургических флюсов, изделий из асбеста, находящихся в открытой разработке в горнодобывающих регионах России. С использованием космических снимков высокого разрешения определено количество горнотранспортного оборудования в карьерах на месторождениях нерудных полезных ископаемых. В итоге определен совокупный производственный потенциал карьеров по горной массе на территории России на уровне 685 млн. т в год.

Ключевые слова: горнодобывающие регионы России, месторождения нерудных полезных ископаемых, открытые горные работы, горные машины, дистанционное зондирование, карьерный транспорт.

Введение. Российская Федерация по площади находится на первом месте в мире. За последние 100 лет на ее территории добыча открытым способом и потребление минерального сырья, добываемого на месторождениях нерудных полезных ископаемых, возросли в тысячи раз, по сравнению с началом XX века. Нерудные полезные ископаемые в количестве не менее 500 млн. т в год потребляются во всех секторах экономики современной России. Потребление цементного сырья определяют работающие заводы по выпуску востребованных рынком марок цемента преимущественно для строительной и дорожной отрасли. Щебень с различными качественными и количественными показателями потребляется в промышленном и гражданском строительстве, а также при строительстве и текущем содержании автомобильных и железных дорог. Минеральное сырье, добываемое для изготовления металлургических флюсов, используется в больших количествах на металлургических заводах при выплавке черных и цветных металлов из рудного сырья или при переплавке металлического лома. Хризотил-асбест, добываемый в двух карьерах в центральной части России, имеет самое широкое применение, но в основном его используют в строительной, металлургической, энергетической и электротехнической отрасли.

В регионах России весь объем нерудных полезных ископаемых (за исключением некоторых видов горнохимического сырья типа калийной соли) добывают на месторождениях с различным горно-геологическим строением и разного геологического

возраста. Как известно, большие объемы любых твердых полезных ископаемых могут добываться только в ходе производства открытых горных работ. Горнодобывающие предприятия функционируют в протяженной полосе от западных районов Республики Карелия до южных районов Приморского края и черноморского побережья Краснодарского края. При такой географической дисперсии изучить технологическое состояние горнодобывающих предприятий за короткий период не представляется возможным, либо это будет сопряжено с большими финансовыми расходами с привлечением значительных по объему и численности соответственно материальных и людских ресурсов. В исследованиях по направлению «Науки о земле» в последние годы все чаще используют результаты дистанционного зондирования Земли из космоса (ДЗЗ). Информационными ресурсами, полученными из космоса, пользуются биологи, почвоведы, геологи, горняки и другие ученые с представлением результатов своих исследований в опубликованных статьях [1-12].

Наша научно-практическая школа на основе информационных ресурсов дистанционного зондирования Земли изучает технологические аспекты и экологические последствия открытых горных работ на месторождениях твердых полезных ископаемых на всей территории России. На очередном этапе наших системных исследований впервые получены новые знания о деятельности горнодобывающих предприятий, производящих открытую разработку месторождений нерудных полезных ископаемых, и экологических последствиях как на территории отдельно взятых регионов, так и на всей территории РФ.

Результаты исследований технологических показателей открытых горных работ на месторождениях нерудных полезных ископаемых. Главная цель настоящего исследования – с использованием информационных ресурсов ДЗЗ определить территории (регионы) с открытой разработкой месторождений нерудных полезных ископаемых и количество горных и транспортных машин, показатели логистики горных пород. Из формулировки цели вытекают основные задачи, решенные с использованием вновь созданных методик по работе с космическими снимками высокого разрешения и методических положений по проектированию открытых горных работ.

В ходе исследования территории России по данным спутниковой съемки были определены 42 региона, в которых производят открытую разработку месторождений нерудных полезных ископаемых с объемом переработки горной массы на одном горнодобывающем предприятии не менее 1 млн. т в год: в восьми республиках – Башкортостан, Бурятия, Дагестан, Карачаево-Черкесской, Коми, Карелии, Мордовии, Чеченской; в шести краях – Краснодарском, Пермском, Красноярском, Забайкальском, Хабаровском и Приморском; а также в 28 областях [13]. Все горнодобывающие регионы в наших исследованиях объединены в три крупных географических сектора: регионы европейской части России; регионы Урала, Оренбургская и Курганская области; регионы Сибири и Дальнего Востока. Отметим, что в довольно протяженной полосе на территории России от западных границ Курганской области до Новосибирской области за исключением локальных отработанных месторождений в Алтайском крае месторождения нерудных полезных ископаемых открытым способом не разрабатывают [13]. Кроме того, все карьеры были сгруппированы в четыре дивизиона по виду и дальнейшему использованию минерального сырья, добываемого на конкретно взятом месторождении.

По данным дистанционного мониторинга на территории европейской части России в настоящее время минеральное сырье для цементной промышленности добывают в 33 карьерах. В этом географическом секторе объем горной массы (полезное ископаемое и вскрышные породы), перерабатываемый горнодобывающими предприятиями в составе цементных заводов, составляет 177,8 млн. т в год. На этой территории на месторождениях цементного сырья в Республике Мордовия и в Краснодарском крае на берегу Черного моря работают восемь цементных заводов с общим объемом выпуска цемента не менее 20 млн. т в год. При этом для обеспечения работы цемзаводов в карьерах перерабатывают 35 млн. т в год горной массы. Здесь необходимо отметить уникальность карьеров нагорного типа,

работающих вблизи г. Новороссийска, в которых высота борта достигает 360 м. В пятнадцати карьерах в регионах Урала и Оренбургской области ежегодно добывают цементное сырье в объеме 16 млн. т. При этом необходимо обеспечить годовой объем переработки горной массы не менее 20 млн. т. Площадь нарушенных земель при работе одного горнодобывающего предприятия в составе цементного завода на этих территориях находится на уровне 93,3 га. Аналогичные показатели для разрабатываемых месторождений с работающими карьерами по добыче цементного сырья в регионах Сибири и Дальнего Востока при работе 12 карьеров составляют 24,1 млн. т и 99,8 га.

В регионах европейской части России объем производимого щебня из минерального сырья, добытого в 65 карьерах, равен 176,5 млн. т в год. На этой территории в двух карьерах по добыче гранита и габбро соответственно на Шкурлатовском и Первоуральском месторождениях суммарный годовой объем добычи полезного ископаемого равен 26 млн. т. При этом площадь нарушенных земель находится соответственно на уровне 667,5 и 366 га. Отметим, что глубина карьеров на этих месторождениях достигает аномальных значений для этой группы карьеров – 184 и 120 м. В 24 щебеночных карьерах в регионах Урала, Оренбургской и Курганской области ежегодно добывают минеральное сырье, из которого получают 67 млн. т щебня.

По нашей оценке, суммарный объем перерабатываемой горной массы на двух месторождениях хризотил-асбеста в двух регионах – в Свердловской и Оренбургской области составляет 54 млн. т в год. Из этого объема добыча полезного ископаемого находится на уровне не менее 23 млн. т. Главной особенностью этих карьеров является разноска рабочих бортов по всему периметру и ведение горных работ до глубины 360 и 240 м соответственно на Баженовском и Киембайском месторождениях. В перспективе глубина карьеров будет увеличиваться.

На месторождениях минерального сырья, используемого в производстве металлургических флюсов, в одиннадцати карьерах на территории европейской части России ежегодно добывают 37 млн. т полезного ископаемого. В семи карьерах в регионах Урала и Оренбургской области ежегодно добывают минеральное сырье, из которого получают металлургические флюсы в объеме 22 млн. т. Для месторождений, разрабатываемых в регионах Сибири, аналогичный технологический показатель при работе пяти карьеров составляют 13 млн. т.

По данным спутниковой съемки на исследуемых месторождениях за период добычи полезных ископаемых открытым способом образовано 185 карьеров с размерами в плане и глубины в широком диапазоне. На каждом месторождении сформирован горнопромышленный ландшафт, состоящий преимущественно из карьера (нескольких карьеров) и внутренних или внешних породных отвалов. В ходе разработки месторождений, представленных пластовыми залежами, на месте вынимаемого полезного ископаемого отсыпают вскрышные породы с организацией так называемых внутренних отвалов. Когда такая возможность отсутствует, вскрышные породы размещают за пределами карьеров на прилегающих природных ландшафтах. На транспортировке вскрышных пород в максимальной степени используют автомобильный транспорт, оснащенный дизельными двигателями мощностью до 1600 л.с.

По данным дистанционного мониторинга в карьерах на исследуемых месторождениях работает 3735 единиц горнотранспортного оборудования (табл. 1). В ходе обработки космоснимков высокого разрешения установлены модели, виды и количество карьерных экскаваторов, буровых станков. Кроме этого, выявлено количество и грузоподъемность карьерных автосамосвалов, работающих на транспортировке горных пород. Состав горных и транспортных машин представлен в табл. 1.

Далее представим краткий обзор расстановки горнотранспортного оборудования по горнодобывающим регионам России. Отметим, что на многих месторождениях нерудных полезных ископаемых имеют место все процессы открытых горных работ, начиная от бурения взрывных скважин и заканчивая отвалообразованием.

Таблица 1

Количественный состав горнотранспортного оборудования в карьерах на месторождениях нерудных полезных ископаемых (минеральное сырье для производства цемента, щебня и металлургических флюсов, хризотил-асбеста) на территории России

Наименование горнотранспортного оборудования	Кол-во, ед.
Буровой станок СБШ-250	214
Пневмоударная буровая установка Atlas Copco Roc L8	9
Драглайн ЭШ-4/40; ЭШ-5/45; ЭШ-10/70; 13/50; ЭШ-20/90	35
Драглайн гусеничный с емкостью ковша 2 м^3 и длиной стрелы 15 м	1
Экскаватор карьерный ЭКГ-5А	371
Экскаватор карьерный ЭКГ-8и; ЭКГ-10	83
Экскаватор Э-2503	2
Экскаватор гидравлический с емкостью ковша 2-10 м^3	261
Фронтальный погрузчик с емкостью ковша 4-6 м^3 на базе автомобильного шасси	16
Фрезерный комбайн	7
Автосамосвалы карьерные грузоподъемностью 30–130 т	858
Автосамосвалы общего назначения с колесной формулой 6×4 грузоподъемностью 20-30 т	610
Шарнирно-сочлененные карьерные автосамосвалы повышенной проходимости грузоподъемностью 25-30 т	68
Думпкары железнодорожные 5ВС-60; 2ВС-105	1098
Электровоз карьерный EL-2; EL-21	29
Тяговый агрегат ОПЭ-1	15
Тяговый агрегат ПЭ2У(М)	42
Тепловоз ТЭМ-7	33

Исключение составляют месторождения глинистых сланцев и меловых известняковых толщ, крепость которых позволяет вести открытые горные работы без рыхления буровзрывным способом. В эту же группу входят месторождения, представленные песчано-галечниково-валунными смесями. Все драглайны, работающие в карьерах по добыче нерудных полезных ископаемых, задействованы именно в таких карьерах на месторождениях с минеральным сырьем, не требующем применения буровзрывного способа на его выемке. Драглайны установлены в карьерах либо на вскрытии залежей полезного ископаемого с совмещением перевалки рыхлых вскрышных горных пород четвертичного возраста по кратчайшему расстоянию в выработанное пространство карьера, либо на погрузке вскрышных пород или полезного ископаемого в железнодорожный транспорт (карьеры на месторождении цементного сырья Фокинское в Брянской области, карьер по добыче гранита для производства щебня на Шкуралатовском месторождении).

По карьерам на месторождениях минерального сырья, представленного крепкими известняками, доломитами, и т.п., все буровые станки распределены в соответствии с объемами перерабатываемой горной массы. Крепость разрабатываемых горных пород обусловливает необходимость их рыхления перед экскавацией с применением буровзрывного способа.

Линейка карьерных экскаваторов представлена машинами с канатным и гидравлическим приводом рабочего оборудования. Основной тенденцией в использовании экскаваторов на открытых горных работах является совместная работа машин с канатным приводом и емкостью ковша 5-15 м^3 с машинами с гидравлическим приводом рабочего оборудования и емкостью ковша в диапазоне от 2 до 20 м^3. Практически все экскаваторы

работают в карьерах за исключением небольшого количества, работающего на поверхностных расходных складах полезных ископаемых с отгрузкой в железнодорожный транспорт с выходом на Российские железные дороги для доставки конечному потребителю.

Транспортная составляющая горных пород во всех карьерах за редким исключением представлена автомобильным транспортом. Удельный вес автосамосвалов грузоподъемностью 20-30 т (автосамосвалы общего назначения), 25-40 т (в т.ч. шарнирно-сочлененные автосамосвалы повышенной проходимости), 55-60 т, 130 т в структуре парка в карьерах на исследуемых месторождениях составляет соответственно 39,7; 52,1; 6,3; и 1,9 %. Железнодорожный транспорт из 185 карьеров, включенных в план исследований, используется на вывозке полезного ископаемого из семи карьеров на месторождениях цементного сырья – Пикалевском (2), «Большевик», Себряковском, Фокинском, Белгородском и Алексеевском; из одного карьера на месторождении минерального сырья для производства металлургических флюсов - Агаповском; из четырёх карьеров на месторождениях минерального сырья для производства щебня – Вяземском (2), Шкурлатовском, Первоуральском; из двух карьеров на месторождениях хризотил-асбеста - Баженовском и Киембайском. В последних двух карьерах транспортная логистика горных пород организована по следующей схеме. На вывозке всего объема горной массы (вскрышные породы и полезное ископаемое) от экскаваторов используют автомобильный транспорт грузоподъёмностью 60 и 130 т. Далее все горные породы отсыпают на внутрикарьерных складах. Со складов карьерными экскаваторами ЭКГ-8 или ЭКГ-10 вскрышные породы отгружают в железнодорожной транспорт и вывозят на породные отвалы, а полезное ископаемое загружают в думпкары аналогичными экскаваторами с последующей транспортировкой на обогатительные фабрики.

Практически во всех карьерах (171) в настоящее время горные породы (вскрыша и полезное ископаемое) на исследуемых месторождениях вывозят на поверхность исключительно в автосамосвалах грузоподъемностью от 20 до 130 т.

По нашей оценке, объем горной массы, перерабатываемой ежегодно в карьерах на исследуемых месторождениях нерудных полезных ископаемых, составляет 686 млн. т в год. Собственниками карьеров на исследуемых месторождениях, при разработке которых используют исключительно автомобильный транспорт, задействован парк горных и транспортных машин, состоящий из 2495 единиц. В него входят 223 буровых станка, 19 драглайнов, 717 гусеничных карьерных экскаваторов, 1536 автосамосвалов грузоподъемностью 20-130 т.

Выводы. По результатам наших работ, основанных на использовании информационных ресурсов дистанционного зондирования Земли из космоса, получены новые знания о горнотранспортном оборудовании в карьерах по добыче нерудных полезных ископаемых на территории России, а также показателях карьерной логистики горных пород в карьерах и за их пределами.

Список литературы

1. Космические методы в составе комплексного деформационного мониторинга земной поверхности горного предприятия / М.Р. Пономаренко, Ю.И. Кутепов, М.А. Волков [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 12.– С. 103–113.

2. Крамаров С.О., Митясова О.Ю., Храмов В.В. Спутниковая идентификация объектов земной поверхности с использованием неортогонального описания исходных данных // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 4. – С. 154–166.

3. Корниенко С.Г. Характеристика антропогенных трансформаций ландшафтов в районе Бованенковского месторождения по данным спутников Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2022. – Т. 19. – № 2. – С. 106–129.

4. Коротаева А.Э., Пашкевич М.А. Применение данных спектральной съемки для экологического мониторинга водной растительности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5–2. – С. 231–244.

5. Deep convolutional neural net-works for surface coal mines determination from sentinel-2 images / L. Madhuanand, P. Sadavarte, A.J.H. Visschedijk [et al.] // European Journal of Remote Sens. 2021. – V. 54. – I. 1.– P. 296–309.

6. Methane Emissions from Superemitting Coal Mines in Australia Quantified Using TROPOMI Satellite Observations / P. Sadavarte, S. Pandey, J.D. Maasakkers [et al.] // Environmental Science and Technology. – 2021. – DOI: 10.1021/acs.est.1c03976.

7. Remote sensing of mining and haul-age equipment arrangement in Russia: A case-study of the coal and iron ore industry / I.V. Zenkov, A.S. Morin, V.N. Vokin [et al.] // Eurasian mining. – 2020. – No. 2. – PP. 46–49.

8. Remote-Sensing Evaluation and Temporal and Spatial Change Detection of Ecological Environment Quality in Coal-Mining Areas / X. Nie, Z. Hu, M. Ruan [et al.] // Remote Sens. – 2022. – 14. 345.

9. Mapping of Aluminum Concentration in Bauxite Mining Residues Using Sentinel-2 Imagery / S. Kasmaeeyazdi, E. Mandanici, E. Balomenos [et al.] // Remote Sens. 2021. – 13(8):1517. – doi.org/10.3390/rs13081517.

10. Combining Satellite InSAR, Slope Units and Finite Element Modeling for Stability Analysis in Mining Waste Disposal Area/ J. López-Vinielles, J.A. Fernández-Merodo, P. Ezquerro [et al.] // Remote Sens. – 2021. – 13(10):2008. – doi.org/10.3390/rs13102008.

11. Ritesh Mujawdiya, R.S. Chatterjee, Dheeraj Kumar. MODIS land surface temperature time series decomposition for detecting and characterizing temporal intensity variations of coal fire induced thermal anomalies in Jharia coalfield, India // Geocarto International. – 2020. – DOI: 10.1080/10106049.2020.1818853.

12. Yi Xu, Hongdong Fan, Libo Dang. Monitoring coal seam fires in Xinjiang using comprehensive thermal infrared and time series InSAR detection // International Journal of Remote Sensing. – 2021. – V. 42. – I. 6. – P. 2220–2245.

13. https://www.google.com.earth.

УДК 622.271(73):550.814

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАРЬЕРНЫХ МАШИН В ПО ДОБЫЧЕ ЦЕМЕНТНОГО СЫРЬЯ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

[1]д.т.н. Зеньков И.В., [2]к.т.н. Черепанов Е.В., [3]Терехина К.Ф., [4]к.т.н. Нефедов Б.Н.

1 – ООО «Сибирский научно-исследовательский институт горного и маркшейдерского дела», г. Красноярск, Россия

2 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия

4 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. По результатам дистанционного мониторинга исследовано состояние горных работ в карьерах по добыче минерального сырья, используемого цементными заводами на территории России. Изучен парк работающих горных и транспортных машин в цементных карьерах. Определена производственная мощность каждого карьера по горной массе. В итоге определен совокупный производственный потенциал карьеров по горной массе на территории России на уровне 210 млн. т в год.

Ключевые слова: цементная промышленность, открытые горные работы, карьеры по добыче цементного сырья, производственный потенциал горнодобывающего предприятия, горнотранспортное оборудование, дистанционный мониторинг.

Введение. На территории промышленно развитых регионов России в открытой разработке, начиная со второй половины XX в., находятся многочисленные месторождения цементного сырья. Многие месторождения являются уникальными по запасам полезного ископаемого, используемого цементными заводами. Такие месторождения находятся в Европейской части России и на Урале. Разработка месторождений на этих территориях начиналась с производства открытых горных работ – именно этот способ добычи полезных ископаемых обеспечивает масштабные объемы выемки цементного сырья из недр, в котором всегда нуждается промышленный сектор экономики любого развивающегося или развитого государства. После второй мировой войны СССР, как никогда остро нуждался в значительных количествах цемента различных марок, поэтому на промышленное освоение минеральной базы для цементной промышленности были направлены колоссальные технические, финансовые и людские ресурсы. В последние десятилетия в сфере наук о Земле большое количество исследования проводится с использованием ресурсов дистанционного зондирования Земли из космоса, что надлежащим образом отражено в специальной научной литературе [1-8]. Аналогичными информационными ресурсами пользуется наша школа в решении задач российского недропользования.

Результаты исследований технологических показателей карьеров и экологии открытых горных работ на месторождениях цементного сырья. В план наших исследований включены 46 районов с нарушенными землями, состоящих из 60 карьеров и 152 породных отвалов, на 46 месторождениях цементного сырья. Главная цель исследования – по данным дистанционного зондирования Земли из космоса изучить состояние открытых горных работ на месторождениях цементного сырья. Комплексное исследование проведено в ходе решения следующих взаимоувязанных задач: по снимкам из космоса определены регионы России, в которых работают цементные заводы, и выявлены места расположения карьеров на месторождениях цементного сырья (при решении этой задачи в небольшом объеме была использована информация, представленная в открытых источниках); исследованы основные характеристики открытых горных работ; определено горнотранспортное оборудование, находящееся в карьерах; рассчитана годовая производительность экскаваторов в каждом карьере, установленных на вскрышных и добычных работах; рассчитан суммарный объем горных пород, поставляемых на цементные заводы России в границах календарного года.

Информация о месторождениях цементного сырья и карьерах с позиции их географического расположения по федеральным округам на территории России, полученная с использованием спутниковой съемки, представлена в табл. 1 [9].

Таблица 1

Распределение месторождений цементного сырья и карьеров по федеральным округам на территории России

Название федерального округа	Количество месторождений цементного сырья, ед.	Количество карьеров, ед.
Северо-Западный	4	6
Центральный	10	11
Южный и Северо-Кавказский	7	9
Приволжский	10	14
Уральский	5	8
Сибирский	5	6
Дальневосточный	5	6

По результатам спутниковой съемки установлены регионы (32), на территории которых работают цементные заводы, в организационной структуре которых имеется карьер (два-три карьера) на месторождениях минерального сырья (таблица 2) [9]. Все исследуемые месторождения цементного сырья условно разделены на две группы: горизонтально (либо с углами падения 2-3°) залегающие слои продуктивных карбонатных или глинистых пород, перекрытых рыхлыми горными породами четвертичного возраста; залежи карбонатных пород, имеющих форму крупных штокверков с размером по двум осям (x, y) до нескольких десятков километров и по вертикальной оси z до нескольких сотен метров. Горно-геологическое строение месторождений, входящих в первую группу, позволяет развивать открытые горные работы без углубки в соответствии с принципами сплошных однобортовых систем разработки.

Такие месторождения, как правило, находятся на территориях с равнинным рельефом. Месторождения, включенные во вторую группу, находятся в местах с расчлененным (возвышенности) или горным рельефом. При разработке месторождений из второй группы горные работы проектируют в соответствии с принципами углубочных систем разработки, которые подразумевают углубление дна карьера с одновременной разноской его борта (бортов). При разработке всех месторождений к вскрышным породам относят верхний слой горных пород четвертичного возраста мощностью до 30 м и некондиционные горные породы, встречающиеся в залежи полезного ископаемого, размещаемые в породных отвалах.

Отметим, что в зависимости от количества и мощности цементных заводов, а также горно-геологического строения месторождений минерального сырья последние могут разрабатываться одним карьером или группой карьеров. В этой связи, как было установлено по данным спутниковой съемки, количество карьеров, работающих на месторождениях цементного сырья, в 1,3 раза превосходит количество последних. Анализ географического размещения карьеров высвечивает следующую дисперсию размещения горнодобывающих предприятий по добыче минерального сырья для цементных заводов [9].

Более половины месторождений (26) разрабатывается 33 карьерами в регионах европейской части России (до Урала), что объясняется исторически сложившимся развитым промышленным потенциалом и концентрацией населения.

В более компактном секторе – в границах Среднего и Южного Урала, Оренбургской области в открытой разработке находится десять месторождений цементного сырья, запасы которых отрабатывают 15 карьерами. В самом протяженном географическом секторе России – от г. Новосибирска до южных районов Приморского края – горные работы ведутся в 12 карьерах цементной отрасли на десяти месторождениях [9].

Для более наглядного представления имеющейся информации все полученные данные территориальных агрегатов, характеризующих состояние цементной промышленности, были трансформированы в три группы в соответствии с географической привязкой: европейская часть России, территории Среднего и Южного Урала, Оренбургская область, регионы Сибири и Дальнего Востока (табл. 2). При составлении таблицы данные для регионов европейской части России и Урала были получены путем считывания информации с космоснимков при движении по территории в направлении с севера на юг и с запада на восток, а при исследовании территории Сибири и Дальнего Востока – в широтном направлении.

В основном эти месторождения находятся на территориях с равнинной местностью или со слабопологим рельефом с перепадом высот 10-20 м на один километр земной поверхности. Глубина таких карьеров чаще всего находится в диапазоне 30-60 м. На трех месторождениях отметка дна карьера превышает 60 м, достигая 100 м на одном из месторождений. На месторождениях цементного сырья, сформированных в ходе глобальных геологических процессов в гористой местности, работают карьеры нагорного типа [9].

Таблица 2

География разрабатываемых месторождений цементного сырья на территории России и характеристики открытых горных работ

Название региона	Название месторождения цементного сырья	Глубина карьера, м (высота борта, м)
Регионы европейской части России		
Ленинградская область	Пикалевское Сланцевское	45-60 45
Архангельская область	Савинское	40-45
Республика Коми	Воркутинское	22-25
Калужская область	Борщевское	48-50
Московская область	Щуровское	26-30
Тульская область	Гуровское	30-60
Брянская область	Фокинское	30-40
Рязанская область	Серебрянское-I Кумовогорское	45-50 35-40
Белгородская область	Белгородское Стойленское	75-80 10-12
Пензенская область	Сурское	35
Липецкая область	Сокольско-Ситовское	50-55
Воронежская область	Подгоренское	50
Ульяновская область	Белый ключ	50
Республика Мордовия	Алексеевское	30-35
Саратовская область	Большевик Коммунар	45-90 60
Волгоградская область	Себряковское	45-100
Карачаево-Черкесская Республика	Джегутинское	30 (120)
Краснодарский край	Новороссийское IV Верхнебаканское Новороссийское I+III	20 (40) 15 (50) 30 (240)
Чеченская Республика	Дуба-Юртовское Черногорское	16 30
Регионы Урала и Оренбургская область		
Пермский край	Ново-Пашийское	25 (60)
Свердловская область	Невьянское-I Кунарское Сухоложское	35-40 60 10
Челябинская область	Гора Груздовник Шеинское	20 (75) 40-45
Республика Башкортостан (восточные территории)	Мичуринское Шах-Тау Янгельское 2	16 30 16-20
Оренбургская область	Аккермановское	45-50
Регионы Сибири и Дальнего Востока		
Новосибирская область	Чернореченское	55-60
Кемеровская область	Соломинское	55-60
Красноярский край	Торгашинское Кузнецовское	40-45 15-20
Иркутская область	Перевал	150-160
Республика Бурятия	Таракановское	30 (60)

Название региона	Название месторождения цементного сырья	Глубина карьера, м (высота борта, м)
Республика Саха (Якутия)	Сасаабытское	45-50
Еврейская автономная область	Теплоозерское	45-50
Приморский край	Длинногорское Кулешовское	40-50 15-18

Примечание: термин «глубина карьера» относится к карьерам, работающим на равнинной местности, а термин «высота борта» относится к карьерам нагорного типа, работающим на территориях с гористым рельефом

В настоящее время в карьерах, на расходных складах и на промышленных площадках горнодобывающих предприятий по разработке открытым способом месторождений минерального сырья, используемого в цементной промышленности на территории России, задействован парк горнотранспортного оборудования, представленный в табл. 3. Все данные в табл. 3 получены с использованием информации на спутниковых снимках.

Таблица 3

Количественный состав горнотранспортного оборудования
в карьерах на месторождениях цементного сырья на территории России

Наименование горнотранспортного оборудования	Кол-во, ед.
Буровой станок СБШ-250	46
Пневмоударная буровая установка Atlas Copco Roc L8	9
Драглайн ЭШ-4/40; ЭШ-10/70; 13/50; ЭШ-20/90	10; 12; 3; 1
Экскаватор карьерный ЭКГ-5А; ЭКГ-8и (ЭКГ-10)	104; 30
Экскаватор гидравлический типа «обратная лопата» и «прямая лопата» с емкостью ковша 2,5-10 м^3	90
Экскаватор роторный ЭРГ-1600	1
Отвалообразовватель ОШ-1600-110	1
Фронтальный погрузчик с емкостью ковша 4-6 м^3 на базе автомобильного шасси	15
Фрезерный комбайн	7
Автосамосвалы карьерные грузоподъемностью 30-55 т	306
Автосамосвалы общего назначения с колесной формулой 6×4 грузоподъемностью 20-30 т	203
Шарнирно-сочлененные карьерные автосамосвалы повышенной проходимости грузоподъемностью 25-30 т	68
Тепловоз ТЭМ-7	28
Электровоз карьерный EL-21	8
Железнодорожные думпкары 5ВС-60	36
Железнодорожные думпкары 2ВС-105	286
Итого горных и транспортных машин	1264

По нашей оценке, объем горной массы, перерабатываемой в ходе открытой разработки месторождений цементного сырья, на территории Российской Федерации составляет 221,9 млн. т в год. Объем горных пород, требующих буровзрывной подготовки перед экскавацией, находится на уровне 81 млн. т в год.

Общая производственная мощность цементных заводов по выпуску востребованных рынком марок цемента составляет не менее 101 млн. т в год. По данным спутниковой съемки, на заводах, работающих по технологии в соответствии с «мокрым» способом, установлено 102 вращающихся печи. В последние годы годовой объем производства цемента в отрасли находится на уровне 60 млн. т. Это означает, что производственные мощности цементных заводов загружены всего лишь на 60 %.

Вместе с тем парк горных и транспортных машин, состоящий из 1264 единиц способен обеспечить полную загрузку производственных мощностей всей совокупности цементных заводов. В него входят 55 буровых станков, 26 драглайнов с емкостью ковша от 4 до 20 м^3, 224 гусеничных карьерных экскаватора, один роторный экскаватор и один отвалообразователь ОШР-1600/110, семь фрезерных комбайнов, 15 погрузчиков с емкостью ковша 4-6 м^3 на автомобильном шасси, 577 автосамосвалов грузоподъемностью 20-55 т и 358 единиц железнодорожного подвижного состава.

Вывод. Таким образом по данным спутниковой съемки и результатам аналитических расчетов объем горной массы, перерабатываемой в ходе открытой разработки месторождений цементного сырья, на территории Российской Федерации составляет 200 млн. т в год. На открытых горных работах задействован парк горных и транспортных машин в количестве 1264 ед.

Список литературы

1. Космические методы в составе комплексного деформационного мониторинга земной поверхности горного предприятия / М.Р. Пономаренко, Ю.И. Кутепов, М.А. Волков [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 12. – С. 103–113.

2. Крамаров С.О., Митясова О.Ю., Храмов В.В. Спутниковая идентификация объектов земной поверхности с использованием неортогонального описания исходных данных // Горный информационно-аналитический бюллетень.– 2021. – № 4. – С. 154–166.

3. 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.

4. Deep convolutional neural net-works for surface coal mines determination from sentinel-2 images / L. Madhuanand, P. Sadavarte, A.J.H. Visschedijk [et al] // European Journal of Remote Sens. – 2021. – V. 54. – I. 1. – PP. 296–309.

5. Methane Emissions from Superemitting Coal Mines in Australia Quantified Using TROPOMI Satellite Observations / P. Sadavarte, S. Pandey, J.D. Maasakkers [et al] // Environmental Science and Technology. – 2021. – DOI: 10.1021/acs.est.1c03976.

6. Remote sensing of mining and haul-age equipment arrangement in Russia: A case-study of the coal and iron ore industry / I.V. Zenkov, A.S. Morin, V.N. Vokin [et al.] // Eurasian mining. 2020. – No. 2. – PP. 46–49.

7. Remote-Sensing Evaluation and Temporal and Spatial Change Detection of Ecological Environment Quality in Coal-Mining Areas / X. Nie, Z. Hu, M. Ruan [et al.] // Remote Sens. – 2022. – No. 14. – P. 345.

8. Evaluation of Ecological Stability in Semi-Arid Open-Pit Coal Mining Area Based on Structure and Function Coupling during 2002-2017 / X. Li, S. Lei, Y. Liu [et al.] // Remote Sens. – 2021. – 13(24):5040. – doi.org/10.3390/rs13245040.

9. https://www.google.com.earth.

УДК 622.271(73):550.814

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ГОРНОТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОМ УГОЛЬНОМ КАРЬЕРЕ В СОСТАВЕ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ АВСТРАЛИИ

[1]д.т.н. Зеньков И.В., [2]к.т.н. Черепанов Е.В., [3]Мулюшкина А.А., [4]к.т.н. Нефедов Б.Н.
1 – ООО «Сибирский научно-исследовательский институт горного и маркшейдерского дела», г. Красноярск, Россия
2 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия
3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия
4 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. В статье представлено исследование динамики горных работ в крупнейшем австралийском карьере по добыче угля, работающего более 40 лет на территории восточного побережья Австралии. По данным спутниковой съемки и результатам аналитических расчетов выявлены технологические показатели карьера, количество работающих горных и транспортных машин, элементы систем разработки угольных месторождений, а также показано взаимодействие с окружающей средой. Сделан вывод о том, что на исследуемом карьере в полной мере реализован эффект от масштаба производства, позволяющий держать объем добычи угля на уровне 60 млн. т в год.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, Австралия, штат Квинсленд, карьер по добыче угля, технологический потенциал, горные и транспортные машины, системы разработки месторождений, эффект от масштаба производства.

Введение. По результатам спутниковой съемки установлено, что на восточном побережье Австралии в секторе между городами Dysart и Moranbah работает самый крупный в мире карьер по добыче угля с условным названием Saraji. 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. Это и в наши дни 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, решения которых представлены в виде небольшой подборки трудов российских и зарубежных ученых [1-9].

Исследование динамики горных работ в карьере с использованием ресурсов дистанционного мониторинга Земли из космоса. С целью получения новых знаний о производстве открытых горных работ в тропическом климате, в границах крупных угольных бассейнов на восточном побережье Австралии проведен дистанционный мониторинг работы карьера Saraji с использованием результатов спутниковой съемки [10]. Это горнодобывающее предприятие начало свою деятельность в начале 1970-х гг. Разрезная траншея в строительный период была заложена по выходам угольных пластов под наносы четвертичных отложений. В 1984 г. по данным спутниковой съемки протяженность фронта горных работ в карьере составляла 39,7 км. В настоящее время этот показатель увеличен на 10,4 км до 50,1 км. Контур горного отвода в 1984 г. обведен линией синего цвета, а его расширение к 2022 г. - линией желтого цвета (рис. 1).

Разрабатываемый угленасыщенный участок месторождения состоит из нескольких рабочих пластов, общая мощность которых местами достигает 25 м. Залегание пласта

практически горизонтальное с небольшими углами в диапазоне 3-5°. Пласты по вертикали разделены между собой породными прослоями. Угольные пласты и вскрышные породы перед их экскавацией требуют рыхления буровзрывным способом. Исключение составляет верхний слой рыхлых горных пород четвертичного возраста мощностью до 3 м.

В конструкции рабочего борта карьера имеется шесть охранных породных целиков-призм, которые отмечены точками 1-6 на рис. 1. На поверхности пяти из них (точки 1) протекают ручьи (направление движения воды показано стрелками синего цвета), впадающие в реку Исаак, а на поверхности одного целика шириной 300 м проложена двухпутная железная дорога. Точкой 2 показано место прохода железной дороги через карьер к стационарным складам угля, расположенным на промышленной площадке карьера.

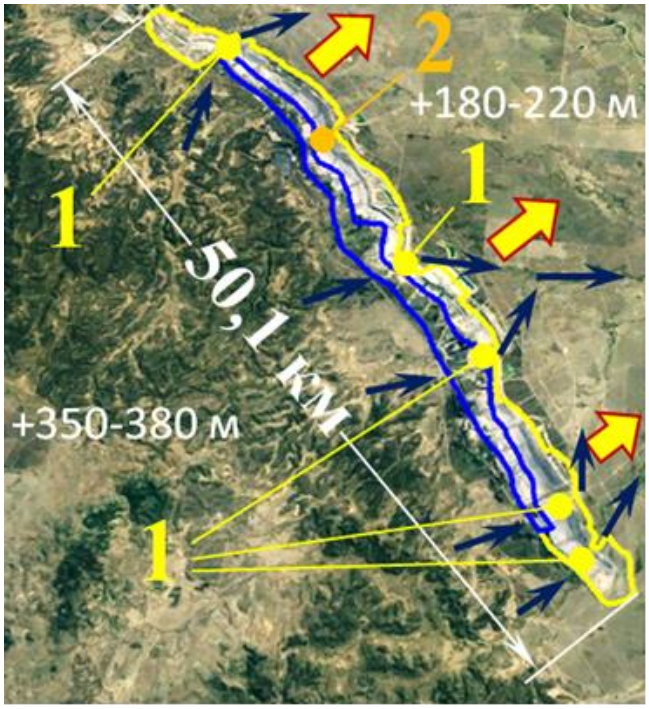


Рис. 1. Карьер по добыче угля Saraji на снимке из космоса

В настоящее время в карьере уголь добывают в 35 выемочных блоках. Каждый блок вскрыт двумя фланговыми въездными траншеями с заездом автотранспорта на почву угольного пласта. Система разработки - однобортовая с размещением вскрышных пород в выработанном пространстве карьера. Направление развития горных работ показано на рис. 1 стрелками желтого цвета. Конструкция рабочего борта карьера включает несколько вскрышных уступов и два-три добычных уступа.

Фрагмент космоснимка с работами по бурению взрывных скважин четырьмя станками в толще угольного пласта (обведены кольцами) показан на рис. 2 *а*. Скважины бурят по диагональной сетке с размерами 7×9 м. Выемка и перемещение горной массы производится мощными экскаваторно-автомобильными комплексами, в состав которых включены экскаваторы с канатным приводом рабочего оборудования или гидравлические экскаваторы типа «прямая» или «обратная лопата» с емкостью ковша 20-50 м^3 и автосамосвалы грузоподъемностью от 240 до 360 т.

Фрагмент отработки вскрышного уступа мехлопатой с емкостью ковша 50 м^3 с погрузкой горных пород в автосамосвалы грузоподъемностью 360 т, установленные по обе стороны от экскаватора, показан на рис. 2 *б*. В этом случае экскаватор не простаивает в ожидании постановки самосвала под погрузку, что обеспечивает, в свою очередь, его производительность, близкую к максимально возможной.

Рис. 2. Фрагменты горных работ в карьере Saraji на снимках из космоса: а – бурение взрывных скважин; б – выемка и погрузка вскрышных пород; в – перемещение вскрышных пород драглайном в выработанное пространство карьера

На перевалке надугольной вскрышной толщи в выработанное пространство в карьере работают драглайны с емкостью ковша 100 м^3 и длиной стрелы 100 м (рис. 2 *в*). В момент получения снимка из космоса драглайн производит разгрузку ковша в отвал.

По данным спутниковой съемки выявлены следующие геометрические и технологические параметры карьера и транспортной логистики. Глубина карьера переменная и составляет 140 м на северо-западном фланге. На юго-восточном фланге этот параметр не превышает 90 м. Расстояние транспортировки вскрышных пород на внутренние отвалы не более 4,2 км. В то же время этот же показатель для угля составляет 14 км. Отличительной особенностью логистики этого карьера является значительное расстояние вывозки угля на обогатительные фабрики.

В состав горнотранспортного оборудования входят 44 буровых станка, 14 драглайнов (российский аналог ЭШ-100/100). На выемке горных пород установлено 18 гидравлических экскаваторов типа «прямая» и «обратная лопата» с емкостью ковша от 20 до 40 м^3, а также 30 гусеничных экскаваторов с канатным приводом рабочего оборудования и емкостью ковша 40-50 м^3. На вывозке горной массы из забоев задействовано 260 автосамосвалов грузоподъемностью в диапазоне 240-360 т.

Вдоль западной границы горного отвода работают три обогатительные фабрики, уголь с которых размещают в стационарных складах. Рядом с ними проложены петлевые развороты железной дороги, проходя по которым, железнодорожные составы загружаются углем. Далее уголь вывозят в направлении морского побережья на перегрузочные логистические терминалы.

По нашей оценке, исходя из горно-геологического строения месторождения и комплектации горнотранспортного оборудования, производственная мощность карьера по добыче угля при мощности угольных пластов 15 м и годовом подвигании фронта горных работ 60 м, может составить 60 млн. т. В то же время годовой объем добычи угля определится спросом со стороны потребителей и мировой ценовой политикой.

Выводы. По результатам спутниковой съемки определены состав горнотранспортного оборудования, работающего в карьере по добыче угля Saraji в штате Квинсленд, технологический объем вскрышных работ и объем добычи угля. По нашей оценке, добыча угля в этом карьере характеризуется коэффициентом вскрыши на уровне 8 м^3/т.

Стабильный мировой спрос на уголь, добываемый в этом карьере, позволяет держать производственную мощность по добыче угля на уровне 60 млн. т в год. По данным дистанционного мониторинга, в последние четыре десятилетия в исследуемом карьере по добыче угля выявлен стабильно растущий тренд в расширении границ и объемов производства открытых горных работ.

Список литературы

1. Космические методы в составе комплексного деформационного мониторинга земной поверхности горного предприятия / М.Р. Пономаренко, Ю.И. Кутепов, М.А. Волков [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 12. – С. 103–113.

2. Крамаров С.О., Митясова О.Ю., Храмов В.В. Спутниковая идентификация объектов земной поверхности с использованием неортогонального описания исходных данных // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 4. – С. 154–166.

3. 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.

4. Корниенко С.Г. Характеристика антропогенных трансформаций ландшафтов в районе Бованенковского месторождения по данным спутников Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2022. – Т. 19. – № 2. – С. 106-129.

5. Samsonov S., Baryakh A. Estimation of Deformation Intensity above a Flooded Potash Mine Near Berezniki (Perm Krai, Russia) with SAR Interferometry // Remote Sens. – 2020. – 12(19):3215.

6. Deep convolutional neural net-works for surface coal mines determination from sentinel-2 images / L. Madhuanand, P. Sadavarte, A.J.H. Visschedijk [et al.] // European Journal of Remote Sens. – 2021. – V. 54. – I. 1. – P. 296–309.

7. Methane Emissions from Superemitting Coal Mines in Australia Quantified Using TROPOMI Satellite Observations / P. Sadavarte, S. Pandey, J.D. Maasakkers [et al.] // Environmental Science and Technology. – 2021. – DOI: 10.1021/acs.est.1c03976.

8. Remote sensing of mining and haul-age equipment arrangement in Russia: A case-study of the coal and iron ore industry / I.V. Zenkov, A.S. Morin, V.N. Vokin [et al.] // Eurasian mining. – 2020. – No. 2. – PP. 46–49.

9. Remote-Sensing Evaluation and Temporal and Spatial Change Detection of Ecological Environment Quality in Coal-Mining Areas / X. Nie, Z. Hu, M. Ruan [et al.] // Remote Sens. – 2022. No. 14. – P. 345.

10. https://www.google.com.earth.

УДК 622.271

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕХЛОПАТ

к. т. н. Чаплыгин В. В., к. т. н. Садыков А. А., Матвеев А. В.
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье изложен методический подход и представлены блок-схемы алгоритмов минимизации затрат и определения параметров технологического комплекса при разработке механическими лопатами вскрышных пород карьеров с применением автотранспорта.

Ключевые слова: мехлопата, блок-схема алгоритма, производительность экскаватора, буровой станок, автосамосвал, бульдозер.

В работах [1, 2] представлена формула для расчета производительности механических лопат в зависимости от среднего размера кусков взорванных пород, позволяющая решать различные задачи по оптимизации параметров экскаваторно-автомобильного комплекса с применением мехлопат (ЭАКМЛ):

– выбор величины удельного расхода ВВ в определенных условиях его работы;

– выбора типа мехлопаты путем сравнения их технико-экономических показателей по величине суммарных удельных затрат экскаваторно-автомобильного комплекса;

– выбор технических средств (бурового станка, автосамосвала, бульдозера) разной производительности и стоимости;

– комплексная задача, путем выбора величины удельного расхода ВВ, типа бурового станка, мехлопаты, автосамосвала и бульдозера.

Основой методики расчета и оптимизации параметров технологического комплекса при разработке механическими лопатами вскрышных пород карьеров с применением автотранспорта, как было уже сказано, являются формулы для расчета производительности механических лопат в зависимости от среднего размера кусков взорванных пород. Кроме того, требуется применение соответствующих методик для определения параметров буровзрывных работ и расчета удельных затрат по основным процессам исследуемой технологии, при этом главные задачи предлагаемого методического подхода сводятся к следующему:

– указание очередности действий для достижения целей, предусмотренных каждым оператором укрупненного алгоритма;

– указание источников исходных данных для получения значений параметров процесса;

– выбор последовательности расчетов, принятых в используемых методиках для расчета параметров основных процессов технологического комплекса.

Алгоритмы, с целью оптимизации параметров различных технологий, в горном деле используются сравнительно давно и дают хорошие результаты [3-6].

Реализация предлагаемого методического подхода для определения параметров технологического комплекса и оптимизации затрат при разработке механическими лопатами вскрышных пород карьеров с применением автотранспорта осуществляется в определенном порядке в зависимости от решаемой задачи.

На рис. 1 приведена укрупненная блок-схема алгоритма расчета и оптимизации параметров ЭАКМЛ путем выбора величины удельного расхода ВВ. В этом случае решается задача по оптимизации параметров комплекса в определенных горнотехнических условиях его работы.

Задача по оптимизации параметров экскаваторно-автомобильного комплекса с применением мехлопат (ЭАКМЛ) путем сравнения величины суммарных удельных эксплуатационных затрат экскаваторно-автомобильного комплекса по всем процессам может быть решена путем выбора типа мехлопаты, при этом дополнительно регулируется величина удельного расхода ВВ. На рис. 2 приведена укрупненная блок-схема алгоритма реализации такого методического подхода.

Оптимизации параметров экскаваторно-автомобильного комплекса также может осуществляться путем выбора технических средств комплекса – автосамосвала, бурового станка и бульдозера.

На рис. 3-5 приведены укрупненные блок-схемы алгоритма оптимизации параметров экскаваторно-автомобильного комплекса с применением мехлопат, на которых к алгоритму, приведенному на рис 2, где оптимизация реализуется путем выбора величины удельного расхода ВВ и типа мехлопаты, поочередно добавляются операторы,

позволяющие осуществить выбор автосамосвала (рис. 3), бурового станка (рис. 4) и бульдозера на отвале (рис. 5).

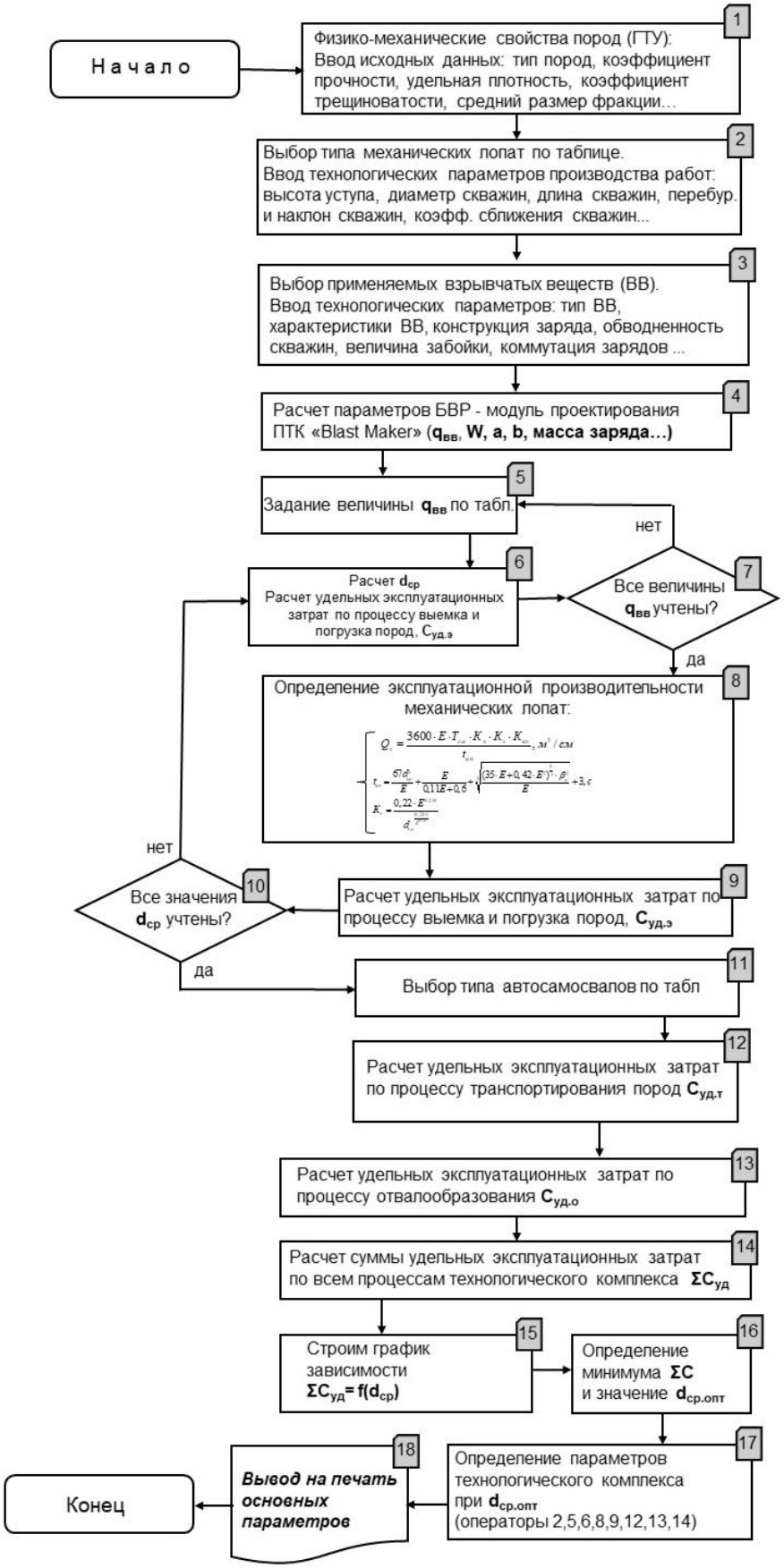


Рис. 1. Укрупненная блок-схема алгоритма оптимизации параметров ЭАКМЛ при разработке вскрышных пород карьеров в определенных условиях его работы

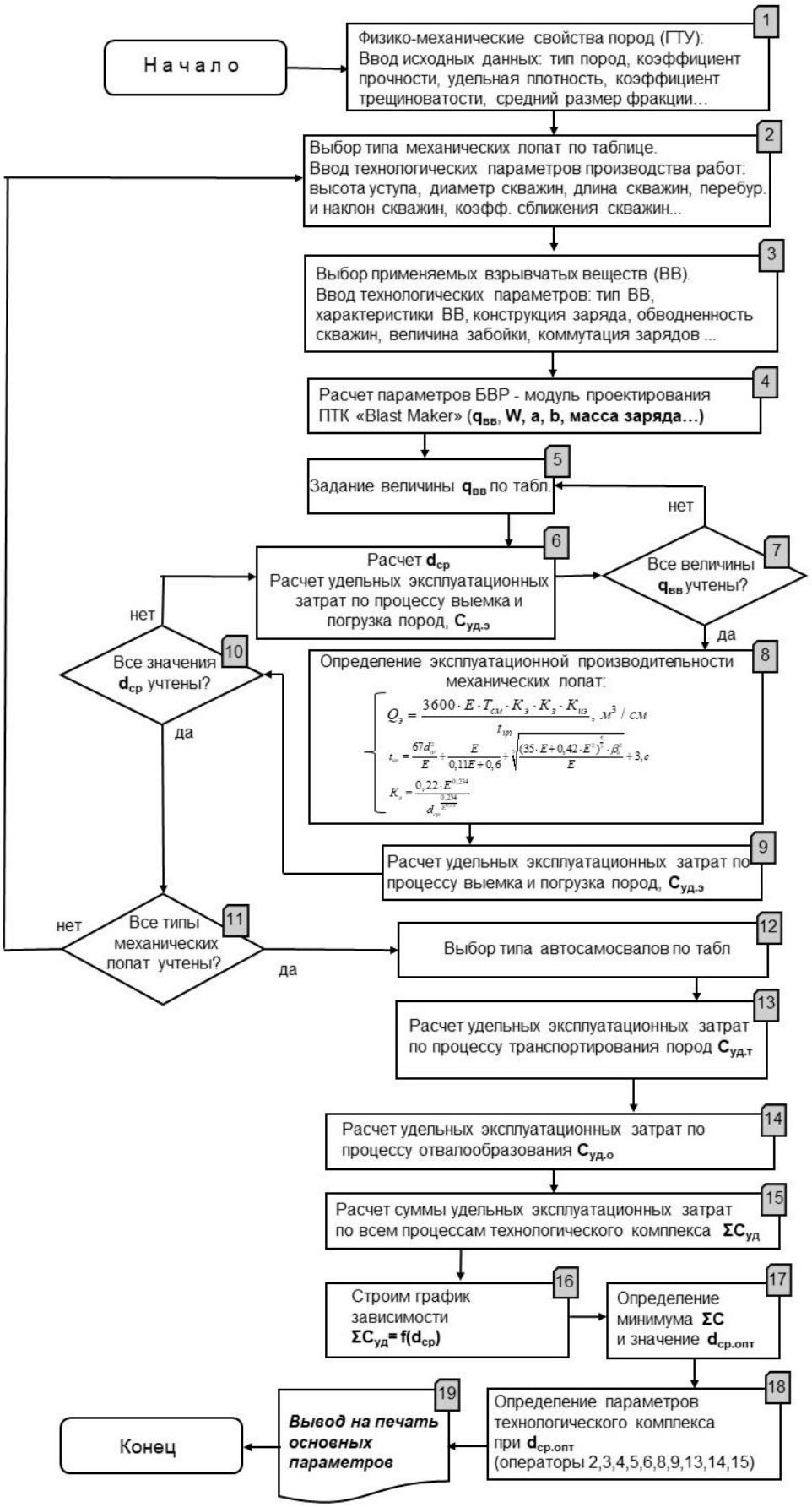


Рис. 2. Укрупненная блок-схема алгоритма оптимизации параметров ЭАКМЛ путем выбора величины удельного расхода ВВ и типа мехлопаты

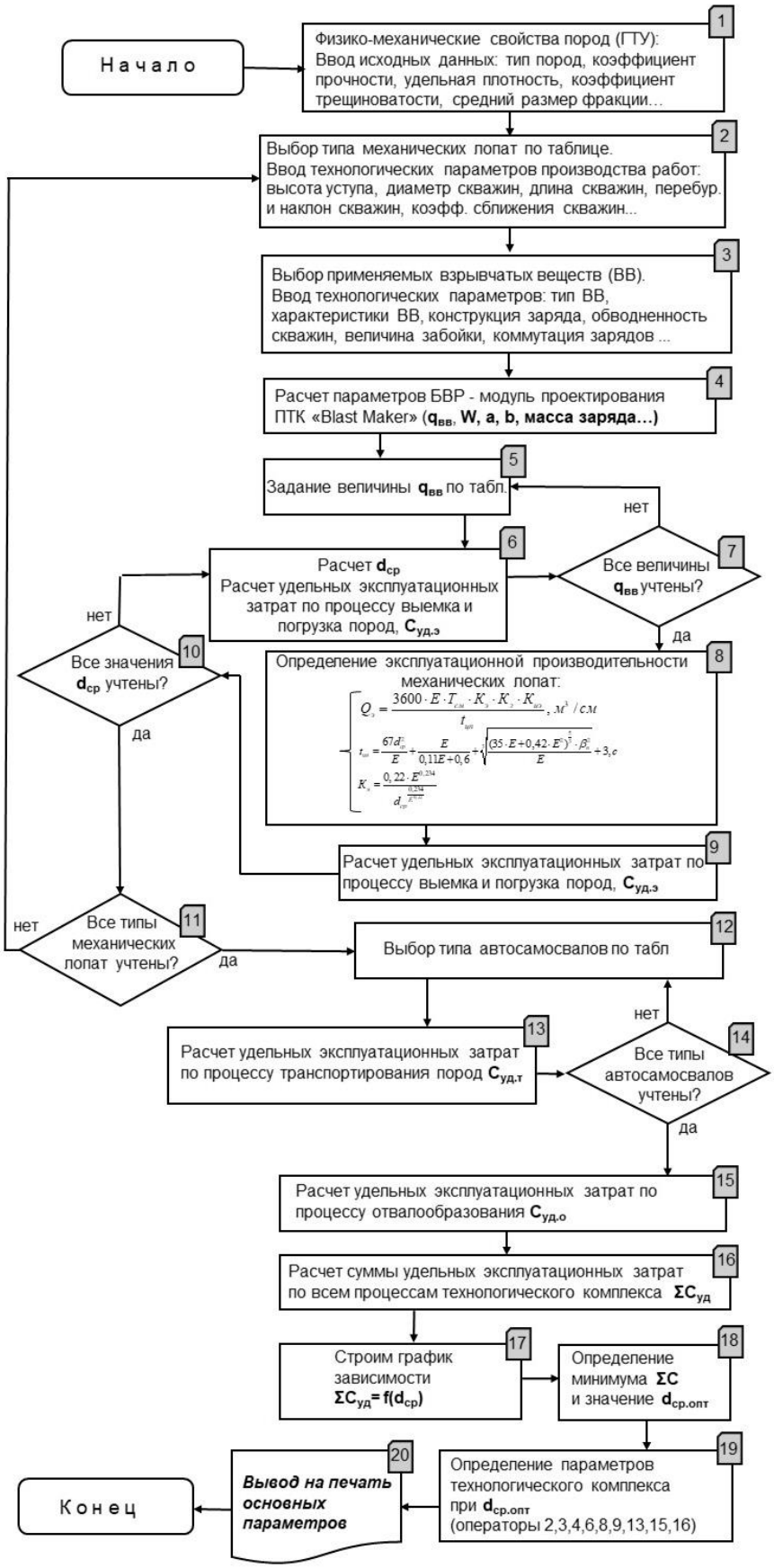


Рис. 3. Укрупненная блок-схема алгоритма оптимизации параметров ЭАКМЛ путем выбора величины удельного расхода ВВ, типа мехлопаты и автосамосвала

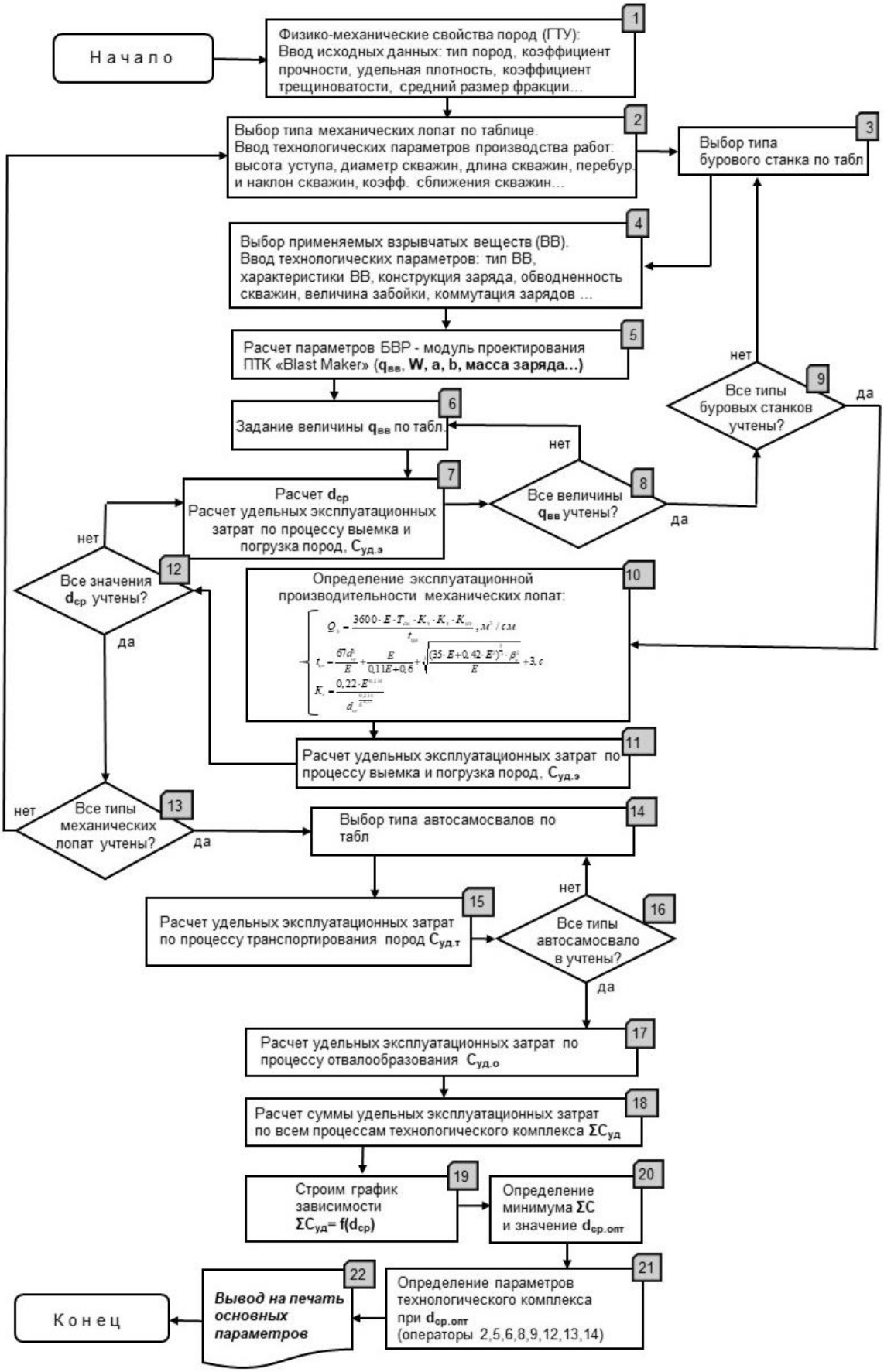


Рис. 4. Укрупненная блок-схема алгоритма оптимизации параметров ЭАКМЛ путем выбора величины удельного расхода ВВ, типа бурового станка, мехлопаты и автосамосвала

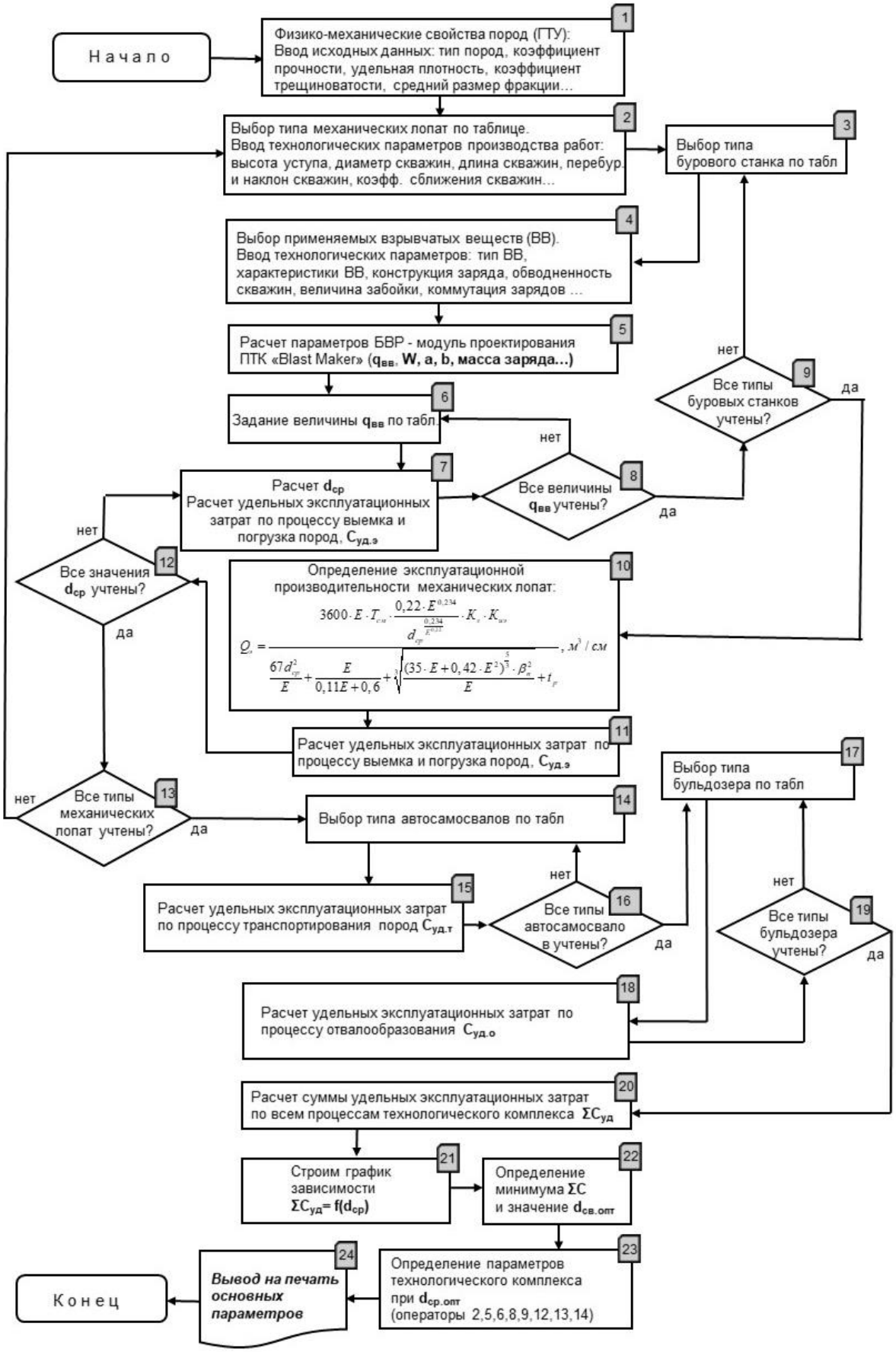


Рис. 5. Укрупненная блок-схема комплексного алгоритма оптимизации параметров ЭАКМЛ путем выбора величины удельного расхода ВВ, типа бурового станка, мехлопаты, автосамосвала и бульдозера

Выводы. В статье на основе проведенных ранее исследований предложены следующие укрупненные блок-схемы алгоритмов:

– оптимизации параметров ЭАКМЛ при разработке вскрышных пород карьеров в определенных условиях его работы;

– оптимизации параметров ЭАКМЛ путем выбора величины удельного расхода ВВ и типа мехлопаты;

– оптимизации параметров ЭАКМЛ путем выбора величины удельного расхода ВВ, типа мехлопаты и автосамосвала;

– оптимизации параметров ЭАКМЛ путем выбора величины удельного расхода ВВ, типа бурового станка, мехлопаты и автосамосвала;

– оптимизации параметров ЭАКМЛ путем выбора величины удельного расхода ВВ, типа бурового станка, мехлопаты, автосамосвала и бульдозера.

Все это позволит принимать рациональные решения при разработке механическими лопатами вскрышных пород карьеров с применением автотранспорта.

Список литературы

1. Чаплыгин В.В., Садыков А.А., Матвеев А.В. К вопросу оптимизации параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород на разрезах Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – №9. – С. 84-98. – DOI: 10.25018/0236149320239084.

2. Федотенко В.С., Чаплыгин В.В., Матвеев А.В. Оптимизация параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами с применением мехлопат. // Маркшейдерия и недропользование. – 2024. – № 1(129). – С. 17-31.

3. Садыков А.А. Обоснование рациональных параметров технологии промышленной добычи янтаря, предотвращающей его измельчение в забое: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – М.: Московский политехнический университет, 2020. – 18 с.

4. Алгоритм определения диаметра насадок гидромониторов с учетом режима работы насосной станции / Д.А. Поклонов, И.А. Мироненко, В.С. Федотенко [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2020. – № 2(138). – 58-66 с. – DOI: 10.26730/1999-4125-2020-2-58-66.

5. Исайченков А.Б. Алгоритм минимизации затрат при применении экскаватора Bucyrus 495HD на разрезе «Тугнуйский» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 9. – С. 251-253.

6. Кононенко Е.А., Кукин А.В. Оптимизация параметров технологии производства щебня из вскрышных пород в условиях Лебединского горно-обогатительного комбината // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 12. – С. 80-85.

РОБОТИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 550.834:622.831

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

д.т.н. Фрянов В.Н., д.т.н. Павлова Л.Д.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье изложен экспериментально-численный метод прогнозирования пространственно-временного расположения концентраторов повышенных напряжений и метана в массиве горных пород при отработке газоносного угольного пласта. Результаты исследований рекомендуются для оценки рисков возникновения аварий и инцидентов в выемочной панели шахты. Предложены способы и средства предотвращения указанных опасных производственных ситуаций.

Ключевые слова: алгоритм, натурные измерения, угольный пласт, напряжения, деформации, подземная выработка, метод конечных элементов, цифровая модель, авария, инцидент.

Введение. На современных угледобывающих предприятиях широко применяется система подземной разработки угольных пластов длинными комплексно-механизированными забоями с полным обрушением пород кровли [1, 2]. На этапе разработки документации на ведение горных работ согласно требованиям Правил безопасности [3] и других нормативных документов сведения о горно-геологических и горнотехнических условиях отработки угольного пласта в пределах выемочных столбов и панелей ограничены информацией, полученной при проведении геологоразведочных работ с расположением разведочных скважин по профильным линиям через 200-300 м. Поэтому основные параметры выемочных столбов и панелей принимаются в проектной документации усреднёнными без учёта изменений свойств угольных пластов и вмещающих пород между разведочными линиями. При подготовке длинных выемочных столбов горно-геологическая информация уточняется. Однако, в этом случае корректировка информации о свойствах горного массива возможна в пределах зоны влияния поперечного сечения подготовительных выработок, а в выемочном столбе, ширина которого (длина лавы) достигает 500 м [4], учёт влияния неравномерности изменения горно-геологических и горнотехнических условий на показатели очистных забоев проводится с недостаточной для практики надёжностью. Отсутствие достоверной информации о состоянии массива горных пород впереди очистного забоя в выемочном столбе приводит к непрогнозируемым отклонениям фактических показателей очистного забоя от плановых. Причинами таких отклонений ритмичной работы очистного забоя при недостоверной информации об изменчивости состояния угольного пласта и вмещающих пород впереди забоев являются следующие внезапные события: обрушения пород кровли, разрушения краевой части угольного пласта, выделения метана из отрабатываемого угольного пласта, прорывы метана из пород почвы пласта или весьма сближенных пластов-спутников, геодинамические явления при воздействии землетрясений природного или техногенного типов и другие.

Одним из направлений повышения достоверности информации о свойствах массива горных пород в выемочном столбе является прогнозирование геомеханического и газодинамического состояния массива горных пород и выявление предвестников опасных производственных ситуаций впереди очистных и подготовительных забоев на этапе разработки проектной документации и при оперативном управлении горными работами.

Результаты прогноза при синтезе полученной при натурных измерениях ретроспективной информации и численного моделирования предвестников опасных

производственных ситуаций в виде запредельных деформаций пород и угольного пласта в окрестности горных выработок, пространственного положения и энергии концентраторов геодинамических явлений в выемочной панели, прорывов метана и воды из соседних выработок позволят заблаговременно разработать и реализовать мероприятия по предотвращению рисков возникновения опасных производственных ситуаций на угольных шахтах.

С учётом изложенного на действующих предприятиях возникает актуальная проблема обоснования предвестников опасных производственных ситуаций, а также способов и средств предотвращения рисков возникновения аварий и инцидентов на угольных шахтах.

Цель исследований. Разработка экспериментально-численного метода прогнозирования напряжённо-деформированного состояния массива горных пород и предвестников опасных производственных ситуаций для обоснования и предотвращения рисков возникновения аварий и инцидентов на угольных шахтах.

Объектом исследования являются закономерности распределения изменчивости горно-геологических и горнотехнических параметров массива горных пород и их влияние на пространственно-временное распределения концентраторов энергии горного давления и геодинамических явлений для обоснования предвестников опасных производственных ситуаций на потенциально опасных участках впереди очистных и подготовительных забоев отрабатываемого угольного пласта выемочной панели.

Методика исследования включает анализ горно-геологического строения массива горных пород, планов развития горных работ, способов и средств натурных измерений деформации горных пород с формированием базы данных. Для прогноза напряжённо-деформированного и газонасыщенного состояния массива горных пород применяются авторские пакеты компьютерных программ [5-7]. При формировании и пополнения базы данных натурных измерений параметров состояния горных выработок и газоносности угольных пластов предлагается использовать метод нейронных сетей [8-10]. Риск возникновения предвестников опасных производственных ситуаций определяется автоматически с учётом совокупности комплекса влияющих факторов. Способы и средства предотвращения аварий и инцидентов принимаются согласно требованиям действующих нормативных документов [3,11,12].

Научные основы экспериментально-численного метода прогноза геомеханического состояния массива горного пород обоснованы в работах [13 -15]. Сущность метода состоит в прогнозировании параметров геомеханических и газодинамических процессов по численным моделям геомеханики с использованием в качестве граничных условий результатов натурных измерений деформаций, напряжений, дебита метана в скважины или горные выработки. Алгоритм экспериментально-численного метода позволяет использовать измеренные величины смещений горных пород не только на границах модели, но и в любой точке модели с известными координатами. Настройка параметров модели по измененным смещениям осуществляется автоматически.

Для прогнозирования геомеханических и газодинамических параметров массива горных пород предлагается использование авторских пакетов компьютерных программ [5-7], в которых реализован алгоритм метода конечных элементов с получением в результате моделирования в пределах геометрической двух- или трехмерной модели следующих геомеханических и газодинамических параметров массива горных пород: полный вектор напряжений, смещений и деформаций, отношение остаточной прочности пород к исходной, фильтрационные параметры массива горных пород такие как проницаемость, давление метана, пористость.

Решение задачи прогноза геомеханических и газодинамических параметров массива горных пород осуществляется в следующих постановках:

– нетронутый горный массив до начала ведения горных работ с учётом гравитационного и геотектонического полей напряжений, в том числе с учётом природных и техногенных микроземлетрясений;

– расчёт геомеханических и газодинамических параметров геомассива под влиянием системы подземных и открытых горных выработок при: упругом и упругопластическом деформировании горных пород; деформирование горных пород с учётом времени эксплуатации выработок;

– расчёт газодинамических параметров геомассива под влиянием подземных и открытых горных выработок: природной газоносности, коллекторов метана при разных вариантах дегазации угольных пластов.

Апробированная область применения компьютерных программ: максимальный размер выемочной панели 10 км, глубина разработки до 1000 м, угол падения свиты пластов 0-90°, количество угольных пластов в свите до 50, максимальное количество угольных пластов и породных слоёв углепородной толщи до 100, общее количество очистных и подготовительных выработок в пределах выемочной панели до 50. По каждому породному слою или угольному пласту вводятся следующие исходные данные: мощность, предел прочности при сжатии. Горные выработки вводятся в задание в виде замкнутых контуров с указанием координат вершин.

В качестве исходных данных, необходимых для формирования граничных условий, используются натурные измерения следующих величин: конвергенция кровли и почвы подготовительной или очистной выработки, конвергенция боков подготовительной выработки, величины пучения пород почвы, давление метана в пласте, изменения прочности угля и пород в боках или кровле подготовительной выработки при её проведении и эксплуатации с указанием времени проведения периодических измерений.

Для оценки изменений прочности пород кровли применяется метод буровых скважин с извлечением керна и определением прочности пород по ГОСТ 24941-81 [19]. Для натурных измерений напряжений и деформаций в массиве горных пород используются методы и приборы, рекомендованные АО «ВНИМИ» [16-18], сейсмического и сейсмоакустического мониторинга – комплексы типа АЭШ, АНГЕЛ, ВОЛНА, КДМ-1, «Массив II», АСКГД [20].

Весьма ценной информацией для настройки параметров математической модели являются результаты измерения напряжений в реальном массиве горных пород. Поэтому рекомендуется измерение напряжений с использованием методов полной или частичной разгрузки [21].

Для идентификации предвестников аварий и инцидентов используется визуально-инструментальная съёмка состояния очистных и подготовительных выработок по пикетам с фотофиксацией деформаций угля и пород по периметру выработок; описание и фотофиксация локальных участков критического состояния пород в виде вывалов, обрушений или расслоений, отжима угля с боков очистных и подготовительных выработок, пучения пород почвы, разрушения элементов крепи, повышения притока воды, суфлярных выделений метана.

Результаты и их обсуждение. Критерием риска возникновения опасных производственных ситуаций являются отклонения фактического состояния геомассива, элементов крепи, параметров шахтной атмосферы от требований нормативных документов. В процессе мониторинга состояния массива горных пород и выработок выделяются и документируются признаки и факты возникновения опасных производственных ситуаций.

В качестве примера аварийного состояния подготовительной выработки на рис. 1 показаны деформации элементов крепи, угольного пласта и вмещающих пород на шахте.

Численное моделирование напряжённо-деформированного состояния геомассива осуществляется с учетом пространственного положения системы очистных и подготовительных выработок на текущий период.

Рис. 1. Виды разрушения угля, пород и элементов крепи в подготовительной выработке

По величинам смещений и отношению остаточной прочности угля и пород предвестников осуществляется идентификация предвестников опасных производственных ситуаций.

На рис. 2 показаны изолинии распределения вертикальных смещений и отношения остаточной прочности угля и пород к исходной в окрестности вентиляционных штреков.

Штреки на рис 2 охраняются ленточными целиками между подготовительными выработками и очистным выработанным пространством, что проявляется в ассиметричности формы изолиний. В качестве индикаторов предвестника риска разрушения пород и крепи в окрестности штреков приняты величины и неравномерность распределения вертикальных смещений пород кровли (рис. 2а).

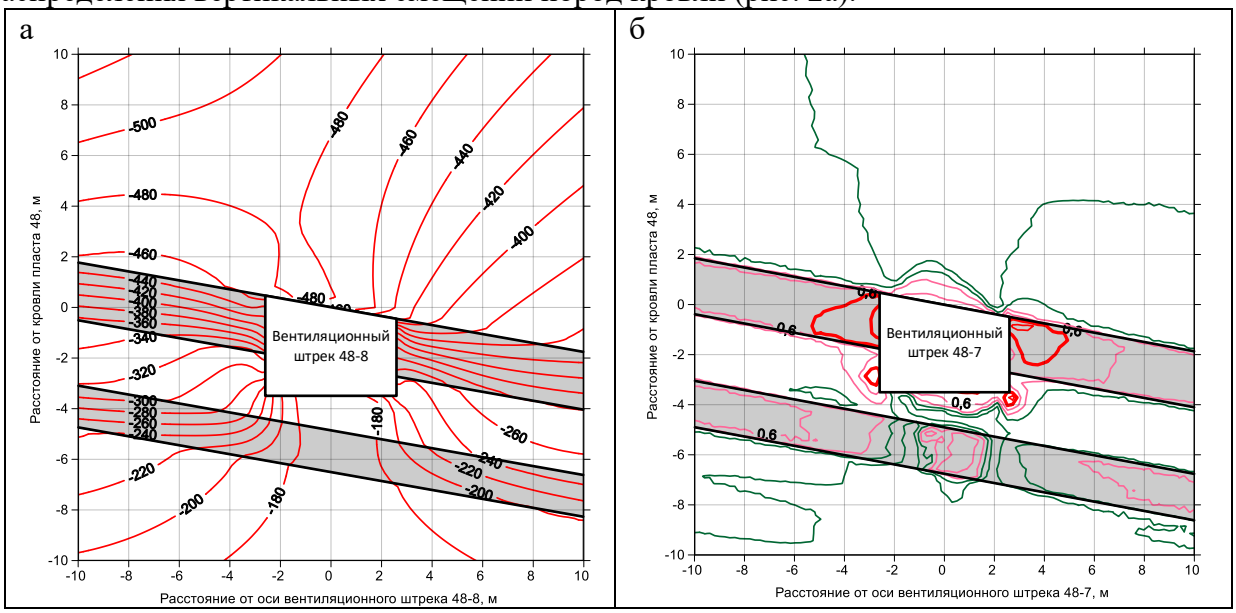


Рис. 2. Изолинии распределения геомеханических параметров в окрестности вентиляционных штреков: а – вертикальные смещения угольного пласта и вмещающих его пород, мм; б – отношение остаточной прочности угля и пород к исходной

По результатам сравнения вычисленной методом конечных элементов и измеренной геофизическими методами глубины изменения прочностных свойств угля на контуре выработки установлено, что разделение угольного массива под влиянием горного давления на блоки происходит при отношении остаточной прочности угля к исходной R=0,8, при R<0,5 угольный пласт в боках выработки разрушается. По указанным индикаторам разрушения угля в окрестности выработки согласно графикам рис. 2б следует ожидать отжим угля со стороны целика глубиной 2,2 м, а отрабатываемого угольного столба 2,0м. В связи с наличием в почве выработки весьма сближенного пласта в качестве предвестника инцидента прогнозируется прорыв метана из этого пласта.

Результаты прогноза предвестников опасных производственных ситуаций сравниваются с признаками фактически произошедших аварий и инцидентов, зафиксированных в процессе мониторинга. В случае отклонений фактических и прогнозных признаков аварий или инцидентов проводится корректировка по величинам измеренных смещений горных пород граничных условий алгоритма модели численного моделирования.

При соответствии прогнозируемых и фактически признаков и параметров опасных производственных ситуаций осуществляется численное моделирование, прогноз напряжённо-деформированного состояния массива горных пород, выявление предвестников и оценка рисков опасных производственных ситуаций на будущие периоды впереди очистных и подготовительных забоев.

На основе полученных результатов численного моделирования осуществляется анализ и выбор технологических и организационных мероприятий, реализация которых позволит снизить риск возникновения аварии ли инцидента.

Для оценки эффективности мероприятий по предотвращению опасных производственных ситуаций проведено тестирование разработанного экспериментально-численного метода прогноза напряжённо-деформированного состояния массива горных пород в окрестности очистного забоя и диагональной печи.

На рис. 3 представлены изолинии распределения геомеханических параметров в окрестности очистного забоя и диагональной выработки: коэффициента концентрации вертикальных напряжений и отношения остаточной прочности угля к исходной. Для моделирования приняты следующие горно-геологические условия: мощность пласта 1,0 м, глубина разработки 390 м, предел прочности угля при одноосном сжатии 6 МПа, вмещающие породы представлены слоями алевролитов и песчаников с пределом прочности при одноосном сжатии 55-118 МПа.

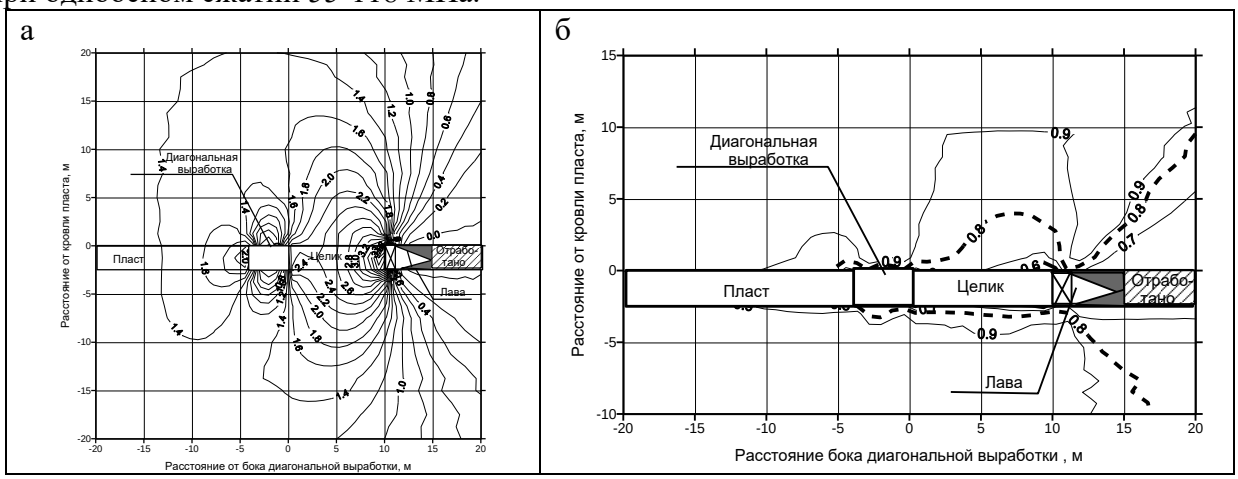


Рис. 3. Изолинии распределения геомеханических параметров в окрестности очистного забоя и диагональной выработки: а – коэффициент концентрации вертикальных напряжений; б – отношение остаточной прочности угля и пород к исходной

По результатам анализа графиков распределения геомеханических параметров возможны следующие риски возникновения опасных производственных ситуаций.

При коэффициенте концентрации вертикальных напряжений в средней части угольного целика К=2,6 (рис. 3а), глубине разработки Н=390 м и объёмном весе осадочных пор γ=2500 кг/м^3 вертикальное напряжение $\sigma_в$=25,3 МПа, что существенно превышает предел прочности угля при сжатии 6 МПа. В этом случае возможен коллапс при разрушении целика, крепи диагональной выработки и, как следствие, геодинамические явления в виде горного удара или внезапного выброса угля. Возможность разрушения угля в целике подтверждается графиками рис. 3б, где уголь под влиянием опорного горного давления структурирован на блоки.Для предотвращения опасного геодинамического

явления предлагается проведение предупредительных мероприятий, направленных на разгрузку угольного целика. В настоящее время наиболее распространёнными способами снижения горного давления в целике являются проведение разгрузочных скважин или щелей направленного гидроразрыва.

На рис. 4 показано влияние разгрузочных скважин на геомеханические параметры геомассива. Согласно графикам рис. 4 бурение разгрузочных скважин приводит к перераспределению горного давления в окрестности очистного забоя и диагональной выработки. В угольном целике в зоне влияния разгрузочных скважин вертикальные напряжения уменьшаются почти в 1,4 раза, но энергия горного давления передаётся в краевые участки пласта в очистном забое и в дальний от очистного забоя бок диагональной выработки. Следовательно риск возникновения опасного геодинамического явления не снижается.

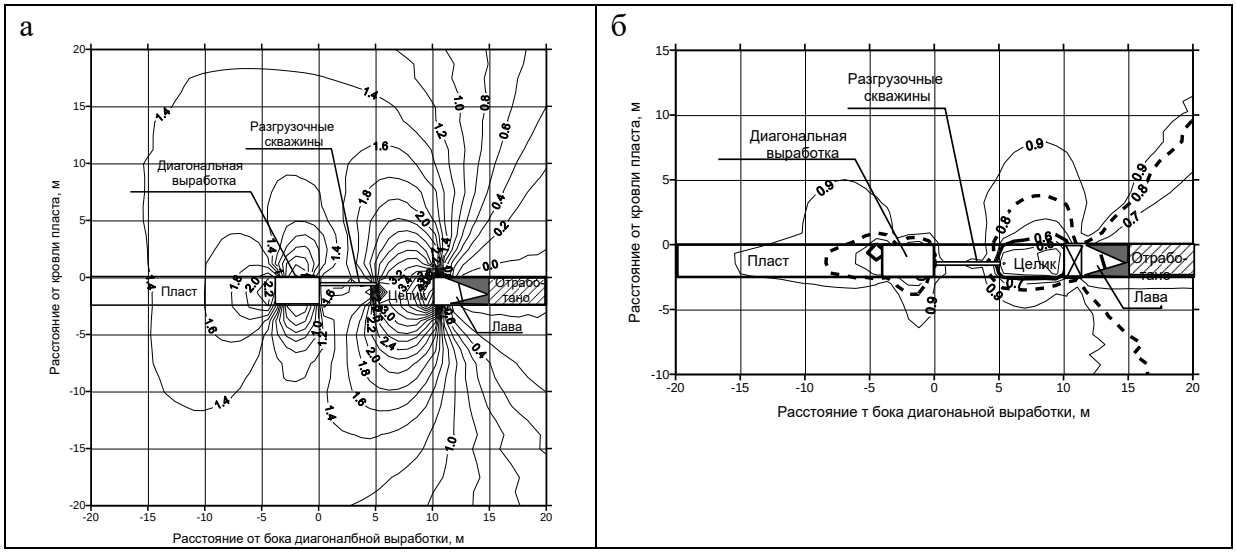


Рис. 4. Изолинии распределения геомеханических параметров в окрестности очистного забоя и диагональной выработки после бурения разгрузочных скважин в угольном целике: а – коэффициент концентрации вертикальных напряжений; б – отношение остаточной прочности угля и пород к исходной

На рис. 5 показано влияние щели направленного гидроразрыва на геомеханические параметры [22].

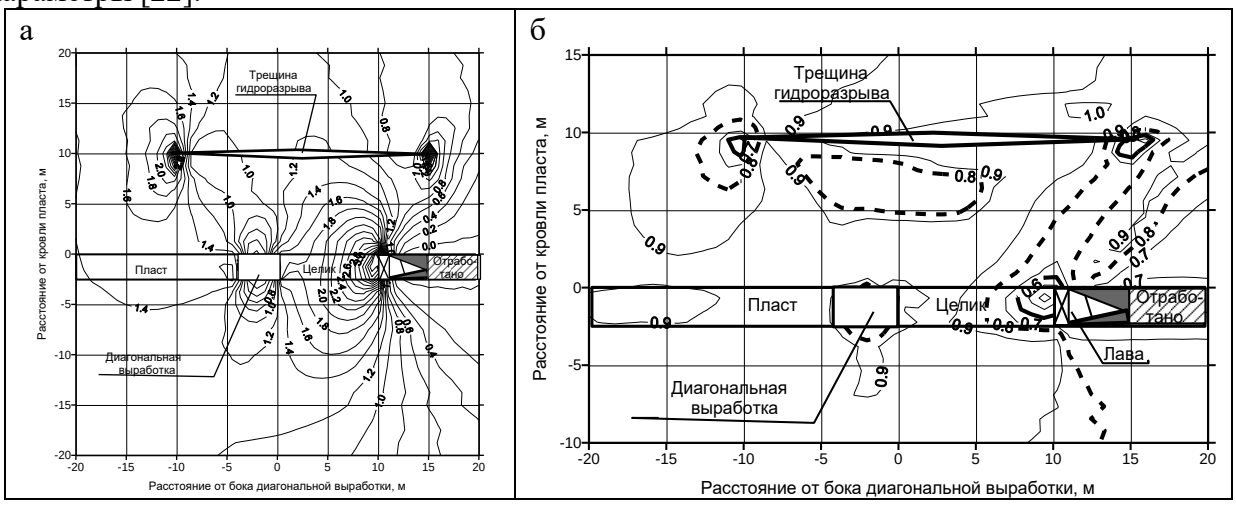


Рис. 5. Изолинии распределения геомеханических параметров в окрестности очистного забоя и диагональной выработки после формирования щелей направленного гидроразрыва в кровле пласта над угольным целиком: а – коэффициент концентрации вертикальных напряжений; б – отношение остаточной прочности угля и пород к исходной угля в целике между очистным забоем и диагональной печью впереди забоя

Согласно графикам рис. 5 происходит частичная разгрузка угольного целика и повышается его устойчивость, в том числе в окрестности очистного забоя и диагональной выработки. Энергия горного давления, в том числе зависающих пород кровли передаётся на краевые участки щели направленного гидроразрыва.

Выводы. Разработан и апробирован на тестовых примерах экспериментально-численный метод прогнозирования напряжённо-деформированного состояния массива горных пород для обоснования и предотвращения рисков возникновения опасных производственных ситуаций на угольных шахтах.

Список литературы

1. Мешков Г.Б. Петренко И.Е., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за 2023 год //Уголь. – 2024. – №3. – С.18-29.

2. Зеньков И.В. Исследование технологических аспектов предприятий угольной промышленности на территории восточной части США с использованием информационных ресурсов спутниковой съёмки // Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2022. – №8. – С. 75-78.

3. Правила безопасности в угольных шахтах: Фед. нормы и правила в области пром. безопасности: утв. приказом Ростехнадзора от 08.12.2020г., с изм. 07 апреля 2022г.

4. Технологические схемы подготовки и отработки выемочных участков на шахтах ОАО «СУЭК-Кузбасс»: альбом / В.Н. Демура, В.Б. Артемьев, С.В. Ясюченя [и др.]. – М.: Горное дело ООО «Киммерийский центр», 2014. – 256 с.

5. Корнев Е.С., Павлова Л.Д., Фрянов В.Н. Численное моделирование геомеханических процессов при короткозабойной отработке угольных пластов: монография – Прага : Vědecko vydavatelské centrum «Sociosféra-CZ», 2014. – 206 с.

6. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 2673. Пространственная расчётная модель динамического блочного обрушения горных пород с последовательным накоплением повреждений/ В.Н. Фрянов, Л.Д. Павлова; Дата регистр. 05.06.2003. -М.: Роспатент, 2003.

7. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2020618595. Программный комплекс для моделирования геомеханических процессов в структурно неоднородном геомассиве при взаимном влиянии системы подземных горных выработок / В.Н. Фрянов, Л.Д. Павлова, А.Б. Цветков; ФГБОУ ВО Сиб. гос. индустр. ун-т. – Фед. служба по интеллект. собств.; дата регистр. 30 июля 2020.

8. Дворянчиков М.В., Павлова Л.Д. Разработка нейронной сети для предиктивной аналитики метановыделения при подземной угледобыче // Научно-технический вестник Поволжья. – 2021. – №7. – С. 83-86.

9. Дворянчиков М.В., Павлова Л.Д. Предобработка данных с датчиков аэрогазового контроля при подземной отработке газоносных угольных пластов для нейросетевого анализа данных // Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – Новокузнецк, СибГИУ. – 2021. – №7. –С. 250-253.

10. Куприянов В.В. Распознавание классов подземных аварий в угольных шахтах на основе нейросетевой технологии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – №8. – С. 148-153.

11. Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений: Фед. нормы и правила в области пром. безопасности. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2020. – Серия 05. – Выпуск 49. – 148 с.

12. Рекомендации по безопасному ведению горных работ на склонных к динамическим явлениям угольных пластах: рук-во по безопасности. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2020. – Серия 05. – Выпуск 53. – 176 с.

13. Грицко Г.И., Власенко Б.В. Экспериментально-аналитический метод определения напряжений в массиве горных пород. – Новосибирск: Наука, 1976. – 190 с.

14. Курленя М.В., Серяков В.М., Ерёменко А.А. Техногенные геомеханические поля напряжений. – Новосибирск: Наука, 2005. – 264 с.

15. Теоретические основы формирования и реализации адресно-ориентированной информационной базы для автоматизированного проектирования технологической системы шахты / Ю.Н. Кузнецов, Д.А. Стадник, Н.М. Стадник [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – №1. – С. 77-86.

16. Применение современных технических средств мониторинга для оценки соответствия проектных параметров анкерной крепи изменяющимся условиям проведения подземных выработок / А.В. Рогачков, А.С. Позолотин, В.Ф. Исамбетов [и др.] // Уголь. – 2012. – № 12. – С. 38- 40.

17. Исследование устойчивости подготовительных выработок, закреплённых анкерной крепью, оказавшихся в сложных аварийных ситуациях при отработке угольных пластов на шахтах Кузбасса / Е.А. Разумов, В.Г. Венгер, С.И. Калинин [и др.] // Уголь. – 2021. – № 11. – С. 13-18.

18. Направление главного вектора горизонтальных напряжений в углепородном массиве и устойчивость подготовительных выработок / Е.А. Разумов, В.Г. Венгер, Е.Ю. Пудов [и др.] // Горный журнал. – 2022. – № 1. – С. 119-124.

19. ГОСТ 24941-81 Породы горные. Методы определения механических свойств нагружением сферическими инденторами. – Введ. 01.07.1982. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 8 с.

20. Захаров В.Н., Забурдяев В.С., Артемьев В.Б. Углепородные массивы: прогноз устойчивости, риски, безопасность. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2013. – 280 с.

21. Грэй И., Шутов А.Б. Измерение напряжений в горном массиве методом обуривания с помощью инструмента SIGRA IST // Горный журнал. – 2022. – №1. – С. 50-54.

22. The influence of coal and enclosing rock fracturing on the management of the rock massif during the exploitation of thick coal seams by the longwall top coal caving technology / SV Klishin, G.Y. Opruk, E.L. Varfolomeev [et al.] // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 823 (2021). – 012011. – 7 с.

УДК 681.5

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ УГЛЕОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК

[1,2]к.т.н. Грачев В.В., [3]д.т.н. Ивушкин А.А., [1]д.т.н. Мышляев Л.П., [1,2]к.т.н. Макаров Г.В.

1 – ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия

2 – Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия

3 – ООО «Объединенная компания «Сибшахтострой», г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье показана необходимость проведения совершенствования систем автоматизации управления технологическими комплексами (САУ ТК) углеобогатительных фабрик (ОФ), созданных в начале XX века. Представлены недостатки действующих САУ ТК ОФ и определены этапы их модернизации. Предложена схема технической структуры САУ ТК ОФ, основу которой составляют технические средства и программное обеспечение отечественного производства, отвечающие самым современным

требованиям и позволяющая проводить модернизацию без остановки основного производства, в сжатые сроки и с минимальными финансовыми затратами.

Ключевые слова: система автоматизации управления, углеобогатительная фабрика, техническое обеспечение, информационное обеспечение, SCADA-система, АРМ диспетчера, сервер предыстории, инженерная станция.

Первые системы автоматизации управления технологическими комплексами (САУ ТК) углеобогатительных фабрик (ОФ) нового поколения были разработаны и внедрены в начале 2000-х годов. Первыми такими фабриками были [1-2]:

– ОФ «Антоновская» (г. Новокузнецк), 2001 г.;

– ОФ «Бачатская-Энергетическая», г. Белово, 2003 г.;

– ОФ «Заречная-Спутник», г. Полысаево, 2004 г.;

– ОФ «Междуреченская», г. Междуреченск, 2005 г.

По прошествии более чем 20 лет ситуация в области автоматизации крупных промышленных комплексов существенно изменилась [3-4]:

–значительно расширились функциональные возможности систем автоматизации;

– появились новые более совершенные и надежные технические и программные средства;

– усложнилось их информационное и программное обеспечение;

– успешно реализуется концепция перехода от «лоскутной автоматизации» к интегрированной САУ ТК на базе единой программно-аппаратной платформы.

Первые действующие САУ ТК ОФ, в принципе выполняя все возложенные на них функции, во многом не соответствуют современным требованиям к системам автоматизации и нуждаются в улучшении. На примере САУ ТК ОФ «Антоновская» и САУ ТК ОФ «Бачатская-Энергетическая» можно сказать, что это связано со следующими причинами:

– персональные компьютеры диспетчера и оператора, реализованные на базе Intel Pentium и ЭЛТ-мониторов, выработали свой ресурс и не могут конкурировать с современными станциями по производительности, надежности, эргономическим и экологическим характеристикам (рис. 1);

– прикладное программное обеспечение, построенное на базе операционной системы QNX и SCADA-системы RealFlex, не обеспечивает в полной мере функциональные возможности современных САУ ТК;

– возможности быстрой корректировки прикладного программного обеспечения ограничены (в частности, при редактировании графических элементов, при написании скриптов) из-за невозможности использования популярных библиотек программирования DDL, готовых управляющих элементов ActiveX, протоколов обмена информации OPC, DDE, COM/DCOM;

– не осуществляется централизованный сбор и хранение всех производственных данных, необходимых для анализа и эффективного управления промышленным комплексом (данных о работе оборудования, произошедших событиях, повлекших простой оборудования или создание аварийной ситуации, о действиях персонала);

– существующая САУ ТК реализует принцип «лоскутной автоматизации». Для решения производственных задач ОФ (визуализация, хранение предыстории, построение отчетов) задействовано большое число программных продуктов от разных производителей, для согласованной и эффективной работы которых требуется использовать множество разнообразных интерфейсов и протоколов;

– отсутствует возможность построения интегрированной системы на базе единой программно-аппаратной платформы – MES (Manufacturing Execution System – система управления производством).

Рис. 1. Обогатительная фабрика «Антоновская». Диспетчерский пункт до модернизации

Этапы совершенствования САУ ТК ОФ. В связи с этим, опираясь на опыт создания и эксплуатации подобных систем в последние годы, предлагается проводить модернизацию действующих САУ ТК с целью устранения перечисленных недостатков, а также для расширения функциональных возможностей системы.

Совершенствование САУ ТК ОФ предлагается осуществлять поэтапно, параллельно работе действующей системы без остановки основного производства.

На первом этапе модернизации развертывается станция разработчика (инженерная станция) и вводится в действие сервер предыстории. Производится конфигурирование сервера предыстории, настройка драйверов ввода/вывода, отладка проектов для АРМов диспетчера и оператора погрузки. Сервер предыстории осуществляет хранение собранных производственных данных, поступающих с контроллеров нижнего уровня. При этом сбор данных для сервера производится параллельно с их сбором для действующих диспетчерских станций.

На втором этапе в систему вводятся АРМы диспетчеров. В процессе развертывания, настройки и конфигурирования АРМов управление технологическим комплексом ОФ осуществляется действующими диспетчерскими станциями.

На третьем этапе вводятся в действие АРМы оператора технологических участков. В процессе их развертывания, настройки и конфигурирования управление технологическими участками осуществляется действующими операторскими станциями.

Управление технологическим комплексом ОФ в целом и технологическими участками ОФ передается на новые АРМы лишь после полного завершения всех этапов пуско-наладочных работ.

Модернизация верхнего уровня САУ ТК позволит расширить функциональные возможности системы, повысить удобство, безопасность и эффективность работы оперативно-диспетчерского персонала, организовать платформу для создания интегрированной системы класса MES и, как следствие, увеличить потенциал для дальнейшего развития САУ ТК.

Техническое обеспечение. На рис. 2 предлагается техническая структура САУ ТК ОФ. Аппаратная реализация системы выполняется на базе современных персональных компьютеров, серверов и контроллеров отечественного производства.

Система автоматизации оперативно-диспетчерского контроля и управления технологическим комплексом комплектуется двумя АРМами диспетчера (основной и резервный), реализованными на базе персональных компьютеров с двумя SSD дисками на 1 Tb, объединенными в RAID-массив для исключения потери работоспособности в случае выхода из строя одного из накопителей. Каждый АРМ оснащен двумя 32” LCD-мониторами.

В штатном режиме работы функционируют оба АРМа диспетчера. Архитектура «горячего» резервирования в сочетании с использованием RAID-массива обеспечивает повышенную отказоустойчивость системы и сохранность данных.

Система централизованного сбора, обработки и хранения информации реализуется на базе серверов предыстории с процессорами XEON и четырьмя жесткими дисками SAS

на 2 Tb, объединенными в RAID-массив для исключения потери данных в случае выхода из строя одного из накопителей.

Серверы предыстории располагается в серверном шкафу ОФ. Для первоначальной настройки серверов и их локального администрирования в серверный шкаф также устанавливается консоль управления и аналоговый KVM переключатель.

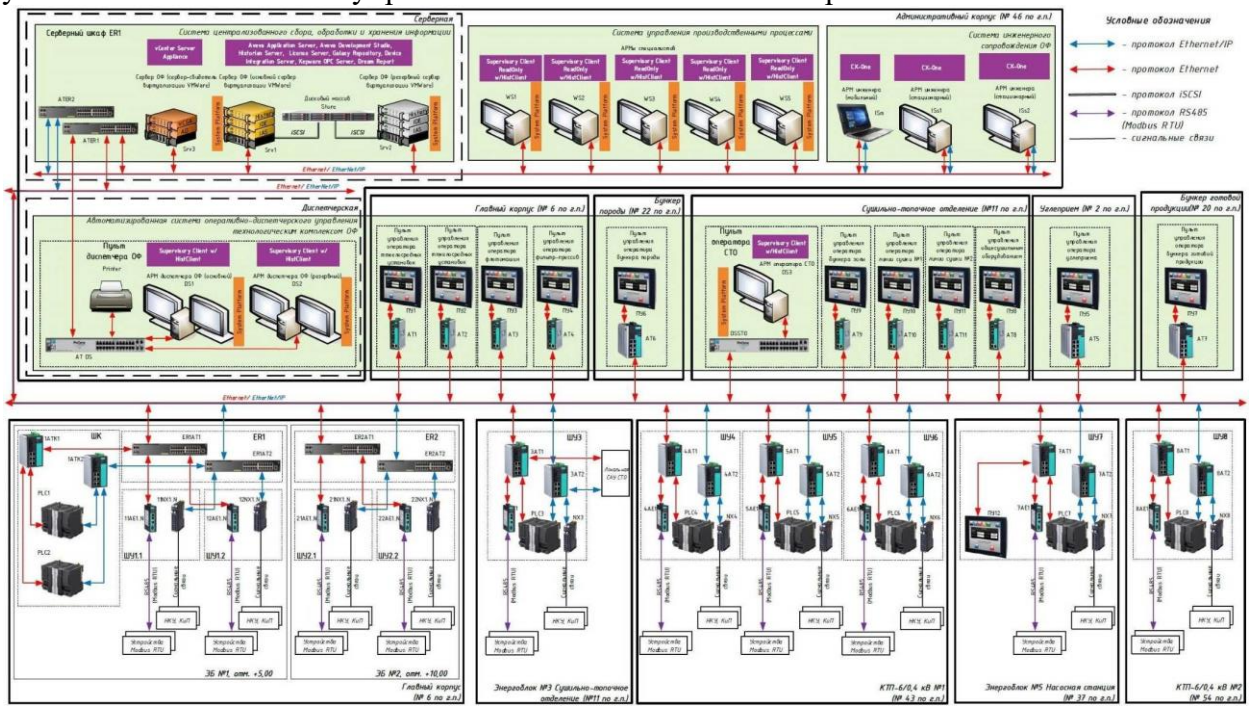


Рис. 2. Схема укрупненной технической структуры системы автоматизации управления ОФ

Система инженерного сопровождения представляет собой инженерные станции, реализованные на базе персональных компьютеров с 30” LCD-монитором. Станции также укомплектованы двумя SSD дисками на 1 Tb, объединенными в RAID-массив для исключения потери данных в случае выхода из строя одного из накопителей.

Система автоматизации управления технологическими участками комплектуется АРМами операторов на базе персонального компьютера с 24” LCD-монитором или HMI-терминала диагональю 15”. В качестве программируемых логических контроллеров используются решения отечественных производителей, такие как Regul (ООО «РегЛаб») [5-6]. Функциональные возможности и технические характеристики этих контроллеров в полной мере соответствуют задачам их применения в современных САУ ТК ОФ.

Обмен данными между компонентами системы осуществляется посредством действующей информационной сети Ethernet/IP.

Программное обеспечение. В качестве базового программного обеспечения при совершенствовании САУ ТК ОФ используются SCADA-система и OPC-серверы отечественного производства ООО «МПС софт», такие как MasterSCADA и MasterOPC [7].

Компания ООО «МПС софт» является ведущим отечественным разработчиком программных продуктов для создания автоматизированных систем, управляющих технологическими и производственными процессами всех уровней предприятия. Уже более 35 лет программные продукты ООО «МПС софт» применяются в России для создания программного обеспечения АСУТП, а также систем управления производством и представляют собой программный пакет класса MES (Manufacturing Execution System).

Программное обеспечение от ООО «МПС софт» строится по модульному принципу и является максимально открытым, то есть позволяет осуществить сопряжение с различными продуктами других фирм с использованием мощного и универсального скриптового языка, а также встраивания готовых компонентов.

Базовое программное обеспечение верхнего уровня САУ ТК ОФ включает в себя следующие программные продукты:

– серверы ввода-вывода (OPC Server's MasterOPC);

– средства визуализации данных (SCADA-система MasterSCADA 4D Runtime);

– средства хранения данных предыстории (сервер предыстории на базе PostgreSQL);

– программное обеспечение разработки и сопровождения системы (SCADA-система MasterSCADA 4D Development).

Сервер ввода-вывода. Все производственные данные из подсистемы нижнего уровня собираются посредством OPC-серверов MasterOPC. Последние позволяют клиентским приложениям, таким, как SCADA-система, сервер предыстории, получать в реальном времени доступ к данным программируемых логических контроллеров. Также OPC-серверы реализуют коммуникации с устройствами сторонних производителей, поддерживающими протоколы Modbus и Modbus TCP. OPC-серверы обеспечивают простые, открытые и прозрачные коммуникации между программными приложениями и аппаратурой, интегрируя в себе все последние спецификации OPC Foundation: OPC-DA, .NET API interface, OPC XML-DA.

Средства визуализации. Для отображения данных о текущем состоянии технологического комплекса в целом и каждой единицы оборудования в частности, выдачи команд управления комплексом и отдельными единицами оборудования, а также для обеспечения возможности анализа накопленных данных на АРМах диспетчера и операторов устанавливается SCADA-система MasterSCADA 4D Runtime с количеством тегов ввода-вывода от 500 до 50000.

Средства хранения предыстории. Специализированный сервер обеспечивает сбор данных с контроллеров нижнего уровня, систем оперативно-диспетчерского контроля и управления технологическими комплексами. Все производственные данные (сведения о технологических параметрах и работе оборудования, произошедших событиях, действиях оперативного и производственно-технического персонала) собираются с помощью OPC-серверов и архивируются в специализированном сервере предыстории на базе PostgreSQL [8-9].

Система централизованного сбора, обработки и хранения информации предоставляет технологические и производственные данные в систему автоматизации оперативно-диспетчерского контроля и управления технологическими комплексами (на АРМы диспетчера, на АРМ операторов технологических участков) в любом требуемом и удобном для восприятия виде (графики, таблицы, диаграммы) с помощью клиентского приложения MasterSCADA 4D Runtime.

Информация о динамике параметров управляемых технологических процессов и состоянии оборудования представляется для различных интервалов времени, с различной степенью детализации и используется при построении разнообразных отчетов.

Программное обеспечение разработки и сопровождения системы. Инструментальная система MasterSCADA 4D Development обеспечивает поддержку изменений информационного и прикладного программного обеспечения САУ ТК ОФ, а также решение задач производственно-исследовательского характера. Необходимость выполнения этих работ возникает в связи с изменениями технологического регламента, состава объектов контроля и управления в процессе выполнения пуско-наладочных работ, опытной эксплуатации и отработки технологических режимов, а также в связи с дальнейшим расширением состава задач и автоматизируемых функций контроля и управления технологическими и производственными процессами обогатительной фабрики.

В последующем разработанное на инженерной станции прикладное программное обеспечение переносится на соответствующие узлы САУ ТК ОФ по информационной сети.

Интерфейс разработки инженерной станции интуитивно понятен и полностью поддерживает принцип WYSIWYG (WhatYouSeeIsWhatYouGet – что есть на экране инженерной станции, то будет и на экране удаленной станции), то есть все, что создается

на экране инженерной станции при помощи соответствующего программного обеспечения, будет выглядеть точно так же и на экране удаленной станции.

Программное обеспечение от ООО «МПС софт» функционирует на базе операционной системы Windows. Подтверждение его лицензирования осуществляется с помощью аппаратных USB-ключей. Пример современного диспетчерского пункта ОФ «Шахта №12 представлен на рис. 3.

Рис. 3. Обогатительная фабрика «Шахта №12». Современный диспетчерский пункт

Выводы. Представленные решения позволяют без значительных затрат и в кратчайшие сроки производить совершенствование систем автоматизации управления технологическими комплексами обогатительных фабрик. Использование отечественных программно-аппаратных средств при модернизации систем автоматизации управления технологическими комплексами обогатительных фабрик позволяет достичь технологической независимости от зарубежных производителей.

Список литературы

1. Ивушкин А.А. Киселев С.Ф., Мышляев Л.П. Системы автоматизации углеобогатительных фабрик: монография. – Новокузнецк: СибГИУ, 2004. – 232 с.

2. Сазыкин Г.П., Синеокий Б.А., Мышляев Л.П. Проектирование и строительство углеобогатительных фабрик нового поколения. – Новокузнецк: СибГИУ, 2003. – 127 с.

3. Планирование создания и испытание автоматизированных промышленных комплексов (на примере углеобогатительных фабрик): учеб. пособие / А.А. Ивушкин, В.В. Грачев, Л.П. Мышляев [и др.]. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2012. – 105 с.

4Применение технологий Industry 4.0 при создании автоматизированных промышленных комплексов / В.В. Грачев, Л.П. Мышляев, М.К. Венгер [и др.] // Сборник научных трудов НГТУ. – 2021. – № 1 (100). – С. 7–20.

5. Программируемые логические контроллеры Regul [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.reglab.ru.

6. Елов А.И., Добриян Д.А. Новое поколение ПЛК REGUL RX00 // Территория Нефтегаз. – 2016. – № 3. – С. 22-24.

7. MasterSCADA 4D [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.masterscada.ru/.

8. PostgreSQL: The World's Most Advanced Open Source Relational Database [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https:// https://www.postgresql.org/.

9. Система управления базами данных PostgreSQL и ее применение для разработки баз данных в АСУ специального назначения / Н.Э. Колосовский, В.А. Ламакин, В.М. Серов [и др.] // Интернаука. – 2022. – № 11-1(234). – С. 17-18.

УДК 681.5

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

[1]д.т.н. Мышляев Л.П., [2]д.т.н. Ивушкин А.А., [1,3]к.т.н. Грачев В.В., [1,3]к.т.н. Макаров Г.В., [4]Коршунов С.Ю.

1 – ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия

2 – ООО «Объединенная компания «Сибшахтострой», г. Новокузнецк, Россия

3 – Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия

4 – ООО «РТ-Инжиниринг», г. Москва, Россия

Аннотация. В статье показана необходимость создания систем автоматизации управления технологическими комплексами (САУ ТК) силами комплексного коллектива, включающего в свой состав ученых, преподавателей, проектировщиков и производственников. Представлен пример создания и результаты функционирования такого коллектива, созданного на базе научно-образовательных учреждений – ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», Сибирский государственный индустриальный университет, проектных институтов – ОАО «Кузбассгипрошахт» (г. Кемерово), АО «Тяжпромсервис» (г. Новокузнецк), ООО «Гипроуголь» (г. Новосибирск) и производственной компании – ООО «Объединенная компания «Сибшахтострой» (г. Новокузнецк). Определены перспективы развития комплексного коллектива.

Ключевые слова: система автоматизации управления, углеобогатительная фабрика, угольная шахта, техническое обеспечение, информационное обеспечение.

Введение. К задачам создания современных систем автоматизации управления относятся как научно-технические задачи, так и организационные.

Среди научно-технических задач выделяют:

– содержательное осмысление задач синтеза и анализа систем управления с соблюдением основных принципов системного анализа;

– применение основ теории новых типов обратной связи для синтеза алгоритмов управления сложными нестационарными процессами в условиях неопределенности;

– комплексное применение подходов, методов и алгоритмов построения систем управления: натурный подход, модельный подход, натурно-модельный подход;

– развитие методов и алгоритмов объединения функций управления: контроля, идентификации, регулирования, планирования, оптимизации, моделирования.

Из основных организационных задач можно выделить:

– формирование и обеспечение постоянного функционирования коллектива исполнителей из представителей научных, образовательных, проектных, монтажных, пуско-наладочных организаций и промышленных предприятий;

– совершенствование системы защиты интеллектуальной собственности, в частности изобретений и полезных моделей;

– подготовка квалифицированных кадров.

Разработка и внедрение современных систем автоматизации управления включает научно-исследовательскую, образовательную, проектную и внедренческую деятельность. Для выполнения всех этих видов работ необходима интеграция соответствующих организаций.

Краткая характеристика комплексного коллектива по созданию систем автоматизации. В Кузбассе с 2001 года функционирует комплексный коллектив по

созданию систем автоматизации. Это ООО «Научно-исследовательский центр систем управления» (ООО «НИЦ СУ»), Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), проектные институты ОАО «Кузбассгипрошахт» (г. Кемерово), АО «Тяжпромсервис» (г. Новокузнецк), ООО «Гипроуголь» (г. Новосибирск) и ООО «Объединенная компания «Сибшахтострой» (г. Новокузнецк).

Руководители-организаторы коллектива доктора наук, профессора, выпускники СибГИУ: председатель совета директоров ООО «ОК «Сибшахтострой» А.А. Ивушкин и директор ООО «НИЦ СУ» Л.П. Мышляев.

Комплексным коллективом разработаны и внедрены системы автоматизации управления в основном в угольной отрасли (таблица 1), а также проведены научные исследования и подготовлены кадры высшей квалификации и специалисты по автоматизации.

Основные разработанные и реализованные системы автоматизации управления технологическими комплексами приведены ниже.

1. Углеобогатительные фабрики:

ОФ «Антоновская», г. Новокузнецк, 2001 г.;
ОФ «Бачатская-Энергетическая», г. Белово, 2003 г.;
ОФ «Заречная-Спутник», г. Полысаево, 2004 г.;
ОФ «Междуреченская», г. Междуреченск, 2005 г.;
ОФ «Северная», г. Березовский, 2005 г.;
ОФ «Листвяжная», г. Белово, 2006 г.;
ОФ «Спутник», г. Полысаево, 2007 г.;
ОФ «Бачатская-Коксовая», г. Белово, 2007 г.;
ЦОФ «Березовская», г. Березовский, 2008 г.;
ОФ «Карагайлинская», г. Киселевск, 2008 г.;
ОФ «Восточная», пос. Липовцы, Приморский край, 2008 г.;
ОУ разреза «Бачатский», г. Белово, 2009 г.;
ОФ «Черногорская», г. Абакан, 2009 г.;
ОФ «Тугнуйская» ОАО «СУЭК». Респ. Бурятия, 2011 г.;
ОФ «Матюшинская», г. Прокопьевск, 2012 г.;
ОФ «Садкинская», г. Шахты, 2013 г.;
ОФ ОАО «СУЭК-Кузбасс» Шахта «Комсомолец». г. Ленинск-Кузнецкий, 2013 г.;
ОФ «Талдинская-Западная», г. Новокузнецк, 2014 г.;
ОФ «Калтанская-Энергетическая», г. Калтан, 2015 г.;
ОФ «Шахта №12», г. Киселевск, 2017 г.;
ЦОФ «Березовская», г. Березовский, 2017 г.;
ОФ «Антоновская», г. Новокузнецк, 2017 г.;
ОФ разреза «Барзасский», г. Березовский, 2018 г.;
ОФ «Матюшинская», г. Прокопьевск, 2019 г.;
ОФ разреза «Барзасский», г. Березовский, 2020 г.;
ОФ «Шахта №12», г. Киселевск, 2020 г.;
ОФ «Убинская», г. Белово, 2022 г.

2. Угольные шахты:

шахта «Заречная», г. Полысаево, 2005 г.;
шахта «Бутовская», г. Кемерово, 2006 г.;
шахта «Южная», г. Кемерово, 2008 г.;
шахта «Алардинская», г. Калтан, 2009 г.;
шахта «Северная», г. Ургал, 2009.

Основные решения при создании современных систем автоматизации. Среди основных проектных и технологических решений автоматизированных промышленных комплексов нового поколения можно выделить:

– новые технологии и агрегаты обогащения углей [1];

– методы совместного проектирования технологических решений и систем автоматизации управления [2-3];

– общие структуры и алгоритмы управления объектами с переменной структурой, с положительными обратными связями (рециклами) [4];

– методы, структуры и алгоритмы, информационное, техническое и программное обеспечение систем удаленной пуско-наладки, сопровождения и развития комплексов автоматизации предприятий [5];

– интеграция импортных и отечественных программно-технических средств с последовательным импортозамещением [6].

Примеры реализованных систем автоматизации. Примеры угольных шахт и углеобогатительных фабрик нового поколения Кузбасса приведены на рис. 1.

ОФ «Калтанская-Энергетическая» (г. Калтан)

ОФ «Междуреченская» (г. Междуреченск)

ОФ «Матюшинская» (г. Прокопьевск)

ОФ «Барзасская» (г. Березовский)

Шахта «Колмогоровская-2» (г. Белово)

Шахта «Южная» (г. Березовский)

Рис. 1. Примеры угольных шахт и углеобогатительных фабрик нового поколения Кузбасса

Примеры диспетчерских пунктов обогатительных фабрик и угольных шахт представлены на рис. 2.

Результаты разработки и внедрения систем автоматизации. Системы автоматизации нового поколения внедрены и успешно функционируют на 26 обогатительных фабриках, на 5 угольных шахтах. По результатам разработки и внедрения современных систем автоматизации управления технологическими комплексами угольной отрасли:

– издано 9 монографий, в том числе в центральных издательствах в соавторстве с ведущими академиками РАН;

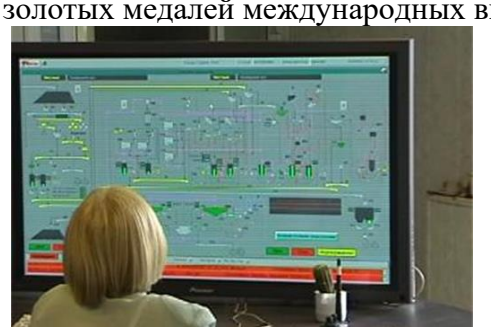
– опубликовано более трехсот статей в отечественных и зарубежных научно-технических сборниках;

– получено 30 патентов на изобретения, в том числе зарубежные;

– защищено 15 диссертаций, в том числе 3 докторских, подготовлено более 100 квалифицированных специалистов;

– выполнено госбюджетных и прикладных исследований на сумму около 400 млн. руб.

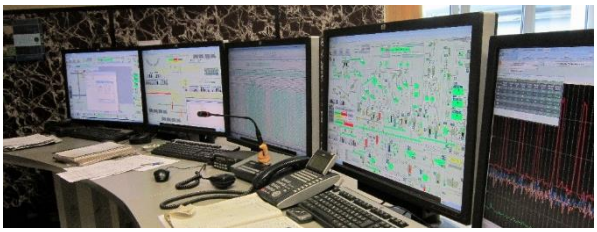
– разработки удостоены Премии Правительства РФ в области науки и техники, Гран-При и золотых медалей международных выставок.



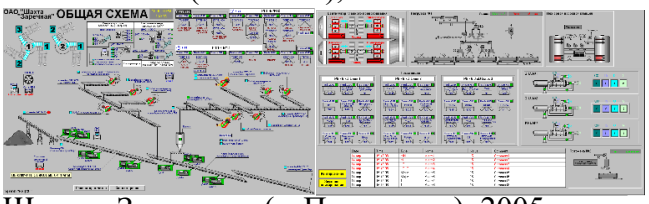
ОФ «Заречная-Спутник»
(г. Полысаево), 2004 г.

ОФ «Междуреченская»
(г. Междуреченск), 2005 г.

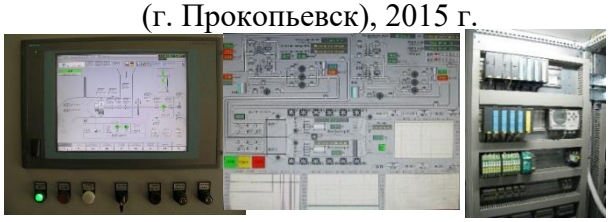
ОФ «Калтанская-Энергетическая»
(г. Калтан), 2015 г.



ОФ «Матюшинская»
(г. Прокопьевск), 2015 г.



Шахта «Заречная» (г. Полысаево), 2005 г.



Шахта «Алардинская» (г. Калтан), 2009 г.

Рис. 2. Диспетчерские пункты обогатительных фабрик и угольных шахт

В настоящее время ведутся работы по созданию систем автоматизации на Рубцовской обогатительной фабрике – стадия пуско-наладки и опытно-промышленных испытаний (г. Рубцовск, Алтайский край), по развитию систем автоматизации на ОФ «Шахта №12» (г. Киселевск) и ОФ «Барзасская» (г. Березовский).

Выполняются проекты по модернизации систем автоматизации Коксохимического производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК», по анализу и разработке рабочей документации на уже действующие системы (поставлены без документации) с ограничениями на вмешательство в работу действующих систем, развитие системы автоматизации на ОФ «Шахта №12».

Успешно функционирует в режиме реального времени инфокоммуникационная сеть, объединяющая новые обогатительные фабрики Кузбасса с информационным центром в СибГИУ, где реализованы цифровые двойники ОФ для их сопровождения и для обучения персонала.

Дальнейшее развитие комплексного коллектива по созданию систем автоматизации требует решения следующих задач:

– создание в Кузбассе объединенного диссертационного совета по специальностям: 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования, 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;

– разработка областных действенных нормативных положений, направленных на стимулирование создания интеллектуальной продукции (патенты на изобретения, полезные модели) и ее коммерциализации наряду с материальной продукцией;

– усиление подготовки специалистов для проектных организаций;

– создание при НОЦ Кузбасса лаборатории (центра) по разработке отечественного алгоритмического, программного и технического обеспечения современных систем автоматизации управления типовыми объектами горного и металлургического производства мирового уровня.

Вывод. Наличие комплексного коллектива с отлаженным организационным механизмом и полученные результаты работы этого коллектива дают основания для реализации систем автоматизации управления технологическими комплексами угольной отрасли любой сложности.

Список литературы

1. Сазыкин Г.П., Синеокий Б.А., Мышляев Л.П. Проектирование и строительство углеобогатительных фабрик нового поколения. – Новокузнецк: СибГИУ, 2003. – 127 с.

2. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 3-х томах Т.1: Анализ и статистическая динамика систем автоматического управления / Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 748 с.

3. Рыков А.С. Методы системного анализа: оптимизация. – М.: НПО «Издательство «Экономика», 1999. – 255 с.

4. Емельянов С.В. Коровин С.К. Новые типы обратной связи: Управление при неопределенности. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 352 с.

5. Системы автоматизации на основе натурно-модельного подхода: монография в 3-х т. Т.2: Системы автоматизации производственного назначения / Л.П. Мышляев, А.А. Ивушкин, Г.П. Сазыкин [и др.]; под ред. Л.П. Мышляева. – Новосибирск: Наука, 2006. – 483 с.

6. Планирование создания и испытание автоматизированных промышленных комплексов (на примере углеобогатительных фабрик): учеб. пособие / А.А. Ивушкин, В.В. Грачев, Л.П. Мышляев [и др.]. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2012. – 105 с.

УДК 681.5

СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ РУБЦОВСКОЙ ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКОЙ

[1]д.т.н. Ивушкин А.А., [2,3]к.т.н. Макаров Г.В., [2,3]к.т.н. Грачев В.В., [3]д.т.н. Мышляев Л.П., [2,3] Свинцов М.М., [2,3]Загидулин И.Р., [2,3]Курышев Е.В.

1 – ООО «Объединенная компания «Сибшахтострой», г. Новокузнецк, Россия

2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

3 – ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье представлены обобщенная функциональная и укрупненная техническая структуры системы автоматизации управления Рубцовской обогатительной фабрикой. Приведено описание информационного, программного и технического обеспечения системы.

Ключевые слова: автоматизация, регуляторы, обогатительная фабрика, функциональная структура, структура технических средств.

Рубцовская обогатительная фабрика была запущена в 2006 году Уральской горно-металлургической компанией для переработки руды Степного и Корбалихинского месторождений. Комплекс обеспечивает полный цикл производства от добычи руды до получения кондиционных концентратов, в 2020 году был запущен масштабный проект по модернизации предприятия, направленный на увеличение производственных мощностей до переработки полутора миллионов тонн руды ежегодно.

Следствием реконструкции технологического процесса является необходимость решения множества задач. Помимо автоматизации новых технологических контуров возникает необходимость в модернизации поточно-транспортных систем для согласованного распределения и использования ресурсов между существующими и новыми контурами.

На рис. 1 представлен фрагмент технологической схемы цепей и аппаратов. Поступление руды в технологический процесс происходит в здании приёмного бункера, откуда по конвейеру сырье поступает к расположенному в новом главном корпусе блоку мельниц, где происходит измельчение материала до требуемой фракции.

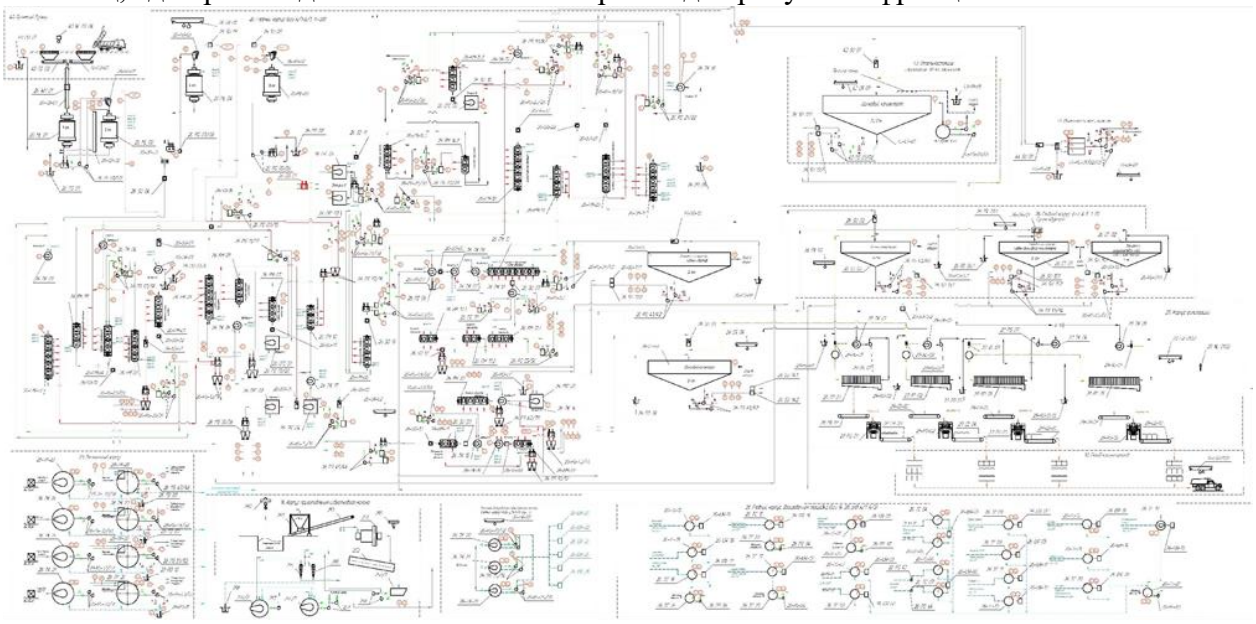


Рис. 1. Фрагмент технологической схемы цепей и аппаратов ОФ «Рубцовская»

Подготовленное сырьё подвергается обработке с использованием различных агрегатов в зависимости от характеристик исходного сырья и требуемых свойств конечного продукта – основное технологическое оборудование нового главного корпуса представлено флотационными машинами, батареями гидроциклонов и контактными чанами.

Сгущение медного и свинцового концентратов с применением радиальных сгустителей, а также отбор проб с помощью вакуумных и напорных пробоотборников производится в помещении существующего главного корпуса.

Помимо описанных помещений ряд технологических операций выполняется в других корпусах – как уже существующих (реагентный корпус, склад концентратов), так и новых (помещение радиального сгустителя для цинкового концентрата, площадка дозирования реагентов).

Основная цель создания системы автоматизации управления – повышение эффективности управления технологическим комплексом и, вследствие этого, улучшение технико-экономических показателей его функционирования.

Для достижения поставленной цели система должна соответствовать ряду требований [1].

В первую очередь, должна быть реализована автоматизация информационных и управляющих функций при решении следующих задач:

− оперативного формирования и анализа информации об изменениях режимов функционирования и состоянии технологических процессов, агрегатов и оборудования;

− оперативной реализации управляющих решений и регулирования технологических параметров;

− контроля, учета и анализа нарушений технологической и производственной дисциплины, эффективности управления.

Помимо этого, важную роль играет повышение надежности системы управления, оперативности и качества контроля и управления за счет:

− применения современных технических средств, методов и алгоритмов автоматического контроля, анализа, диагностики состояния и управления технологическими процессами и оборудованием;

− комплексного и детального отображения информации о состоянии оборудования и агрегатов, об изменениях технологических параметров, о действиях оперативного персонала в системе;

− использования в качестве технической базы на нижнем уровне системы современных микропроцессорных контроллеров, обладающих высокой надежностью, большими сроками наработки на отказ, простотой замены вышедших из строя элементов, расширения технической структуры, модификации математического и программного обеспечения;

− минимизации количества малонадежных электромеханических устройств в локальных системах логического контроля и управления отдельными механизмами и агрегатами.

На рис. 2 представлена схема функциональной структуры обогатительной фабрики. Особенностью объекта является необходимость в бесшовной интеграция существующих и реализуемых систем автоматизации управления, максимально возможное использование уже существующих технических средств, а также унификация программно-аппаратных средств существующих и реализуемых систем автоматизации управления фабрики.

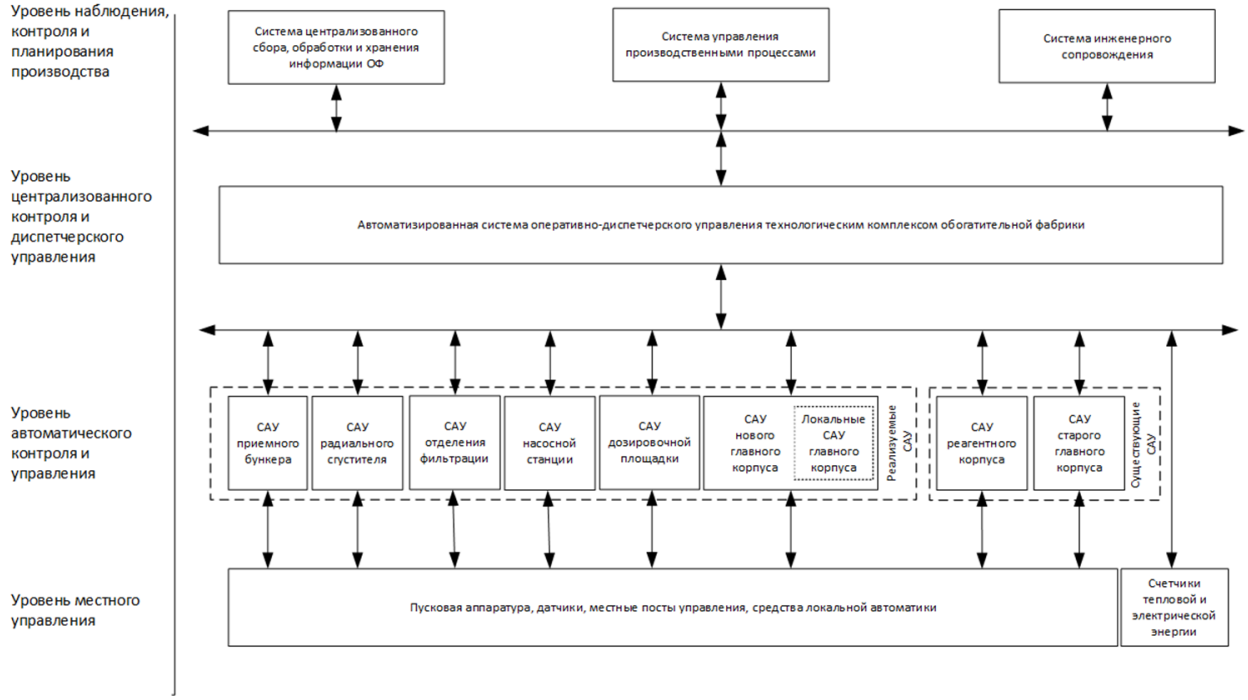


Рис. 2. Функциональная структура системы автоматизации управления ОФ «Рубцовская»

Техническое обеспечение нижнего уровня системы автоматизации управления обогатительной фабрикой реализовано на базе программируемых логических контроллеров Siemens. На рис. 3 представлена структура комплекса технических средств главного корпуса обогатительной фабрики.

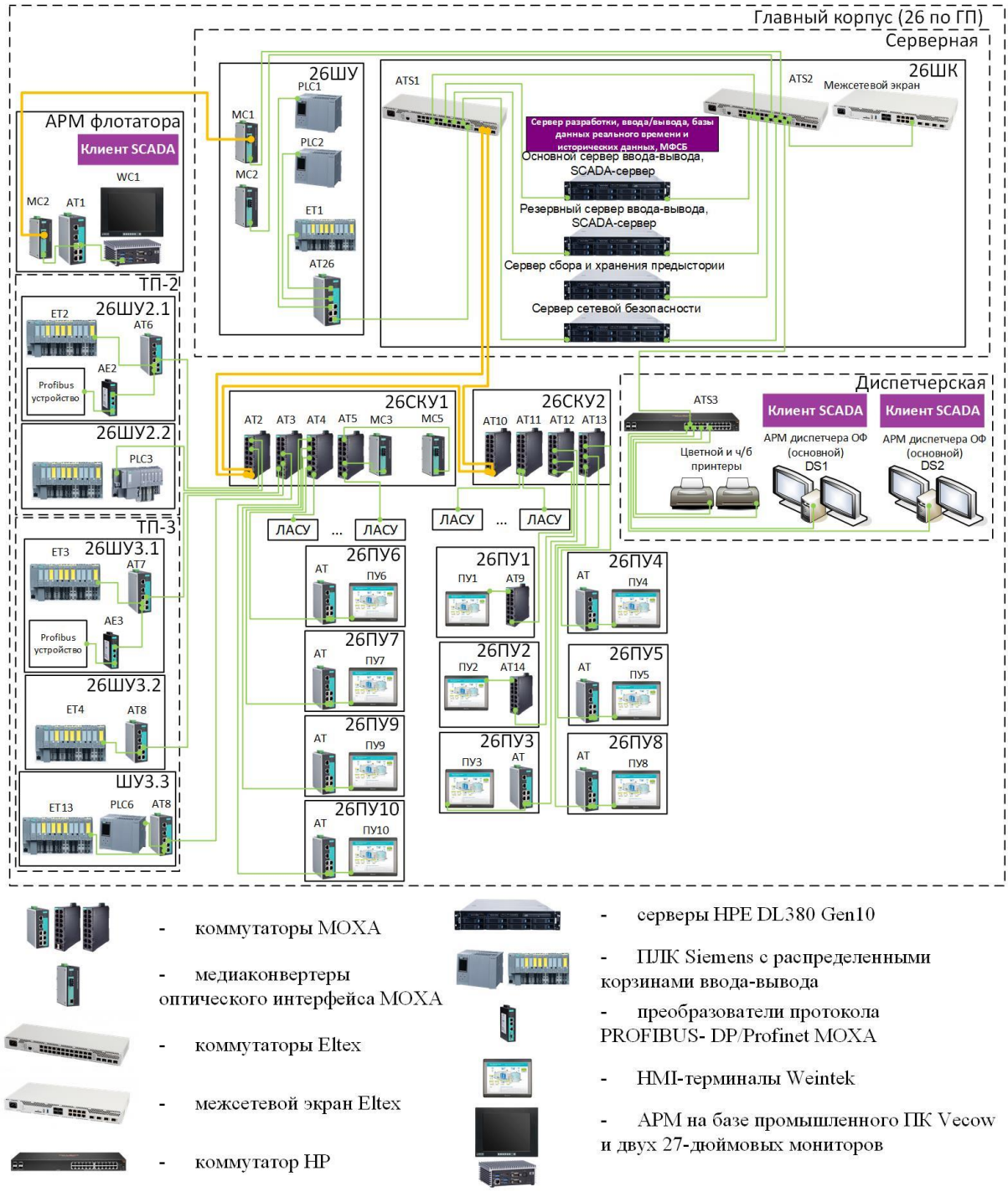


Рис. 3. Структура технических средств системы автоматизации управления главным корпусом ОФ «Рубцовская»

Системы нижнего уровня строятся с использованием контроллеров, связанных между собой с помощью сети PROFINET, с переходом на оптоволоконный кабель для подключения контроллеров, расположенных в других распределительных пунктах.

Функциональные возможности и технические характеристики этих контроллеров в полной мере соответствуют задачам их применения в проектируемой системы.

Для подключения внешних устройств и автономных систем по протоколу PROFINET используются соответствующие коммуникационные модули Siemens, для информационного обмена с устройствами, не поддерживающими данный стандарт, используются модули преобразования PROFIBUS в PROFINET.

Обмен информацией между контроллерами, с устройствами, подключенными по PROFINET к соответствующим коммуникационным модулям контроллера Siemens, с АРМ оператора, АРМ инженера, с сервером и операторскими HMI-терминалами также осуществляется по информационной сети PROFINET.

Система централизованного сбора, обработки и хранения информации представлена основным и резервным серверами, на которых расположены следующие программные модули: сервер ввода-вывода, сервер объектов, сервер предыстории. Система реализована на базе серверов с жесткими дисками, объединенными в RAID-массив для исключения потери информации в случае выхода из строя одного из накопителей.

Система инженерного сопровождения предназначена для инструментальной поддержки эксплуатации существующего и проектирования дополнительного информационного и программного обеспечения контроллеров, серверов, АРМов оператора, HMI-терминалов операторов в процессе поиска рационального технологического регламента, наладки, последующего развития и модернизации проектируемой системы. Система представлена стационарным АРМ инженера, реализованным на базе персонального компьютера с 32” LCD-монитором, а также мобильным АРМ инженера на базе ноутбука в защищённом промышленном исполнении.

Автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления технологическим комплексом обогатительной фабрики представлена АРМ базе персонального компьютера с 32” LCD-монитором и HMI-терминалами. Поставщиком производственных данных реального времени для АРМ оператора является сервер проектируемой системы, для HMI-терминалов операторов – программируемые логические контроллеры.

В качестве базового программного обеспечения проектируемой системы используется пакет MasterSCADA [2] и программное обеспечение TIA Portal [3].

Базовое программное обеспечение верхнего уровня включает в себя средства ввода-вывода данных, средства архивации и хранения предыстории, программное обеспечение для анализа данных и подготовки отчетности, а также средства визуализации данных.

На АРМ инженера устанавливается пакет TIA Portal – для конфигурирования и программирования контроллеров Siemens систем нижнего уровня и для конфигурирования и разработки прикладного программного обеспечения HMI-терминалов операторов.

Интерфейс разработки АРМ инженера интуитивно понятен и полностью поддерживает языки программирования стандарта МЭК 61131–3. Все, что создается на экране АРМ инженера при помощи соответствующего программного обеспечения, будет выглядеть точно так же и на экране удаленной станции. Пример компоновки станции оперативно-диспетчерского управления представлен на рис. 4.

В системе управления обогатительной фабрикой реализуются три режима управления технологическим комплексом:

– автоматический режим управления: это основной режим работы комплекса, в котором все информационные и управляющие функции выполняются автоматически;

– дистанционный режим управления: в этом режиме информационные функции автоматически реализуются системой, но управление каждым агрегатом осуществляется диспетчером;

– местный режим управления: все информационные функции автоматически выполняются, но управление каждым отдельным агрегатом осуществляется с местных постов управления.

Выбор режима управления производится с помощью пульта управления диспетчера обогатительной фабрики.

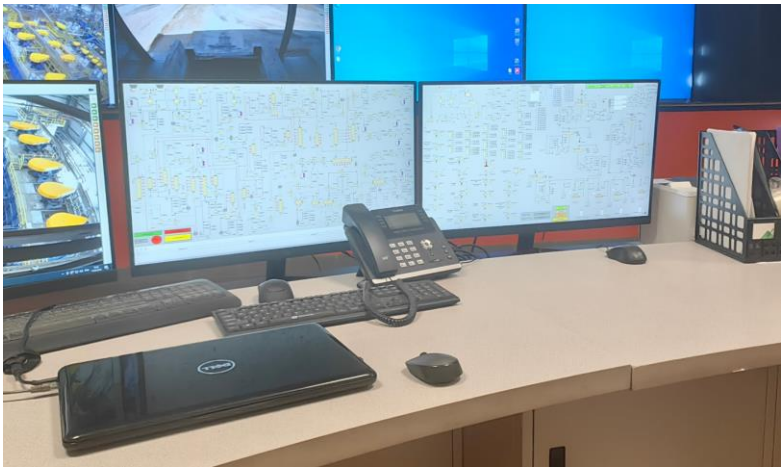


Рис. 4. Пример компоновки станции оперативно-диспетчерского управления Рубцовской обогатительной фабрикой

Вывод. Разработка и внедрение системы автоматизации управления Рубцовской обогатительной фабрикой осуществляется в очень сжатые сроки, что достигается благодаря параллельному выполнению ряда проектных работ, использованию типовых проектных решений и сред автоматизированного проектирования.

Список литературы

1. Системы автоматизации на основе натурно-модельного подхода: монография в 3-х т. Т.2: Системы автоматизации производственного назначения / Л.П. Мышляев, А.А. Ивушкин, Г.П. Сазыкин [и др.]; под ред. Л.П. Мышляева. – Новосибирск: Наука, 2006. – 483 с.

2. Официальный сайт SCADA-системы MasterSCADA 4D. – URL: https://masterscada.ru/.

3. Totally Integrated Automation Portal. – URL: https://www.siemens-pro.ru/soft/tia-portal.html.

УДК 681.518

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ MASTERSCADA 4D ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОИЗВОДСТВА ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ ПОЛИМЕТАЛЛОВ

[1,2]Курышев Е.В., [1,2]к.т.н. Грачев В.В., [1,2]Кулюшин Г.А., [1,2]к.т.н. Макаров Г.В., [2]д.т.н. Мышляев Л.П., [1,2]Халимов В.А.

1 - Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия

2 - ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье рассматривается роль аналитических инструментов (графические тренды, журнал событий) SCADA-системы MasterSCADA 4D для управления качеством производства ОФ «Рубцовская» (г. Рубцовск, Алтайский край). Приведен обзор функциональных возможностей и примеры их использования для мониторинга и анализа производственных процессов.

Ключевые слова: автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП), SCADA-система, обогатительная фабрика (ОФ), автоматизированное рабочее место (АРМ), тренды, журнал событий.

Введение. В условиях современной индустрии добычи и обработки полезных ископаемых повышение эффективности производства и управление качеством продукции становятся ключевыми задачами для обеспечения конкурентоспособности предприятий. Использование современных технологий играет важную роль в достижении этих целей, а также влияет на эффективность управления качеством производства.

Система оперативно-диспетчерского управления ОФ «Рубцовская». В рамках создания автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) обогатительной фабрики полиметаллов «Рубцовская» решалась задача совершенствования системы оперативно-диспетчерского управления, путем добавления в неё аналитических инструментов MasterSCADA 4D в виде графических трендов и журнала событий.

В качестве базового программного обеспечения АСУ ТП ОФ «Рубцовская» используется SCADA-пакет MasterSCADA 4D [1]. Взаимодействие диспетчера фабрики при управлении и контроле технологического комплекса фабрики осуществляется посредством пульта диспетчера фабрики, на котором расположены два АРМа диспетчера (основной и резервный), каждый из которых реализован на базе персонального компьютера с двумя мониторами.

Отображение информации диспетчеру фабрики осуществляется посредством мнемосхем, представленных на мониторах АРМа диспетчера, отражающих все основные компоненты технологических комплексов и их связи в технологической цепи (рис. 1, 2). Обобщенное отображение информации о текущем состоянии агрегата осуществляется в соответствии с признаками, формируемыми в программируемых логических контроллерах посредством цветовой индикации мнемонического изображения этого агрегата. Например, зеленый цвет указывает на состояние «Работа», мигающий зеленый – на состояние «Пуск» или состояние «Останов», желтый – на состояние «Неготовность», красный – на состояние «Авария» и песочный цвет характеризует состояние «Стоп» [2].

Информация о текущем состоянии технологических агрегатов, диагностические данные о причинах неготовности или аварии, а также кнопки управления агрегатами доступны во всплывающих диагностических окнах, которые появляются при щелчке мышью на соответствующем агрегате (рис. 3).

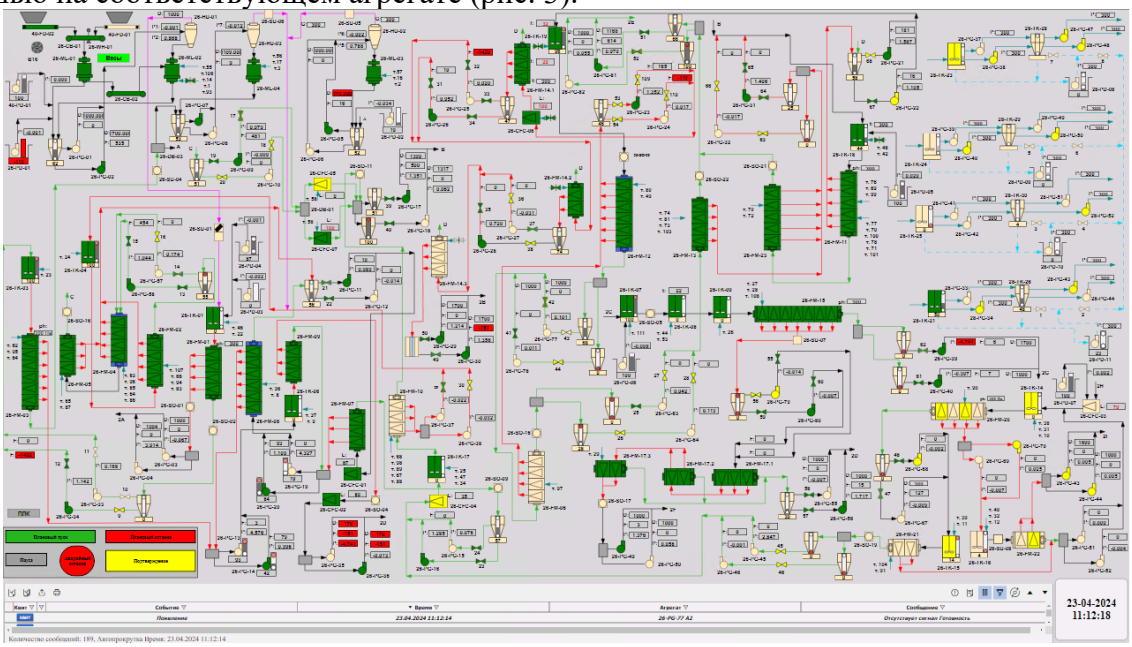


Рис. 1. Мнемосхема первого монитора АРМа диспетчера ОФ «Рубцовская»

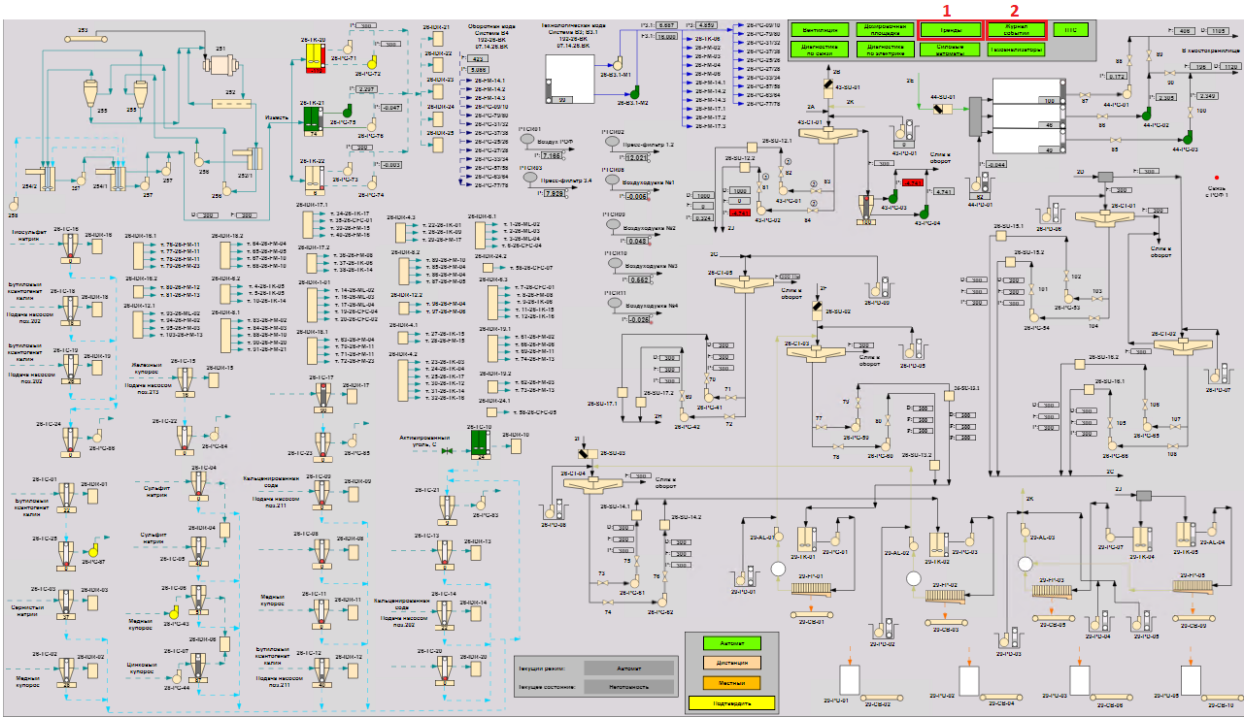


Рис. 2. Мнемосхема второго монитора АРМа диспетчера ОФ «Рубцовская»

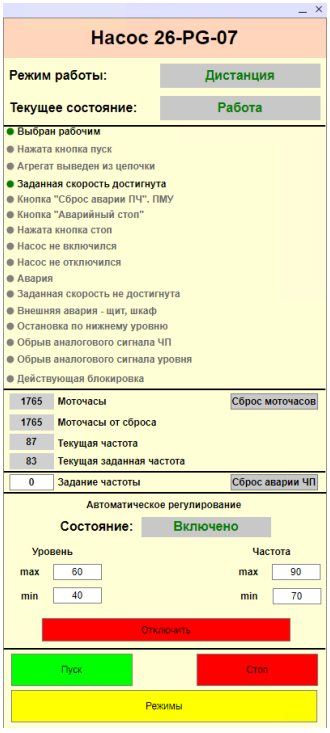


Рис. 3. Всплывающее диагностическое окно

Особую роль в системе диспетчеризации ОФ «Рубцовская» играют графические тренды и журнал событий, обеспечивая эффективность управления качеством производства.

Графические тренды в MasterSCADA 4D представляют собой графическое отображение изменения параметров процесса или переменных системы во времени. Они позволяют визуально отслеживать динамику изменений и выявлять тенденции развития процессов. Тренды могут быть представлены в виде линейных или графических диаграмм, позволяя оперативно-диспетчерскому и административно-техническому персоналу

проводить анализ параметров – отслеживать динамику, выявлять аномалии и предотвращать возможные отклонения от нормы.

На ОФ «Рубцовская» графические тренды реализованы в виде всплывающего окна, открывающегося при нажатии на кнопку «Тренды» (рис. 4), находящуюся на втором мониторе АРМа диспетчера (область 1 рис. 2).

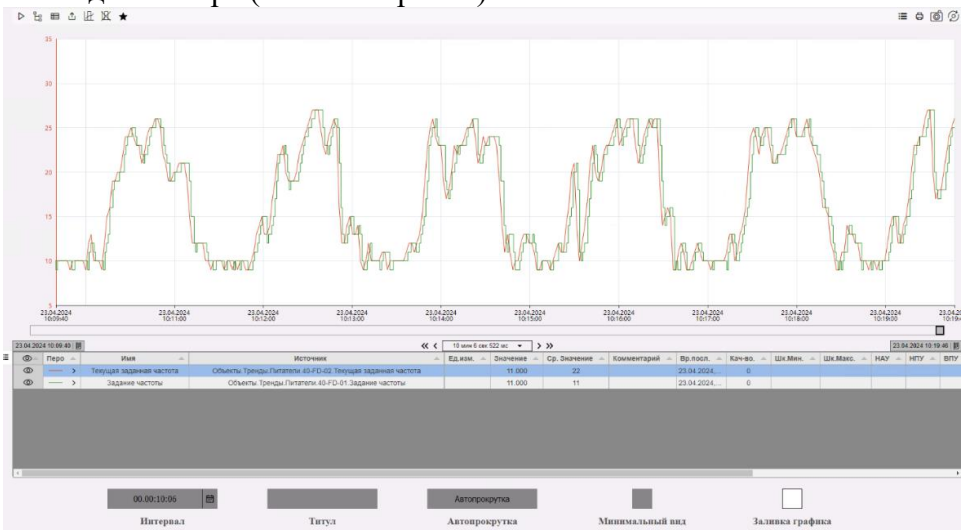


Рис. 4. Окно графических трендов

Журнал событий в MasterSCADA 4D реализован в виде системы записей, в которой фиксируются все события, происходящие в системе диспетчеризации. Это могут быть как оперативные действия операторов, так и автоматические срабатывания системы на основе заданных условий. В журнале отображается информация о том, какой именно агрегат находится в аварии, о времени и причине возникновения события. Это позволяет операторам оперативно реагировать на проблемы, минимизировать время простоя и уменьшить риск возникновения серьезных аварий. Журнал событий также реализован во всплывающем окне (рис. 5), которое открывается при нажатии на кнопку «Журнал событий» на втором мониторе АРМа диспетчера (область 2 рис. 2).

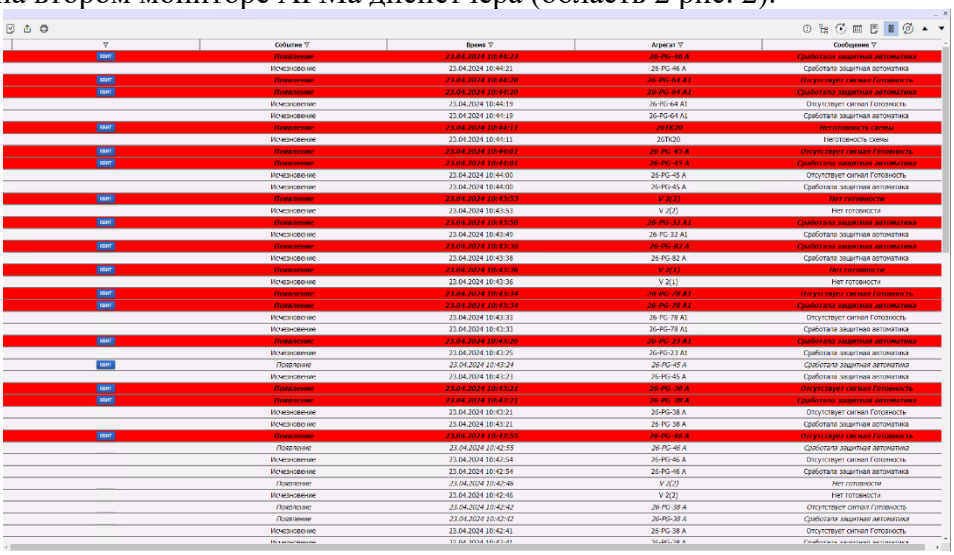


Рис. 5. Окно журнала событий

Применение графических трендов и журнала событий на ОФ «Рубцовская» обладает следующими преимуществами:

– быстрое обнаружение и реагирование на аварийные ситуации**.** Благодаря автоматической регистрации и анализу событий операторы могут оперативно реагировать на возникающие проблемы и минимизировать временные потери.

– повышение надежности и снижение простоев оборудования**.** Анализ графических трендов и данных журнала позволяет выявлять причины отказов оборудования и принимать меры по их быстрому устранению или предотвращению, что способствует повышению надежности и долговечности технических систем.

– оптимизация производственных процессов**.** Использование данных аварийного журнала для анализа производственных процессов позволяет выявлять узкие места и разрабатывать меры по их оптимизации, что способствует повышению эффективности производства.

Для хранения и использования архивных данных в трендах и журнале событий используется PostgreSQL - мощная реляционная система управления базами данных [3].

База данных PostgreSQL обладает хорошей производительностью, надежностью и возможностями для масштабирования, что делает ее прекрасным выбором для хранения важной информации в системе управления производством.

Администрирование происходит посредством pgAdmin 4, который предоставляет графический интерфейс пользователя для управления базами данных PostgreSQL. Он предоставляет удобное и интуитивно понятное средство для выполнения широкого спектра задач администрирования, таких как создание и удаление баз данных, таблиц и индексов, выполнение SQL-запросов, управление пользователями и ролями, а также мониторинг состояния баз данных. С помощью pgAdmin 4 администраторы могут легко взаимодействовать с базой данных PostgreSQL через удобный веб-интерфейс, что делает процесс администрирования более эффективным и удобным. Кроме того, pgAdmin 4 предоставляет различные инструменты для визуализации данных, отображения статистики и мониторинга работы базы данных.

Вывод. В целом можно утверждать, что графические тренды и аварийный журнал событий обеспечивают прозрачность и контроль над производственными процессами. Они позволяют операторам и управленцам быстро оценивать текущую ситуацию на производстве и принимать обоснованные решения для улучшения качества продукции и эффективности производства ОФ «Рубцовская».

Список литературы

1. Официальный сайт SCADA-системы MasterSCADA 4D. – URL: https://masterscada.ru/.

2. Информационное обеспечение автоматизированной системы управления технологическими процесса обогатительной фабрики полиметаллов / В.В. Грачев, Д.Е. Коровин, Г.А. Кулюшин [и др.] // Краевые задачи и математическое моделирование: сб. науч. ст. – Новокузнецк: КГПИ КемГУ, 2023. – С. 32-38.

3. Официальный сайт базы данных PostgreSQL. – URL: https://www.postgresql.org/.

УДК 65.011.56

К ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ СУШИЛЬНО-ТОПОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ

Коровин Д.Е.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье исследуется вопрос управления сушильно-топочным отделением с использованием алгоритма проверки футеровки топки. Рассматривается важность обеспечения целостности футеровки для предотвращения повреждений топки, что может привести к возгоранию или даже взрыву. Особое внимание уделяется проблеме неправильных переходов в горячий резерв как основной причине деформации и дальнейшего разрушения футеровки.

Ключевые слова: сушильно-топочное отделение, футеровка топки, управление безопасностью, SCADA алгоритмизация, интеллектуальная система, предотвращение повреждений.

Введение. Угольная отрасль является одной из важнейших отраслей Кузбасса. В условиях постоянного развития технологий и стремительных изменений в промышленной сфере автоматизация играет ключевую роль в оптимизации производственных процессов. Внедрение автоматизированных систем становится необходимостью для повышения эффективности добычи, обработки и использования угольного сырья.

Процесс сушки в угольной отрасли занимают важное место в процессе обработки угольного концентрата. Он не только обеспечивает необходимые характеристики материала перед его транспортировкой, но и являются ключевым звеном в производственной цепочке, влияя на качество конечного продукта [1].

Сушильно-топочные отделения (СТО) в угольной отрасли занимают центральное место в производственных процессах, влияя на ключевые параметры обработки материалов и качество конечной продукции. Особенно важны они при сушке концентрата угля, где правильное функционирование сушильно-топочных установок напрямую влияет на эффективность всего производственного процесса.

Однако, помимо усилий по автоматизации процессов, не менее важным является обеспечение безопасности и эффективности работы ключевых узлов и оборудования, включая СТО.

В данной работе рассматривается инновационный метод управления и диагностики в сушильно-топочных отделениях угольной отрасли Кузбасса. Исследуется потенциал автоматизированных систем для повышения эффективности производственных процессов, обеспечения безопасности на производстве и сокращения затрат.

Обеспечение безопасности сушильно-топочными отделениями через контроль футеровки топки. В угольной промышленности контроль за состоянием и эффективностью СТО выходит на передний план [2]. Необходимость обеспечения оптимальных условий работы этих установок не только обусловлена стремлением к высокому качеству продукции, но и связана с обеспечением безопасности на производстве. СТО подвержены различным факторам, включая износ, неполадки и потенциальные опасности, такие как пожары или выбросы вредных веществ.

В этом контексте внедрение инновационных методов диагностики и контроля состояния сушильно-топочных установок становится необходимостью. Разработка и применение алгоритмов предиктивной диагностики для регулярного мониторинга и анализа работы за счет оперативного контроля предаварийных состояний технологических агрегатов сушильно-топочных установок помогает предотвращать возможные сбои, оптимизировать процессы сушки и повышать безопасность труда на производстве [3].

Одним из важнейших аспектов управления производственным процессом сушки является поддержание целостности футеровки топки.

Нарушение целостности футеровки топки может привести к серьезным последствиям. Во-первых, повреждение футеровки может привести к утечке высокотемпературных газов и продуктов горения, что может стать причиной возгорания или взрыва. Во-вторых, деформация или износ футеровки уменьшает её эффективность, что может привести к снижению производительности оборудования и увеличению расхода энергии. Одной из основных причин ускоренного разрушения футеровки являются неправильные переходы в горячий резерв и из него. Горячий резерв – это состояние топки СТО, при котором производится снижение температуры, но при этом не прекращается сгорание топлива Неправильные технологические режимы или несоответствие материалов, используемых при футеровке, могут привести к её деформации и разрушению.

В настоящий момент для обеспечения безопасности и эффективности футеровки используются следующие методы:

визуальный осмотр – регулярный визуальный осмотр футеровки для выявления признаков деформации, износа или других повреждений;

анализ данных – ручная обработка данных от датчиков для выявления аномалий и предотвращения возможных аварийных ситуаций;

регулярное обслуживание – плановое обслуживание и ремонт футеровки согласно установленному графику (один раз в год).

В данной работе предлагается следующий метод проверки футеровки топки. Этот метод включает в себя несколько пунктов.

1. Использование датчиков. Установка датчиков температуры, давления и кислорода для мониторинга состояния футеровки в реальном времени.

2. Анализ данных. Автоматическая обработка данных от датчиков для выявления аномалий и предотвращения возможных аварийных ситуаций.

3. Анализ горячего резерва. Проверка правильности процесса перехода в/из горячего резерва.

4. Нерегулярное обслуживание. При выявлении аномалий, производить внеочередную проверку футеровки.

Рассмотрим подробнее алгоритм проверки данных от датчиков и анализ горячего резерва

Алгоритм проверки футеровки. Первоочередной задачей является анализ данных, поступающих либо из базы данных, либо из SCADA-системы в реальном времени. В современных автоматизированных системах управления технологическими процессами – первоочередную роль играют SCADA-системы. Они способны обрабатывать и сохранять большие объемы информации помимо своих первоочередных функций по управлению технологическими процессами. В данной работе теги были получены из базы данных Historian, эти данные предоставляют ценную информацию о состоянии системы и процессов, происходящих в ней. Проведение анализа данных позволяет выявить возможные проблемы или аномалии в работе и принять меры по их решению [4].

Предлагается следующий алгоритм проверки температурного режима топки (рис. 1).

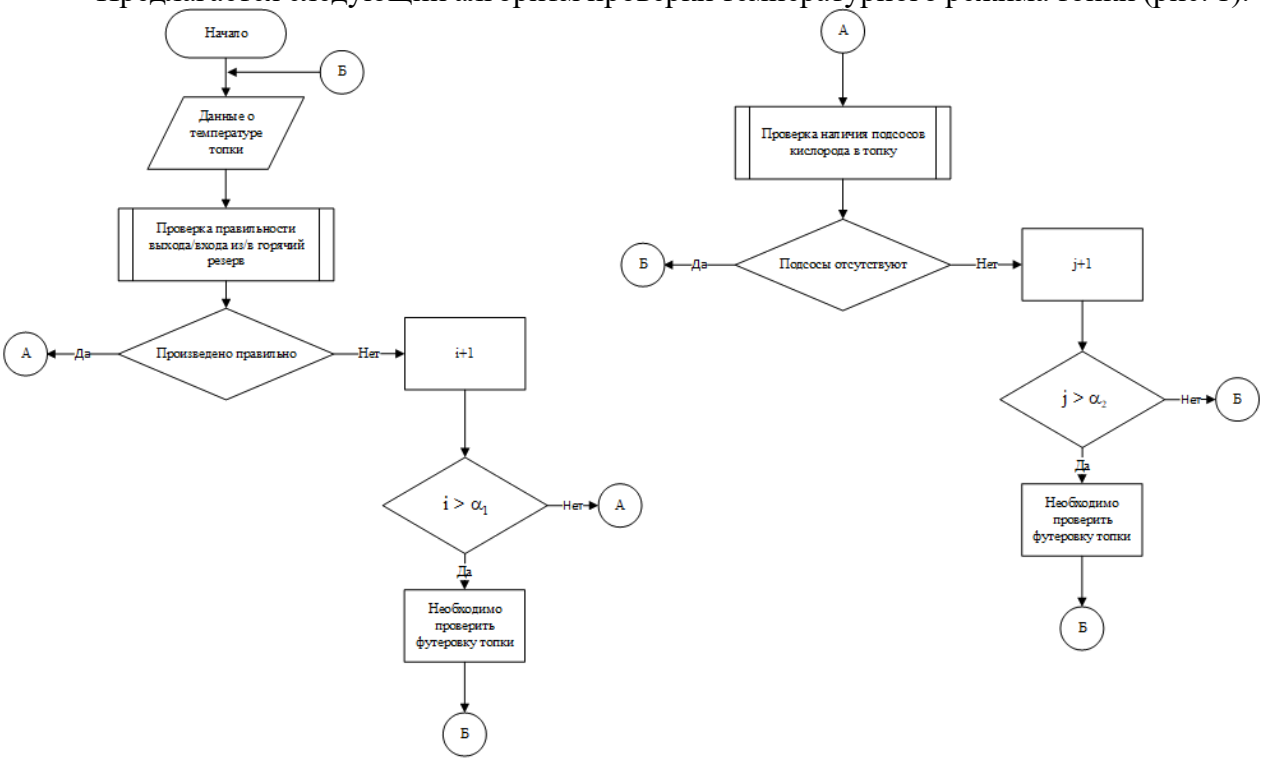


Рис. 1. Блок-схема алгоритма проверки футеровки

Сначала значения, полученные из SCADA-системы, обрабатываются нейронной сетью для выявления аномалий. После α_1 количества аномалий – выводится сообщение о необходимости проверки футеровки

Если же этого не произошло, то производится проверка наличия подсосов кислорода в топку. После α_2 аномалий – выводится сообщение о необходимости проверки футеровки.

Один из основных инструментов для анализа данных – нейронная сеть, обученная на предыдущих данных о переходе в горячий резерв. Этот метод обеспечивает систему способностью автоматически выявлять паттерны и тренды, что значительно улучшает её способность реагировать на изменяющиеся условия.

Процесс обучения нейронной сети. Подразумевалось активное взаимодействие с экспертами, которые анализировали предоставленные данные на предмет их соответствия стандартам "корректного" течения процессов. Такие данные, одобренные экспертами, стали обучающей выборкой для системы. Пример таких данных можно увидеть на рис. 2, который иллюстрирует типичные сценарии данных, на основе которых проводилось обучение нейронной сети [5].

Сплошной линией показаны натурные данные. Пунктирной линией показано течение процесса, принятое за правильное экспертом.

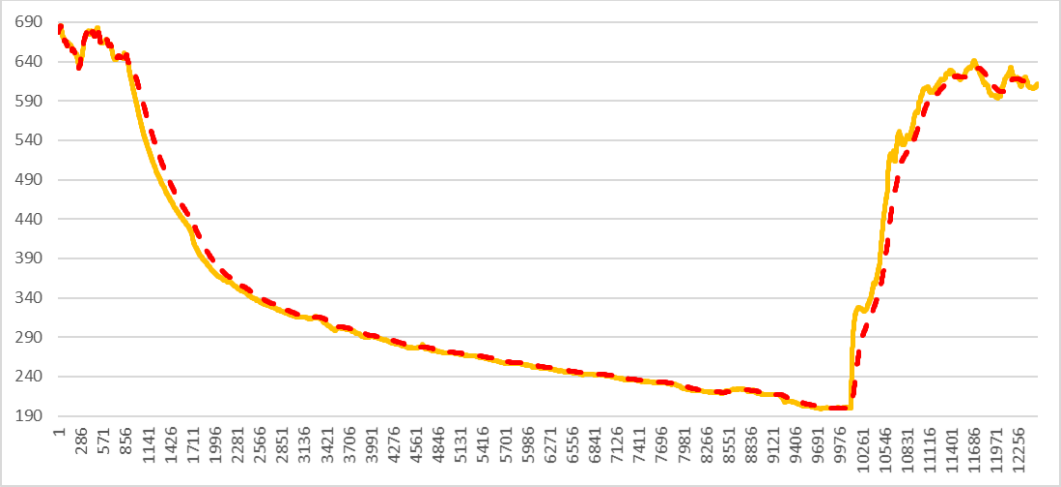


Рис. 2. «Корректное» течение процесса перехода в горячий резерв

С другой стороны, для улучшения точности обучения, в систему также вводились данные, которые эксперты оценивали как «некорректное». Это позволило нейронной сети научиться распознавать не только успешные, но и ошибочные паттерны процессов. На рис. 3 показан пример подобных данных. Сплошной линией показаны натурные данные. Пунктирной линией показано течение процесса, принятое за неправильное экспертом.

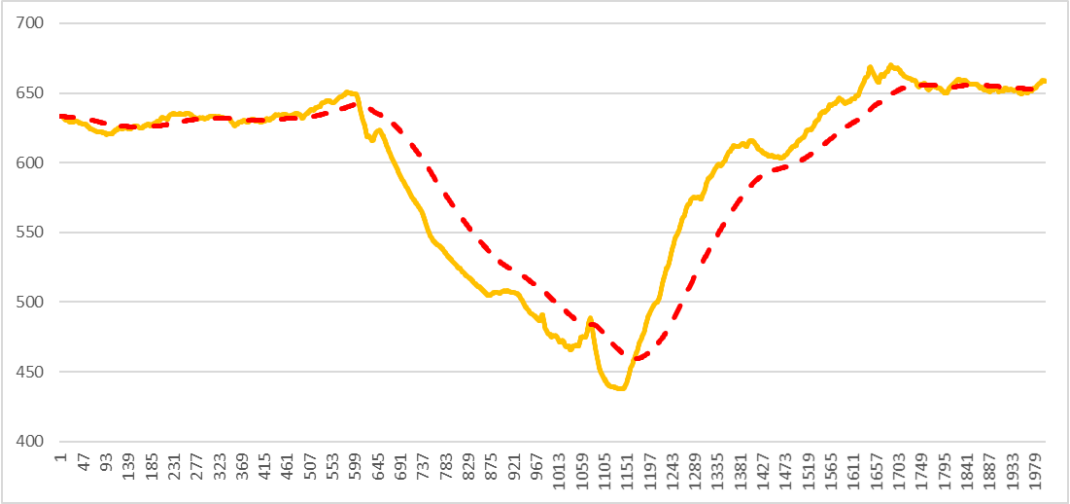


Рис. 3. «Некорректное» течение процесса перехода в горячий резерв

Результаты. После завершения процесса обучения, результаты, представленные в табл. 1, демонстрируют высокую эффективность выбранной модели нейронной сети, Fast Forest Regression, которая достигла коэффициента детерминации 0.9218. Это подтверждает, что обученная модель способна с высокой точностью предсказывать результаты на основе вводимых данных.

Таблица 1

Результаты обучения нейронной сети

Параметр	Значение
Время обучения заданное (в секундах)	30
Время обучения затраченное (в секундах)	16,3
Исследованно моделей	5
Выбранная модель	Fast Forest Regression
Коэффициент детерминации	0,9218

Используя эту обученную нейронную сеть, можно в режиме реального времени мониторить и проверять процессы перехода в горячий резерв, тем самым обеспечивая не только стабильность процессов, но и предотвращение возможных нештатных ситуаций за счет своевременного реагирования на аномалии или отклонения в процессе.

Определение подсосов воздуха. Второй этап алгоритма, представленного на рис. 1, включает проверку на наличие несанкционированных подсосов кислорода в топочное устройство. Этот процесс является важным элементом управления рисками, поскольку неконтролируемые притоки кислорода могут существенно увеличить вероятность возгораний или даже взрывов в рабочей зоне.

В контексте данной задачи, особое внимание уделяется расчету потенциальных подсосов воздуха, которые могут возникать в процессе работы от борова к дымососу. Этот участок является особенно критичным, поскольку любые утечки или дефекты в системе могут привести к увеличению концентрации кислорода, что, в свою очередь, создает повышенные риски для производственной безопасности.

Процедура расчета включает в себя анализ потока воздуха и его характеристик на различных этапах — как до, так и после возможных подсосов. Анализируется также газовый состав воздуха и его изменения, что позволяет получить полную картину потенциальных изменений в атмосфере рабочей зоны. Важным аспектом является также учет геометрии системы вентиляции, поскольку структурные особенности могут влиять на динамику и распределение воздушных потоков [6].

На основе собранных и проанализированных данных, можно определить оптимальное количество точек проверки и контроля, которые необходимы для эффективного мониторинга и предотвращения риска возгорания. Эти меры позволяют не только снизить вероятность нештатных ситуаций, но и значительно повысить общую эффективность работы СТО, обеспечивая стабильность и безопасность производственных процессов.

Выводы. Автоматизация играет ключевую роль в современной промышленности, включая угольную. В сушильно-топочных отделениях, где точность, эффективность и безопасность процессов имеют решающее значение, автоматизированные системы управления становятся не просто удобством, но и необходимостью. Они обеспечивают оптимизацию рабочих процессов, повышение КПД оборудования, снижение энергопотребления.

Были рассмотрены различные методы проверки футеровки топки. Для проведения предиктивной диагностики обучена нейронная сеть на данных собранных посредством SCADA-системы. Для составления обучающий выборки данные были разделены на «корректное» и «некорректное» течение процесса перехода в горячий резерв эксперта. В результате была получена нейронная сеть с моделью Fast Forest Regression и

коэффициентом детерминации 0,9218. Также был разработан алгоритм проверки наличия подсосов кислорода в топку.

Дальнейшее развитие и оптимизация процессов управления СТО, включая улучшение алгоритмов предиктивной диагностики и усиление процедур регулярного обслуживания, будут способствовать не только улучшению производственных показателей, но и обеспечению устойчивого развития угольной промышленности в целом.

Список литературы

1. Фридман Ю.А., Логинова Е.Ю., Речко Г.Н. Теория и практика планирования инновационного развития сырьевых отраслей: на примере угольной промышленности Кузбасса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. –№. 6 (106). – С. 131-136.

2. Эффективность использования цифровых технологий в производственных процессах угольной промышленности / А.В. Зозуля, П.В. Зозуля, С.А. Титов [и др.] // Уголь. – 2022. – №. 9 (1158). – С. 47-52.

3. Оценивание предаварийных состояний технологического оборудования и контрольно-измерительных приборов / М.В. Ляховец, Г.В. Макаров, А.С. Саламатин [и др.] // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2020. – № 3. – С. 16-24. – DOI 10.25791/asu.3.2020.1166.

4. Коровин Д.Е., Иванов Д.В. Модернизация верхнего уровня автоматизированной системы управления обогатительной фабрикой «Барзасское товарищество» // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : тр. всерос. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 19–21 мая 2020 года ; под общ. ред. М.В. Темлянцева. Выпуск 24. Часть VI. – Новокузнецк: СибГИУ, 2020. – С. 8-12.

5. Проталинский О.М., Бородин В.А. Предиктивный анализ ремонтных работ энергетического оборудования на основе методов машинного обучения // Математические методы в технике и технологиях. – 2019. – Т. 4. – С. 106-109.

6. Мерзликина Г. С. Предиктивный анализ инновационного развития промышленного предприятия // Цифровая экономика и Индустрия 4.0: форсайт Россия : сб. тр. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 26–28 марта 2020 года. Том 2. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – С. 366-374. – DOI 10.18720/IEP/2020.2/40.

УДК 62.519

АВТОНОМНАЯ И ДИСТАНЦИОННО-УПРАВЛЯЕМАЯ ТЕХНИКА НА ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ

[1]д.э.н. Никитенко С.М., [1]к.т.н. Никитенко М.С., [1]Худоногов Д.Ю., [1]Кизилов С.А., [2]PhD Вайс И

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

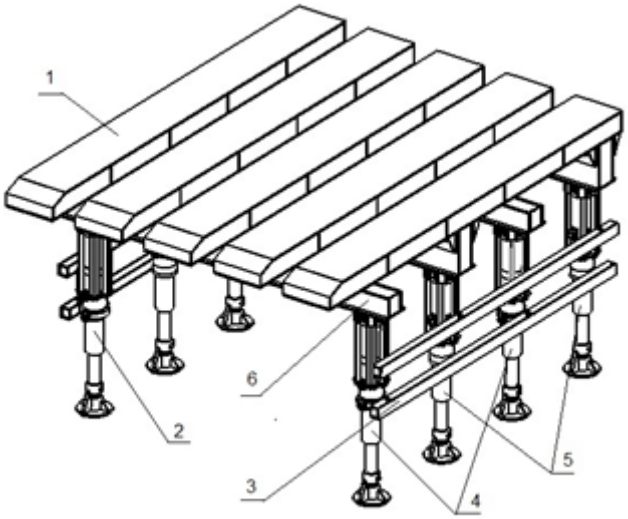
2 – EEP Elektro-Elektronik Pranjic GmbH, Гельзенкирхен, Германия

Аннотация. при проходке подземных горных выработок в угольных шахтах периодически возникают горно-геологические риски, которые могут привести к аварийным происшествиям. Одним из способов предотвращения этих опасных событий в зонах работы персонала может быть применение автономных горных машин и оборудования с возможностью дистанционного управления.

Ключевые слова: гидрофицированная шагающая временная крепь, обоснование технических параметров, горная выработка, универсальный пульт дистанционного управления.

В настоящее время в проходческих забоях для предотвращения обрушений пород кровли на шахтах широко применяются предохранительные временные крепи различных конструкций [1]. Авторы считают, что одним из перспективных решений повышения эффективности и безопасности проходческих работ является гидрофицированная крепь шагающего типа (ГШК), которая позволяет создать временное безопасное крепление призабойного пространства над проходческим комбайном и позволяет производить анкерное крепление выработки без остановки комбайна и вне зоны его работы [2-5].

Гидрофицированная крепь шагающего типа (рис. 1) в горной выработке создает опережающую временную поддержку пород кровли за счет попеременного циклического шагания двухсекционной конструкции крепи и поочередного восприятия горного давления от массива пород кровли ее секциями, что обеспечивает ограждение и защиту рабочего пространства от проникновения обрушающихся пород кровли.



1 – балки перекрытия; 2 – гидравлическая стойка; 3 – боковое ограждение; 4 – секция передовая; 5 – секция отстающая; 6 - траверса

Рис. 1. Конструкция гидрофицированной крепи шагающего типа:

При этом шагающая крепь перемещается вслед за комбайном, выемка горной массы производится под защитой перекрытия крепи, что обеспечивает гарантированную безопасность проходческих работ и увеличивает скорость проведения выработок.

ГШК разработана как высокоавтоматизированная единица горношахтного оборудования, способная выполнять ряд задач без вмешательства человека. При этом движение за комбайном в проходческом забое может сопровождаться рядом нештатных ситуаций, трудно поддающихся автоматизации, либо их автоматизация требует значительных временных затрат. В таких ситуациях уместно передать управление ГШК от автоматической системы человеку-оператору. Вполне очевидно, что оператор должен основную часть времени находиться вне зоны, где работает комбайн, но при этом иметь хорошую ситуационную осведомленность при необходимости принять управление. Два этих условия требуют оснащения ГШК пультом управления. Пульт управления должен обеспечивать два режима работы: коррекция автоматического управления (может выполняться со стационарно закрепленного на ГШК пульта) и ручное управления во нештатной ситуации (требуется мобильный дистанционный пульт управления).

Промышленность выпускает достаточно большую номенклатуру пультов управления как стационарных, так и дистанционных, которые применяются для управления различными горными машинами с высокой степенью автоматизации. К стационарным пультам управления, которые позволяют управлять горношахтным оборудованием на расстоянии, относятся пульты, выпускаемые различными компаниями [6-9].

Компания EEP Elektro-Elektronik Pranjic является одной из ведущих в области эффективных технологий автоматизации и управления в горнодобывающей промышленности. Основой серии интеллектуальных и инновационных продуктов и приложений EEP является PRA_matic® - комплексная система управления забоем. Искробезопасные блоки управления PRA_matic®, разработанные компанией EEP, обеспечивают абсолютно точное электрогидравлическое управление и могут автоматически выполнять до 24 функций (рис. 2).

Рис. 2. Пульт управления PRA_matic (Elektro-Elektronik Pranjic)

Компания "EEP Elektro-Elektronik Pranjic" уже поставила и ввела в эксплуатацию более 60 комплектов современного автоматического управления для ведения подземных работ. В этом случае, как правило, подземный персонал требуется только для контролирования технологического процесса и при выполнении ремонта. Автоматизация позволила улучшить безопасность и экономические показатели.

В некоторых странах полная автоматизация производственных процессов в очистных забоях осуществляется разработанной фирмой «marco System Analysis and Development GmbH» системой комплексного управления лавой «Robotic Mining». Система обеспечивает возможность компьютерного управления процессами и механизмами в лаве в полностью автоматизированном режиме с одного пульта. Происходящие в лаве процессы, положение механизмов и состояние лавы представляются при этом в визуальной форме в реальном режиме времени. Достигнутые успехи рассматривались компанией как промежуточные шаги к реализации ранее намеченной задачи по переходу от полной автоматизации к роботизации очистных работ. Для дистанционного управления работой лавы фирмой marco был разработан компактный эргономичный пульт дистанционного управления (174×86×30.2 мм) с модулем RFID, позволяющий управлять всеми процессами в лаве из штрека (рис. 3).

Рис. 3. Пульт управления pm32 (marco System Analysis and Development GmbH)

Компания GHH Group и специалисты из Nerospec SK разрабатывают решения как для полной автоматизации техники, так и для дистанционного управления. С помощью пульта радиоуправления T-RX100J от GHH Group (рис. 4) оператор может с безопасного расстояния управлять горношахтным оборудованием. Основным преимуществом этого решения является возможность его эксплуатации не только с машинами GHH Group, но и с техникой других производителей.

Рис. 4. Пульт управления T-RX100J (GHH Group)

Конструкция ГШК значительно отличается от любого современного горношахтного оборудования, что вносит ряд особенностей в управление подобным устройством (отдельное управление каждой из восьми гидравлических стоек, домкратами передвижки). Соответственно, описанные выше пульты управления необходимо адаптировать для управления ГШК. В ФИЦ УУХ СО РАН разрабатывается универсальный пульт дистанционного управления (УПДУ) горношахтным оборудованием, который предназначен для использования в составе стендовой установки моделирования технологий скоростной проходки горных выработок и эффективной отработки трудноизвлекаемых запасов пластовых угольных месторождений и алмазосодержащих россыпей подземным способом.

Пульт коммутационного устройства предназначается для дистанционного подключения к подвижному ГШО, стационарного коммутационного устройства для установки на ГШО. Корпус УПДУ имеет размеры (300 х 100 х 50 мм). На лицевой панели корпуса расположены два дисплея для индикации технологических параметров и функций программируемых кнопок, не менее 20 программируемых клавиш управления. На боках и нижней панели корпуса расположены разъемы для подключения УПДУ к коммутационным устройствам, крепления и направляющие. УПДУ оснащен программируемым аппаратным модулем для управления экспериментальными образцами горношахтного оборудования разной конструкции (рис. 5).

УПДУ обеспечивает формирование сигналов управления к исполнительным блокам технологических систем по протоколу Ethernet и цифровым линиям. Он оснащен не менее 22 нажимными кнопками для ручного ввода команд, текущая функция каждой нажимной кнопки отображается на экране под ней, что даёт возможность ей изменяться по заложенной в память универсального пульта программе. Пульт содержит два одноплатных компьютера и встраиваемый контроллер с возможностью реконфигурации портов ввода вывода. Одноплатные компьютеры обеспечивают отображение интерфейса управления на встроенных в пульт экранах и его изменение согласно заложенной программе по командам от контроллера. Контроллер обеспечивает считывание процесса нажатия оператора на кнопки, обрабатывает их по заложенной в него программе, формирует управляющие сигналы к цифровым реконфигурируемым портам или на Ethernet адаптер для управления ГШК.

Рис. 5. Пульт управления УПДУ (ФИЦ УУХ СО РАН)

Конструкция УПДУ защищена двумя патентами на промышленный образец и Программой для ЭВМ [10-12].

Выводы. На основании вышеизложенного материала можно сделать следующий вывод: применение шагающей временной крепи в подготовительном забое за счет попеременного циклического шагания двухсекционной конструкции крепи и поочередного восприятия горного давления ее перекрытием создается опережающая временная поддержка, что снижает риск обрушения пород кровли.

Благодаря разработанному универсальному пульту дистанционного управления обеспечивается безопасность работы для оператора ГШК, имеющего возможность управлять оборудованием из более защищенного места.

Благодарности. Статья подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075–15-2022-1190).

Список литературы

1. Robotic walking module as underground mining safety device / S. Nikitenko, M. Nikitenko, S. Kizilov [et al.] // E3S Web of Conferences. –2024. – 498. – 03014.

2. Разработка технических требований к механизированной шагающей крепи в составе горно-проходческого комплекса /В.И. Клишин, Ю.В. Малахов, С.М. Никитенко [и др.] // Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – № 6. – С.125-131.

3. Rock mass-multifunction mobile roof support interaction in mining / V.I. Klishin, V.N. Fryanov, L.D. Pavlova [et al.] // Journal of Mining Science. – 2021. – Т. 57. – № 3. – С. 361-369.

4. Выбор формы армирующих вставок для тангенциальных поворотных резцов горных машин / П.Д. Крестовоздвиженский, В.И. Клишин, С.М. Никитенко [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 6. – С. 107-115.

5. Клишин В.И., Малахов Ю.В. Разработка и обоснование параметров многофункциональной шагающей крепи // Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2019. – № 5. – С. 125-131.

6. EEP. - URL: https://eep.de/en/.

7. Роботизация очистного забоя - полностью автоматизированная высокопроизводительная лава с системой управления «Marco Robotic mining» (шахта «Полысаевская») / M. Reuter, M. Krach, U. Kiessling [et al.] // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2017. – № 4(2). – 263-269.

8. Reuter M., Veksler Ju., Kurfurst W. From automation to “robotization” of production heading // Industr Kazakhstan. – 2007. – No. 9. – PP. 34–40.

9. Агентство полного цикла «Маркетинг от Тимченко» – URL: https://stimchenko.ru/coffee-break/роботизированная-и-дистанционно-упр/.

10. Патент №134982 Российская Федерация, МКПО 13/14–03; 15–04. Пульт управления электро-гидро-пневмосистемами / М.С. Никитенко, С.А. Кизилов, С.М. Никитенко, Д.Ю. Худоногов; ФГБНУ ФИЦ УУХ СО РАН. – № 2022503531, заявлю. 15.08.2022; зарегистр. 19.01.2023. – Бюл. №2.

11. Патент №134983 Российская Федерация, МКПО 13/14–03; 15-04. Сервисный пульт управления электро-гидро-пневмосистемами / М.С. Никитенко, С.А. Кизилов, С.М. Никитенко, Д.Ю. Худоногов; ФГБНУ ФИЦ УУХ СО РАН. – № 2022503531, заявлю. 15.08.2022; зарегистр. 19.01.2023. – Бюл. №2.

12. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2022611584. Программа управления и индикации данных экспериментальной эксплуатации прототипов роботизированных элементов подземного горно-шахтного оборудования / С.М. Никитенко, М.С. Никитенко, С.А. Кизилов [и др.]; ООО «ИнТехПромИнжиниринг». – Фед. служба по интеллект. собств.; Дата регистр. 27 января 2022.

УДК 622 +004.5:519.876.2

СПОСОБ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ С ИХ ФИЗИЧЕСКИМИ МАКЕТАМИ

[1]Кизилов С.А., [1]к.т.н. Никитенко М.С., [1]Худоногов Д.Ю., [2]Neogi B., [1]Верховцев Д.О.
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия
2 – Инженерный колледж JIS, Кальяни, Западная Бенгалия, Индия

Аннотация. В статье рассмотрены подходы к взаимодействию цифровых моделей технологических объектов и их физических макетов. Предложено и обосновано применение виртуальной реальности как системы управления технологическим процессом. Разработан способ и программа, обеспечивающие взаимодействие между технологическим оборудованием и его цифровыми моделями в виртуальной реальности.

Ключевые слова: цифровая модель, виртуальная реальность, макет технологического объекта, система управления.

В системах управления технологическими процессами визуализация данных всегда занимает особое место реализация инженерных промышленных приложений. Сложные технологические участки должны быть представлены интерактивной схемой управления, индикацией контрольных параметров систем сбора данных промышленных объектов, максимально эффективно и своевременно информировать о нарушениях в работе производственного процесса.

Технические средства отображения процессов и параметров, в большинстве реализаций представляют собой рабочее место оператора, где вся информация выводится на экраны мониторов. Значительный объем информации необходимо визуально контролировать, при этом концентрировать внимание на нескольких мониторах одновременно. Уменьшение мнемосхемы контролируемых параметров и самого технологического участка также влияют на высокую степень концентрации оператора [1].

Развитие технологий виртуальной реальности позволяет подойти к реализации приложений АСУТП с принципиально новой позиции: управлять и контролировать технологические участки через средства отображения виртуальной реальности [2-3], где глубина и трехмерность отображения картинки достигаются за счет предъявления отдельного изображения для каждого глаза в гарнитуре [4-6].

Одним из главных преимуществ виртуальной реальности перед отображением информации на мониторе является возможность задействовать видимую глубину сцены – у оператора появляется возможность комфортно считывать информацию с объектов, расположенных в глубине виртуальной трехмерной сцены и взаимодействовать с ними [7-10].

Разработка цифровых моделей технологических объектов является одним из неотъемлемых этапов создания цифровых двойников и формирования моделей управления технологическими процессами. Реализация таких моделей в среде виртуальной реальности позволяет создавать их цифровые аналоги, повторяющие технологические операции физических объектов на основе управляющих воздействий.

Выбор среды виртуальной реальности в задаче формирования цифровой модели управления обусловлен возможностью создания эффекта присутствия оператора непосредственно на технологическом участке. Взаимодействие с цифровыми моделями в виртуальной среде отражается и на их физических макетах.

Взаимодействие с физическими макетами осуществляется при помощи сетевых приложений модулей обмена данными между средой виртуальной реальности и контроллером управления физическими макетами (рис. 1).

Рис. 1. Обобщенная структурная схема взаимодействия цифровых моделей технологических объектов виртуальной реальности и их взаимодействие с физическими макетами

Трехмерные модели технологических объектов с элементами контроля и управления отображаются на экране гарнитуры виртуальной реальности, обеспечивая необходимый эффект пространства вокруг оператора, осуществляют сбор и обработку данных, получаемых через сетевое приложение обмена информацией с физическим уровнем.

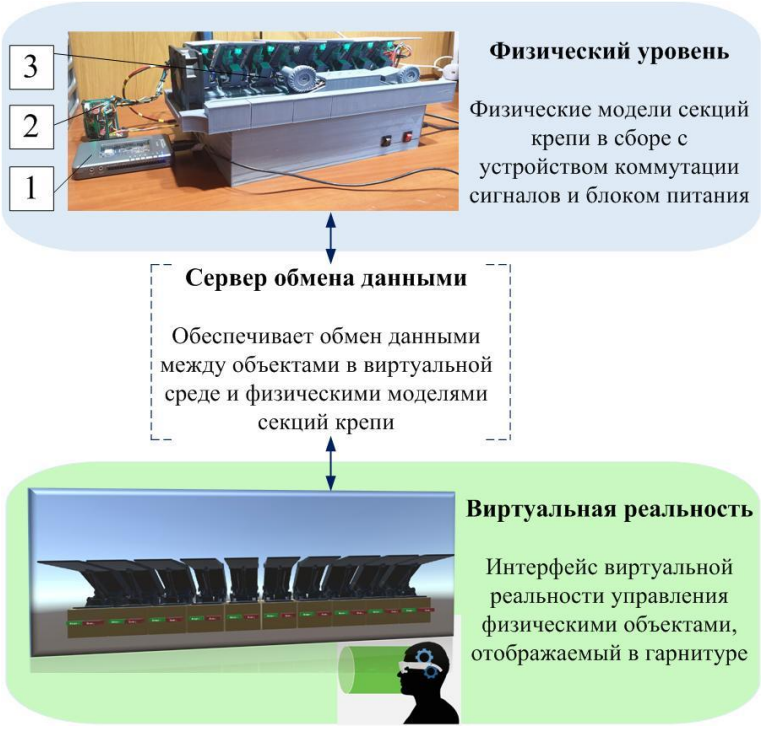
На основе обобщенной структурной схемы, представленной на рис. 1, была разработана структурная схема цифровой модели управления технологическим процессом на примере очистного комплекса, выполненного в виде комплекта масштабных трехмерных демонстрационных динамических макетов секций механизированной крепи и комбайна. (рис. 2).

Физический уровень представляет собой аппаратно-программный комплекс, который взаимодействует с цифровыми моделями секций крепи в среде виртуальной реальности.

Основной подход в реализации программного модуля управления цифровыми моделями технологических объектов в среде виртуальной реализован на основе регистрации и обработки событий, определяемых действием оператора. Реализация же самих цифровых моделей выполняется средствами разработки виртуальной среды. Фрагмент цифровой модели секции механизированной крепи представлен на рис. 3, а внешний вид интерфейса оператора приводится на рис. 4.

Зарегистрированные события (нажатие одной из кнопок «ВВЕРХ» или «ВНИЗ»), кодируются в команды и поступают в программный модуль сетевого обмена данными физического уровня согласно схеме (рис. 2) и обеспечивают выполнение заданных

действий на физическом макете. Программный модуль сетевого обмена данными, разработанный на основе протокола TCP/IP, является как приемником сообщений, поступающих из среды виртуальной реальности, так и передатчиком параметров с физических макетов (положение секций).



1 – контроллер управления; 2 – блок питания и устройство коммутации; 3 – модели секции крепи с очистным комбайном

Рис. 2. Структурная схема цифровой модели управления технологическим процессом на примере очистного комплекса, выполненного в виде комплекта масштабных трехмерных демонстрационных динамических макетов секций механизированной крепи и комбайна

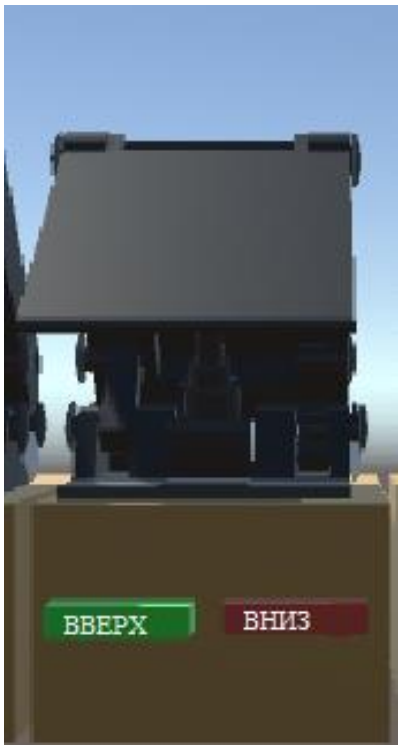


Рис. 3. Цифровая модель секции механизированной крепи

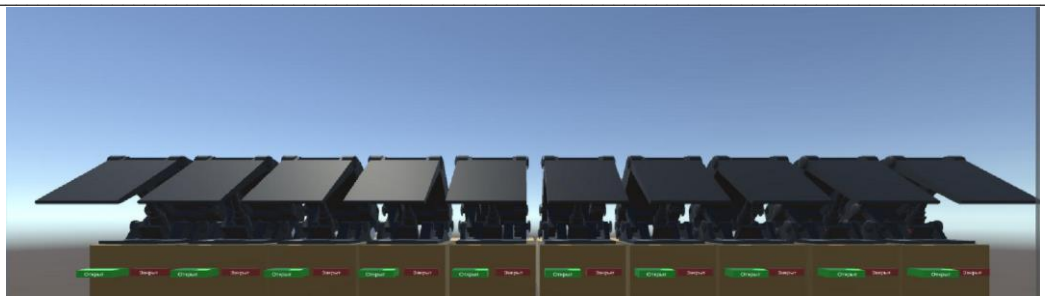


Рис. 4. Интерфейс оператора в среде виртуальной реальности

Виртуальный интерфейс цифровых моделей секций механизированной крепи построен таким образом, чтобы предоставить оператору возможность получать данные с датчиков и сенсоров физического макета с возможностью управления.

Разработка физических макетов технологического оборудования проводилась на примере очистного комплекса, выполненный в виде комплекта масштабных трехмерных демонстрационных динамических макетов секций механизированной крепи и комбайна.

Конструктивные элементы, входящие в состав макета: лавная механизированная крепь и очистной механизированный комбайн. Все элементы разработаны в масштабе 1:40. Для создания физического масштабного макета использовалась технология аддитивной печати на фотополимерном и экструзионном 3D принтере для обеспечения приемлемой прочности элементов.

Макет очистного механизированного комплекса подразумевает выполнение следующих функций:

– полностью автономное выполнение всех заложенных функций с циклическим повторением для тестирования работоспособности всех объектов управления и настройки положения сервоприводов после регулировки кинематики или замены вышедших из строя элементов;

– выполнение заранее прописанных действий при получении сигнала в виде логической единицы на соответствующий цифровой порт одного из микроконтроллеров от реконфигурируемого устройства ввода-вывода.

Макет комплекса создан для последующей отладки программы управления, апробации и демонстрации технологии взаимодействия между цифровыми моделями в виртуальной реальности и физическим оборудованием (рис. 6).

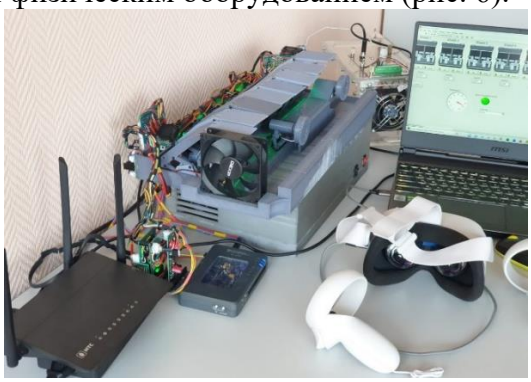


Рис. 6. Демонстрационный макет очистного механизированного комплекса с управлением из интерфейса виртуальной реальности

Таким образом, цифровой макет технологического оборудования в среде виртуальной реальности позволяет решать задачи, связанные с построением его цифрового двойника. Интеграция с физическим макетом средствами аппаратной и программной разработки обеспечивает обмен данными в моделях управления технологических объектов, что обеспечивает обратную связь от физического макета и визуализирует актуальную информацию о его состоянии в цифровой среде виртуальной реальности.

Если посмотреть на такой способ реализации в целом, то можно выделить основные шаги в задачах построения цифровых моделей и двойников управления АСУТП:

– проектирование и макетирование масштабных физических объектов промышленного оборудования;

– разработка электронных средств управления исполнительными механизмами;

– реализация цифровых моделей в среде виртуальной реальности;

– изготовление физических макетов при помощи технологии аддитивной печати на фотополимерном и экструзионном 3D принтере;

– разработка аппаратного и программного обеспечения контроллера управления физическими макетами и модуля сетевого обмена между цифровыми моделями и физическими макетами.

Такой способ может быть полезен на этапах прототипирования автоматизированных систем управления от макетирования до промышленного изготовления и является важной вехой в сопровождении жизненного цикла производственного процесса.

Представленные в разделе способы взаимодействия между цифровыми двойниками технологических объектов в виртуальной реальности и их физическими макетами могут быть интегрированы в состав действующих на предприятиях АСУТП, где физический макет заменяется промышленным оборудованием. Один из вариантов такой интеграции приводится на рис. 7.

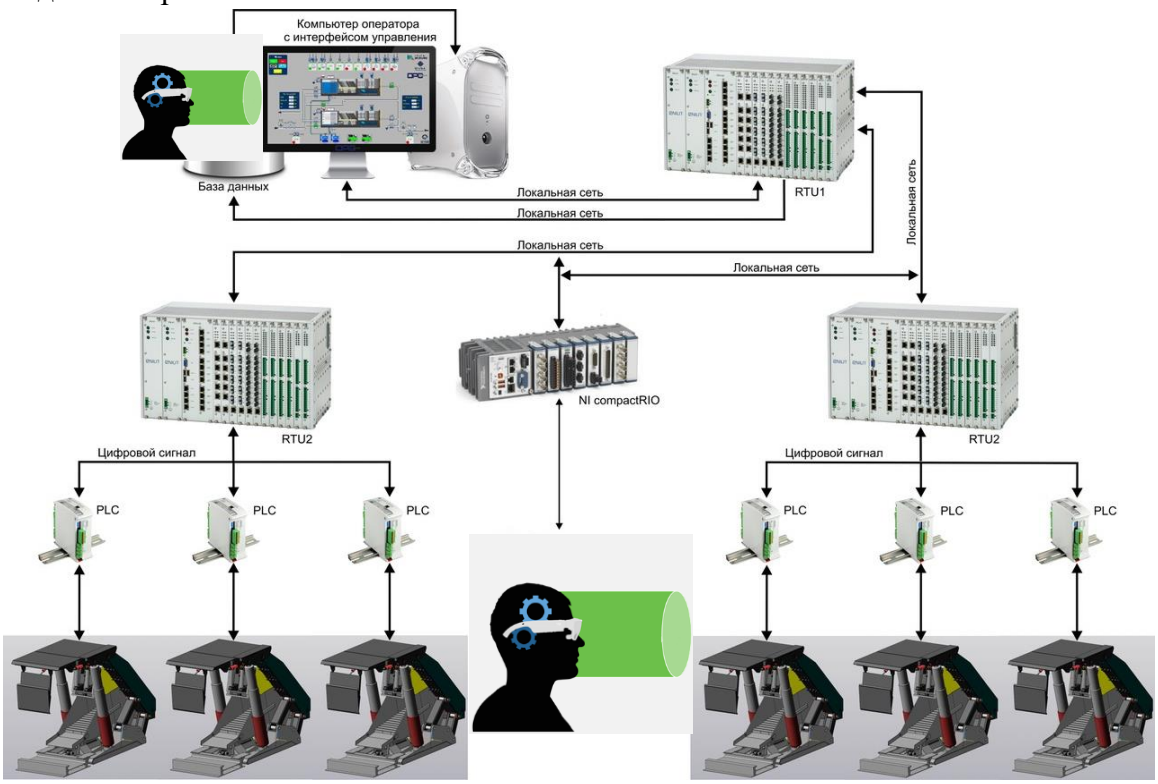


Рис. 7. Структурная схема интеграции цифровых моделей промышленных объектов в АСУТП

В среде виртуальной реальности отображаются промышленные объекты управления с контролируемыми параметрами в реальном времени технологического процесса. Возможность работы оператора с виртуальными объектами обеспечивает максимальную наглядность работы в АСУТП, что обеспечивает возможность управления промышленными объектами через среду виртуальной реальности.

Вывод. Полученные результаты позволяют проводить тестирование и отладку алгоритмов управления, проводить обучение по программированию контроллеров и

виртуальных интерфейсов. Создание виртуальных моделей технологического оборудования позволяет решать задачи, связанные с построением цифрового двойника. Интеграция модели с физическим макетом средствами аппаратной и программной разработки обеспечивает обмен данными в моделях управления технологических объектов, что позволяет реализовать обратную связь от физического макета и визуализировать актуальную информацию о его состоянии в цифровой среде виртуальной реальности.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0025 «Разработка научных основ создания автономных и автоматизированных горных машин, оборудования, технических и управляющих систем на базе перспективных цифровых и роботизированных технологий» (рег. №1023033000581-6).

Список литературы

1. Barakat M. Virtual reality and its impact on the industrial product // Al-Academy. – 2023. – P. 277-296. – DOI:10.35560/jcofarts1227.

2. Kizilov S.A., Nikitenko M.S., Neogi B. Concept of mobile operator position based on neurocomputer interface and augmented reality // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – С. 012016.

3. Кизилов С.А., Никитенко М.С., Neogi B. Разработка концепции создания мобильного места оператора для горнодобывающей промышленности на основе совмещения технологий нейрокомпьютерного интерфейса и дополненной реальности // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: труды XI Всероссийской научно-практической конференции. – 2017. – С. 47-50.

4. Application of simulation and virtual reality to production learning / R. Rio-Belver [et al.] // Education + Training. – 2024. – №2. – DOI:10.1108/ET-02-2023-0051.

5. Development of a second-screen system for sharing virtual reality information. / B. Nakano [et al.] // Software: Practice and Experience. – 2023. – V. 53.– DOI:10.1002/spe.3299.

6. Rosellini A. Measuring Augmented Reality and Virtual Reality Trajectory in the Training Environment // Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management. – P. 299-308.

7. Stecula K. Review of Virtual Reality Applications Applied in Industrial Practice // Scientific Papers of Silesian University of Technology Organization and Management Series. – 2023. V. 187. – DOI:10.29119/1641-3466.2023.187.32.

8. Dalal S. Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR) // A Thriving Technology. International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology. – 2024. – P. 667-677. DOI:10.48175/IJARSCT-15099.

9. Lytvynova S., Soroko N. Interaction in an educational environment with virtual and augmented reality // Information Technologies and Learning Tools. – 2023. – V. 98. – P. 13-30. – DOI:10.33407/itlt.v98i6.5433.

10. Haokun L. The Research of Virtual Reality Technology on Application and Competition // Highlights in Business, Economics and Management. – 2024. – V. 24. – P. 1868-1872. – DOI:10.54097/fg8drh42.

A COMPREHENSIVE REVIEW ON ADVANCING COAL MINING THROUGH INDUSTRY 4.0 AND INDO-RUSSIA COLLABORATION

Shaw H. K., Rajak A., Chanda A., Pal M., Neogi B.
JIS College of Engineering, Kalyani, West Bengal, India

Abstract. This research paper investigates the traditional and modern technologies used in coal mining operations, focusing on conventional underground and surface mining techniques as

well as the implementation of Industry 4.0 concepts such as automation, IoT, data analytics, and AI to improve productivity, safety, and sustainability. It looks at the Indo-Russian collaboration through the Centre of Excellence at JIS College of Engineering to develop cutting-edge coal mining technologies customized to Indian needs. Current developments include continuous miners, longwall systems, draglines, and truck-shovel methods, as well as advanced research techniques such as underground coal gasification, coal bed methane extraction, and robotic/autonomous mining systems. The purpose of this paper is to present a complete review of coal mining technology, with a focus on the importance of innovation and international cooperation in driving this critical sector.

Keywords: coal mining, mining methods, industry 4.0, advanced technologies, collaboration, Indo-Russia.

Introduction. Coal, a carbonaceous fossil fuel generated through the compaction and induration of plant remnants over millions of years, is critical to satisfying global energy demands [1]. Mining operations take coal from the Earth's surface, allowing it to be used for a variety of industries such as power generating and steel production [2]. Coal mining has two basic methods: surface mining and underground mining, which are used depending on the depth and accessibility of the coal reserves [3] (fig.1).

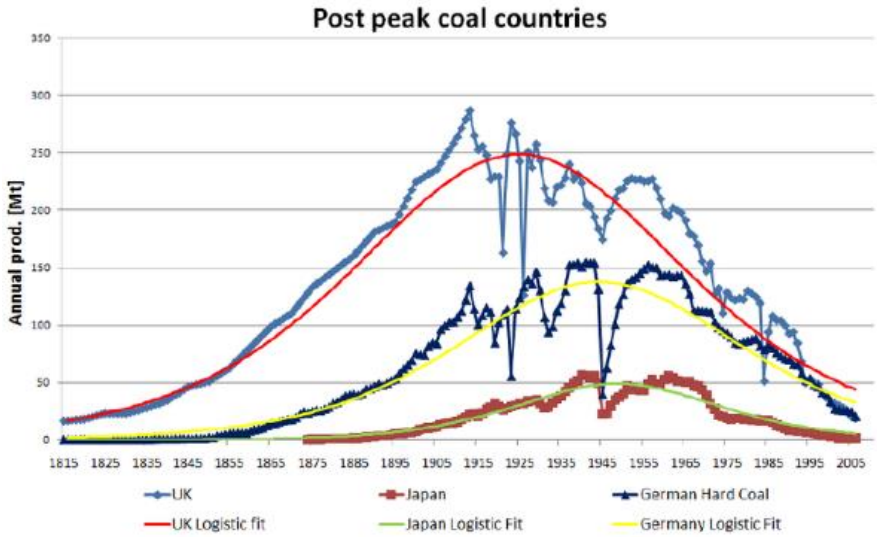


Fig. 1. Post Peak Coal Countries

When coal seams are near the surface, surface mining entails removing the soil and rock layers that lie above them [3]. Underground mining is used when coal seams are located at great depths, necessitating the excavation of subterranean tunnels and shafts to access the mineral reserves [3]. This study paper goes into both ancient and modern coal mining technologies, offering light on their concepts, procedures, and uses [4].

India's coal reserves are divided into two geological eras: the Permian period, which began around 270 million years ago during the Gondwanaland era, and the more recent Tertiary age, which lasts 30 to 60 million years [5]. These deposits have been critical in meeting the country's energy needs and promoting industrial development [5]. However, the continued search for efficient, sustainable, and technologically advanced coal mining processes has resulted in the development of novel approaches, such as the implementation of Industry 4.0 principles and international collaboration [6].

This paper investigates the application of cutting-edge technologies such as automation, the Internet of Things (IoT), data analytics, and artificial intelligence (AI) in coal mining operations [7]. These innovations aim to increase productivity, improve safety standards, and reduce environmental effect while adhering to the principles of sustainable mining practices [7]. Furthermore, the Indo-Russian collaboration via the Centre of Excellence at JIS College of

Engineering, which focuses on creating adapted coal mining technology for the Indian context, is thoroughly studied [6].

Several traditional technologies of coal mining. Traditional coal mining processes, which date back thousands of years, can be divided into two categories: underground and surface mining methods, each with its own set of pros and disadvantages. Coal mining dates back to the Bronze Age in Wales, about 3000-4000 years ago, when it was used in funeral ceremonies, before obtaining economic momentum in colonial America around 1730, especially in Midlothian, Virginia [3, 8]. This signaled the beginning of a business that would drastically influence world energy usage. The advent of coal cutting machines in the 1880s marked a watershed moment in industrial history, significantly increasing efficiency and productivity. By 1900, coal dominated the energy scene, accounting for 95% of the global supply. However, the 20th century saw a shift toward oil as industrialized nations sought its abundance and efficiency, until the 1973 energy crisis triggered a rebound in coal demand as petroleum prices skyrocketed, demonstrating the dynamic nature of energy consumption trends [3].

Underground mining technologies such as room and pillar mining provide simplicity, flexibility, and selective extraction possibilities, but they often have poorer recovery rates and potential roof instability difficulties. Longwall mining has high production rates, effective resource usage, and low surface subsidence, but it needs large capital investment and is only appropriate for uniform and thick seams. Shortwall mining finds a balance by providing higher recovery rates than room and pillar mining while needing less capital investment than longwall mining; however, output rates and panel sizes are limited. Continuous mining offers significant flexibility and adaptability, making it ideal for a wide range of seam conditions, but it has lower production rates and may provide roof control difficulties [3].

Shifting to surface mining methods, open-pit mining allows for high recovery rates, production rate flexibility, and adaptability for shallow and thick seams, but it also requires major overburden removal, environmental effect, and land reclamation issues [3]. Strip mining has very low operational costs, continuous production, and concurrent reclamation, but it is only applicable to shallow seams and causes surface disruption. Mountaintop removal mining allows for fast extraction of many seams with high recovery rates, but it has a significant environmental impact, causes massive land disruption, and requires costly restoration operations. Highwall mining reduces surface disturbance, enabling for the recovery of previously inaccessible reserves at lower costs than underground mining (fig. 2).

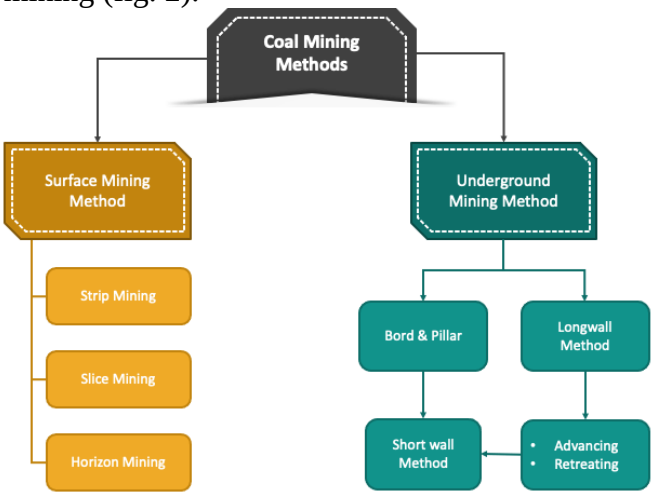


Fig. 2. Coal Mining Methods

However, it has limited seam access and poorer recovery rates than other surface approaches, as well as potential stability difficulties. Finally, the choice of mining method is determined by factors such as seam depth, thickness, geological conditions, production requirements, environmental considerations, and economic factors, which frequently require a combination of techniques to optimize coal extraction while addressing site-specific challenges

[3]. Despite oscillations, coal mining remains an important part of the global energy mix, progressing from manual extraction methods to sophisticated processes, illustrating humanity's desire for progress and the lasting importance of coal in powering civilizations. At the same time, due to the depletion of easily accessible reserves, the development of layers located in complex mining and geological conditions begins, which requires the use of modern technologies and technical means [9].

Industry 4.0 implementation in coal mining. The incorporation of Industry 4.0 concepts is transforming coal mining operations, increasing productivity, safety, and sustainability [7]. Automation and robots are key drivers of this revolution, with automated mining equipment and systems allowing for precise, efficient, and remote operations [10]. The Internet of Things (IoT) and connection enable real-time monitoring and data collecting across all mining processes via integrated sensors and devices [11]. This data is then processed with modern data analytics and artificial intelligence (AI) tools, allowing for predictive maintenance, resource efficiency, and better planning [10]. Augmented and virtual reality (AR/VR) technologies enable immersive training settings, remote collaboration, and increased visualization for mine planning [12].

The most recent innovations include autonomous mining systems for self-driving haul trucks and drilling rigs, digital twin technology for virtual replication and simulation of operations, intelligent mine ventilation systems optimized for IoT and AI, predictive maintenance strategies based on machine learning, and drone/satellite imaging for geological surveys and environmental monitoring [13]. While Industry 4.0 improves productivity and safety, it also introduces new issues in cybersecurity, data management, and the need for experienced individuals to operate these sophisticated systems [7].

Indo-russian collaborative action in coal mining. India and Russia have formed a strategic collaboration in coal mining via the Indo-Russian Centre of Excellence at JISCE in Kalyani, West Bengal. This collaborative endeavor attempts to address India's unique coal mining issues while also promoting new and sustainable approaches customized to the country's needs. The Centre uses Russian mining expertise to assist technology transfer, knowledge sharing, and capacity building among Indian mining experts.

Research and development in underground coal gasification, coal bed methane extraction, mining safety, automation, and environmental management measures are among the top priorities. Joint training programs and information sharing initiatives provide the Indian workforce with advanced skills. Collaborative research collaborations between Indian and Russian experts promote innovation and add to the global knowledge base.

The Indo-Russian Centre of Excellence, which combines the strengths of both countries, is critical in determining India's future coal mining landscape. It improves energy security, encourages technical advancement and environmental responsibility, and prepares a qualified workforce to address current mining difficulties.

JISCE's Center of Excellence leads research and development in advanced coal mining technology to meet changing industry needs. Underground Coal Gasification (UCG) improves in-situ coal conversion to combustible gas, lowering mining requirements. Coal Bed Methane (CBM) extraction techniques improve energy security while reducing emissions. Automation and robotics, including self-driving vehicles and robotic mining equipment, improve safety and production. Advanced mine safety technologies such as real-time monitoring, predictive analytics, and new protective equipment prioritize worker safety [14-16]. Water, land reclamation, and emission control are all aspects of environmental management techniques that aim for sustainability. Digital twin and simulation technologies allow for virtual scenario testing and optimization. Geospatial and remote sensing data integration enhances mining planning, exploration, and monitoring. Working with industry and international institutions, the Center promotes sustainable, efficient mining practices that strengthen India's energy security while reducing environmental impacts.

Conclusion and future works. The coal mining business has seen a tremendous metamorphosis, transitioning from old manual extraction to modern, technologically improved technologies. This study paper investigated traditional coal mining technology, the implementation

of Industry 4.0 principles, and Indo-Russian collaboration via the Centre of Excellence at JIS College of Engineering. While classic methods such as room and pillar mining, longwall mining, and surface mining techniques remain in use, the incorporation of Industry 4.0 components such as automation, IoT, data analytics, AI, and AR/VR is transforming coal mining operations. These technologies improve productivity, safety, and sustainability, propelling the sector into a more efficient and ecologically responsible future. The Indo-Russian collaboration, fostered by JISCE's Centre of Excellence, demonstrates the effectiveness of international cooperation in addressing global concerns. By combining the experience and resources of both countries, this effort paves the path for the development of tailored coal mining technologies that meet India's specific needs, fostering technological improvements, knowledge sharing, and capacity building. As the world grapples with rising energy demands and environmental concerns, the coal mining industry must adapt and embrace new solutions. The JIS College of Engineering Centre of Excellence's research and development efforts are critical to determining the sector's future.

References

1. Sinha Suranjan, Surajit Chakraborty, Shatrajit Goswami. Ecological footprint: an indicator of environmental sustainability of a surface coal mine // Environment, Development and Sustainability. – 2017. N 9. – 807-824.

2. Rathore C.S., Wright R. Monitoring environmental impacts of surface coal mining // International Journal of Remote Sensing. – 1993. – No 14.6. – P. 1021-1042.

3. Comparison of underground coal mining methods based on life cycle assessment / Wu Haoyuan [et al.] // Frontiers in Earth Science. – 2022. – N 10. – 879082.

4. Mukherjee Sourav, Deb Prakash Pahari. Underground and opencast coal mining methods in India: a comparative assessment / Space and Culture, India. – 2019. – N 7.1. – P. 39-55.

5. Coal resources under carbon peak: Segmentation of massive laser point clouds for coal mining in underground dusty environments using integrated graph deep learning model / Xing Zhizhong [et al.] // Energy. – 2023. – N 285. – 128771.

6. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: a review / Feng Yu [et al.] // Earth-Science Reviews. – 2019. – N 191. – P. 12-25.

7. Wang Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems / Coal Science and Technology. – 2022. – N 50.1. – P. 1-27.

8. Underground mining of thick coal seams / Kumar Rakesh [et al] // International Journal of Mining Science and Technology. – 2015. – N 25.6. – P. 885-896.

9. Promising technical solutions for mining thick flat coal seams with release / Klishin V.I., Nikolaev A.V., Egorov A. [at al.] // Coal. – 2011. – N. – 12(1029). – P. 6-10.

10. Study on key technology of patrol robots for fully-mechanized mining face / LI Sen [et al.] // Coal Science and Technology. – 2020. – N 48.7.

11. A novel non-pillar coal mining technology in longwall top coal caving: a case study / Wang Haosen [et al.] // Energy Science & Engineering. – 2023. – N 11.6. – P. 1822-1841.

12. Singh R.D. Principles and practices of modern coal mining. – New Age International, 2005.

13. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: a review / Feng Yu [et al.] // Earth-Science Reviews. – 2019. – N 191. – P.12-25.

14. Kizilov S.A., Nikitenko M.S., Neogi B. Concept of mobile operator position based on neurocomputer interface and augmented reality // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – C. 012016.

15. Walking support control system algorithms testing with brain-computer interface (BCI) and augmented reality (AR) technology integration / M.S. Nikitenko, S.S. Zhuravlev. S.V. Rudometov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – P. 012043.

16. Technological equipment control system using virtual reality devices / S.A. Kizilov, M.S. Nikitenko, D.Yu. Khudonogov [et al.] // Gornaya Promyshlennost. – 2023. – N 5. – 124–129. – URL: https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-124-129.

17. Li Xuelong, Zuoyong Cao, Youlin Xu. Characteristics and trends of coal mine safety development // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2021. – P. 1-19.

18. Qian Minggao, Jialin Xu, Xie-xing Miao. Green technique in coal mining. – Zhongguo Kuangye Daxue Xuebao 32, 2003.

19. Coal mining trends, approaches, and safety hazards: a brief review / Ullah Muhammad Fahad [et al.] // Arabian Journal of Geosciences. – 2018. – N 11. – P. 1-16.

20. Palka D., K. Stecuła. Concept of technology assessment in coal mining / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 261. – No. 1.

21. A search-and-rescue robot system for remotely sensing the underground coal mine environment / Zhao Jingchao [et al.] // Sensors. – 2017. – P. 2426.

22. Coal Mine Design and Explosion Prevention Studies / Abdaaliyevna Ergasheva Zulxumor [et al.] // Nexus: Journal of Advances Studies of Engineering Science. – 2023. – P. 255-259.

23. Prevention of co in a working face with z-type ventilation using the n00 longwall mining method: a case study / Huang Ruifeng [et al.] // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2023. – N 40.1. – 463-474.

24. A review of monitoring, calculation, and simulation methods for ground subsidence induced by coal mining / Cai Yinfei [et al.] // International Journal of Coal Science & Technology/ – 2023. – N 10.1. – P. 32.

25. The impact of behavior safety management system on coal mine work safety: a system dynamics model of quadripartite evolutionary game / Zhang Yan [et al.] // Resources Policy. – 2023. – N 82. P. 103497.

26. Smart industrial IoT empowered crowd sensing for safety monitoring in coal mine / Zhang Jing [et al.] // Digital Communications and Networks. – 2023. – N 9.2. – P. 296-305.

27. Choudhury Mihir. Sustainability of Underground Coal Mining in India Vis-a'-Vis Coal Mines Regulations, 2017: Asian Mining Congress. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2023.

28. Dynamic Response Analysis of a Reinforced Concrete Structure in Underground Coal Mine Environment with Various Strata Conditions / E. Karadeniz Kutay [et al.] // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2023. – N 40.2. – P. 563-581.

29. IoT based Coal Mining Monitoring and Control / Esther B. Priya [et al.] // 2nd International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing (ICAAIC). – IEEE, 2023.

УДК 004.942; 622.3

ДИСКРЕТНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ ПО ПЕРЕСЫПНОМУ УЗЛУ СТАКЕРА-РЕКЛАЙМЕРА

к.т.н. Клишин С.В., Морев А.Э., Тимофеев Т.Т.
АО «Моделирование и цифровые двойники», г. Москва, Россия

Аннотация. На основе метода дискретных элементов исследованы различные варианты конструкции пересыпного узла стакера-реклаймера при транспортировке через него железорудного полуфабриката, брикетов и гранул. Для установления параметров численных моделей проведены лабораторные испытания частиц сыпучих материалов, а также защитных поверхностей оборудования. Выполнена серия численных экспериментов по оптимизации конструкции пересыпного узла.

Ключевые слова: сыпучий материал, пересыпной узел, стакер, реклаймер, метод дискретных элементов.

Введение. В настоящее время применение метода дискретных элементов (МДЭ) при численном исследовании динамики сыпучих сред в различных технологических процессах приобретает большую популярность [1-5]. Данный метод в случае верификации физико-механических свойств материалов и параметров контактного взаимодействия позволяет получить адекватные результаты при анализе работы оборудования для транспортировки сыпучих грузов, например, как пересыпной узел стакера-реклаймера, представленного на рис. 1 [6]. Такое оборудование предназначено для складирования в штабель и забора из него сыпучих материалов, в контексте данной работы – брикеты, гранул и штучного груза железорудного фабриката в режимах «стакер», «реклаймер» и «транзит» при различных положениях стрелы. Дискретно-элементное моделирование дает возможность получать расширенное представление о сложных процессах, происходящих в таких технических системах, позволяя оптимизировать конструкцию с целью улучшения сохранности материала и обеспечения стабильности работы.

Рис. 1. Реклаймер [6]

В данной работе представлены результаты исследования различных конструкций пересыпного узла для обеспечения таких показателей, как требуемая производительность, равномерность движения частиц транспортируемых материалов, сохранность грузов, а также исключение образования застойных зон в рабочем объёме пересыпного узла.

Разработка изделия на основе концепции всеобъемлющего моделирования – SDPD (Simulation Driven Product Development) обеспечивает сокращение продолжительности цикла разработки, уменьшение числа модификаций конструкции, сокращение числа натурных испытаний элементов систем и прототипов, что позволяет достичь существенного сокращения бюджета инновационных разработок.

Общий подход к численному моделированию. Метод дискретных элементов представляет собой подход, при котором исследуемый сыпучий материал представляется в виде набора отдельных твердых частиц с определенными физическими и контактными свойствами. Такая дискретизация позволяет эффективно описывать динамику сыпучей среды.

Взаимодействия между элементами включают в себя силы отталкивания, трения, и сцепления, при наличии внешних сил, а также граничных и начальных условий. В рамках МДЭ численно интегрируются уравнения движения для каждой частицы сыпучей среды с учетом указанных контактных взаимодействий. При этом определяются координаты, скорости, ориентации и угловые скорости каждой частицы [7–9]. с учетом воздействия внешних сил (гравитации и др.), а также положения ограждающих конструкций.

Универсальность такого подхода позволяет моделировать взаимодействия частиц материалов и поверхностей в широком диапазоне физико-механических свойств. Помимо свойств самих материалов, МДЭ учитывает параметры, описывающие контактное взаимодействие частиц друг с другом и с поверхностями – параметры взаимодействия [3-4], к которым в данной работе относятся коэффициенты трения и восстановления – для всех контактных пар с железорудным полуфабрикатом, брикетов и гранул, а также параметры адгезионного взаимодействия для всех контактных пар с гранулами.

Экспериментальное определение параметров частиц. Эксперимент по определению коэффициента восстановления в паре «Брикеты-Сталь» заключался в следующем: на наклонную поверхность стальной пластины сбрасывался предварительно обработанный образец с определенной массой. При этом замерялось расстояние от точки падения образца на пластину до точки падения на горизонтальную поверхность. Схема эксперимента представлена на рис. 2а.

Для представленных условий было проведено 56 опытов, по результатам которых среднее значение искомой величины отскока составило 206 мм. По результатам варьирования коэффициента восстановления в численной модели данного эксперимента, такой величине отскока соответствует коэффициент восстановления.

На рис. 2б представлена модель данного эксперимента, продублированного в численной модели, где показана траектория движения частиц. Аналогичным образом были проведены остальные эксперименты для определения коэффициентов взаимодействия материалов, представленных в исследовании.

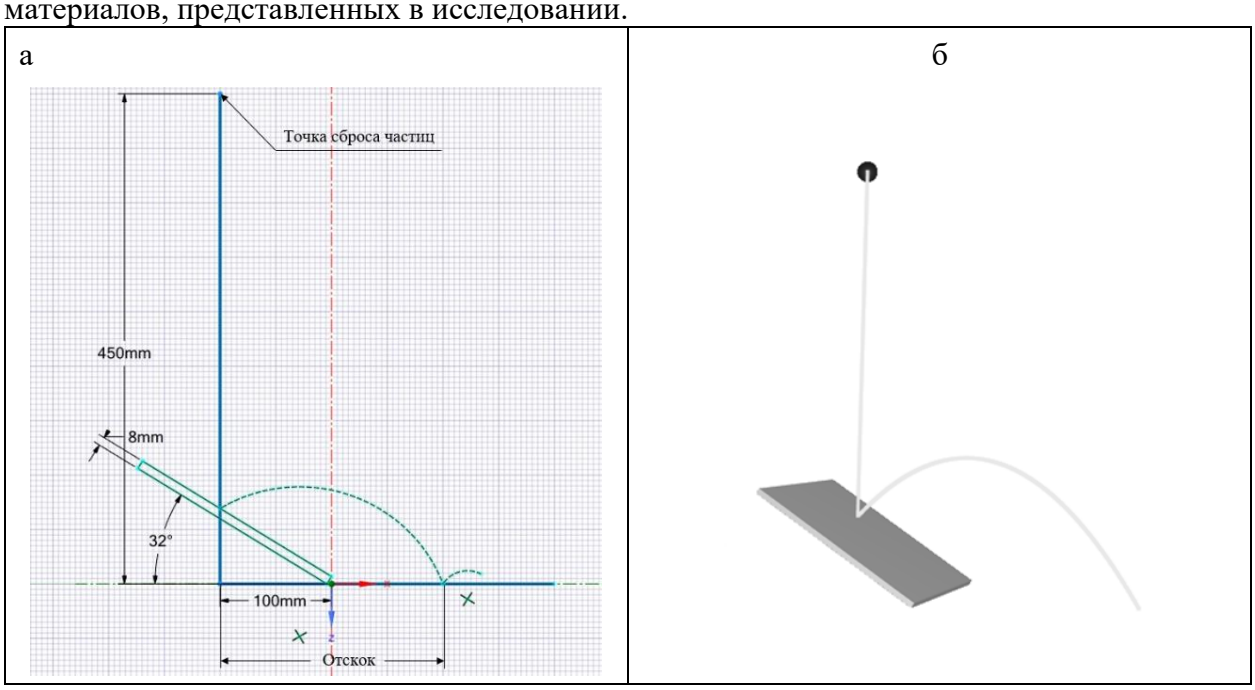


Рис. 2. Схема эксперимента по определению коэффициента восстановления в паре «Брикет-Сталь» (а); численная модель (б)

В данной статье описан один пример из обширного перечня проведенных испытаний, таких как угол соскальзывания материала с пластины, набор скорости материала при соскальзывании с пластины, эксперименты по калибровке коэффициента адгезии.

Моделирование исходной конструкции пересыпного узла. Исходная конструкция пересыпного узла стакера-реклаймера была смоделирована при подаче различного материала на питающий конвейер с производительностью 1400 м^3/ч. Скорости лент питающего конвейера и конвейера стрелы составляет не более 2.0 м/с. Выход на стабильный режим с момента подачи питания составил 9 с модельного времени, а общее время моделирования – 11.5 с.

На рис. 3 представлены общие проблемы исходной конструкции пересыпного узла.

Исходная конструкция пересыпного узла имела ряд существенных недостатков. На рис. 3а показана область застойной зоны, которая была получена при моделировании конструкции Спираль-1 при транспортировке Брикетов в режиме «Реклаймер -10°». На рис. 3б представлены зоны наибольшего абразивного износа рабочих поверхностей пересыпного узла конструкции Конус при транспортировке железорудного фабриката в режиме «Реклаймер -10». На рис. 3в приведено распределение поперечного баланса массы груза на ленте стрелового конвейера, где явно видна асимметрия распределения массы частиц на ленте.

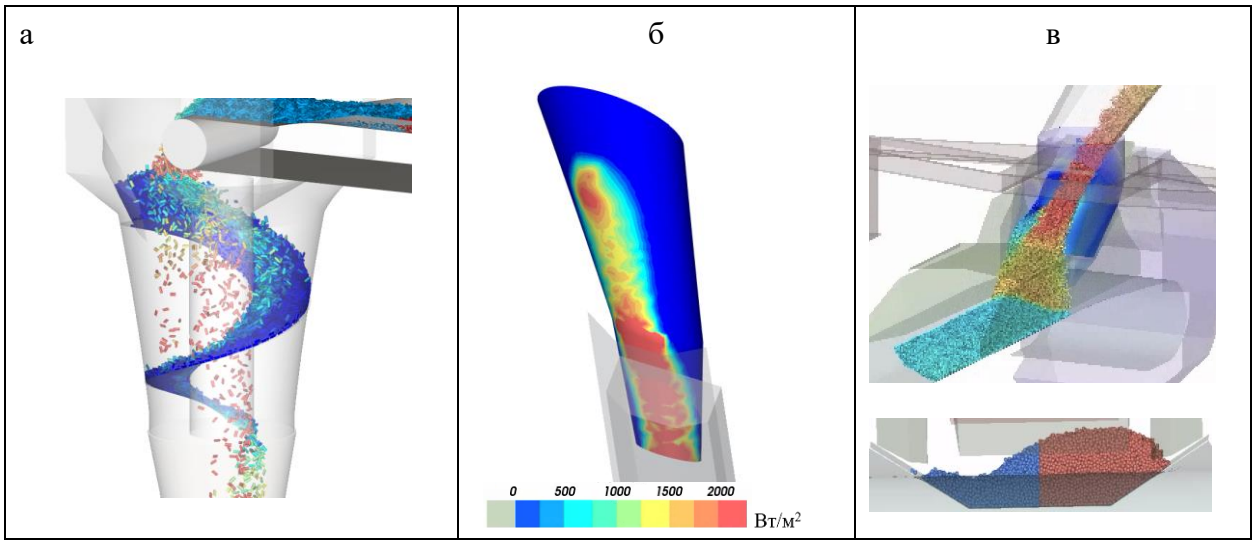


Рис. 3. Проблемы исходной конструкции: область застойной зоны (а); интенсивность абразивного воздействия, Вт/м^2 (б); неравномерность баланса массы (в)

В ходе данной работы был проведен анализ нескольких вариантов конструкции пересыпного узла стакера-реклаймера при транспортировке материала с целью исключения застойных зон материала, уменьшения абразивного износа, а также увеличения равномерности распределения массы материала в поперечном сечении ленты конвейера.

На рис. 4а представлено обще изображение процесса транспортировки и профиль материала, наблюдаемого на ленте в стабилизировавшемся режиме. Данные приведены для конструкции пересыпного узла стакера-реклаймера «Отражатель» при подаче железорудного фабриката на питающий конвейер в режиме реклаймера с производительностью до 2333 м^3/ч. Положение стрелы составило +100°. Скорости питающего и магистрального конвейеров составили не более 2.0 м/с.

На рис. 4б представлены зоны наибольшего абразивного износа рабочих поверхностей пересыпного узла конструкции «Отражатель» при транспортировке железорудного фабриката в режиме «Стакер -100°+100°», можно отметить, что интенсивность износа была уменьшена по сравнению с базовой конструкцией.

На рис. 4в представлено общее изображение процесса транспортировки материала в конструкции пересыпного узла стакера-реклаймера «Отражатель» при подаче брикетов на питающий конвейер в режиме транзита с производительностью 1400 м^3/ч. Положение стрелы составило -100°.

На рис. 5а представлен профиль материала, наблюдаемый на ленте. Моделирование конструкции пересыпного узла стакера-реклаймера «Отражатель-2» было проведено при подаче брикетов на питающий конвейер в режиме транзита с производительностью 1400 м^3/ч. Положение стрелы составило -100°. Как видно из рис. 5.а, в ходе оптимизации конструкции удалось значительно улучшить баланс массы профиля материала на ленте.

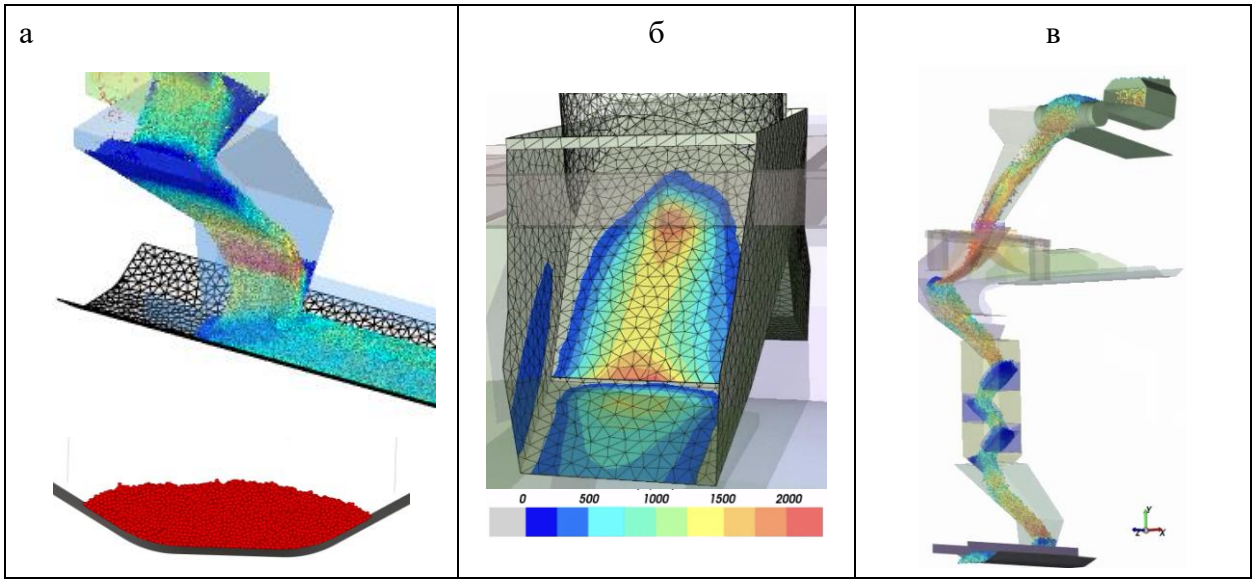


Рис. 4. Примеры режимов работы оптимизированных конструкций: процесс транспортировки и профиль материала (а); зоны наибольшего абразивного износа (б); общая картина процесса транспортировки материала (в)

С целью снижения износа рабочих поверхностей пересыпного узла были установлены отражатели потока, формирующие рудные карманы, которые обеспечивают эффект самофутеровки элементов пересыпного узла. Распределение истирающих нагрузок представлено на рис. 5б.

На рис. 5в представлены другие зоны абразивного износа конструкции пересыпного узла стакера-реклаймера «Отражатель-2» при подаче брикетов на питающий конвейер в режиме транзита с производительностью 1400 м^3/ч. Положение стрелы составило -100°.

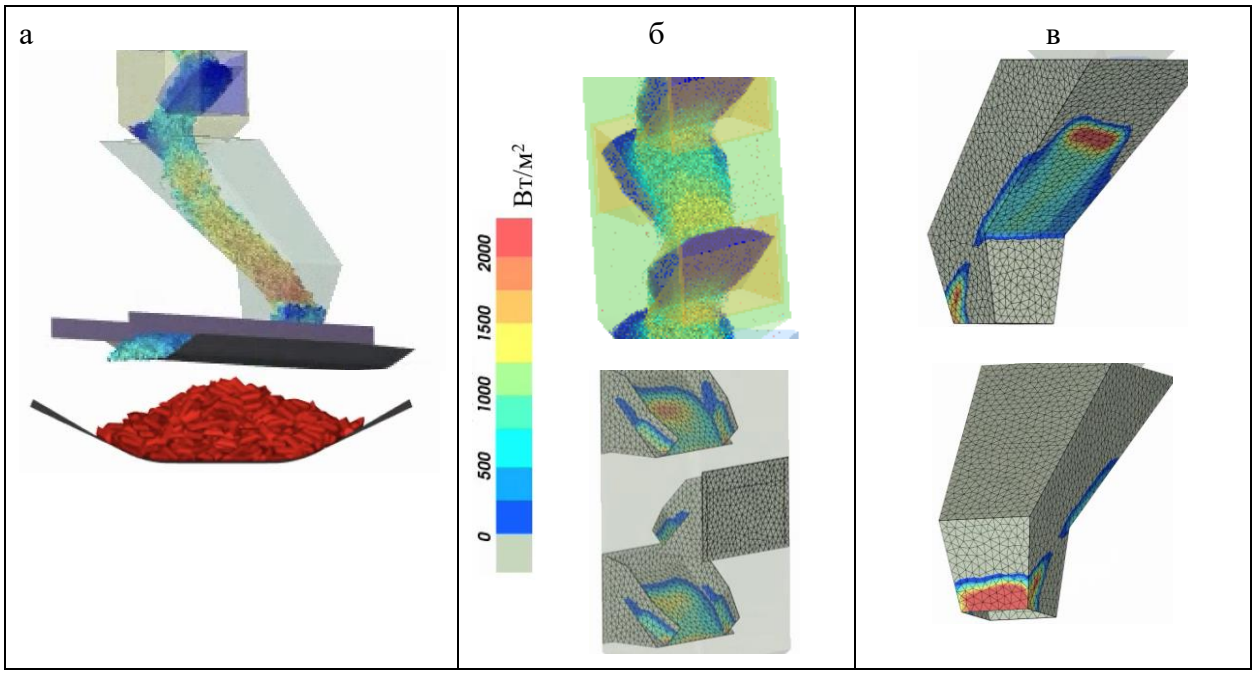


Рис. 5. Конструкция пересыпного узла стакера-реклаймера при подаче железорудных материалов: профиль материала, наблюдаемый на ленте (а); отражатели потока, формирующие рудные карманы (б); распределение истирающих нагрузок в конструкции пересыпного узла стакера-реклаймера (в)

Выводы. В работе представлены результаты исследования физико-механических свойств проб железорудного полуфабриката, брикетов и гранул, образца стали Hardox и образца конвейерной ленты. С использованием комбинированного экспериментально-численного подхода были определены параметры DEM для взаимодействия контактирующих пар указанных материалов, такие как коэффициенты трения, восстановления и адгезии.

Представлены результаты моделирования различных конструкций пересыпного узла стакера-реклаймера при транспортировке железорудного полуфабриката, брикетов и гранул. Рассмотрены более 25 вариантов модификаций конструкции пересыпного узла до достижения требуемых условий транспортировки, в рамках концепции SDPD.

Итоговая конструкция показала положительные результаты по обеспечению производительности, равномерности движения частиц, отсутствию застоных зон и просыпей, а также показано, что негативным конструктивным фактором является несимметричность профиля транспортируемых материалов на ленте стрелового конвейера в режиме «Стакер» при углах поворота стрелы от +20° до +100°.

Применение метода дискретных элементов является эффективным инструментом для анализа работы сложных систем, таких как пересыпные узлы стакера-реклаймера, с учетом различных режимов и условий эксплуатации. Математическое моделирование с помощью DEM позволяет не только учитывать физико-механические свойства материалов и конструкций, но и предсказывать их поведение при различных сценариях. Это позволяет оптимизировать процессы проектирования и эксплуатации систем, снижать издержки на их обслуживание и ремонт, а также обеспечивать производительность и предсказуемость производственных процессов.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках консалтингового проекта для компании ЗАО «СММ».

Список литературы

1. Discrete element method-(DEM-) based study on the wear mechanism and wear regularity in scraper conveyor chutes / R. Xia, X. Wang, B. Li [et al.] // Mathematical Problems in Engineering. – 2019. – Vol. 2019.

2. Effect of the particle shape and swirling intensity on the breakage of lump coal particle in pneumatic conveying / J.W. Zhou, Y. Liu, C.L. Du [et al.] // Powder Technology. – 2017. – Vol. 317. – P. 438–448.

3. Xie Y.S., Zhao Y.S. Numerical simulation of the top coal caving process using the discrete element method // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2009. – Vol. 46. – Iss. 6. – P. 983–991.

4. Marteau E., Andrade J.E. A model for decoding the life cycle of granular avalanches in a rotating drum // Acta Geotechnica. – 2018. – Vol. 13. – Iss. 3. – P. 549–555.

5. Effect of lifters and mill speed on particle behaviour, torque, and power consumption of a tumbling ball mill: Experimental study and DEM simulation / X. Bian, G. Wang, H. Wang [et al.] // Minerals Engineering. – 2017. – Vol. 105. – P. 22–35.

6. Мазуренко О.И., Русинов И.А. Дискретно-событийное имитационное моделирование склада морского угольного терминала в среде Anylogic // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2022. – Т. 14 (2). – С. 181–198.

7. Review and extension of normal force models for the discrete element method / H. Kruggel-Emden, E. Simsek, S. Rickelt [et al.] // Powder Technology. – 2007. – Т. 171. – № 3. – С. 157–173.

8. Determination of microscopic parameters of quartz sand through tri-axial test using the discrete element method / K. Cheng, Y. Wang, Q. Yang [et al.] // Computers and Geotechnics. – 2017. – Т. 92. – С. 22–40.

9. Scheffler O.C., Coetzee C. DEM calibration for simulating bulk cohesive materials // Computers and Geotechnics. – 2023. – Т. 161. – С. 105476.

УДК 004.94

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА T-ENERGY

к.т.н. Сеченов П.А., д.т.н. Рыбенко И.А.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В работе проведены исследования процессов горения природного газа с применением кислорода и воздуха. Компьютерное моделирование производилось с использованием разработанного программного комплекса T-Energy. Получены равновесные составы и температуры при различном количестве окислителя.

***Ключевые слова*:** компьютерное моделирование, программный комплекс, природный газ, горение, равновесная температура, равновесный состав.

Программные комплексы термодинамического моделирования Thermo-Calc [1], FactSage [2], HSC Chemistry [3], Pandat, ИВТАНТЕРМО позволяют рассчитать равновесный состав сложной многокомпонентной термодинамической системы, но не позволяют определить при какой температуре будет достигнуто термодинамическое равновесие. То есть равновесное состояние может быть с избытком или недостатком тепла от химических реакций. Для нахождения равновесной температуры нужно дополнительно рассчитать изменение энтальпии исходных веществ и продуктов реакций. Для этого необходимо решить уравнение, соответствующее закону сохранения полной внутренней энергии [4, 5]:

$$\sum_{исх} \Delta f H^0(298) = \sum_{прод} H^0(T), \quad (1)$$

где $\Delta f H^0(298)$ – энтальпия образования исходных веществ, Дж/моль; $H^0(T)$ – энтальпия продуктов при температуре T, Дж/моль.

В случае, если исходные вещества подаются в реактор при температуре, отличной от 298 K, в левой части уравнения (1) необходимо учесть изменение энтальпии нагрева исходных веществ до заданной температуры

$$\sum_{исх} \Delta f H^0(298) + \sum_{исх} H^0(T_i) = \sum_{прод} H^0(T). \quad (2)$$

Решение этого уравнения относительно T позволит определить температуру сложной изолированной системы в состоянии термодинамического равновесия.

Равновесный состав. Метод CALPHAD

Для нахождения равновесного состава в зависимости от данных, хранящихся в термодинамических базах данных, применяются различные методы для расчета равновесной температуры. Так для термодинамической базы данных в формате TDB [6] применяется стандарт CALPHAD, согласно которому расчет равновесного состава определяется как максимум изменения энергии Гиббса. В общем виде энергию Гиббса можно разложить на три составляющие:

$$G = G^{ref} + G^{id} + G^{xs}, \quad (3)$$

где G^{ref} – энергия чистых веществ, Дж; G^{id} – энергия идеального смешения, Дж; G^{xs} – избыточная энергия смешения, Дж.

Энергия чистых веществ рассчитывается через полином в формате SGTE с коэффициентами, заданными в термодинамической базе данных:

$$G(T) = a + bT + cT \cdot \ln T + \sum_{2}^{n} d_n T^n =$$
$$= a + bT + cT \cdot \ln T + dT^2 + eT^3 + fT^{-1} + gT^7 + hT^{-9}, \quad (4)$$

где a, b, c, d, e, f, g, h – коэффициенты полинома, записанные в базе данных, T – температура, К.

Для двухкомпонентных жидкостей или сплавов может присутствовать дополнительно энергия смешения G^{id} и избыточная энергия смешения G^{xs}.

Энергия идеального смешения рассчитывается по формуле:

$$G^{id} = RT \sum_i x_i \ln x_i, \quad (5)$$

где R – универсальная газовая постоянная, x_i – молярная доля компонента при учете, что сумма количества молей веществ равна единице.

Избыточная энергия рассчитывается через выражение Редлиха – Кистера [7]:

$$G^{xs} = x_i x_j \sum_{v=0} L_{i,j}^{v} (x_i - x_j)^v, \quad (6)$$

где $L_{i,j}^{v}$ – модельные параметры, которые рассчитываются через полином по формуле (4).

Модель идеального смешения. В этом методе, применяемом при разработке термодинамических баз данных ИВТАНТЕРМО, для нахождения равновесного состава применяется модель идеального смешения газов. И для уравнения (3) не учитывается избыточная энергия смешения G^{xs}.

Такой подход реализован в программном комплексе T-Energy [8]. Для нахождения максимального изменения энергии Гиббса с большей скоростью были проведены модификации программы T-Energy, заключающиеся в параллельном запуске расчета равновесного состава при различных температурах и выборе оптимального численного метода решения СЛАУ [9].

Исследования. С использованием программного комплекса T-Energy проводились исследования по определению равновесного состава и температуры процессов горения природного газа в чистом кислороде и в атмосфере воздуха. Расчет осуществлялся для 1 м^3 метана. Количество окислителя варьировалось от недостатка до избытка. На рис. 1 представлены продукты реакций горения метана в кислороде.

Из рис. 1 видно, что при расходе кислорода от 0 до 0.5 м^3, т.е. при его недостатке, в продуктах реакции присутствует углерод. При увеличении кислорода от 0.5 до 3 м^3 снижается содержание водорода, монооксида углерода, а содержание веществ, содержащих кислород, – возрастает.

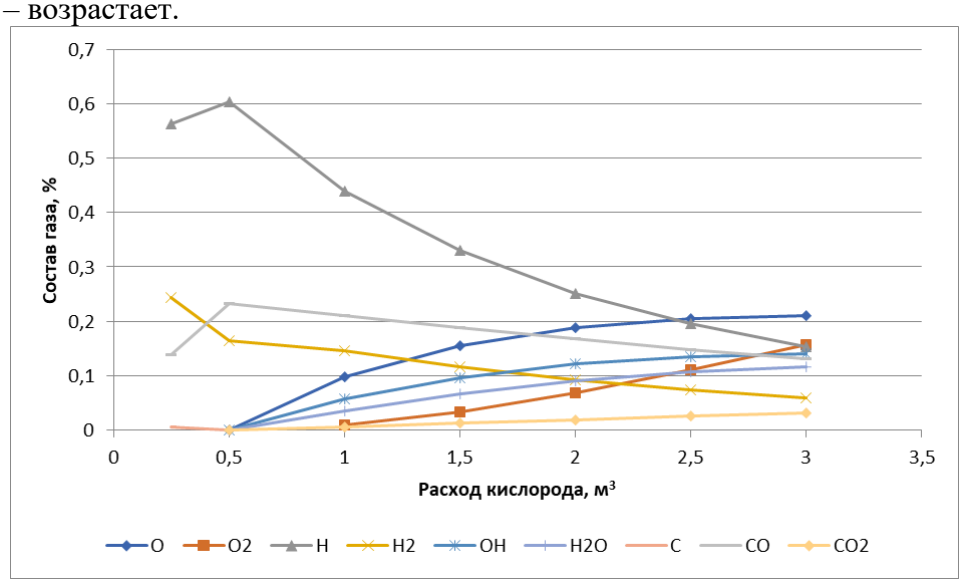


Рис. 1. Графики зависимости состава продуктов горения природного газа от расхода кислорода

При расходе кислорода в количестве 0.25 м^3 равновесная температура составляет 3820 К (рис. 2). При расходе кислорода 0.5 м^3 наблюдается пик по равновесной температуре, которая составляет 3965 К. При увеличении расхода кислорода от 0.5 до 3.5 м^3 равновесная температура стабильно уменьшается с 3965 до 3532 К.

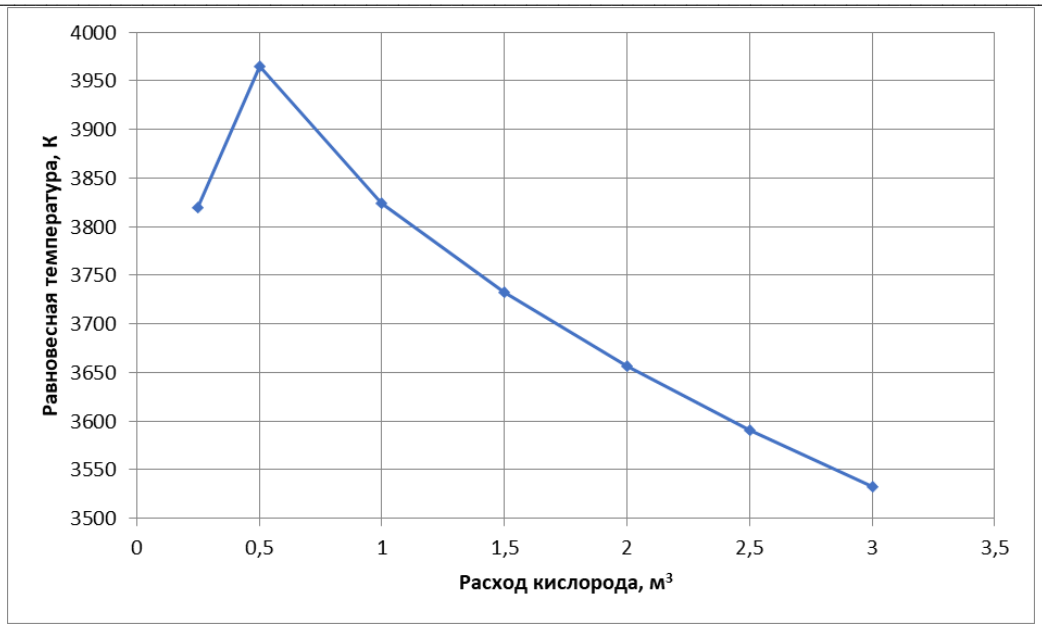


Рис. 2. График зависимости равновесной температуры продуктов горения природного газа от расхода кислорода

Вторым численным экспериментом было определение равновесного состава и температуры при горении метана в атмосфере воздуха. Результаты представлены на рис. 3 и 4.

При расходе воздуха от 1 до 3 м^3 наблюдается недостаток кислорода и образование углерода, метана в продуктах реакций (рис. 3). При подаче воздуха от 3 до 9 м^3 снижается содержание водорода, монооксида углерода, повышается содержание азота и воды. При подаче воздуха от 9 до 15 м^3 наблюдается образование кислорода, что свидетельствует о его переизбытке, образование азота при данной подаче воздуха растет, одновременно с этим падает процентное содержание воды и двуокиси углерода.

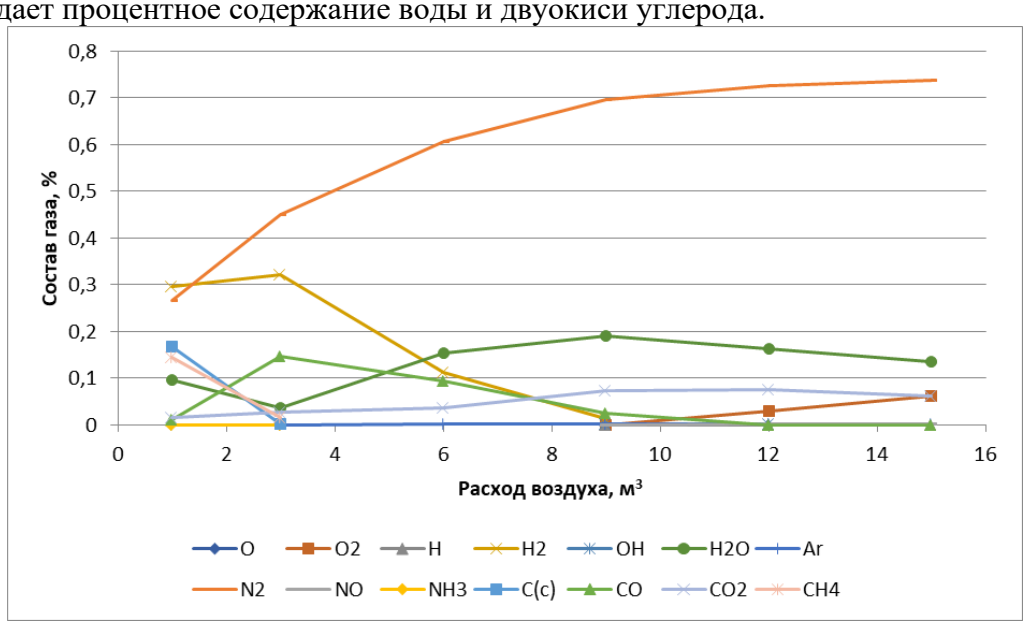


Рис. 3. График зависимости состава продуктов горения природного газа от расхода воздуха

Из рис. 4 видно, что по сравнению с рис. 2, максимальная равновесная температура оказалась значительно ниже. Это связано с тем, что в воздухе помимо окислителя и восстановителя присутствуют и другие вещества, на протекание реакций, с которыми затрачивается энергия. При недостатке воздуха в пределах от 1 до 3 м^3 равновесная

температура не превышает 1000 К. При расходе воздуха от 3 до 9 м^3 происходит значительный рост температуры до 2143 К. При расходе воздуха свыше 9 м^3 происходит снижение равновесной температуры до 1715 К.

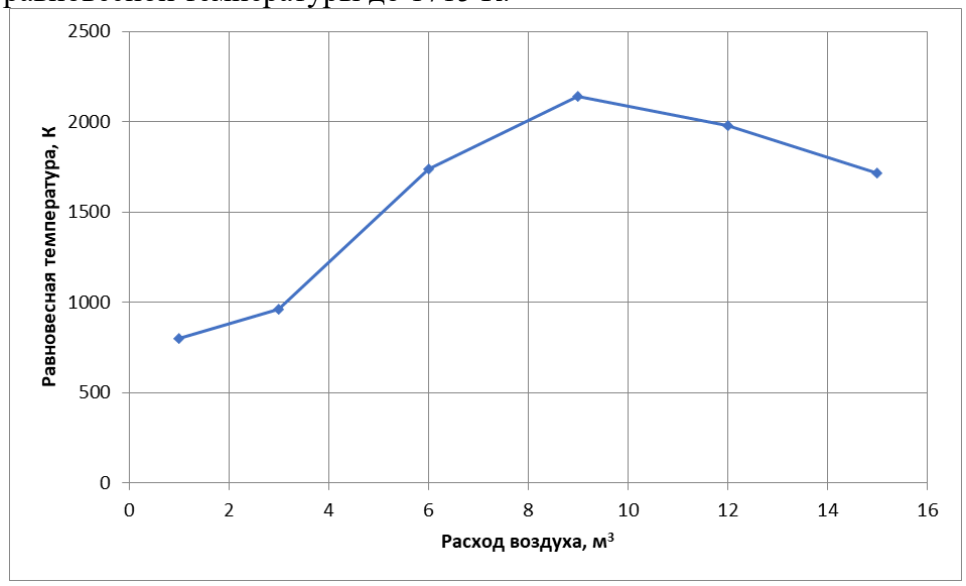


Рис. 4. График зависимости равновесной температуры продуктов горения природного газа от расхода воздуха

Выводы. Программный комплекс T-Energy позволяет производить эксперименты по моделированию процессов горения метана, в том числе и определять равновесные температуры продуктов горения, что невозможно в других инструментальных системах. Максимальная равновесная температура достигается при 1.5 м^3 кислорода на 1 м^3 метана. При продувке воздухом для достижения максимальной равновесной температуре потребовалось 10 м^3 воздуха на 1 м^3 метана.

Список литературы

1. Influence of co-deposition strategy on the mechanical behavior of additively manufactured functionally integrated materials / B.E. MacDonald, B. Zheng, B. Fields [et al] // Additive Manufacturing. – 2023. – Vol. 61. – 103328.

2. FactSage thermochemical software and databases / C.W. Bale, E. Belisle, P. Chartrand [et al.] // Calphad. – 2016. – Vol. 55. – PP. 1-19.

3. Salina V.A., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V. Thermodynamic simulation of the manufacture of Fe–Si–Ni–Cr alloys // Russian Metallurgy (Metally). – 2019. – No. 2. – PP. 162-164.

4. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. – М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2013. – 96 с.

5. Новикова И.В., Райкова В.М., Акинин Н.И. Адиабатическая температура горения и теплота сгорания аэродисперсных систем, содержащих жидкое горючее и металл // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – Т. 17. – № 1. – С. 6-11.

6. Ansara I., Dinsdale T., Rand M.H. Thermochemical database for light metal alloys // Office for Official Publications of the European Communities. – 1998. – Vol. 2. – 396 p.

7. Термодинамика равновесия жидкость-пар / А.Г. Морачевский, Н.А. Смирнова, Е.М. Пиотровская [и др.]. – Л: Химия, 1989. – 344 с.

8. Сеченов П.А., Кожемяченко В.И., Рыбенко И.А. Параллельная реализация алгоритма расчёта равновесного состава в программном комплексе T-Energy // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2023. – № 1 (57). – С. 64-73.

9. Сеченов П.А. Сравнение быстродействия численных методов Гаусса и LUP-разложения в задаче нахождения равновесного химического состава // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2023. – Т. 19. – № 2. – С. 79-85.

УДК 519.876.2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РЕМОНТОВ И РАБОТЫ КОНВЕРТЕРОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Прохоров И. М., к.т.н. Турчанинов Е. Б., к.т.н. Шакиров М. К., д.т.н. Зимин А.В.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье описана и приведена математическая постановка задачи согласованного планирования ремонтов и работы конвертеров сталеплавильного производства, содержащего два цеха с, соответственно, двумя и тремя конвертерами.

Ключевые слова: сталеплавильное производство, конверторный цех, календарное планирование ремонтов, длительность кампании конвертера, постановка задачи, декомпозиция.

Особенность задачи планирования времени выполнения ремонта конвертера состоит в том, что задача определения времени ремонта конвертера решается одновременно с построением календарного плана работы металлургического агрегата. Как правило, при планировании ремонтов других агрегатов график ремонта является частью исходных данных для календарного планирования их работы [1-4]. Отличие обусловлено тем, что конвертер останавливают на ремонт после того, как количество выпущенных им плавок достигает заданного значения, называемого нормативной длительностью кампании конвертера. Время достижения нормативной длительности определяется календарным планом работы конвертера.

Основные понятия, обозначения и постановка задачи. Обозначим через $O = \{O_I, O_{II}\}$ сталеплавильное производство, включающее два цеха. Причем $O_I = \{o_1, o_2, o_3\}$ и$O_{II} = \{o_4, o_5\}$, то есть в первом цехе имеется три конвертера, а во втором – два. В качестве интервала планирования работы и ремонтов конвертеров определим месяц $(0, T) = (\Delta t_s | s = \overline{1, S})$, S – количество суток в месяце. Последовательностью$(g^{вх}(\Delta t_s) | s = \overline{1, S})$, $\sum_{s=1}^{S} g^{вх}(\Delta t_s) = G_T^{вх}$, опишем ежесуточное поступление жидкого чугуна из доменного производства для производства стали.

Пусть $G(O_I), G(O_{II})$ - плановое производство стали цехов в текущем периоде $(0, T)$, $g(O_I)$ и $g(O_{II})$ - объемы выпуска стали за один цикл конвертерами первого и второго цехов, ρ_I, ρ_{II} расходные коэффициенты на чугун для выплавки тонны стали в соответствующих цехах, K_I и K_{II} – нормативные значения длительностей кампаний конвертеров первого и второго цеха, $\{T_r(o_i) | i = \overline{1,5}\}$ - искомые планируемые периоды ремонтов конвертеров в цехах O_I, O_{II}, где$T_r(o_i) = (\Delta t_{s_r}(o_i) | r = \overline{1, r_i})$, r_i – длительность ремонта i–го конвертера в сутках.

Заметим, что рыночные условия привели к сопоставимости цен на металлолом с себестоимостью производства чугуна. Вследствие этого коэффициенты ρ_I, ρ_{II} расхода чугуна на тонну стали перестали рассматриваться в качестве констант, а получили интервальную оценку:

$$\rho_I \in (\rho_I^{min}, \rho_I^{max}),$$
$$\rho_{II} \in (\rho_I^{min}, \rho_I^{max}). \quad (1)$$

Это обстоятельство также создало условия для ограниченного управления объемом чугуна, перерабатываемого конвертером.

Благодаря совершенствованию технологии конвертерного производства (внедрению внепечной обработки стали, оперативной оценки текущего состояния конвертера, организации периодических горячих ремонтов между очередными холодными) длительность кампании конвертера существенно увеличилась и сегодня достигает 6000 тысяч плавок. Сократилось общее число холодных ремонтов конвертера, но и появились условия для управления длительностью кампании конвертера в пределах, ограниченными интервалами:

$$K_I = (K_1^{min}, K_1^{max}),$$
$$K_{II} = (K_{1I}^{min}, K_{1I}^{max}). \quad (2)$$

Кроме того, различные поставщики специализированных материалов для горячих ремонтов гарантируют различные длительности кампаний конвертеров (устоявшимся термином стал термин «гарантированная стойкость конвертера»). Величина длительности кампании (2) стала относится к конкретному поставщику, с которым заключается контракт.

Существенно изменилось представление о длительности холодного ремонта, под которым изначально понималось период времени замены футеровки конвертера. Сегодня часто совмещают холодный ремонт конвертера с ремонтами смежного оборудования и ремонтами других металлургических агрегатов. Вследствие этого длительность остановки конвертера на ремонт может превышать длительность текущего планового периода.

Далее, если не оговорено специально, будем исходить из того, что оценки введенных параметров носят точечный, а не интервальный характер.

Обозначим через $m_k(\Delta t_s), m_I(\Delta t_s), m_{II}(\Delta t_s), m_O(\Delta t_s)$, соответственно, количество плавок выпускаемых конвертером k, цехом O_I, цехом O_{II}, производством O в сутки Δt_s. Очевидно, что

$$\sum_{k=1}^{3} m_k(\Delta t_s) = m_I(\Delta t_s);$$
$$\sum_{k=4}^{5} m_k(\Delta t_s) = m_{II}(\Delta t_s);$$
$$m_I(\Delta t_s) + m_{II}(\Delta t_s) = m_O(\Delta t_s). \quad (3)$$

Под календарным планом работы k-го конвертера будем понимать последовательность

$$(m_k(\Delta t_s) \mid s = \overrightarrow{1,S}). \quad (4)$$

Обозначим через $k_i^o, i = \overline{1,5}$ и $k_i^T, i = \overline{1,5}$ количество плавок, выпущенных соответствующими конвертерами на начало и, соответственно, на конец планового периода (0,T). Общее количество плавок $k_i(s)$, выпущенных конвертерами на конец s-ых суток должно удовлетворять ограничениям

$$k_i(s) = \begin{cases} k_i^0 + \sum_{l=1}^{s} m_i(\Delta t_s) \le K_{II}, s = \overline{1, s(K_{II})} \\ 0, s = \overline{s(K_{II}), s(K_{II}) + r_i} \\ \sum_{l=1}^{s} m_i(\Delta t_s) \le K_{II}, s > s(K_{II}) + r_i \end{cases}, i = \overline{1,5} \quad (5)$$

Нелинейная целочисленная функция $k_i(s)$ имеет «пилообразный» вид, максимальное значение ее равно K_{II}. Достигает она максимума в те сутки $s(K_{II})$, когда количество плавок, выплавленных конвертером, становится равным длительности кампании K_{II}, причем основание «зуба пилы» является переменным и зависит от количества плавок, выпускаемых конвертером в каждые сутки межремонтного периода. Во время ремонта конвертера значение функции $k_i(s)$ равно 0.

На совместную работу конвертеров в цехах накладываются технологические ограничения, определяющие диапазон изменения числа плавок в сутки в каждом цехе при одном или двух одновременно работающих конверторах:

$$\underline{m_I^1} \le m_k(\Delta t_s) \le \overrightarrow{m_I^1}, \quad o_k \in O_1; \tag{6}$$

$$\underline{m_{II}^1} \le m_k(\Delta t_s) \le \overline{m_{II}^1}, \quad o_k \in O_2; \tag{7}$$

$$\begin{aligned} &2\underline{m_I^1} \le (m_k(\Delta t_s) + m_{k'}(\Delta t_s)), \\ &(m_k(\Delta t_s) + m_{k'}(\Delta t_s)) \le \overline{2m_I^1}, \\ &o_k, o_{k'} \in O_I; \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} &2\underline{m_{II}^1} \le (m_k(\Delta t_s) + m_{k'}(\Delta t_s)), \\ &(m_k(\Delta t_s) + m_{k'}(\Delta t_s)) \le \overline{2m_{II}^1}, \\ &o_k, o_{k'} \in O_2. \end{aligned} \tag{9}$$

Здесь $\underline{m_I^1}$, $\overrightarrow{m_I^1}$, $\underline{m_{II}^1}$, $\overline{m_{II}^1}$, $2\underline{m_I^1}$, $\overline{2m_I^1}$, $2\underline{m_{II}^1}$, $\overline{2m_{II}^1}$ соответственно, минимальное и максимальное количество плавок, выпускаемых в первом и втором цехе при работе одним конвертером, а также минимальное и максимальное количество плавок, выпускаемых в цехах при работе двумя конвертерами. Работа тремя конвертерами в первом цехе технологически не реализуема.

Система организации ремонтов в сталеплавильном производстве не допускает одновременного выполнения в цехе ремонта более одного конвертера:

$$\begin{aligned} &\bigcap_{i=1}^{3} T_r(o_i) = \varnothing, \\ &\bigcap_{i=4}^{5} T_r(o_i) = \varnothing. \end{aligned} \tag{10}$$

Кроме того, каждый цех должен выполнить производственный план

$$\begin{aligned} &\sum_{k=1}^{3} m_k(\Delta t_s) g(o_I) = G(O_I), \\ &\sum_{k=4}^{5} m_k(\Delta t_s) g(o_{II}) = G(O_{II}). \end{aligned} \tag{11}$$

Работа и ремонты конвертеров должны быть организованы так, чтобы в каждые сутки планового периода перерабатывался весь поступающий в миксерах жидкий чугун:

$$\begin{aligned} &\sum_{k=1}^{3} m_k(\Delta t_s) g(o_I) \rho_I + \\ &+ \sum_{k=4}^{5} m_k(\Delta t_s) g(o_{II}) \rho_{II} = \\ &= g^{вх}(\Delta t_s), \ s = \overline{1, S}. \end{aligned} \tag{12}$$

Каждый конвертер в каждый интервал времени Δt_s может находится в одном из трех возможных технологических состояний: режим работа – «wr», режим ремонта – «rm», режим горячего резерва – «rz». Для состояний «ремонт» и «горячий резерв» имеют место соотношения

$$m_k(\Delta t_s \mid rm) = 0,$$
$$m_k(\Delta t_s \mid rz) = 0,\ k=\overline{1,5}. \quad (13)$$

Введем понятия текущей оперативной мощности конвертора, цеха и сталеплавильного производства, определяемые как количество плавок, которые может выплавить конвертор, цех и производство в целом до окончания длительностей кампаний соответствующих конвертеров

$$\mu(o_i) = \Delta k_i(s) = K_I - k_i(s),\ i=\overline{1,3},$$
$$\mu(o_i) = \Delta k_i(s) = K_{II} - k_i(s),\ i=\overline{4,5}; \quad (14)$$

$$\mu(O_I) = \sum_{i=1}^{3} \Delta k_i(s),$$
$$\mu(O_{II}) = \sum_{i=4}^{5} \Delta k_i(s); \quad (15)$$

$$\mu(O) = \sum_{i=1}^{3} \Delta k_i(s) + \sum_{i=4}^{5} \Delta k_i(s); \quad (16)$$

Планирование ремонтов и работы конверторов в текущем плановом периоде целесообразно ориентировать на максимально возможную оперативную мощность сталеплавильного производства на конец планируемого периода с тем, чтобы обеспечить способность производства выполнить очередное плановое задание.

Задача планирования ремонтов и работы конвертеров сталеплавильного производства в текущем плановом периоде состоит в определении таких

$$T_r(o_i) = (\Delta t_{s_r}(o_i) \mid r = \overline{1, r_i}),\ i=\overline{1,5}; \quad (15)$$

$$(m_k(\Delta t_s) \mid s = \overline{1,S}),\ \ k=\overline{1,5}; \quad (16)$$

которые удовлетворяют ограничениям (3) – (13) и максимизируют критерий

$$\mu(O) = \sum_{i=1}^{3} \Delta k_i(S) + \sum_{i=4}^{5} \Delta k_i(S). \quad (17)$$

Очевидно, ремонт конвертера o_i в цехе может быть выполнен только в интервале времени $T_r(o_i) = (\Delta t_{s_r}(o_i) | r = \overline{1, r_i})$ таком, что для всех $\Delta t_{s_r}(o_i), r = \overline{1, r_i}$ выполняются неравенства:

$$\underline{m_I^1} \le m_I(\Delta t_{s_r}) \le \overline{m_I^1},\ o_i \in O_I, \quad (18)$$

$$\underline{m_{II}^1} \le m_{II}(\Delta t_{s_r}) \le \overline{m_{II}^1},\ o_i \in O_{II}. \quad (19)$$

Вывод. Принципы декомпозиции, схема разложения сформулированной задачи, алгоритмы решения отдельных подзадач и задачи композиции решений подзадач будут составлять предмет дальнейших исследований авторов.

Список литературы

1. Зимин В.В. Построение согласованных расписаний для производственных звеньев комплекса «сталь-прокат»: дис. … канд. техн. наук 05.13.06. – Москва, МИСиС, 1979. – 219 с.

2. Автоматизированная система управления для металлургического завода / А.П. Копелович, М. Кнотек, А.А. Белостоцкий [и др.]. – М.: Металлургия, 1973. – 230 с.

3. Планирование дискретного производства в условиях АСУ / Под ред. В.М. Глушкова. – Киев: Техника, 1975. – 295 с.

4. Программная координация в рамках комплекса сталь-прокат. Построение агрегированного расписания для конвертерных цехов. / А.А. Кугушин, В.В. Зимин, С.М. Кулаков [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 1980. – № 8. – С. 100-106.

УДК 621.311, 621.331

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЯГОВЫХ НАГРУЗОК НА КАЧЕСТВО ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В РАЙОНАХ УГЛЕДОБЫЧИ

[1]Стишенко К.П., [2]Герасимук А.В., [1]к.ф-м.н. Хаимзон Б.Б., [1]к.т.н. Кипервассер М.В.
1 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия
2 – АО «Сибирский Тяжпромэлектропроект», г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Выполнено моделирование тяговой подстанции с использованием среды Mathlab/Simulink для анализа влияния работы полупроводниковых преобразователей электрифицированных железных дорог постоянного тока на качество электрической энергии, потребляемой нетяговыми потребителями.

Ключевые слова: гармонические искажения, полупроводниковый выпрямитель, математическая модель, качество электрической энергии, гармонический состав, пост электрической централизации.

В границах Западно-Сибирской железной дороги был зафиксирован ряд случаев ложного срабатывания защиты от нарушения чередовании фаз напряжения, питающего электронное оборудование постов электрической централизации (ЭЦ) железных дорог постоянного тока. Срабатывание защиты сопровождалось переходом питания поста с основного на резервный фидер и нарушениями в работе электрической централизации. Поиск причин указанной проблемы привел к рассмотрению вопроса влияния полупроводниковых выпрямителей на качество электрической энергии в линиях электроснабжения нетяговых потребителей, к которым относятся посты электрической централизации.

По результатам выполненных замеров тока и напряжения, потребляемых постом ЭЦ и приведенных на рис. 1, было выявлено, что при увеличении тягового тока увеличивается степень несинусоидального искажения напряжения на вводной панели поста ЭЦ 0,4 кВ, что в свою очередь, и вызывает ложное срабатывание защиты.

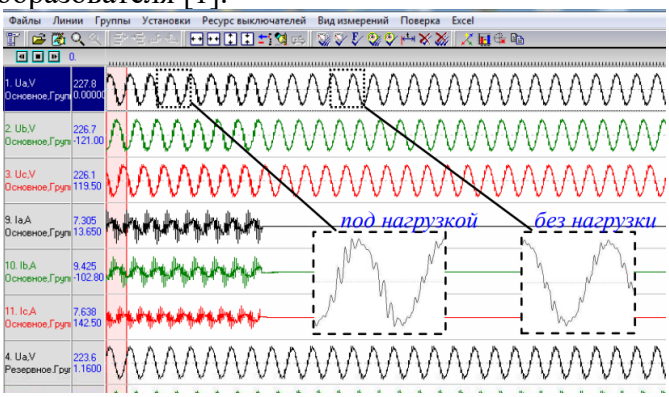
Искажение формы кривой напряжения на шинах тяговой подстанции, и, соответственно в линиях питания нетяговых потребителей обуславливается наличием высших гармоник в составе сетевого тока выпрямительного агрегата, возникающих вследствие коммутации, т.е. короткого замыкания между вентильными плечами. Продолжительность коммутации определяется углом коммутации:

$$\gamma_{\text{м}} = \arccos\left(1 - 2u_k sin\frac{\pi I_d}{mI_{d\text{ном}}}\right), \quad (1)$$

где u_k – сумма напряжений короткого замыкания понизительного и преобразовательного трансформаторов тяговой подстанции; m - число пульсаций выпрямленного напряжения; I_d – тяговый ток, потребляемый локомотивом на стороне постоянного тока; $I_{d\text{ном}}$ – номинальный ток нагрузки выпрямителя, равный 3150 А.

Из (1) следует, что при увеличении тягового тока увеличивается угол коммутации, увеличение которого ухудшает форму кривой выпрямленного и сетевого напряжения полупроводникового преобразователя [1].

а



б

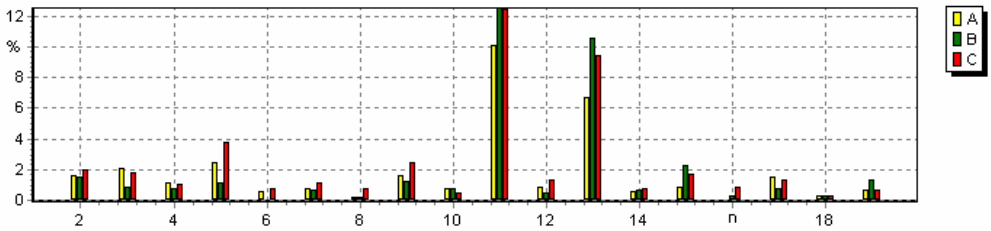


Рис. 1. Результаты натурных измерений: а – осциллограммы токов и напряжения 0,4 кВ поста ЭЦ; б – гармонический спектр напряжения 0,4 кВ поста ЭЦ

Ложное срабатывание защит поста ЭЦ препятствует надежной и устойчивой работе устройств сигнализации, обеспечивающих безопасность перевозочного процесса. С учетом повышения тяговых нагрузок, обусловленных ростом перевозок полезных ископаемых, проблема приобретает особенную актуальность.

Для анализа факторов, влияющих на качество электрической энергии в смежных тяговым подстанциям сетях и линиях электроснабжения, была разработана имитационная модель тяговой подстанции с линией питания поста ЭЦ в программной среде Matlab/Simulink, на основе однолинейной схемы электроснабжения постов электрической централизации. Схема электроснабжения приведена на рис. 2.

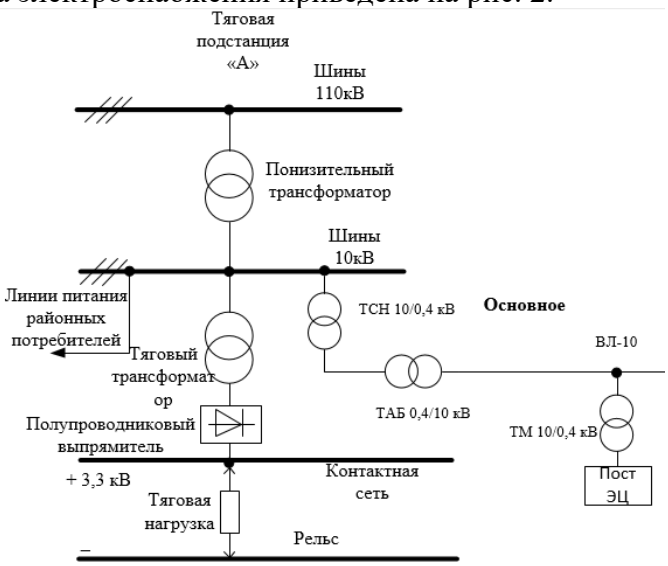


Рис. 2. Схема электроснабжения поста электрической централизации

Основное питание поста ЭЦ осуществляется от общих с тяговым выпрямителем шин 10 кВ тяговой подстанции «А». Далее через понижающий трансформатор собственных нужд (ТСН) питание по кабельной линии подаётся на повышающий трансформатор

автоблокировки (ТАБ), вторичные обмотки которого подключены к воздушной линии 10 кВ, питающей понизительный трансформатор (ТМ) поста ЭЦ.

Имитационная модель включает в себя трехфазный источник электрической энергии напряжением 110 кВ, воздушную линию, питающую тяговую подстанцию, силовой трансформатор ТДН 16000 110/10, тяговый трансформатор ТРДП 12500 с 12-ти пульсовым тяговым выпрямителем, тяговую нагрузку и сглаживающий фильтр на стороне постоянного тока [2]. На рис. 3 приведена блок-схема модели системы электроснабжения поста ЭЦ.

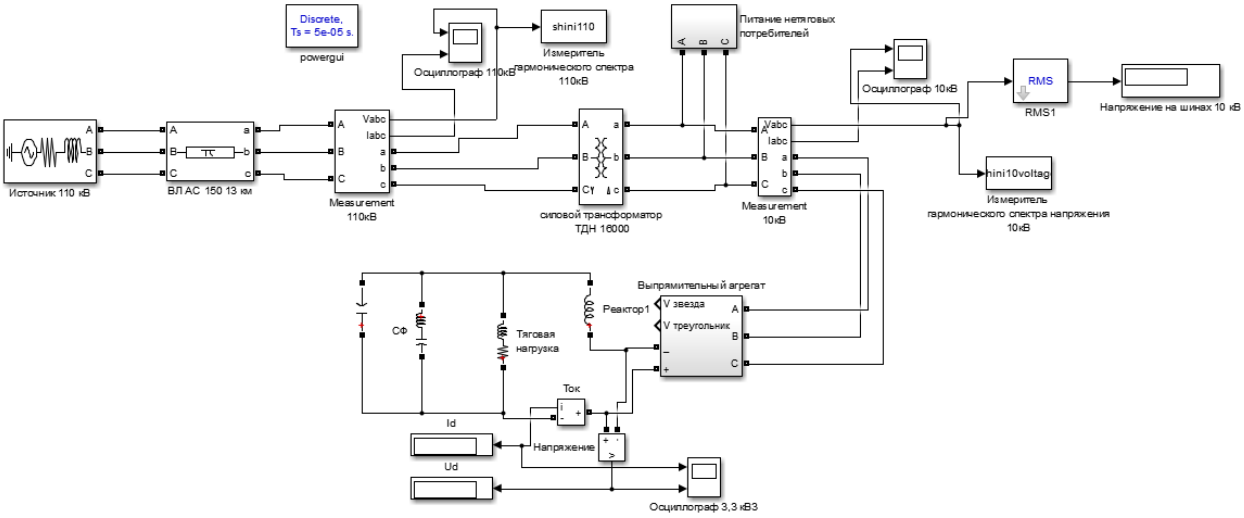


Рис. 3. Блок-схема модели системы электроснабжения поста ЭЦ

Подсистема «Питание нетяговых потребителей» включает трансформатор собственных нужд ТС-400 10/0,4, кабельную вставку, трансформатор автоблокировки ТС-250 0,4/10, воздушную линию 10 км, выполненную проводом АС-35, и КТП поста электрической централизации с трансформатором ТМ-160 10/0,4. Измерения кривых напряжений и гармонических спектров осуществляется блоками из библиотеки Matlab/Simulink. Трансформатор ТМ-160 работает в режиме холостого хода в целях оценки непосредственного влияния на качество электрической энергии тягового выпрямителя. Блок-схема подсистемы приведена на рис. 4.

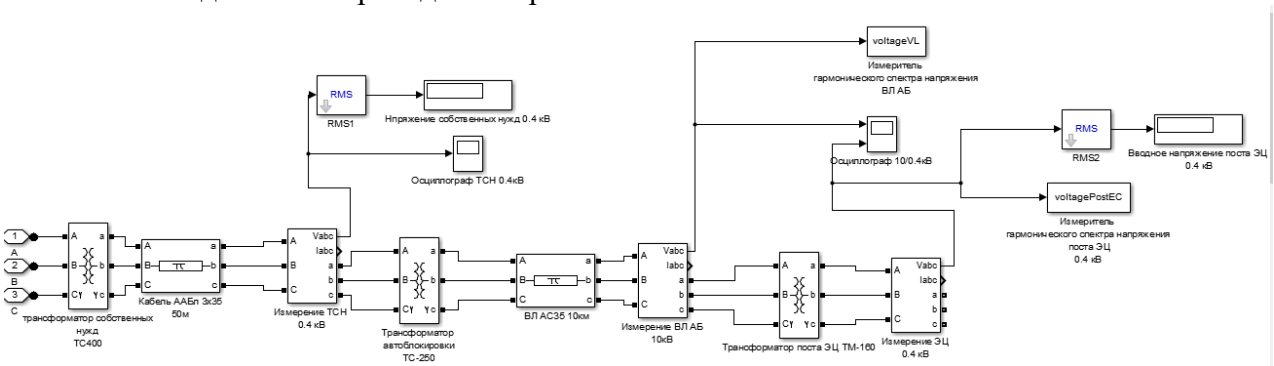


Рис.4. Блок схема подсистемы «Питание нетяговых потребителей»

Расчет параметров использующегося в модели оборудования, осуществлялся на основе паспортных данных, методик и результатов, приведенных в [1, 3-6].

Моделирование осуществлялось в двух режимах на интервале времени моделирования 10 минут:

– при тяговом токе, составляющем 10% от номинального (3150 А), полностью симметричном и синусоидальном питающем напряжении 110 кВ;

– при тяговом токе, составляющем 100% от номинального (3150 А), полностью симметричном и синусоидальном питающем напряжении 110 кВ.

В ходе моделирования первого режима были получены результаты, приведенные на рис. 5, 6.

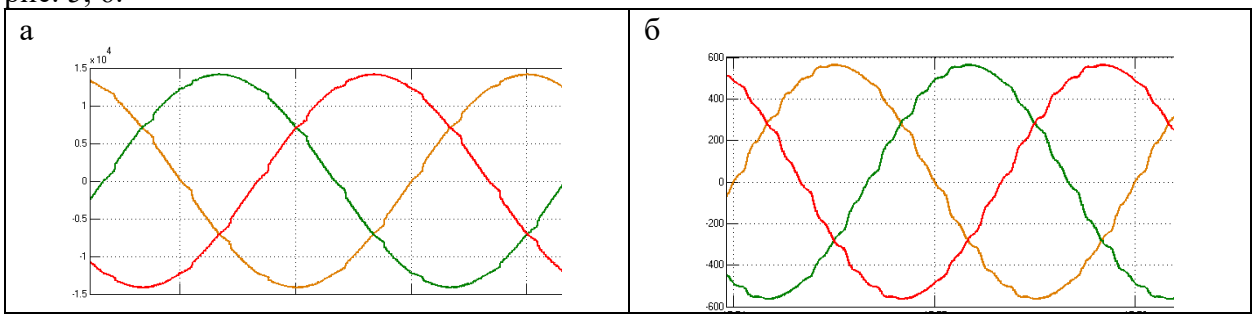


Рис. 5. Кривые напряжения: а – на шинах 10кВ; б – на шинах 0,4 кВ поста ЭЦ

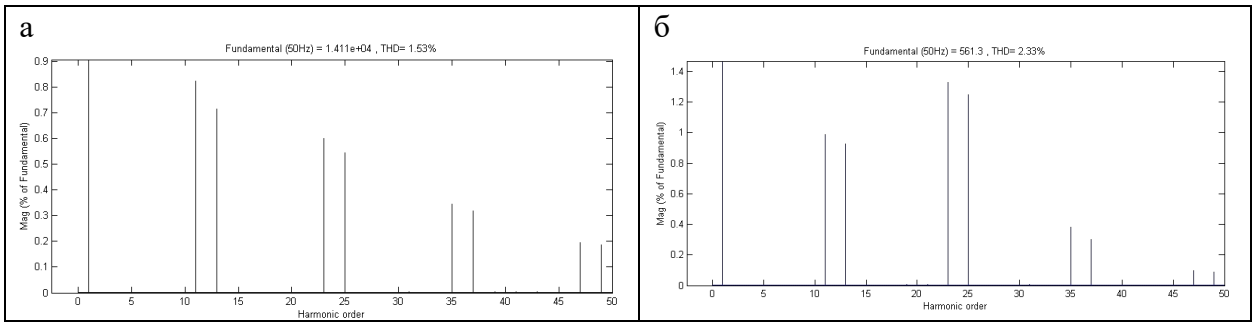


Рис. 6. Гармонические спектры напряжения: а –на шинах 10 кВ; б – на шинах 0,4 кВ поста ЭЦ

В ходе моделирования второго режима были получены результаты, приведенные на рис. 7, 8.

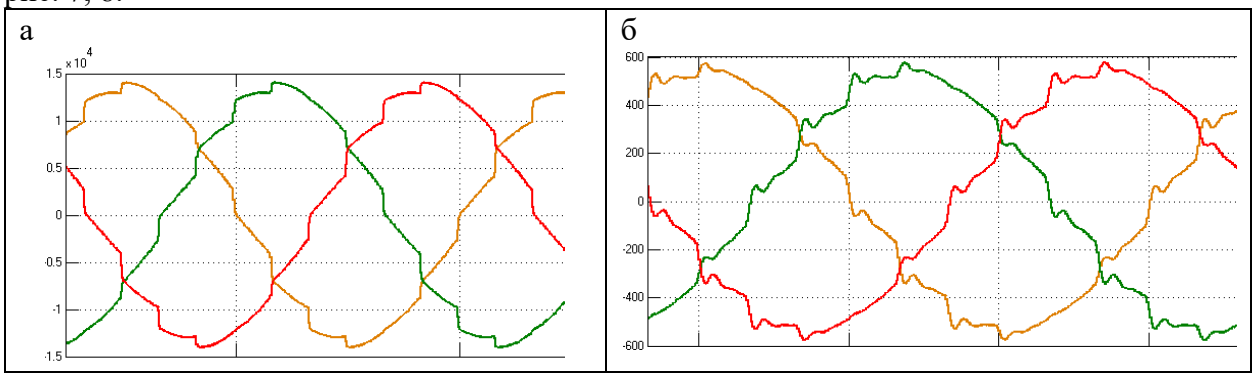


Рис. 7. Кривые напряжения: а – на шинах 10кВ; б – на шинах 0,4 кВ поста ЭЦ

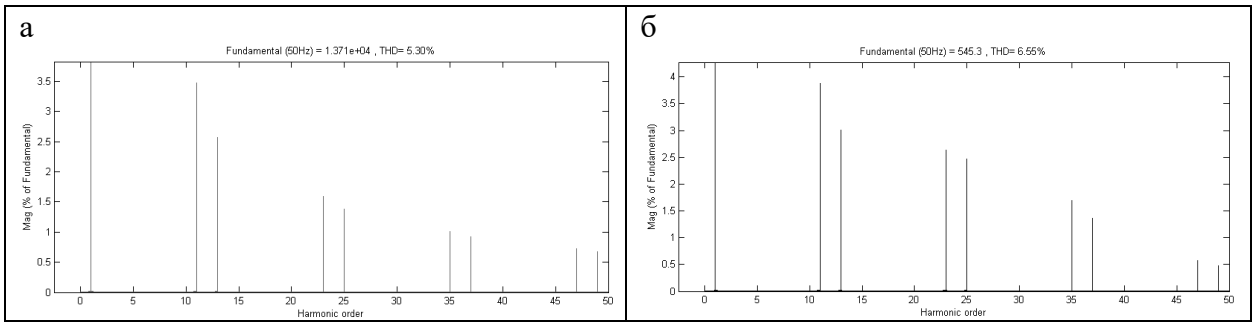


Рис. 8. Гармонические спектры напряжения: а – на шинах 10 кВ; б – на шинах 0,4 кВ поста ЭЦ

Анализ результатов моделирования показывает наличие влияния тягового тока на качественный уровень напряжения 0,4 кВ на вводной панели поста электрической централизации. При тяговом токе, соответствующем 10 % от номинального, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах 10 кВ тяговой

подстанции составляет 1,53%. Кривая напряжения имеет видимые искажения, обусловленные коммутацией вентильных плеч тягового преобразователя. Гармонический спектр напряжения 10 кВ включает канонические для 12-ти пульсовой схемы выпрямления высшие гармоники. На шинах 0,4 кВ поста ЭЦ, K_U составляет 2,33%, состав гармонического спектра повторяет спектр на шинах 10 кВ, за исключением непропорционального усиления 23-ей и 25-ой гармоник, что может быть вызвано наличием возможного резонансного режима. Наличие резонансного режима возможно по причине последовательного включения трансформаторов собственных нужд и автоблокировки, представляющих собой индуктивность, которая может резонировать с емкостью проводов ЛЭП.[1]

При моделировании второго режима, соответствующего номинальной нагрузке тягового выпрямителя, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения 10 кВ увеличился до 5,3%. Кривая напряжения приобрела выраженные искажения под действием коммутации вентильных плеч. На шинах вводной панели поста ЭЦ 0,4 кВ степень искажения кривой напряжения увеличилась: суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения составил 6,55 %. Амплитуда 11-ой гармоники (3,88%) превышает допустимое значение (3,5%) , приведенное в требованиях ГОСТ [7].

Выводы. Результаты моделирования с использованием имитационной модели коррелирует с результатами натурных замеров, что подтверждает адекватность модели. Выявлено ухудшение показателей качества напряжения 0,4 кВ, питающего пост ЭЦ, свыше допустимых пределов, по мере увеличения тягового тока.

В реальных условиях на качество напряжения 0,4 кВ также будут оказывать влияние несимметрия и несинусоидальность сетевого напряжения 110 кВ, обусловленные наличием в системе тягового электроснабжения также 6-ти пульсовых выпрямителей и мощных однофазных нагрузок, особенно в районах станций стыкования. Наличие искажений требует разработки технических мероприятий по увеличению помехозащищённости постов ЭЦ и исключению нарушений в работе электрической централизации.

Список литературы

1. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций / Б.С. Барковский, В.П. Маценко, М.Г. Шалимов [и др.]; под ред. М.Г. Шалимова. – М.: Транспорт, 1990. – 126 с.

2. Стишенко К.П., Кипервассер М.В. Разработка математической модели в программной среде Mathlab/Simulink для исследования влияния полупроводниковых выпрямителей тяговых подстанций на качество электрической энергии // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2023. – № 9. – С. 280-286.

3. Новаш И.В., Румянцев Ю.В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MatLab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2015. – № 1. – С. 12–24.

4. Герасимук А.В., Семыкина И.Ю., Кипервассер М.В. Расчет параметров схемы замещения трансформаторов с расщепленной обмоткой с учетом устройства регулирования напряжения под нагрузкой в обмотке высшего напряжения // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – № 2(142). – С. 52-59. – DOI 10.26730/1816-4528-2019-2-52-59.

5. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

6. Мамошин Р.Р., Зимакова А.Н. Электроснабжение электрофицированных железных дорог: учебник для техникумов ж.-д. трансп. – М.: Транспорт, 1980. – 296 с.

7. ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 01.07.2014. – М.: Стандартинформ, 2014. – 6 с.

УДК 621.313.333.2

ХАРАКТЕРИСТИКИ СХЕМ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ МЕХАНИЗМОВ В ГОРНОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Александров Н.А., Жданов Е.В., к.т.н. Кипервассер М.В.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В работе описываются системы управления скоростью и соотношением моментов для многодвигательных электроприводов, которые работают на общую нагрузку. В этих системах осуществляется равномерное распределение нагрузки между взаимосвязанными электроприводами.

Ключевые слова: многодвигательный электропривод, регулятор скорости, блок управления моментом, коэффициент соотношения моментов, регулятор скорости, передаточный механизм, исполнительный орган.

Для увеличения мощности и момента на валу механизмов, используемых при добыче и переработке полезных ископаемых, используются электроприводы большой мощности, в частности – многодвигательный электропривод. Также системы многодвигательных электроприводов используются в коксохимическом производстве металлургических предприятий при транспортировке угля и кокса.

Для электроприводов с несколькими двигателями возникает задача равномерного распределения нагрузки между ними, а также согласование работы электроприводов при работе на общую нагрузку. Например, две пары двигателей соединены с двумя редукторами, вращающими барабан подъемника установки сухого тушения кокса (УСТК) коксового цеха (рис. 1). В таких системах приводы могут создавать различные моменты в зависимости от индивидуальных характеристик электродвигателей и состояния механической части подъемного устройства [1].

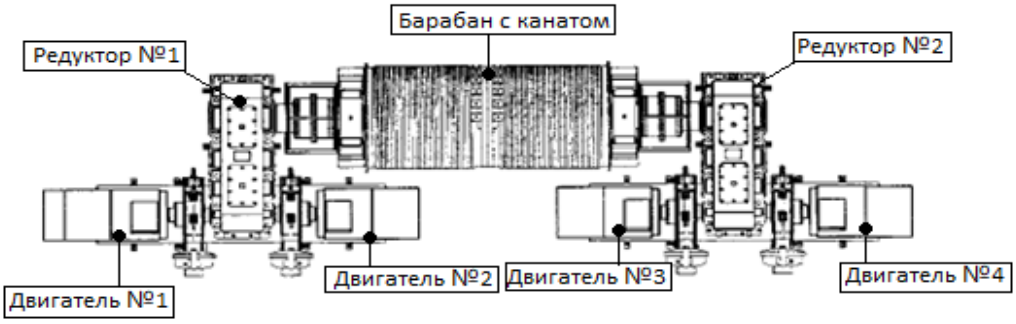


Рис. 1. Функциональная схема подъемника УСТК

Увеличение числа двигателей в электроприводах производственных механизмов большой мощности и с высокими моментами инерции приносит определённые преимущества по сравнению с однодвигательным электроприводом [1, 2]. Многодвигательный электропривод имеет следующие положительные качества в сравнении с однодвигательным электроприводом:

– увеличение надежности и эффективности работы электропривода при низких нагрузках;

– уменьшение мощности, крутящего момента и габаритов отдельного электродвигателя;

– снижение общей массы исполнительной части (включая электродвигатель и передаточный механизм);

– уменьшения динамических нагрузок на механические системы;

Также у электропривода с несколькими двигателями есть свои недостатки:

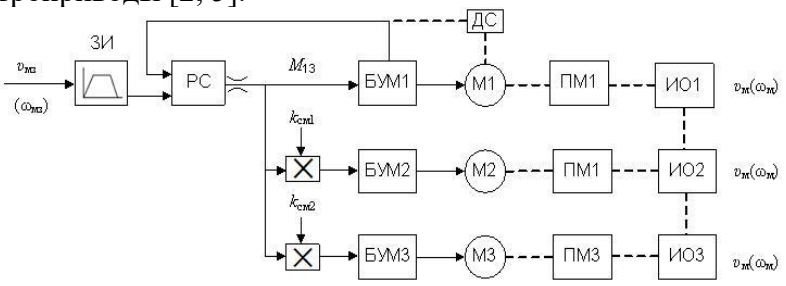
– усложнение электрической схемы подключения электродвигателей к электросети при их последовательном и параллельном соединении;

– неодинаковость характеристик двигателей одной модели;

– неравномерное распределение нагрузки между несколькими двигателями, работающими на общий вал [3, 4].

Последний недостаток является существенным. Для равномерного распределения нагрузки между электродвигателями в многодвигательном электроприводе применяются различные варианты принципов построения и компоновки схем управления. На рис. 2 - 4 показаны структурные схемы систем управления тремя электроприводами, основанные на разных принципах.

На рис. 2 представлена система, где первый привод выступает в качестве ведущего, осуществляя управление скоростью с применением блока управления моментом (БУМ) и регулятора скорости (РС), имеющего ограничение на выходной сигнал. Согласно с заданными значениями величин $\upsilon_{м3}$ или $\omega_{м3}$, данный электропривод обеспечивает скорость $\upsilon_м$ или $\omega_м$ движения исполнительного органа (ИО). В то время как ведомые электроприводы с ИО2 и ИО3, двигаясь с аналогичной скоростью, управляются исключительно по заданным значениям моментов M_{23} и M_{33}. Эти значения устанавливаются при помощи устройств задания моментов, аналогично принципу независимого управления скоростями в многодвигательных электроприводах. Регулируя конкретные коэффициенты соотношения моментов $k_{смj}$, достигается соответствующая нагрузка на электроприводы [2, 5].



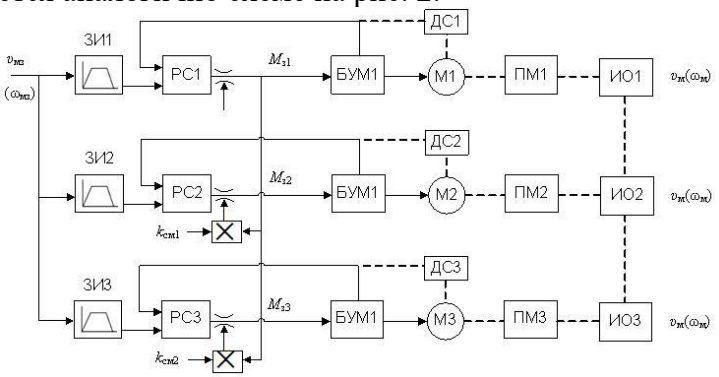
РС – регулятор скорости; БУМ1 – блок управления моментов; М1 – мотор; ДС – датчик скорости; ПМ1 – передаточный механизм; ИО1 – исполнительный орган

Рис. 2. Структурная схема многодвигательного электропривода по системе ведущий / ведомый

Каждый электропривод развивает критический момент, учитывая коэффициент $k_{смj}$, однако происходит остановка механизмов. При использовании в многодвигательном электроприводе схемы типа "ведущий/ведомый" нагрузка равномерно распределяется по всему диапазону скоростей после передачи команды на моменты от регулятора скорости ведущего привода к регуляторам моментов ведомых приводов, обеспечивая равномерное функционирование системы. В случае широкого диапазона регулирования скорости производственного механизма ведущий привод должен быть оборудован датчиками скорости (ДС). При ограниченных возможностях диапазона использования обратной связи по оценке скорости двигателя может быть выполнена в блоке управления моментом (БУМ1). Варианты такой оценки рассматриваются в [2, 5].

Недостатком обсуждаемого варианта электропривода является неконтролируемый разгон ведомых электроприводов при разрыве механической связи с исполнительным органом (ИО1). Этот недостаток устраняется в системах, представленных на рис. 3 и 4. В варианте на рис. 3 все три привода структурно и функционально идентичны, как в случае ведущего привода с регуляторами скорости. Время разгона и торможения задаются одинаково для каждого электропривода с использованием функционального модуля

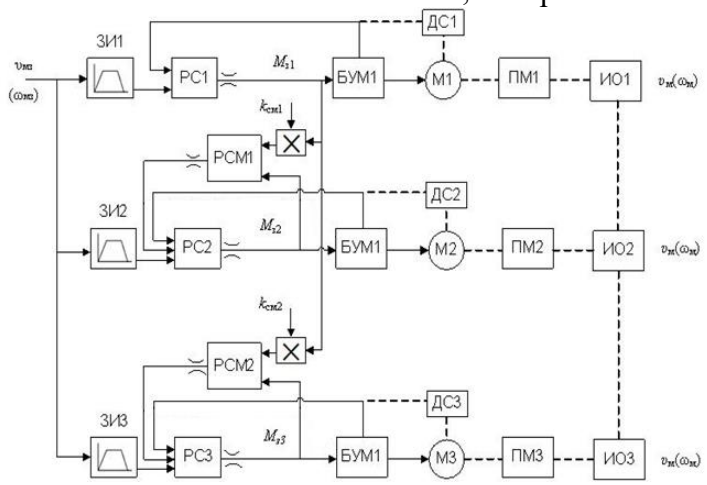
«задатчик интенсивности». Регулирование соотношениями моментов происходит путем управления ограничениями момента, устанавливаемого ведущим приводом. Ограничение моментов выполняется аналогично схеме на рис. 2.



ЗИ – задатчик интенсивности; РС – регулятор скорости; БУМ1 – блок управления моментов; М1 – мотор; ДС – датчик скорости; ПМ1 – передаточный механизм; ИО1 – исполнительный орган

Рис. 3. Структурная схема многодвигательного электропривода с независимыми задатчиками интенсивности

Более широкие возможности по выравниванию нагрузки и управлению соотношениями моментов обеспечиваются в системе, изображенной на рис. 4.



ЗИ – задатчик интенсивности; РС – регулятор скорости; РСМ1 – регулятор соотношения моментов; БУМ1 – блок управления моментов; М1 – мотор; ДМ – датчик скорости; ПМ1 – передаточный механизм; ИО1 – исполнительный орган

Рис. 4. Структурная схема многодвигательного электропривода с корректировкой значений индивидуальных приводов

В данной системе используются регуляторы соотношения моментов (РСМ1, РСМ2), которые позволяют корректировать значения частот индивидуальных преобразователей частоты для достижения необходимых соотношений, в том числе равенства моментов. Аналогично предыдущим вариантам систем, эти соотношения определяются коэффициентами $k_{см1}$ и $k_{см2}$ на основе значения момента задания ведущего привода [2, 5].

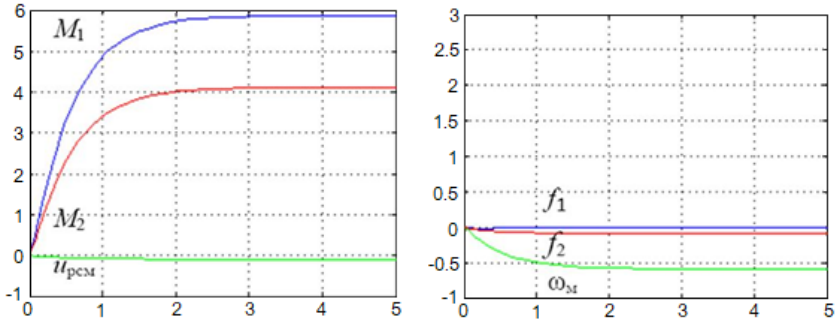
В системе управления структурной схемы №3 (рис. 4) предусмотрено несколько вариантов реализации.

Вариант 1. Задание отправляется в виде сигнала статорной частоты f_3. Все преобразователи частоты настраиваются с одинаковым временем разгона и торможения двигателя. Преобразователями частоты должна быть обеспечена скорость механизма, которую задал пользователь. Для равномерного распределения нагрузки заданный момент на первом приводе сравнивается с моментом на каждом из остальных приводов, и частота

корректируется соответственно с использованием регуляторов соотношения моментов РСМ1, РСМ2 и регуляторов частоты РС1, РС2, РС3. При реализации данной системы управления частота, момент и команды управления передаются с первого преобразователя частоты на остальные через сеть [3, 4].

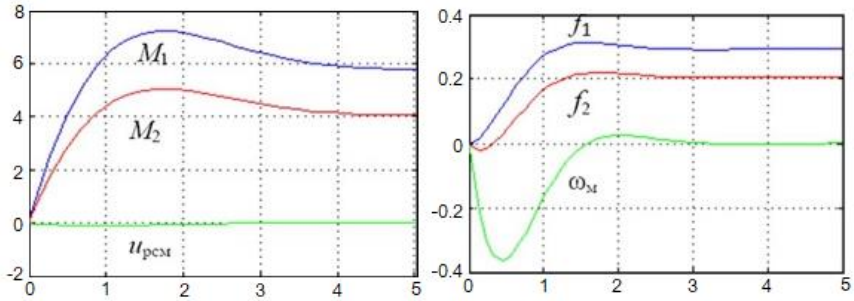
Вариант 2. В этой системе управления задается скорость механизма, а в качестве регуляторов используются регуляторы скорости РС1, РС2 и РС3. Информация о скорости получается либо путем оценки скорости двигателей с блоков БУМ1-БУМ3, либо с датчиков скорости, установленных на каждом двигателе. Устанавливается общее значение скорости с одинаковыми временами разгона и торможения механизма. При аналогичных условиях работы системы по сравнению с первым вариантом, коррекция моментов и частоты преобразователей поступает с РСМ1 и РСМ2 на блоки БУМ2 и БУМ3 соответственно, что показано пунктирными линиями на схеме (рис. 4). Используя ПИ-регуляторы скорости в данном случае, можно достичь высокой стабильности скорости $\upsilon_м$ или $\omega_м$ при значительных изменениях нагрузки на приводы в соответствии с заданными параметрами [3, 4].

Динамические процессы двух приводов вариантов №1 и №2 систем управления изображены на рис. 5 и 6. Анализ графиков по показателям моментов и частоты электроприводов показывает, что схема 3 (рис. 4) является наилучшим вариантом использования для многодвигательного электропривода. Она позволит согласовать работу нескольких независимых друг от друга электродвигателей, работающих на общий вал. Подобное согласование позволяет избежать аварийных ситуаций механической части оборудования с многодвигательным электроприводом [6].



M1, M2 – моменты двигателей, $U_{рсм}$ – выходная переменная регулятора соотношения момента, $\omega_м$ – частота вращения механизма, f_1 и f_2 – частоты приводов

Рис. 5. Динамические процессы при возмущающих воздействиях, вариант №1



M1, M2 – моменты двигателей, $U_{рсм}$ – выходная переменная регулятора соотношения момента, $\omega_м$ – частота вращения механизма, f_1 и f_2 – частоты приводов

Рис. 6. Динамические процессы при возмущающих воздействиях, вариант №2

Вывод. Независимые электроприводы выполнены одинаково, по структуре ведущего привода с регуляторами скорости. Также схема позволяет получить высокую стабильность системы с помощью индивидуальных блоков регуляторов соотношений моментов для получения нужных соотношений, в том числе и равных значений моментов.

Список литературы

1. Анучин А.С. Система управления электроприводов: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 375. с.
2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. – 272 с.
3. Выравнивание нагрузки с помощью преобразователей частоты Altivar 71. Руководство пользователя. – 18 с.
4. Руководство для Siemens Simovert Masterdrives Application Manual. – 942 с.
5. Белов М.П. Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов технологических комплексов: учебник для вузов. – М: Изд. Центр «Академия» 2007.
6. Пугачев Е.В., Кипервассер М.В., Аниканов Д.С. Контроль работоспособности конвейерного транспорта посредством регистрации параметров электропривода // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – № 3(97). – С. 101-105.

УДК 681.518.22+681.518.5: 621.313.333

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК

к.т.н. Поползин И.Ю.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье приведены сведения об одном из перспективных способов модернизации асинхронного электропривода шахтных подъемных установок – применении схемы машины двойного питания. Актуальность вопроса обусловлена тем, что в большом числе подъемных электроприводов применены мощные асинхронные двигатели с фазным ротором и подключенной к нему роторной станцией, модернизация которых с использованием частотного управления не всегда возможна и сопряжена с рядом трудностей.

***Ключевые слова*:** асинхронный двигатель с фазным ротором, машина двойного питания, электропривод, подъемная установка, частотное управление.

С 1995 года на базе кафедры автоматизированного электропривода и промышленной электроники СибГИУ (с 2016 г. – кафедра электротехники, электропривода и промышленной электроники) и ООО «НИИ АЭМ СибГИУ» проводятся НИОКР, направленные на разработку систем автоматизации, управления, защит и мониторинга для производственных объектов горно-металлургического комплекса Кузбасса и других регионов на российской элементной базе.

Существующие электроприводы на основе асинхронных электродвигателей с фазным ротором (например, применяемые на шахтных и рудничных подъемных установках) обычно построены по схеме с роторной станцией и ступенчатым переключением величины активного сопротивления в цепи ротора. В таких приводах значительная часть подведенной к двигателю энергии рассеивается в виде тепла на резисторах роторной станции, что существенно снижает их КПД и энергоэффективность. Также следует учитывать, что регулирование скорости машины с помощью переключения ступеней сопротивлений роторной станции из-за бросков тока, а, следовательно, и момента двигателя в момент переключения ступеней, ведет к возникновению значительных по величине динамических нагрузок в канатах и ударам в механической части привода, что отрицательно сказывается на надежности привода в целом. В то же время данная схема электропривода до сих пор находит достаточно широкое применение (в основном, в

существующих электроприводах подъемных установок, спроектированных до начала 2000х годов) благодаря своему главному достоинству – возможности регулирования скорости привода с неизменным критическим моментом, равным таковому для естественной механической характеристики приводного АД. Тем не менее, из-за указанных выше проблем с энергоэффективностью таких приводов весьма актуальна проблема их модернизации, при этом обычно необходимо сохранить приводной двигатель (многие из которых являются уникальными) и модернизировать только питающую часть электропривода и схему управления.

Общепринятым на сегодняшний день способом модернизации асинхронных электроприводов является использование схемы частотного электропривода с преобразователем частоты в цепи статора машины. Однако для подъемных двигателей большой мощности (сотни-тысячи кВт) это не всегда возможно из-за необходимости в применении силовых вентилей, способных на коммутацию значительных по величине токов при напряжении 6/10 кВ.

В этой связи перспективными представляются другие способы модернизации, учитывающие особенности АДФР. Так, каскадные схемы включения асинхронного двигателя [1] позволяют достигать существенного увеличения показателей энергоэффективности, однако для них характерны следующие недостатки:

– в асинхронно-вентильных каскадах (АВК) обычно используются преобразователи с одной управляемой (транзисторной или тиристорной) группой вентилей и неуправляемым диодным мостом, что не позволяет полностью управлять потоком мощности в электроприводе, в частности, осуществлять рекуперацию. Кроме того, это снижает достигаемый диапазон регулирования до 2-2,5:1, в то время как для подъемных двигателей данный диапазон должен составлять 30:1 и выше;

– машинные и машинно-вентильные каскады требуют установки в машинном зале установки дополнительной машины постоянного тока, что, как правило, невозможно. Кроме того, необходима организация питания цепи возбуждения этой машины, что требует дополнительной установки трансформатора, управляемого выпрямителя и системы регулирования возбуждения (или хотя бы защиты от обрыва поля).

Обеспечение приемлемых энергетических и регулировочных характеристик АДФР возможно при их использовании в режиме двойного питания [2]. Под машиной двойного питания (МДП), как правило, понимается схема включения АДФР, в которой к ротору двигателя подключен преобразователь частоты, построенный по схеме с промежуточным звеном постоянного тока. В качестве силовых вентилей для такого преобразователя в настоящее время используются силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT).

Электропривод, силовая часть которого построена по данной схеме, обладает следующими конструктивными особенностями [3]:

– статор двигателя запитан непосредственно от сети либо от частотного преобразователя;

– ротор двигателя запитан от управляемого преобразователя частоты;

– управление скоростью и моментом двигателя осуществляется за счет управления амплитудой, фазой и частотой добавочной ЭДС, вводимой в цепь ротора, с выхода преобразователя частоты.

Функциональная схема электропривода на основе МДП, разработанного ООО «НИИ АЭМ СибГИУ» и кафедрой ЭЭиПЭ СибГИУ, приведена на рис. 1. На схеме приняты следующие условные обозначения: *М* – асинхронный двигатель с фазным ротором; *Тр* – трансформатор; *БУРГ* – блок управления вентильной группой, синхронизированной с ротором; *БУСГ* – блок управления вентильной группой, синхронизированной с сетью; *БСВГ* – блок синхронизации вентильных групп; *БУТР* – блок управления током ротора; *ИУС* – информационно-управляющая система; *К1, К2* – коммутационное устройство,

осуществляющее подключение к цепи ротора управляемого преобразователя напряжения (УПН) или управляемого преобразователя тока (УПТ) [4].

Приведенная схема в соответствии с разработанным алгоритмом функционирования [6] работает следующим образом:

1) В режиме пуска при заторможенном роторе *К1* разомкнут, *К2* замкнут, в цепь ротора включен управляемый преобразователь тока (УПТ), формирующий в цепи ротора плавно нарастающий ток, который увеличивается, пока момент машины не станет равным статическому моменту на валу. При равенстве момента машины статическому моменту снимается тормоз. Реализация такого режима растормаживания позволит избежать рывка подъемного сосуда вверх или его провала вниз при снятии тормоза.

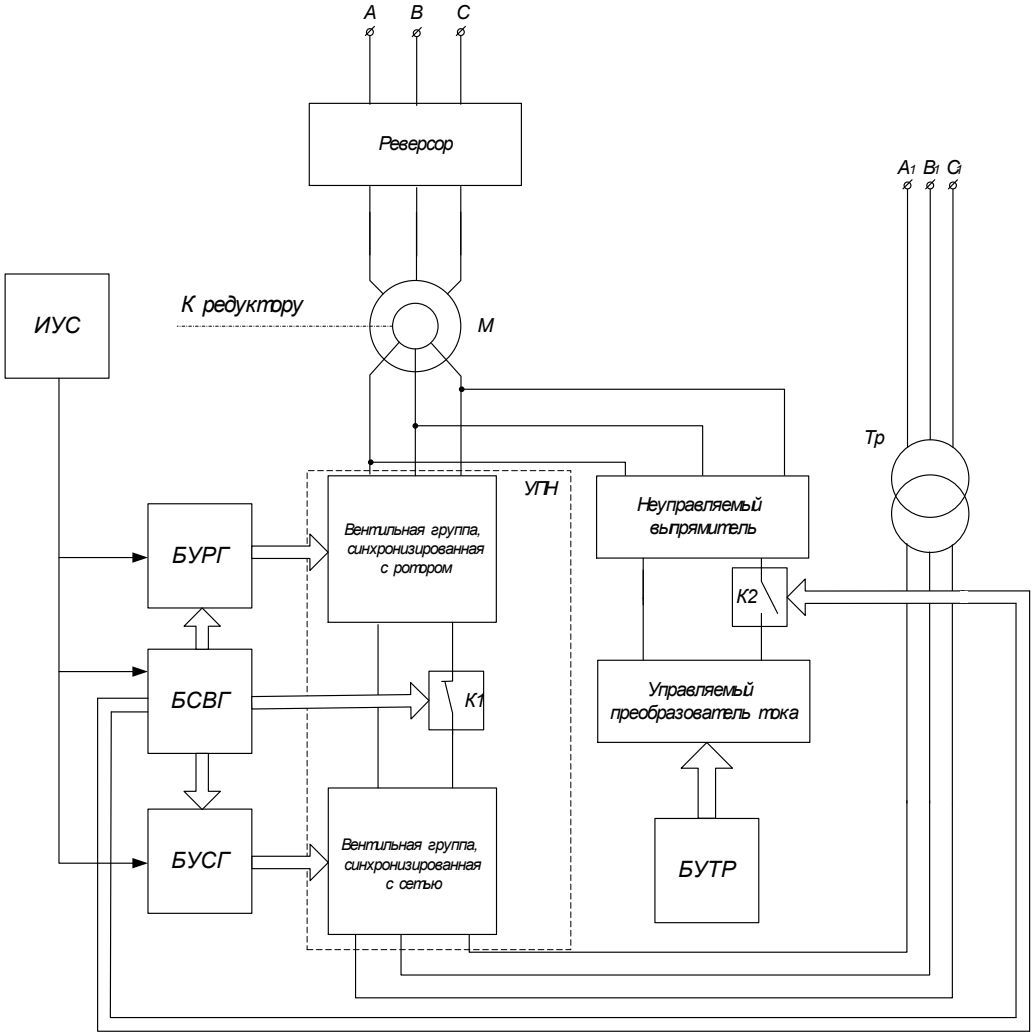


Рис. 1. Функциональная схема электропривода с асинхронным электродвигателем двойного питания

2) После снятия механического тормоза ток в цепи УПТ уменьшается, и машина начинает плавно разгоняться под действием динамического момента. При выходе на заданную скорость (принимаемую $0{,}1\omega_0$) необходимо отключить от цепи ротора УПТ и подключить УПН. Для этого «сетевая» группа вентилей переводится в выпрямительный режим, а «роторная» – в инверторный. Частота напряжения на выходе роторной группы устанавливается равной текущей частоте ЭДС ротора, определяемой по величине текущего скольжения; амплитуда устанавливается на уровне, определяемом желаемым темпом увеличения скорости; фазовый сдвиг между напряжением на статоре и добавочным напряжением – на уровне, обеспечивающем требуемую перегрузочную способность МДП. По достижении заданной пороговой скорости, определяемой по тахограмме установки, *К2* размыкается, *К1* замыкается.

3) После подключения к ротору УПН амплитуда и частота напряжения на выходе ПЧ ротора непрерывно уменьшаются с уменьшением скольжения; при этом машина разгоняется до заданной скорости (если заданная скорость равна номинальной, то амплитуда напряжения на роторе уменьшается до 0). Машина выходит на заданную тахограммой подъемной установки скорость.

4) При начале замедления амплитуда напряжения на роторе начинает увеличиваться, машина начинает замедляться, частота добавочного напряжения на роторе равна частоте собственной ЭДС ротора и изменяется вместе со скольжением.

5) После достижения машиной скорости $0{,}5\omega_н$ машина переводится в режим частотной коррекции [5]. Замедление в таком режиме возможно до полного останова машины и наложения механического тормоза.

Выводы. Особенности разработанного электропривода заключаются в следующем.

Система автоматического регулирования скорости осуществляет управление скоростью и моментом двигателя за счет регулирования амплитуды, фазы и частоты добавочной ЭДС, вводимой в цепь ротора асинхронного двигателя, при этом достижим диапазон регулирования скорости 40:1 с сохранением требуемой перегрузочной способности, возможно регулирование потребляемой приводом реактивной мощности.

В двигательном режиме работы мощность скольжения АДФР через преобразователь частоты возвращается в питающую сеть, что обеспечивает существенную экономию электроэнергии.

Управление фазовым сдвигом добавочного напряжения в цепи ротора позволяет управлять фазовым сдвигом тока ротора относительно напряжения на статоре, что дает возможность вводить машину в режим генераторного торможения при скорости ниже синхронной с рекуперацией энергии в сеть.

Разработанная система электропривода может быть интегрирована в управляюще-вычислительный комплекс автоматизированного электропривода, разработанный ООО «НИИ АЭМ СибГИУ».

Существенным отличием данной схемы от существующих на данный момент решений [7, 8] является комбинированное управление УПН и УПТ с возможностью управления амплитудой, фазой и частотой добавочной ЭДС в цепи ротора. При этом частота ЭДС может задаваться как независимо, так и в функции скорости вращения ротора, что позволяет организовать работу машины как в синхронном, так и в асинхронном режиме с сохранением перегрузочной способности на всем диапазоне регулирования скорости. Экономия электрической энергии при этом составляет до 30% по сравнению со схемой электропривода с роторной станцией. При использовании предлагаемой схемы электропривода также повышается надежность электропривода за счет устранения динамических перегрузок в механической части.

Список литературы

1. Онищенко Г.Б. Асинхронный вентильный каскад. – М. : Энергия, 1967. – 152 с.

2. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. – Минск : ЗАО «Техноперспектива», 2006. – 363 с.

3. Поползин И.Ю. Электропривод подъемной установки с комбинированным управлением на основе машины двойного питания // Горное оборудование и электромеханика. – 2023. – №1 (165). – С. 18-23. – DOI: 10.26730/1816-4528-2023-1-18-23

4. Управляемый преобразователь тока для электропривода шахтной подъемной установки на основе машины двойного питания / В.Ю. Островлянчик, И.Ю. Поползин, Д.А. Маршев [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – №1. – С. 40 – 46.

5 Ostrovlyanchik V.Y., Popolzin I.Yu. Equivalent structure of a double-fed induction motor with a change in frequency of additional voltage for electric drive systems of mine winders // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 377. – 012041. – 9 p. – DOI: 10.1088/1755-1315/377/1/012041.

6. Ostrovlyanchik VYu., 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. – P. 1–9 (012040). – DOI: 10.1088/1755–1315/206/1/012040.

7. Иванцов В. В. Повышение энергоэффективности и производительности клетевой шахтной подъемной установки с использованием роторного частотного электропривода «ЭРАТОН-ФР» – ЗАО «ЭРАСИБ», 2011. – URL : https://erasib.ru/staty/hoist-eratonfr-efficiency/

8. Бежок В.Р. Шахтный подъем ; под общ. ред. Б.А. Грядущего и В.А. Корсуна. – Донецк : ООО «Юго-Восток ЛТД», 2007. – 624 с.

УДК 621.316.13

ВЛИЯНИЕ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ НА РАБОТУ ЧАСТОТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Жданов Е.В., Александров Н.А., к.т.н. Кубарев В.А.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье рассмотрено влияние различных типов провалов напряжения по продолжительности и напряжению на работу частотных преобразователей в горно-металлургической промышленности.

Ключевые слова: частотный преобразователь, провал напряжения, горно-металлургическая промышленность.

Горно-металлургические предприятия в последние годы активно повышают степень автоматизации производства: всё большее количество систем и механизмов модернизируются и оснащаются современными устройствами силовой электроники (частотные преобразователи, преобразователи постоянного тока, устройства плавного пуска и т.п.) и микропроцессорной техники (промышленные контроллеры, системы телемеханики, устройства релейной защиты и автоматики и т.п.). Перечисленные устройства обладают повышенными требованиями к качеству питающей электроэнергии и электромагнитной совместимости. В силу конструктивных и схемных особенностей данные потребители электрической энергии чувствительны к кратковременным нарушениям электроснабжения, называемыми провалами напряжения, длительностью порядка десятых долей секунды. Системы автоматического включения резерва и автоматического повторного включения срабатывают на временных интервалах порядка нескольких секунд. По этой причине может нарушаться работа чувствительных потребителей электроэнергии, что может вызывать сбои в работе технологических агрегатов с высокой степенью автоматизации.

Провалы напряжения обычно происходят из-за неисправностей в электрических сетях или в электроустановках потребителей, а также при подключении мощной нагрузки. Провал напряжения, как правило, связан с возникновением и окончанием короткого замыкания или иного резкого возрастания тока в системе или электроустановке, подключенной к электрической сети. Длительность провала напряжения может быть до 1 минуты. В трехфазных системах электроснабжения за начало провала напряжения принимают момент, когда напряжение хотя бы в одной из фаз падает ниже порогового значения начала провала напряжения, за окончание провала напряжения принимают момент, когда напряжение во всех фазах возрастает выше порогового значения окончания

провала напряжения. Пороговое значение начала провала напряжения принимают равным 90% опорного напряжения.

Влияние провалов напряжения на ход технологического процесса во многом зависит от его характера. Особенно ощутимое влияние провалы напряжения оказывают на непрерывные технологические процессы. Такие технологические процессы для останова и повторного пуска требуют длительного времени – от нескольких часов до нескольких суток при строгом соблюдении технологического регламента. Сложная технологическая цепочка выпуска продукции на таких производствах обычно включает множество аппаратов, в каждом из которых должны соблюдаться определенные значения параметров. Поддержание постоянства этих величин обеспечивается насосами, компрессорами, холодильниками, термостатами, мешалками, регулируемыми задвижками и другими механизмами, приводимыми во вращение электродвигателями. В некоторых случаях достаточно одному из таких механизмов остановиться или даже снизить свою производительность, как параметры технологического процесса превысят критические значения, и он будет остановлен системой противоаварийной автоматики. Возникающий при этом ущерб в лучшем случае выражается в браке части продукции, а в худшем – требуется полный останов технологического процесса и его последующая долгая наладка.

На горно-металлургических предприятиях ООО «ЕВРАЗ» используются частотные преобразователи Siemens, Schneider, Danfoss, Innovance, ABB. Наибольшее распространение получили частотные преобразователи фирмы Siemens, в том числе их последняя серия Sinamics (G130, G150, S120, S150). Данные преобразователи нашли свое применение в электрических приводах, где требуется регулирование скорости работы приводного двигателя, а также его частые пуски и остановы. На горно-металлургических предприятиях такими механизмами в первую очередь являются системы вентиляции, кондиционирования, водоснабжения, система откачки вод, конвейеры, подъёмники.

Корректная работа преобразователей частоты зависит от величины и времени провала напряжения. Непрерывная работа преобразователей Sinamics допустима в следующем диапазоне номинального напряжения питания: $0{,}9V_N \leq V_{Line} \leq 1{,}1V_N$. В этом диапазоне напряжения питания все вспомогательные устройства, питаемые напряжением 230 В от внутреннего преобразователя, работают в допустимых пределах, а вентиляторы способны полностью обеспечить поток охлаждающего воздуха, необходимый для силовых компонентов, в пределах допустимых частотных допусков. При более низком напряжении питания $0{,}9V_N \leq V_{Line} \leq V_N$. необходимо учитывать, что мощность привода уменьшается пропорционально напряжению питания. Если снижение мощности недопустимо, преобразователь и двигатель должны иметь резервы тока, чтобы компенсировать более низкое напряжение питания увеличенным входным током. Это может привести к необходимости увеличения размеров привода.

Чтобы объяснить поведение приводов Sinamics все возможные провалы напряжения питания по величине и продолжительности разделены на шесть различных диапазонов, названных от A до F. На диаграмме (рис. 1) эти диапазоны показаны для нерегулируемых входов Sinamics, при этом каждый диапазон соответствует различным граничным условиям и, следовательно, различному поведению привода.

Диапазон A включает провалы напряжения питания, величина которых находится в долгосрочном и краткосрочном диапазонах допустимых колебаний напряжения питания. Таким образом, перепады в диапазоне A допустимы с тем ограничением, что напряжение линии постоянного тока и мощность привода уменьшаются пропорционально величине перепадов напряжения питания.

Диапазон B включает в себя провалы напряжения питания, величина которых достигает значений $V_{Line}/V_N \approx 0{,}75$. Напряжение линии постоянного тока, пропорциональное напряжению питания, все еще превышает уровень отключения при пониженном напряжении в линии постоянного тока, но вспомогательные устройства, которые получают питание от внутреннего преобразователя напряжением 230 В перестают

работать через несколько миллисекунд. Таким образом, провалы в диапазоне B допустимы только в том случае, если питание вспомогательных устройств напряжением 230 В осуществляется от защищенного внешнего источника. Необходимо также принимать во внимание, что напряжение линии постоянного тока и мощность привода уменьшаются пропорционально величине падения напряжения питания.

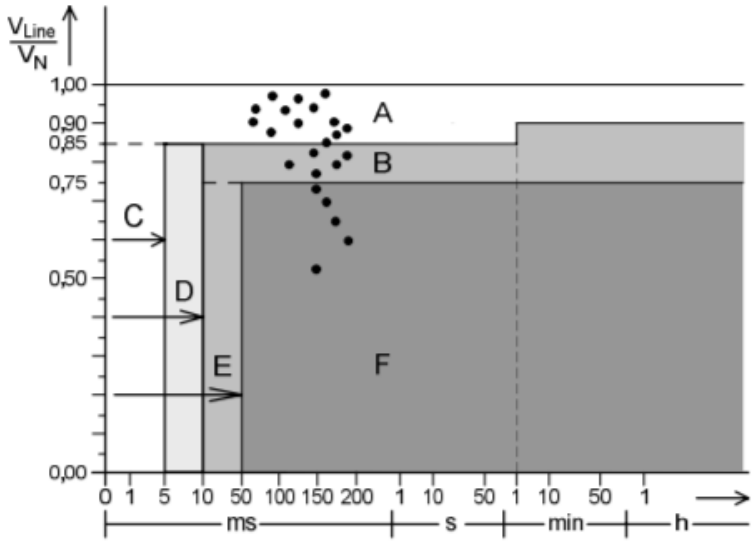


Рис. 1. Работа частотных преобразователей Siemens при различных провалах напряжения

Диапазон C включает в себя очень короткие провалы напряжения питания любой величины, продолжительность которых составляет до 5 мс. Во время этого со временем ток, требуемый нагрузкой, полностью вырабатывается конденсаторами линии постоянного тока, что приводит к снижению напряжения линии постоянного тока. В результате чрезвычайно короткой продолжительности провала напряжение линии постоянного тока все еще не достигает уровня отключения при пониженном напряжении даже при 100% нагрузке. Вспомогательные устройства, питаемые напряжением 230 В, также остаются в рабочем состоянии. Таким образом, провалы в диапазоне C из-за чрезвычайно короткой продолжительности допустимы без ограничений.

Диапазон D включает в себя очень короткие провалы напряжения питания любой величины, продолжительность которых составляет до 10 мс. Во время этого со временем ток, требуемый нагрузкой, полностью вырабатывается конденсаторами линии постоянного тока, что приводит к снижению напряжения линии постоянного тока. Напряжение линии постоянного тока не достигает уровня отключения при пониженном напряжении только в том случае, если линия постоянного тока разряжается медленнее, чем в диапазоне C. Таким образом, привод может работать с максимальной нагрузкой около 50 %. Из-за все еще относительно короткого времени провала можно предположить, что вспомогательные устройства, питаемые напряжением 230 В, останутся в рабочем состоянии. Таким образом, из-за очень короткой продолжительности допустимы провалы в диапазоне, при условии, что привод работает с частичной нагрузкой не более 50%.

Диапазон E включает кратковременные провалы напряжения питания любой величины, продолжительность которых составляет до 50 мс. В течение этого времени ток, необходимый нагрузке, полностью вырабатывается конденсаторами линии постоянного тока, в результате чего напряжение линии постоянного тока уменьшается. Напряжение линии постоянного тока не достигает уровня отключения при пониженном напряжении только в том случае, если линия постоянного тока разряжается медленнее, чем в диапазоне D. Таким образом, привод может работать только без нагрузки. Вспомогательные устройства, которые питаются напряжением 230 В непосредственно от источника питания через внутренний преобразователь не продолжают работать. Таким образом, провалы в

диапазоне E допустимы только в том случае, если вспомогательные устройства питаются от надежного внешнего источника питания и привод работает в режиме холостого хода.

Диапазон F включает в себя провалы напряжения питания, величина и продолжительность которых настолько велики, что, независимо от нагрузки, невозможно избежать аварийного отключения из-за пониженного напряжения в линии постоянного тока. Таким образом, провалы в диапазоне F недопустимы.

Полученные данные можно интерпретировать на частотные преобразователи других фирм, работа которых устроена тем же образом, что и у Sinamics.

Выводы. Таким образом, работа частотных преобразователей во многом зависит от качества питаемого напряжения и на особо важных горно-металлургических объектах, на которых остановка одного агрегата может повлиять на работу всего технологического комплекса, требуется разработка технических мероприятий, позволяющих минимизировать влияние провалов напряжения на работу частотных преобразователей.

Список литературы

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014.

2. Новости электротехники // Информационно-справочное издание. – 2004. – №5 (29). – URL: http://news.elteh.ru/arh/2004/29/06.php.

3. SINAMICS – Low Voltage Engineering Manual: 1st Edition. – Berlin and Munich: Siemens Aktiengesellschaft, 2014.

4. Семёнов А.С., Саввинов П.В., Рушкин Е.И. Внедрение частотно-регулируемых электроприводов как метод энергосбережения на горных предприятиях // Достижения и перспективы естественных и технических наук: сб. материалов II междунар. науч.-практ. конф. – Центр научного знания Логос, 2012. – С. 60-63.

УДК 621.314.26

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МАТРИЧНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ

Петрущенко А.Ю.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В данной статье рассмотрены основные подходы к управлению матричными преобразователями частоты с акцентом на генерацию синусоидального тока на входе и выходе. Анализируя различные методы управления, учитывается не только их эффективность, но и теоретическая сложность применения. Результаты исследования подтверждают, что выбор конкретного метода управления непосредственно влияет на характеристики резонанса входного фильтра матричного преобразователя частоты.

Ключевые слова: матричный преобразователь частоты, методы управления, скалярная модуляция, пространственно- векторная модуляция.

Матричный преобразователь частоты (МПЧ) представляет собой массив управляемых полупроводниковых переключателей, которые напрямую соединяют каждую входную фазу с каждой выходной фазой, без каких-либо промежуточных звеньев постоянного тока [1].

Основным преимуществом МПЧ является отсутствие громоздких реактивных элементов, которые подвержены старению и снижают надежность системы [2]. Более того, МПЧ обеспечивают двунаправленный поток мощности, почти синусоидальный вход и выход формы сигналов и контролируемый входной коэффициент мощности. Поэтому МПЧ

получили значительное внимание как хорошая альтернатива инвертору источника напряжения [3].

Разработка МПЧ началась, когда Алесина и Вентурини предложили основные принципы работы в начале 1980-х годов [4]. В дальнейшем исследования в этой области продолжились по двум направлениям. С одной стороны, возникла необходимость в надежных двунаправленных переключателях. С другой стороны, первоначальная стратегия модуляции была оставлена в пользу более современных решений, обеспечивающих более высокий коэффициент передачи напряжения и лучшее качество тока.

В оригинальной теории Алесины и Вентурини коэффициент передачи напряжения был ограничен 0,5, но позже было показано, что с помощью третьей гармоники методы инжекции, максимальный коэффициент передачи напряжения может быть увеличен до 0,866, значение, которое представляет собой внутреннее ограничение трехфазного МПЧ со сбалансированными напряжениями питания.

В исследовании [4] был представлен новый подход к управлению матричными преобразователями, который получил название «косвенный метод». Этот метод, впервые представленный в 1986 году, описывает МПЧ как виртуальную двухступенчатую систему, объединяющую трехфазный выпрямитель и трехфазный инвертор с помощью фиктивной цепи постоянного тока. Основная идея косвенного подхода заключается в использовании устойчивой пространственной векторной модуляции для VSI с целью полного управления процессом работы МПЧ. Исходно этот метод был предложен лишь для контроля выходного напряжения, однако в последствии он был совершенствован для обеспечения полного контроля входного коэффициента мощности, что позволяет наилучшим образом использовать входные напряжения и улучшить характеристики модуляции. Таким образом, косвенный метод стал ключевым инновационным решением в области управления матричными преобразователями, обеспечивая оптимальное использование ресурсов и повышение эффективности работы устройств.

Общее решение проблемы модуляции для МПЧ было основано на концепции «Вектора рабочего цикла», которая позволяет немедленное понимание всех степеней свободы, влияющих на стратегии модуляции.

Между тем, было представлено несколько исследований о двунаправленных переключателях. необходимые для построения матричного преобразователя. Первоначально переключатели были получены путем объединения дискретных компонентов. Тогда, как интерес к матричному преобразователю возрос, некоторые производители выпустили силовые модули, специально разработанные для матричных преобразователей. Что касается аппаратных компонентов, переключатели обычно представляют собой традиционные кремниевые IGBT, но недавно были протестированы и другие решения, такие как MCT или IGBT с диодами из карбида кремния.

Еще одна проблема, с которой столкнулись исследователи, это коммутация между двунаправленными переключателями. Отсутствие обратных диодов обязывает разработчика контролировать коммутацию, чтобы избегать коротких замыканий и перенапряжений.

Для получения хорошей производительности матричного преобразователя необходима также конструкция LC-фильтра для сглаживания входных токов и удовлетворения требований к электромагнитным помехам [5]. Было показано, что наличие резонансного L-C фильтра может определять явления нестабильности, которые могут помешать матричному преобразователю выдавать номинальную мощность на нагрузку. Возможное решение этой проблемы заключается в фильтрации входного напряжения перед вычислением рабочих циклов. Такой подход может способствовать увеличению предельной стабильной мощности и обеспечению максимального коэффициента передачи напряжения [6].

Для управления МПЧ применяется несколько алгоритмов. Многие алгоритмы скалярной модуляции позволяют в режиме реального времени регулировать коэффициент

передачи напряжения q в диапазоне от 0 до 0,5 [7]. Оптимизированный алгоритм Вентарини позволяет регулировать коэффициент передачи напряжения q в диапазоне от 0 до $\frac{\sqrt{3}}{2}$ за счёт использования в выходном фазном напряжении гармонической составляющей третьего порядка. Методы пространственно-векторной модуляции (ПВМ) также позволяют обеспечить максимальный коэффициент передачи напряжения q равный $\frac{\sqrt{3}}{2}$.

Понятие пространственного вектора играет ключевую роль в теории ПВМ. Оно представляет собой трехфазную систему векторов на комплексной плоскости. Для управления МПЧ с помощью хорошо известных алгоритмов ПВМ выпрямительной и инверторной частей двухзвенных преобразователей частоты, МПЧ был представлен в эквивалентной схеме, сочетающей выпрямитель и инвертор, связанные с помощью виртуального звена постоянного тока.

Из-за того, что ПВМ рассматривает три модулирующих сигнала или напряжения как единое целое, их векторная сумма известна как опорное напряжение U0ref. Это напряжение связано с величиной выходного напряжения переключающих топологий [8].

Для симметричной трехфазной системы синусоид мгновенные значения выходных напряжений могут быть представлены в виде:

$$[u_a(t);\ u_b(t);\ u_c(t)\ ] = [cos\omega_0 t; cos(\omega_0 t - 120°);\ cos(\omega_0 t - 240°)\ ]. \quad (1)$$

Представим в форме комплексного пространственного вектора:

$$\underline{U_0} = \frac{2}{3}\left[u_a(t) + u_b(t)e^{\frac{j2\pi}{3}} + u_c(t)e^{\frac{j4\pi}{3}}\right], \quad (2)$$

где $e^{j\psi_0 t} = cos\psi_0 t + jsin\psi_0 t$ – оператор фазового сдвига трехфазной системы; u_0 и ψ_0 – амплитуда и угол пространственного вектора выходного напряжения.

Подобно этому пространственно-векторное представление трехфазного входа имеет вид:

$$\underline{U_i} = \frac{2}{3}\left[u_A(t) + u_B(t)e^{\frac{j2\pi}{3}} + u_C(t)e^{\frac{j4\pi}{3}}\right] = u_i e^{j\psi_i t}, \quad (3)$$

где u_i и ψ_i – амплитуда и угол пространственного вектора входного напряжения.

Если к выходу преобразователя подключена симметричная трехфазная нагрузка, то пространственно-векторное представление выходных и входных токов будут иметь вид:

$$\underline{I_0} = \frac{2}{3}\left[i_a(t) + i_b(t)e^{\frac{j2\pi}{3}} + i_c(t)e^{\frac{j4\pi}{3}}\right] = i_0 e^{j\psi_0 t - \Theta_0}; \quad (4)$$

$$\underline{I_i} = \frac{2}{3}\left[i_A(t) + i_B(t)e^{\frac{j2\pi}{3}} + i_C(t)e^{\frac{j4\pi}{3}}\right] = i_i e^{j\psi_i t - \Theta_i}, \quad (5)$$

где Θ_0 – угол вектора выходного тока внутри сектора, а Θ_i – угол вектора входного тока внутри сектора.

Так как МПЧ непосредственно подключает нагрузку к источнику напряжения с помощью девяти двунаправленных ключей, то входные фазы никогда не должны быть закороченными, а из-за индуктивного характера нагрузки выходные фазы никогда не должны оставаться разомкнутыми.

Если переключающую функцию ключа Sxy определить как:

$$S_{xy} = \{1, S_{xy}\ \text{замкнут}\ ; 0, S_{xy}\ \text{разомкнут}\ x \in \{a, b, c\}, y \in \{A, B, C\}\ , \quad (6)$$

то данные ограничения могут быть выражены как SxA + SxB + SxC = 1.

При подключении трехфазных электродвигателей переменного тока к МПЧ для обеспечения правильной работы системы необходимо соблюдать определенное условие: из девяти ключей МПЧ всегда должны быть одновременно замкнуты три ключа, принадлежащих к разным фазам нагрузки [9]. Это условие позволяет получить двадцать семь разрешенных комбинаций открытых ключей. Для каждой комбинации можно выразить линейные напряжения на входе и на выходе в виде пространственных векторов, что представлено в табл. 1.

Таблица 1

Состояния ключей МПЧ

Г	№	В	К	Uab	Ubc	Uca	iA	iB	iC	U_0	ψ_0	Ii	ψi
I	1	+1	SAa,Bb,Bc	UAB	0	-UAB	ia	-ia	0	(2/3) UAB	0	$\frac{2}{\sqrt{3}}$ia	-π/6
	2	-1	SBa,Ab,Ac	-UAB	0	UAB	-ia	ia	0	-(2/3) UAB	0	-$\frac{2}{\sqrt{3}}$ia	-π/6
	3	+2	SBa,Cb,Cc	UBC	0	-UBC	0	ia	-ia	(2/3) UBC	0	$\frac{2}{\sqrt{3}}$ia	π/2
	4	-2	SCa,Bb,Bc	-UBC	0	UBC	0	-ia	ia	-(2/3) UBC	0	-$\frac{2}{\sqrt{3}}$ia	π/2
I	5	+3	SCa,Ab,Ac	UCA	0	-UCA	-ia	0	ia	(2/3) UCA	0	$\frac{2}{\sqrt{3}}$ia	7π/6
	6	-3	SAa,Cb,Cc	-UCA	0	UCA	ia	0	-ia	-(2/3) UCA	0	-$\frac{2}{\sqrt{3}}$ia	7π/6
	7	+4	SBa,Ab,Bc	-UAB	UAB	0	ib	-ib	0	(2/3) UAB	2π/3	$\frac{2}{\sqrt{3}}$ib	-π/6
	8	-4	SAa,Bb,Ac	UAB	-UAB	0	-ib	ib	0	-(2/3) UAB	2π/3	-$\frac{2}{\sqrt{3}}$ib	-π/6
	9	+5	SCa,Bb,Cc	-UBS	UBC	0	0	ib	-ib	(2/3) UBC	2π/3	$\frac{2}{\sqrt{3}}$ib	π/2
	10	-5	SBa,Cb,Bc	UBC	-UBC	0	0	-ib	ib	-(2/3) UBC	2π/3	-$\frac{2}{\sqrt{3}}$ib	π/2
	11	+6	SAa,Cb,Ac	-UCA	UCA	0	-ib	0	ib	(2/3) UCA	2π/3	$\frac{2}{\sqrt{3}}$ib	7π/6
	12	-6	SCa,Ab,Cc	UCA	-UCA	0	ib	0	-ib	-(2/3) UCA	2π/3	-$\frac{2}{\sqrt{3}}$ib	7π/6
	13	+7	SBa,Bb,Ac	0	-UAB	UAB	ic	-ic	0	(2/3) UAB	4π/3	$\frac{2}{\sqrt{3}}$ic	-π/6
	14	-7	SAa,Ab,Bc	0	UAB	-UAB	-ic	ic	0	-(2/3) UAB	4π/3	-$\frac{2}{\sqrt{3}}$ic	-π/6
	15	+8	SCa,Cb,Bc	0	-UBC	UBC	0	ic	-ic	(2/3) UBC	4π/3	$\frac{2}{\sqrt{3}}$ic	π/2
	16	-8	SBa,Bb,Cc	0	UBC	-UBC	0	-ic	ic	-(2/3) UBC	4π/3	-$\frac{2}{\sqrt{3}}$ic	π/2
	17	+9	SAa,Ab,Cc	0	-UCA	UCA	-ic	0	ic	(2/3) UCA	4π/3	$\frac{2}{\sqrt{3}}$ic	7π/6
	18	-9	SCa,Cb,Ac	0	UCA	-UCA	ic	0	-ic	-(2/3) UCA	4π/3	-$\frac{2}{\sqrt{3}}$ic	7π/6

Г	№	В	К	Uab	Ubc	Uca	iA	iB	iC	U_0	ψ_0	Ii	ψi
II	19	0	SAa,Ab,Ac	0	0	0	0	0	0	0	-	0	-
	20	0	SBa,Bb,Bc	0	0	0	0	0	0	0	-	0	-
	21	0	SCa,Cb,Cc	0	0	0	0	0	0	0	-	0	-
III	22	-	SAa,Bb,Cc	UAB	UBC	UCA	ia	ib	ic	ui	ψit	i_0	ψ_0t

Первая группа содержит восемнадцать комбинаций активных векторов выходного напряжения U0 и активных векторов входного Ii, имеющих фиксированное направление. Они имеют место, когда все три выходные фазы соединены каким-либо образом только с двумя входными фазами.

Вторая группа векторов, состоящая из трех комбинаций нулевых векторов выходного напряжения и входного тока, представляет собой интересный случай, когда все три фазы связаны только с одним из выходных фаз.

Третья группа векторов, хотя и не используется, представляет собой шесть комбинаций, где каждая выходная фаза соединена с одной из входных. В этом случае величина и фаза каждого из векторов являются переменными.

Выводы. В этой статье рассматриваются некоторые хорошо известные технологии управления, такие как метод Алесины-Вентурини и метод пространственных векторов. Теоретически оба метода эквивалентны друг другу. Систематически анализируется взаимосвязь между входным/выходным напряжением во временной области и входным/выходным опорным вектором в комплексном пространстве. Рабочий цикл каждого переключателя во временной области может быть представлен комбинацией пространственных векторов, и также устанавливается обратное преобразование

Список литературы

1. Полякова Л.Ю. Современные преобразователи частоты. – URL: www.rusnauka.com/Article/Tehnica/10-12/31.html.

2. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. – URL: http://ets.ifmo.ru/usolzev/SEITEN/konspekt/index.htm.

3. Direct DutyRatio Pulse Width Modulation Method for Matrix Converters / Yulong Li, Nam-Sup Choi, Byung-Moon Han [et al.] // International Journal of Control Automation and Systems. – 2008. – Vol. 6. – No. 5. – PP. 660-669.

4. Alesina A., Venturini M. Analisys and Design of Optimum Amplitude Nine-Switch Direct AC-AC Converters // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1989. – Vol. 4. No. 1.

5. Стыскин А.В., Уразбахтина Н.Г. Система управления асинхронного энергосберегающего электропривода // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. научн. тр. II всерос. научн.-техн. конф. В 2 т. Т. 1. – Уфа: УГНТУ, 2009.

6. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника: учеб. пособие для вузов. – М: МЭИ, 2009.

7. Силовая электроника - матричный преобразователь частоты – объект скалярного управления. – URL: http://www.power-e.ru/2009_3_31.

8. Issues of matrix converters: Technical review / Ruzlaini Ghoni, Ahmed N. Abdalla, S.P. Koh [et al.] // International Journal of the Physical Sciences. – 2011. – Vol. 6(15).

9. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоатомиздат, 1982.

УДК 621.3.051

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

к.т.н. Кузнецова Е.С., Богдановская Т.В., Игнатенко О.А.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Разработана имитационная модель подстанции 220/35/6 кВ. В работе было смоделировано десять различных режимов работы трансформатора в Matlab Simulink. Исследования показали, что подстанция работает эффективно и надежно во всех режимах и полученная модель подстанции может быть использована для оптимизации работы подстанции и повышения ее эффективности.

Ключевые слова: подстанция, модель, режим работы подстанции резкопеременная нагрузка, трансформатор, схема электроснабжения.

Одной из наиболее распространенных причин нарушения подачи электроэнергии на угледобывающие предприятия является отказ оборудования, что может привести к перегрузкам, короткому замыканию или пожару. Другой причиной может быть неправильно настроенная система, приводящая к неэффективной работе или отказу. Система электроснабжения современной крупной горнодобывающей компании представляет собой сложную комбинацию электрооборудования, включающую региональные электростанции, фидерные и распределительные сети 110-220 кВ и десятки понижающих подстанций.

В отличие от сети региональных энергосистем, потребители большой мощности сосредоточены в ограниченном районе угольного предприятия. Сеть 110-220 кВ работает в сложной замкнутой системе с относительно небольшой длиной линий, что позволяет широко изменять распределение передаваемой мощности в периоды нормального и технического обслуживания для снижения потерь электроэнергии, регулирования напряжения и ограничения токов короткого замыкания.

Подача электроэнергии на угледобывающее предприятие ограничена технологией горных работ, способом эксплуатации основного приемного оборудования, условиями работы электрооборудования и сети (полевые работы, значительная площадь и глубина угольного забоя, распределение приемного оборудования по всей площади и глубине горной выработки, систематическое движение горной техники, взрывные работы, значительная единичная мощность системы электроснабжения).

Для анализа различных режимов работы подстанции и оценки ее эффективность при различных условиях, в программе Matlab Simulink была разработана модель подстанции с глубоким вводом 220/35/6.

Для этого была создана схема подстанции, включающая основные элементы, такие как трансформаторы, выключатели, автоматические выключатели и реле. Кроме того, рассмотрены факторы, влияющие на работу подстанции, такие как напряжение, ток и частота.

Simulink – это мощный инструмент для моделирования и анализа систем. Он позволяет быстро и эффективно проектировать, тестировать и отлаживать системы до их внедрения в реальный мир.

С помощью программы моделирования Matlab Simulink были проведены различные исследования для оценки работы подстанции в различных ситуациях. Были смоделированы такие режимы работы, как номинальная нагрузка, перегрузка и короткое замыкание.

В Simulink эта модель представлена в виде блок-схемы, где каждый блок представляет элемент системы. Например, блок "сумматор" может использоваться для

сложения двух входных сигналов, а блок "интегратор" - для интегрирования сигналов. Блоки соединены линиями для передачи данных между ними.

Чтобы создать модель в Simulink, необходимо выбрать блоки из библиотеки Simulink и соединить их. Также можно создать свои собственные блоки, которые могут быть использованы в модели. После создания модели ее можно запустить и смоделировать в Simulink, чтобы увидеть, как она ведет себя в различных условиях.

Simulink также позволяет анализировать и оптимизировать модель. Можно провести анализ стабильности системы или определить наилучшие параметры системы для достижения заданной цели. Это может повысить производительность и эффективность системы.

На схеме (рис. 1) представлено два трансформатора со схемой обмоток звезда/треугольник, питающие воздушные линии (ВЛЭП), отходящие кабельные линии (КЛ) и сопротивления нагрузки.

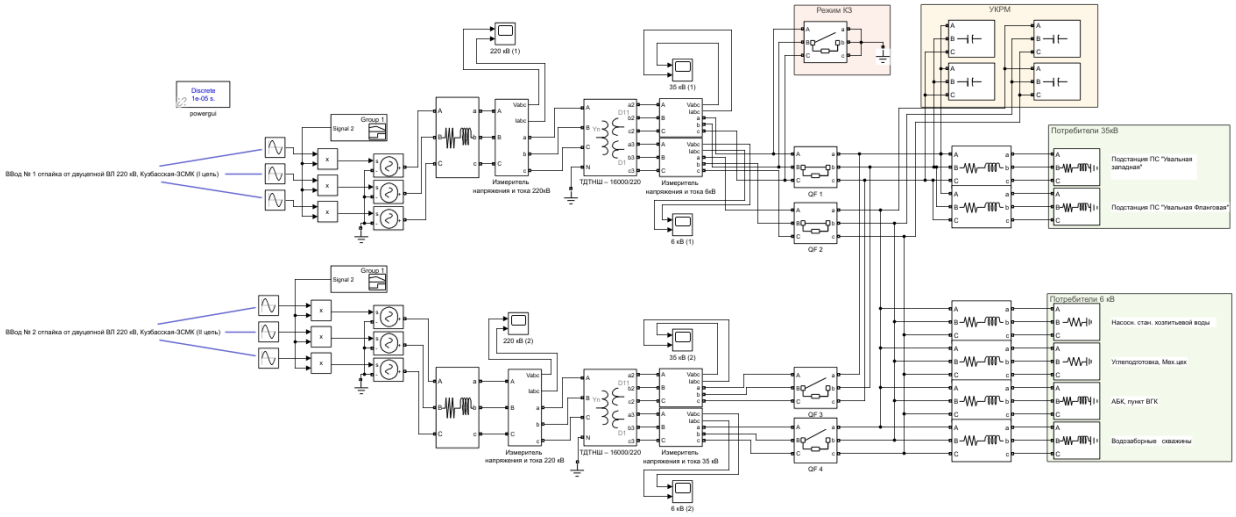


Рис. 1. Принципиальная схема подстанции в среде MatLab Simulink

В работе было смоделировано десять различных режимов работы трансформатора в Matlab Simulink:

– режим холостого хода характеризуется работой трансформатора в режиме холостого хода;

– нормальный режим работы;

– аварийный режим работы трансформатора, который возникает при падении напряжения на 15% на линии электропередачи 110 кВ;

– режим короткого замыкания (вторичная обмотка замкнута накоротко);

– режим короткого замыкания (вторичная обмотка короткозамкнута в обеих фазах);

– режим короткого замыкания ARC (дугового короткого замыкания).

– режим перенапряжения;

– режим тока утечки;

– режим фазового замыкания;

– режим фазного замыкания из-за короткого замыкания на землю.

При моделировании трансформатора важно убедиться, что параметры модели соответствуют параметрам реального трансформатора. Это позволит сделать модель более точной, а результаты - более надежными.

Для анализа результатов моделирования можно использовать различные инструменты Matlab, такие как графики и таблицы. Эти инструменты позволяют визуализировать параметры трансформатора в разное время и на разных частотах.

Анализ осциллограмм (рис. 2-11) позволяет диагностировать электрооборудование, выявлять неисправности и определять причины аварий.

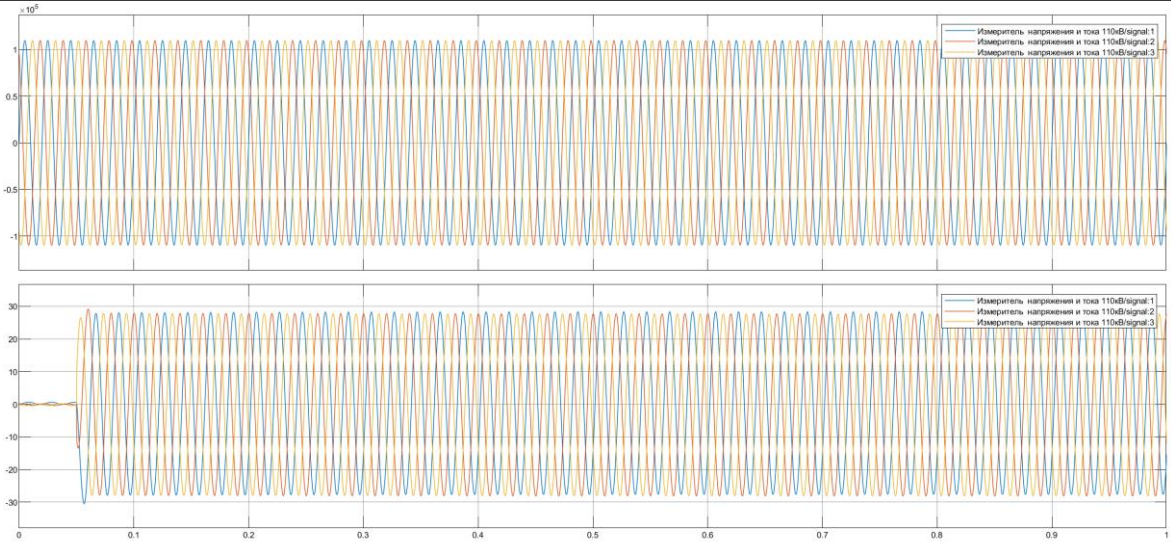


Рис. 2. Осциллограмма тока и напряжения на линии 220 кВ Т1 холостой ход и нагрузка

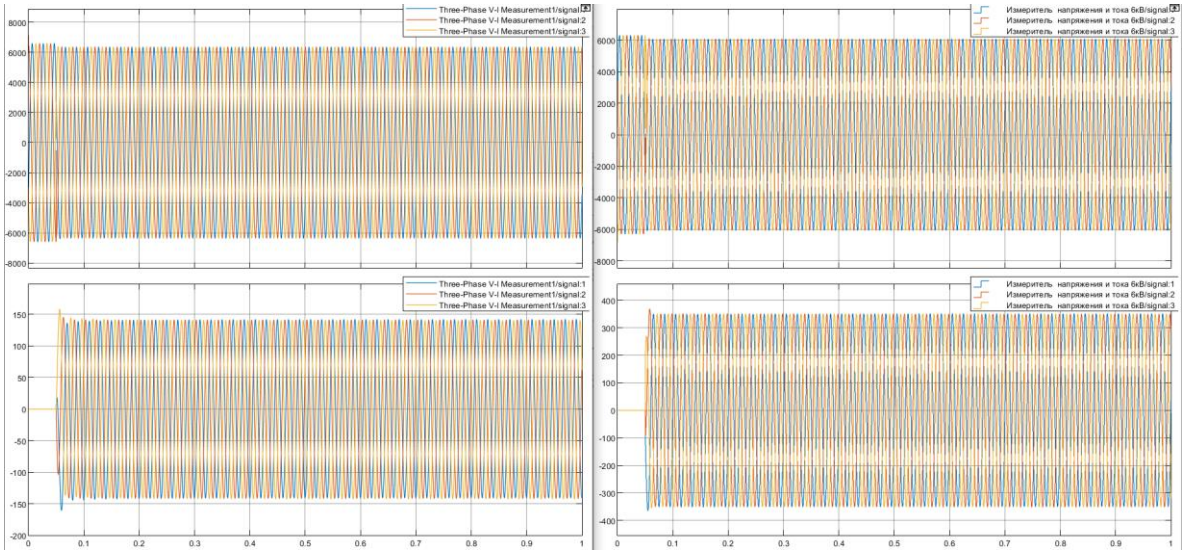


Рис. 3. Осциллограмма тока и напряжения на линии 35 кВ и 6 кВ Т1 холостой ход и нагрузка

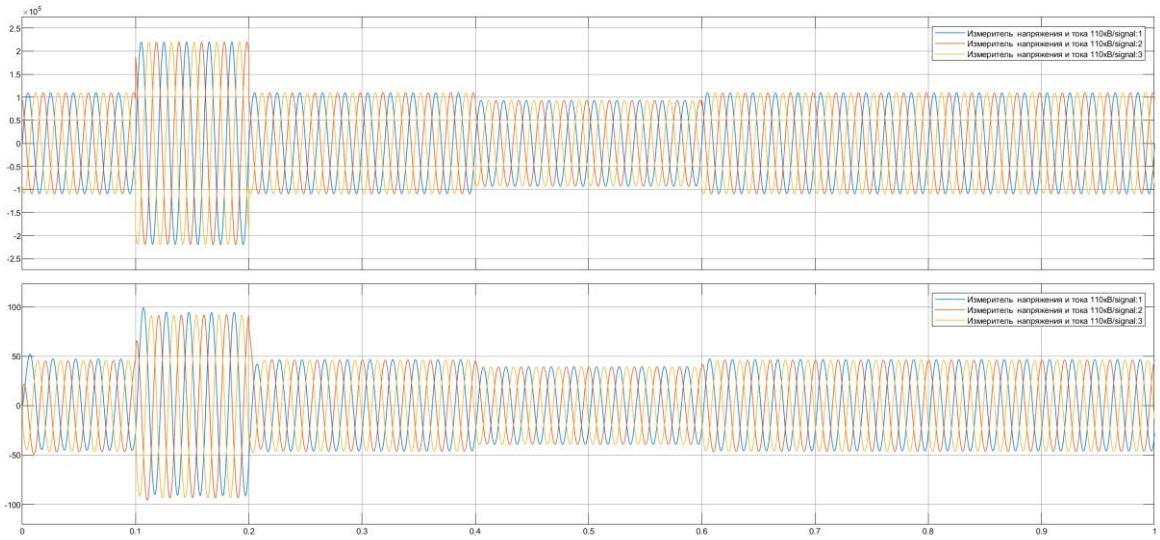


Рис. 4. Осциллограмма тока и напряжения на линии 220 кВ Т1 скачок и просадка напряжения

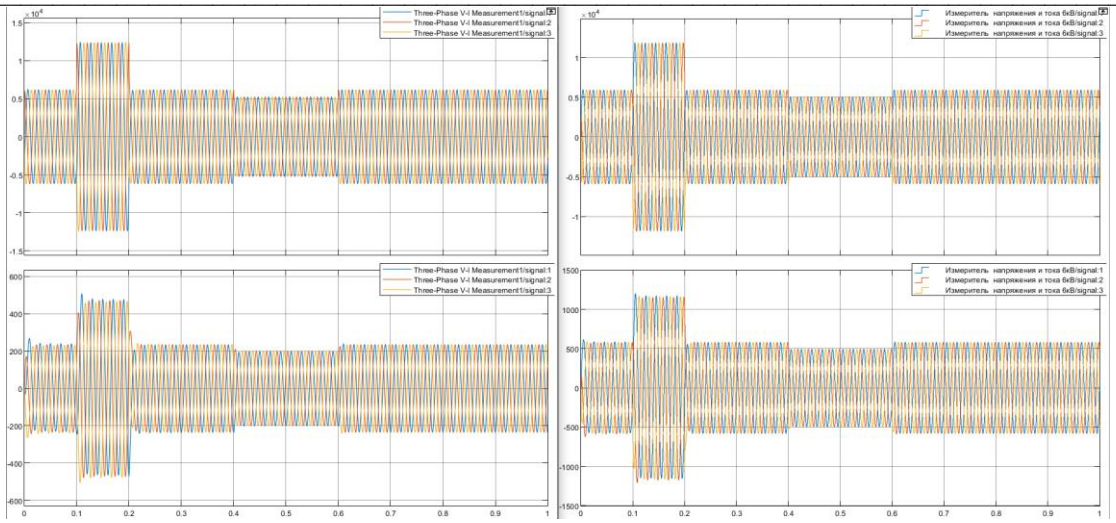


Рис. 5. Осциллограмма тока и напряжения на линии 35 кВ и 6 кВ Т1 скачок и просадка напряжения

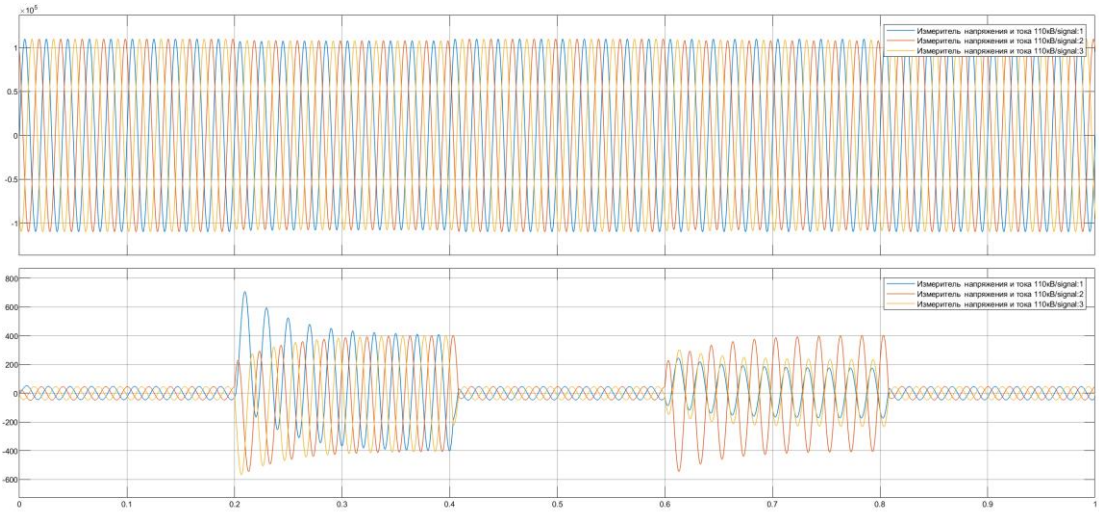


Рис. 6. Осциллограмма тока и напряжения на линии 220 кВ Т1 короткое замыкание всех фаз и одной

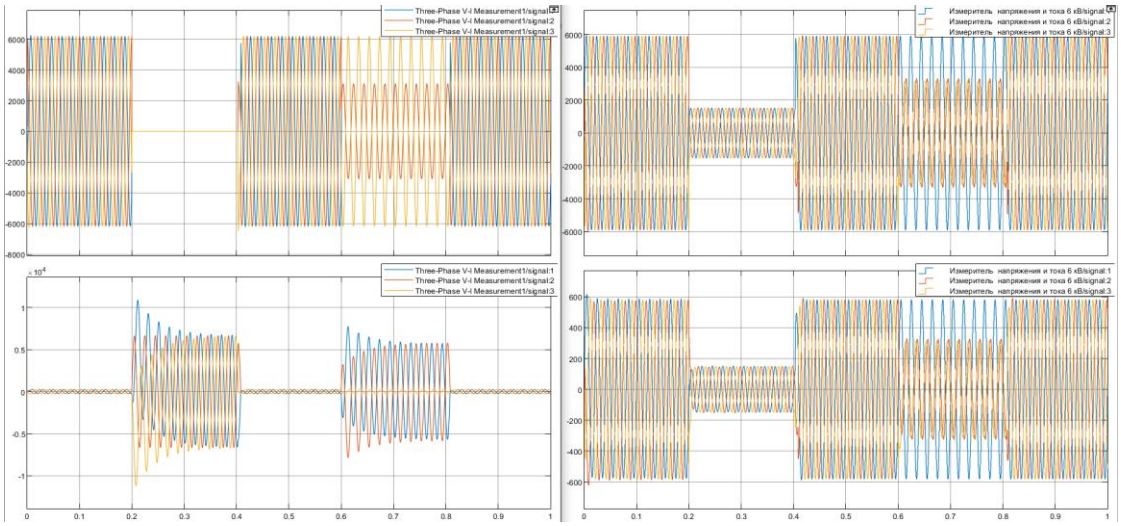


Рис. 7. Осциллограмма тока и напряжения на линии 35 кВ и 6 кВ Т1 короткое замыкание всех фаз и одной

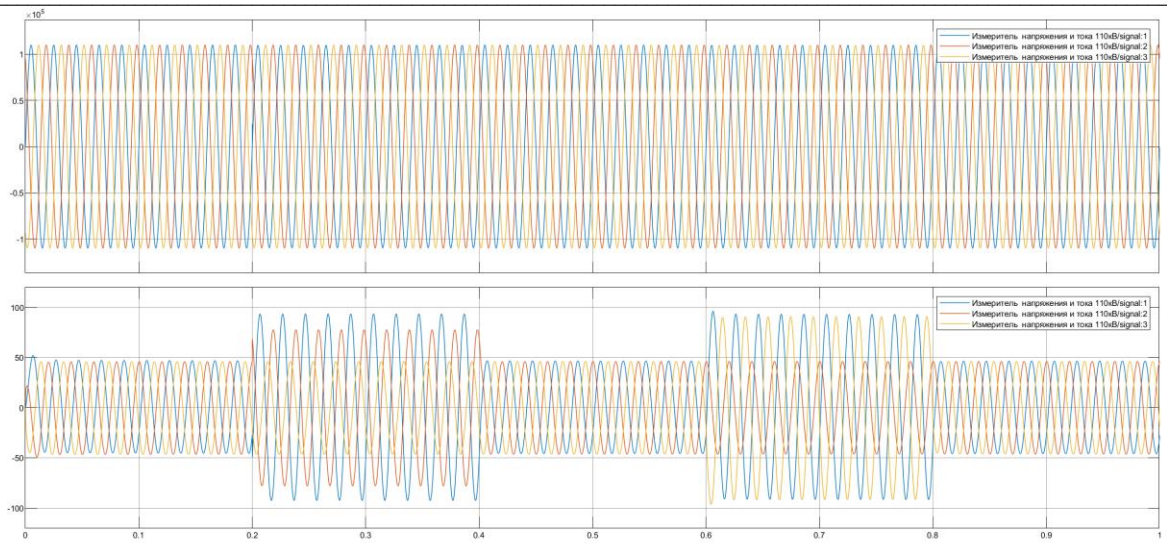


Рис. 8. Осциллограмма тока и напряжения на линии 220 кВ Т1 дуговое замыкание и утечка тока

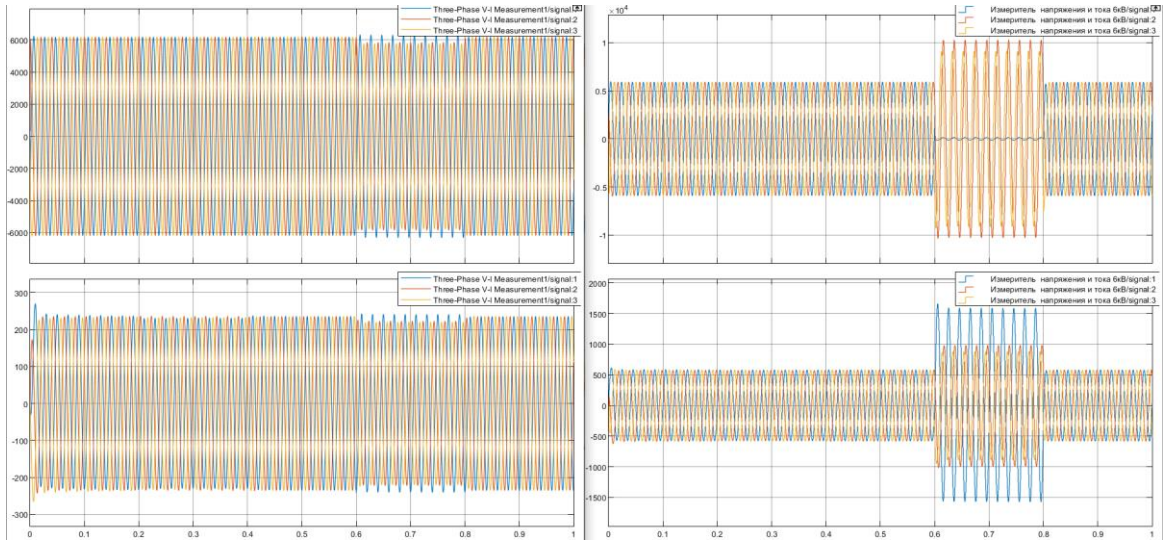


Рис. 9. Осциллограмма тока и напряжения на линии 35 кВ и 6 кВ Т1 дуговое замыкание и утечка тока

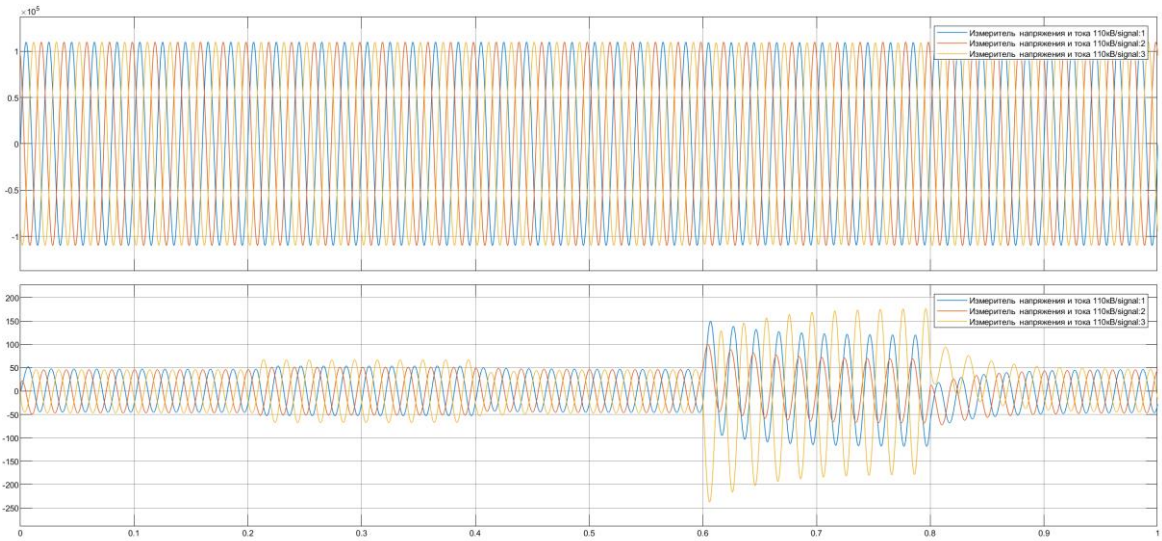


Рис. 10. Осциллограмма тока и напряжения на линии 220 кВ Т1 обрыв фазы без и с замыканием на массу

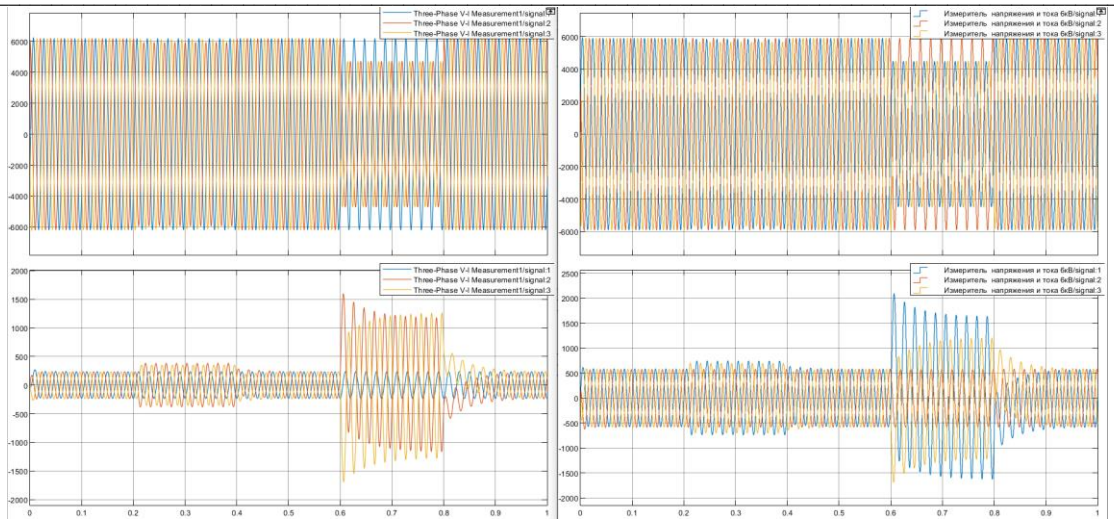


Рис. 11. Осциллограмма тока и напряжения на линии 35 кВ и 6 кВ Т1 обрыв фазы без и с замыканием на массу

Выводы. Исследования показали, что подстанция работает эффективно и надежно во всех режимах, а имитационная модель может быть использована для оптимизации работы подстанции и повышения ее эффективности.

Таким образом, используя модель подстанции, разработанную в программе MATLAB SIMULINK, можно проанализировать работу подстанции, оценить ее эффективность при различных условиях и использовать для улучшения работы подстанции и повышения ее эффективности.

Список литературы

1. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. для студентов высших учебных заведений. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. –672 с.

2. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

3. Кончакова О.В., Кузнецов В.А., Кузнецова Е.С. Разработка модели мини-ТЭЦ в MATLAB // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды девятой науч.-практ. конф., 25-26 ноября 2020 г. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2020. – С. 108-117.

4. Кузнецов В.А., Кузнецова Е.С., Видинеев А.А. Разработка модели подстанции 110/6 кв в среде «Матлаб – Симулинк» // Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей XXII междунар. науч.-практ. конф., 5 ноября 2021 г. – Пенза : МЦНС «Наука и просвещение», 2021. – С. 42–47.

УДК 621.31

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА МОЩНЫХ ИМПУЛЬСА НА БАЗЕ КОНТРОЛЛЕРА

Кузнецова Е.С., Арбузов И.С.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Показана реализация системы управления генератора, в которой в качестве объекта управления используется модель, реализованная в программном пакете MatLab. Управление осуществляется посредством алгоритмов, работающих на контроллере. Для передачи данных служит набор повсеместно принятых спецификаций (технология OPC).

Ключевые слова: генератор мощных импульсов тока, система автоматического регулирования параметров генератора, технология OPC, технологическое программирование, моделирование в Simulink, программная реализация.

В горнодобывающей промышленности существует ряд производственных процессов, связанных с разрушением негабаритов горных пород, откола породы от массива, бурение скважин при проходке выработки, дробление и измельчение породы при обогащении руды и т.д. Для выполнения такого рода задач обычно используются взрывчатые вещества (ВВ) и механические способы разрушения [1]. Несмотря на широкий ряд достоинств традиционных методов разрушения, все они имеют свои недостатки. Например, применение взрывчатых веществ экологически небезопасно и требует эвакуации персонала из зоны возможного поражения, что приводит к остановке других работ.

По этим причинам возрастает актуальность поиска альтернативных способов разрушения, обладающих высокой эффективностью и низкими удельными энергозатратами при разрушении. Многочисленные исследования, проводимые различными научными центрами в крупных странах, неоднократно демонстрировали достоинства электроразрядной технологии для разрушения твердых материалов [4]

Необходимым условием развития процесса разрушения является передача некоторого количества энергии разрушаемой среде от внешних источников. В основе электроразрядного способа разрушения лежит использование энергии, выделяемой в плазменном канале электрического разряда при протекании через него мощного импульса тока. Для таких целей нам потребуется генератор. В статье будет описана программная реализация силовой схемы управления.

Любой сигнал Simulink модели может быть передан на сервер и, соответственно, может быть передан в контроллер или в любое приложение, поддерживающее стандарт OPC. OPC-сервер является основным компонентом, обеспечивающим передачу данных между средой моделирования, контроллером и внешними программами.

Общая структурная схема представлена на рис. 1.

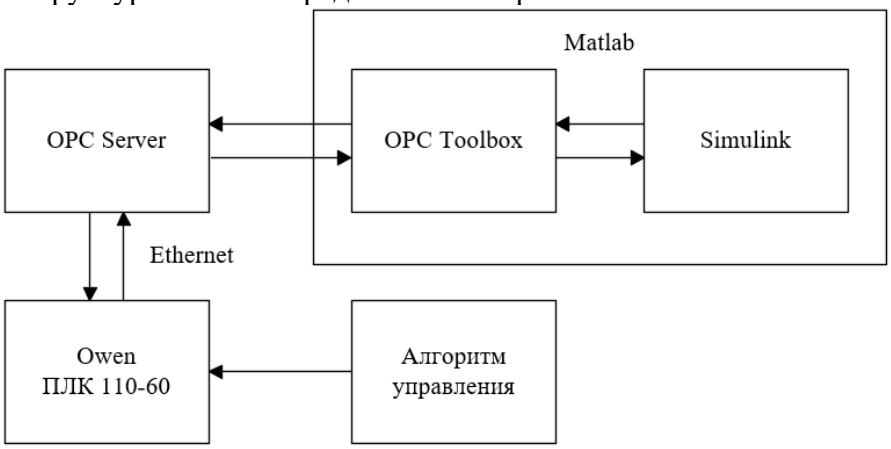


Рис. 1. Структурная схема системы

Математическая модель реализована в приложении Simulink как совокупность функциональных блоков и связей между ними. Модель состоит из силовой схемы генератора. На рис. 2 показана функциональная схема модели генератора. От контроллера модель получает управляющий сигналы на IGBT транзисторы. Через нижний транзистор происходит нарастание требуемого тока. И при отключение всех транзисторов происходит разрядка в цепь нагрузки.

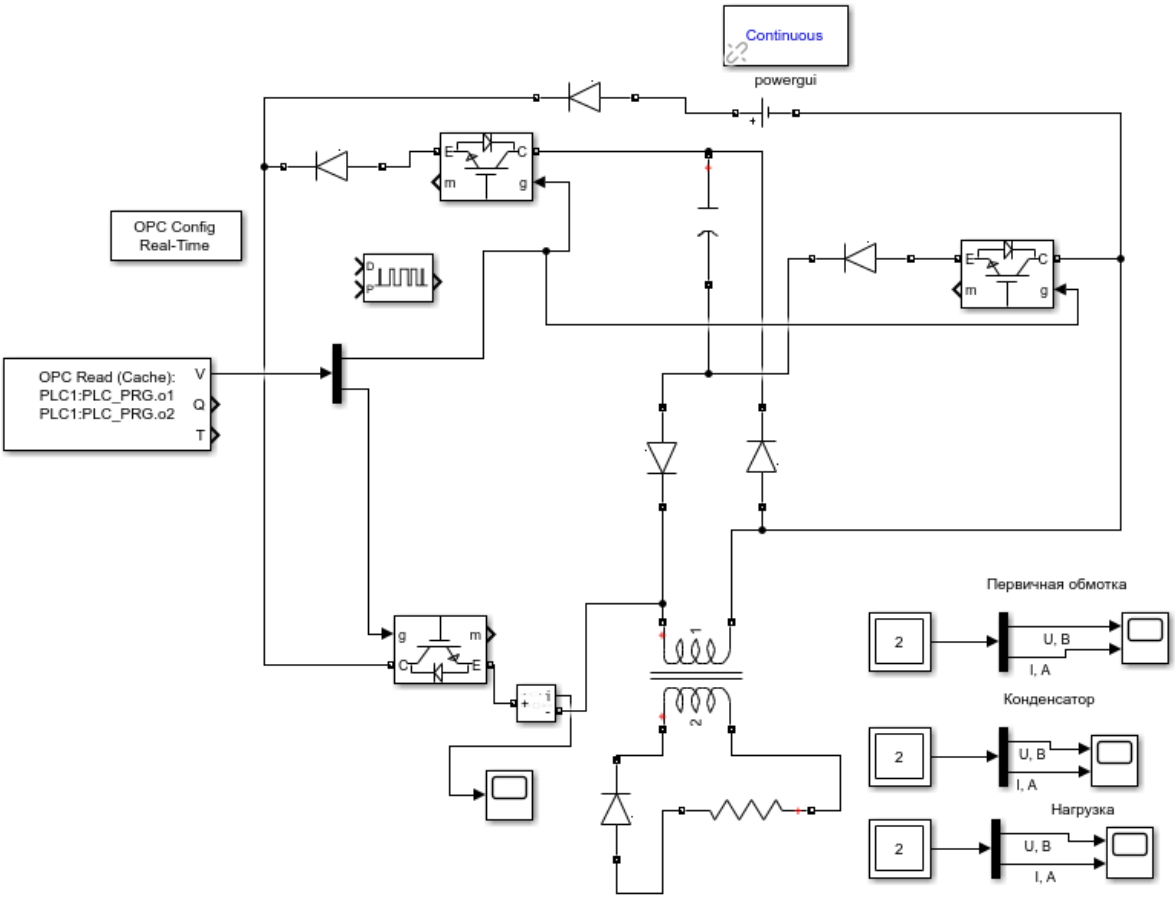


Рис. 2. Функциональная схема генератора

В качестве контроллера выбран ОВЕН ПЛК110-60. Данное устройство широко распространено в промышленности, имеет удобную среду разработки алгоритмов управления CodeSys. Часть кода программы представлена на рис. 3. Программа представляет собой два генератора импульсов, с одинаковым периодом, но разной длительностью импульса.

```
0001 FUNCTION_BLOCK generator
0002 VAR_INPUT
0003     ssMethodType: SINT;
0004 END_VAR
0005 VAR_OUTPUT
0006     Out1,Out2: BOOL;
0007 END_VAR
0008 VAR
0009
0010     clockTickCounter_e: DINT;
0011     clockTickCounter: DINT;
0012 END_VAR
```

```
0001 CASE ssMethodType OF
0002 0:  plc_ts_counter1 := 0;
0003     clockTickCounter := 0;
0004     clockTickCounter_e := 0;
0005 1:  Out1 := (clockTickCounter < 1) AND (clockTickCounter >= 0);
0006     IF clockTickCounter >= 19 THEN
0007         clockTickCounter := 0;
0008     ELSE
0009         clockTickCounter := clockTickCounter + 1;
0010     END_IF;
0011     IF plc_ts_counter1 = 0 THEN
0012         Out2 := (clockTickCounter_e < 1) AND (clockTickCounter_e >= 0);
0013     IF clockTickCounter_e >= 4 THEN
0014         clockTickCounter_e := 0;
0015     ELSE
0016         clockTickCounter_e := clockTickCounter_e + 1;
0017     END_IF;
0018     END_IF;
0019     IF plc_ts_counter1 >= 3 THEN
0020         plc_ts_counter1 := 0;
0021     ELSE
0022         plc_ts_counter1 := plc_ts_counter1 + 1;
0023     END_IF;
0024 END_CASE;
```

Рис. 3 – Листинг кода в ПЛК

Разрабатываемая система позволит перейти от математических моделей к их программным аналогам, работающим на определенной аппаратной платформе. Возможна также доработка системы, которая предполагает реализацию возможности конфигурирования.

Список литературы

1. Протасов Ю.И. Разрушение горных пород. – М.: Горная книга, 2001. – 453 с

2. Бухаров Р.А., Дмитриева В.В. Микропроцессорная система управления скоростью движения ленты конвейера // Научный вестник Московского государственного горного университета. – 2010. – № 6. – С. 67-71.

3. Прима А.И., Войтенко Н.В. Электроразрядные методы разрушения // Проблемы геологии и освоения недр : тр. XX междунар. симпозиума им. акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета: в 2 томах, Томск, 04–08 апреля 2016 года. Том 2. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016. – С. 622-624.

4. Кузнецов В.А., Кузнецова Е.С., Перегудов О.А. Электромеханическая установка на базе генератора мощных токовых импульсов = Electromechanical installation based on high power current pulse generator // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2020. – Т. 63. – № 9. – С. 755–762.

ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СУВЕРЕНИТЕТ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

УДК 622.814

НЕОБХОДИМОСТЬ РАЗРАБОТКИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА И ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЁТА НОРМАЛЬНОГО И АВАРИЙНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ УГОЛЬНЫХ ШАХТ ПРИ ВЗРЫВАХ МЕТАНА И УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В НЕСТАЦИОНАРНОЙ ПОСТАНОВКЕ

д.т.н. Палеев Д.Ю.
Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия

Аннотация. В статье обосновывается необходимость совершенствования существующих методов проектирования вентиляции угольных шахт, учитывающих переходные процессы при нарушении их проветривании. Анализируются существующие математические модели и применяемые в России программные комплексы в стационарной и нестационарной постановках. Показано, что все они обладают одним общим недостатком - раздельно решают вопросы вентиляции, взрыва и распространения ударных волн по сети горных выработок, применяя устаревшие методы их решения. Предлагается начать разработку нового программного комплекса, в основе которого должна лежать идея учета нестационарных процессов взаимодействия вентиляционного потока с газодинамическими возмущениями, возникающими как при нормальной работе шахты, так и при взрыве метана и угольной пыли. Сформулированы проблемы, возникающие при разработке такого комплекса и задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели.

***Ключевые слова*:** шахта, горные выработки, выемочный участок, взрыв, ударная волна, метан, угольная пыль, вентиляция, газодинамический метод, программный комплекс.

Постановка проблемы. Важнейшая роль в обеспечении функционирования угольных шахт в нормальных и аварийных условиях принадлежит шахтной вентиляции. Основное ее назначение – обеспечение очистных забоев, подготовительных выработок и других потребителей требуемым количеством воздуха для создания санитарно-гигиенических норм на содержание примесей в атмосфере. Ни в одной отрасли современной промышленности задача обеспечения рабочих мест санитарно-гигиеническими атмосферными условиями не является столь важной, а вместе с тем и такой сложной, как в горном деле, так как не только здоровье и производительность труда, но и сама жизнь шахтеров часто зависит от того, насколько удовлетворительно разрешена задача проветривания угольной шахты [1].

Методы проектирования вентиляции угольных шахт, применяемые в настоящее время, учитывают большое количество факторов, влияющих на состав и чистоту атмосферы шахты. Особое внимание обращается на метановыделение и аэродинамические связи различных участков горных выработок. Современные методы проектирования позволяют создавать схемы и режимы проветривания, обеспечивающие поддержание в горных выработках состава атмосферы, регламентированного нормативными документами [2]. Однако при нарушении проветривания, которое может возникнуть при нормальном функционировании шахты, и особенно при авариях, пожарах, взрывах, внезапных выбросах большого количества метана и т.д. эти методы становятся непригодными, так как основаны на решении стационарных уравнений. При нарушении проветривания вентиляционная сеть шахты в течение некоторого промежутка времени переходит из одного устойчивого (стационарного) состояния в другое. Именно в результате такого переходного (нестационарного) периода и происходит загазование горных выработок до сверхнормативных концентраций. Для предотвращения подобных аварийных ситуаций, имеющих катастрофические последствия, необходима разработка методов их

моделирования, по результатам которых можно прогнозировать как изменение аэрогазовой обстановки в выработках, так и разрабатывать способы и приемы их предотвращения.

В настоящее время все расчеты проветривания угольных шахт проводятся на основе стационарного подхода в предположении несжимаемости среды. В его основе лежат алгебраические соотношения [3, 4] и расчет нестационарных процессов вентиляции становится принципиально невозможным. Поэтому разработка газодинамических методов расчета нестационарных процессов вентиляции, в том числе методов, позволяющих анализировать изменение вентиляции в аварийных ситуациях и, особенно, при распространении взрыва метана и угольной пыли по горным выработкам, является актуальной.

Цель статьи – разработка газодинамического метода и программного комплекса расчёта потокораспределения в вентиляционной сети горных выработок при нормальных и аварийных режимах работы шахты.

Идея статьи – учет нестационарных процессов взаимодействия вентиляционного потока с газодинамическими возмущениями, возникающих в угольной шахте, в том числе при взрывах метана и угольной пыли.

Стационарные методы расчета. Вентиляционная сеть угольной шахты состоит из двух сильно различающихся видов макрообъектов – сети горных выработок и выработанного пространства, которые работают исключительно как единая система (рис. 1). Различие же обуславливается их пространственной структурой, скоростью и видом протекающих процессов. Различны и математически модели, описывающие эти процессы. Сложность их сопряжения приводит к тому, что наибольшее внимание всегда уделяется проветриванию горных выработок в стационарной постановке, а выработанное пространство учитывается редко и лишь в крайне упрощенном виде.

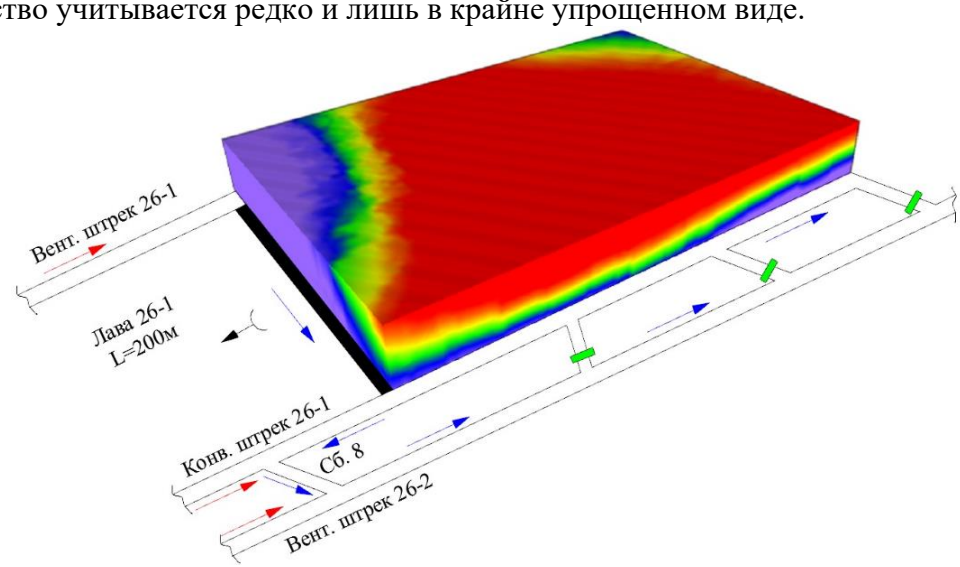


Рис. 1. Модель очистного участка угольной шахты с распределением метана в выработанном пространств

В последнее время разработан ряд программных комплексов [5-9], позволяющих надежно и быстро производить расчеты стационарного воздухораспределения в горных выработках на основе решения сетевой вентиляционной задачи, базирующейся в основном на методе контурных расходов, использующих теорию графов и включающих в себя различные методы приближений к искомому результату (метод Ньютона или Андрияшева). В них математическая модель вентиляционной сети представляется в виде ориентированного графа $G = \{E, V\}$, где E – множество его ветвей, а V – множество его узлов. Ветви данного графа – это отрезки горных выработок, характеризуемые длиной, площадью поперечного сечения, периметром, аэродинамическим сопротивлением и расходом воздуха. Узлы – сопряжения горных выработок. Этот метод требует сортировки

массива ветвей в порядке возрастания их аэродинамических сопротивлений и определения линейно независимых контуров.

Существует также достаточное количество работ, посвященных модификациям метода стационарного расчета воздухораспределения, учитывающих местные аэродинамические сопротивления [10-13], различные термодинамические факторы (естественную тягу, тепловую депрессию, влажность) [12, 14-17], в том числе сжимаемость и инерционность воздуха [16], повышающих точность проводимых расчетов.

Учет выработанного пространства. Выработанное пространство угольных шахт всегда является коллектором метана. Под влиянием целого ряда природных и технологических факторов этот метан поступает в действующие выработки, влияя на интенсивность и безопасность работ в шахте. Неоднородность свойств и параметров выработанного пространства по всем трем направлениям (мощности, падению и простиранию) – его пористости, проницаемости, размеров кусков обрушенной породы – формируют сложную аэродинамическую картину. Ее прогнозирование требуется для управления вентиляцией выемочного участка, включая аварийные режимы, проектирования эффективных систем управления газовыделением и решения других практических задач. Выработанные пространства становятся важным элементом шахтной вентиляционной сети. Поэтому корректный расчет воздухораспределения в горных выработках невозможен без вовлечения выработанного пространства в общую схему расчета. Чтобы решить эту проблему выработанные пространства угольных шахт в практических расчетах проветривания часто учитываются путем введения произвольного числа фиктивных выработок в обрушенной среде, имитирующих утечки (притечки) рудничного воздуха без строгого обоснования.

Первоначально задачи фильтрации газа в выработанном пространстве решались на основе эмпирических соотношений [18], а затем, с расширением возможностей вычислительной техники, в одно-, двух- и трехмерных постановках [19-21]. Поскольку фильтрационное движение газа в обрушенной среде выработанного пространства относится к пространственному типу течений и поэтому в строгом подходе должно описываться системой трехмерных уравнений газовой динамики. В работах [22-24] предложен единый алгоритм расчета воздухораспределения в вентиляционной сети горных выработок и пространственной фильтрации газа с двучленным законом сопротивления в выработанном пространстве. Фильтрация газа рассчитывается на основе классических уравнений газовой динамики на прямоугольной разностной сетке, которая рассматривается как ориентированный связный граф, ветви которого в отличии от ветвей графа вентиляционной сети несут дополнительную информацию об их ориентации относительно координатных осей. Это дало возможность перейти от дифференциальных уравнений к алгебраическим, полностью вписывающимися в классическую задачу распределения воздуха в сети выработок, записанную в рамках 1-го и 2-го законов Кирхгофа. В [23] разработан алгоритм, позволяющий объединить две модели «Геомеханика» СибГИУ [25] и «Вентиляция» [22, 24] и рассчитывать фильтрацию в выработанном пространстве, которое является элементом вентиляционной сети шахты. Таким образом, представление выработанного пространства в виде сети узлов и ветвей дает возможность включать в эту сеть любые технологические решения и ситуации, связанные с управлением газовыделением, выбором способов, схем и режимов проветривания. В результате у горных инженеров появляется возможность рассчитывать в стационарной постановке на компьютере различные варианты проветривания не только шахты, но и выемочного участка и получать пространственные поля фильтрационных утечек от линии очистного забоя до монтажной камеры.

Нестационарные методы расчета вентиляции. При нарушении вентиляции установление стационарного режима быстро не происходит, так как при сокращении расхода воздуха в выработках с интенсивным выделением метана ещё долго может

продолжаться в нестационарном режиме процесс их загазования и перенос повышенных концентраций метана по вентиляционной сети. Такая же проблема возникает при расчёте других аварийных режимов (реверсия вентиляторов главного проветривания, пожар, взрыв), когда по выработкам перемещаются потоки с переменной плотностью. Применение стационарных методов является некорректным и приводит к неверным результатам. В то же время разработка нестационарных методов расчёта вентиляции шахты (одномерная постановка) и фильтрации метана в обрушенных и деформированных средах выработанного пространства (трехмерная постановка), учитывающих влияние тепло- и массообменных процессов при возникновении аварийных ситуаций, является непростой задачей. В наиболее строгой постановке нестационарная физико-математическая модель накопления и перемещения метана в горных выработках и выработанных пространствах угольной шахты была апробирована в [26-31]. Предложенная модель позволяет рассчитывать распределение метана по всему выработанному пространству с учетом конкретных горногеологических условий, различных схем проветривания, дегазации и отвода метана.

В [30] были проведены расчеты для выработанного пространства шириной 230 м, длиной 200 м и высотой 14 м. Задавались величины и направления потоков массы газа в сечениях сбоек, конвейерного, вентиляционного штреков, расход массы метановоздушной смеси в скважину и суммарная величина метановыделения в выработанное пространство. Это позволило выявить условия, при которых газоотсасывающая установка перестаёт эффективно перераспределять потоки в выемочном участке. Так, в зоне метановыделения уменьшение плотности газа и увеличение скорости потока при практически неизменном давлении приводит к изменению его температуры, которая увеличивается пропорционально объему метана, поступающего в выработку.

Проведено моделирование различных способов управления аэрогазодинамическими процессами в обрушенной среде выработанного пространства. Расчёты показали, что скорости движения газа в верхней части выработанного пространства несколько выше, чем у его основания. При подработке пласта-спутника выше и концентрация метана в верхней части выработанного пространства. Поэтому при работе дегазационной скважины в неё преимущественно подтекает газ с более высокой концентрацией метана из верхних областей выработанного пространства. Под действием сил давления он, как менее инерционный, быстрее перемещается к устью скважины, формируя под ней область в виде воронки повышенной концентрации метана. Для оптимизации расположения дегазационных скважин и уменьшения затрат на их бурение, проектирование и эксплуатацию дегазационных сетей, оценки запасов метана, оценки производительности и эффективности добычи метана был предложен набор задач, необходимых для моделирования дегазационной сети шахты (рис. 2).

Вместе с тем практика применения нестационарных математических моделей для моделирования аварийного проветривания угольных шахт выявила и их существенный недостаток – низкую скорость расчетов. Так, расчет аварийного воздухораспределения при развитии очага пожара длительностью 200 с на замкнутом участке протяженностью ~170 м занимает на персональном компьютере около 25 минут реального времени. Подобные временные масштабы считаются нормальными при проведении научно-исследовательских расчетов, но слишком большими при проведении экспертной работы и совершенно неприемлемыми для оперативного использования при аварии в шахте. Поэтому необходима разработка специальных методов ускорения вычислений, учитывающих особенности моделируемых процессов.

Нестационарные методы расчета взрывов. В угольных шахтах очень опасны взрывы, возникающие в ходе ведения горноспасательных работ, когда при нарушенном проветривании существует угроза быстрого формирования зон с высокой концентрацией метана вблизи источников высокой температуры. Для расчёта распространения воздушных

ударных волн в сложной разветвлённой сети горных выработок были разработаны методика, основанная на численном решении системы нестационарных уравнений газовой динамики [32, 33], и программный комплекс «Ударная волна» [34]. Это дало возможность описать процесс распространения ударных волн одновременно по всем выработкам, с учетом таких эффектов, как усиление и ослабление волн при их взаимодействии между собой, отражение волн в тупиках, влияние волн разрежения, а также взаимодействие ударных волн с различными защитными сооружениями и горным оборудованием.

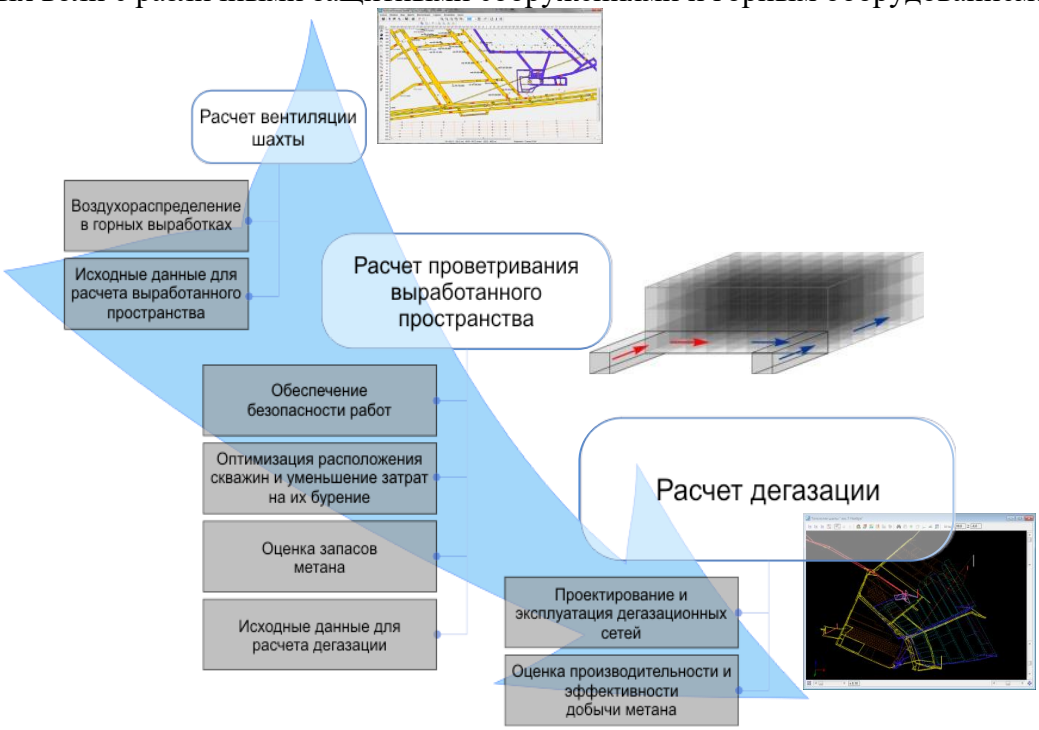


Рис. 2. Набор задач, решаемых при моделировании дегазационной сети шахты

Программный комплекс «Ударная волна» является первым и пока единственным программным комплексом, который основывается на численном решении нестационарных уравнений газовой динамики. С 2003 года он используется на всех угольных шахтах России, в ВГСЧ и в проектных институтах при разработке Планов ликвидации аварий, во время ликвидации аварий и ведении технических работ, а также при проектировании противоаварийной защиты шахт. Этот программный комплекс корректно рассчитывает распространение по горным выработкам ударных волн с последующим их затуханием при взрыве метановоздушной смеси.

Исследования на математических моделях показали, что главным определяющим фактором, влияющим на характер взрыва, является расположение очага взрыва (горные выработка или выработанное пространство) и топология сопредельных с местом взрыва действующих, изолированных или погашенных выработок и выработанных пространств. В зависимости от этого главного фактора и будут развиваться дальнейшие события: разгон фронта ударной волны, волновое взаимодействие распространяющихся по горным выработкам ударных волн и колебательные процессы в выработанном пространстве, вызывающие вытеснение из него больших объемов метана. Воспламенение и взрыв газовых смесей в обрушенной среде выработанного пространства не приводит к образованию сильных ударных волн. Из-за демпфирующего влияния выработанного пространства, которое проявляется в большом сопротивлении обрушенной среды и огромной площади соприкосновения с ней газового потока, температура продуктов взрыва быстро падает, падает давление и скорость расширяющихся газов. Поэтому для получения полной картины взрыва Методика [33] и программный комплекс [34] должны быть дополнены возможностью расчета выработанного пространства в нестационарной постановке.

В последние годы на угольных шахтах при взрывах метана начала принимать участие и угольная пыль, отложившаяся на стенках горных выработок. В результате ударная волна получает дополнительную подпитку энергией и способна распространяться на очень большие расстояния, вплоть до выхода на поверхность. Математическое описание такого процесса в нестационарной постановке резко усложняется. Возрастает и машинное время, затрачиваемое на численный расчет такого взрыва. Физико-математическая модель распространения волны горения газопылевой среды в прямолинейной горной выработке, сформулированная с учетом основных особенностей этого процесса, предложена в [35].

Тестирование модели было проведено на решении ряда более простых задач. Рассматривалась задача о сгорании угольной пыли в постоянном объеме, когда задавалось равномерное распределение угольной пыли и движение газопылевой смеси не возникает. После сгорания угольной пыли была получена равновесная температура, которая отличается от термодинамической на 0.2%. Решена задача о распространении взрывной волны в выработке, на стенках которой имеется негорючая пыль. При расчетах контролировалось выполнимость законов сохранения массы, массы угольной и инертной пыли и полной энергии. К сожалению, эта модель не подходит для быстрых расчетов в условиях ликвидации подземных аварий. Она нуждается в разумном упрощении без существенной потери точности результатов, получаемых за более короткое время.

Программный комплекс расчета нестационарных процессов при авариях. В мире разрабатываются различные компьютерные программы и методы расчёта нормального и аварийного функционирования угольного предприятия. Они применимы для расчёта, как правило, одного класса задач, обладают определёнными достоинствами и недостатками, в разной степени используя графические возможности современных компьютеров. Однако они обладают одним общим недостатком - раздельно решают вопросы вентиляции, взрыва и распространения ударных волн по сети горных выработок, применяя устаревшие методы их решения. Неэффективность раздельного подхода, как и стационарный расчет вентиляции, обусловлена тем, что процессы проветривания, формирования пожаров, воспламенения метана и угольной пыли изменяются во времени, часто взаимосвязаны и следуют один из другого. Пожар всегда приводит к появлению тепловой депрессии, которая, играя роль источника дополнительной тяги, может изменить направление вентиляционной струи и создать условия для опасного повышения концентрации метана в горных выработках с потенциальной угрозой взрыва. Взрыв, в свою очередь, приводит к разрушению вентиляционных и изолирующих сооружений и резко изменяет режим проветривания аварийного участка и всей шахты в целом. Такой сценарий развития аварийной ситуации требует знания нестационарных процессов, возникающих при взаимодействии вентиляционных потоков с газодинамическими возмущениями от взрыва метана и угольной пыли. Расчет нового потокораспределения с учетом разрушенных взрывом вентиляционных и изолирующих сооружений, как и изменение во времени давления, температуры, концентрации метана и продуктов взрыва в горных выработках практически не изучены и имеют первостепенное значение при ликвидации аварийных ситуаций в угольных шахтах в ходе ведения горноспасательных работ.

В России сейчас применяются на всех угольных шахтах, в ВГСЧ и в проектных институтах программы расчета вентиляции в стационарной постановке [5, 6] и программа расчета взрыва метановоздушной смеси в нестационарной постановке [34]. В соответствии с вышеизложенным, угольной промышленности уже сейчас необходима разработка газодинамического метода и программного комплекса расчёта потокораспределения в вентиляционной сети горных выработок при взрывах метана и угольной пыли. В его основе должна лежать идея учета нестационарных процессов взаимодействия вентиляционного потока с газодинамическими возмущениями от взрыва метана и угольной пыли. Для достижения поставленной цели предлагается решить следующие задачи:

– дополнить существующую программу стационарной вентиляции модулем расчета фильтрации в выработанном пространстве, сделав её базовой для обеспечения графической и числовой информацией разрабатываемый программный комплекс;

– доработать газодинамическую модель и метод расчета нормального и аварийного потокораспределения в вентиляционной сети горных выработок и в выработанном пространстве в нестационарной постановке с учетом тепломассообмена;

– доработать газодинамическую модель и метод расчета параметров воздушных ударных волн и зон поражения при взрывах метана и угольной пыли в горных выработках;

– разработать газодинамический метод расчета нормального и аварийного потокораспределения при взрывах метана и угольной пыли;

– разработать «Методику расчёта нормального и аварийного потокораспределения в вентиляционной сети горных выработок при взрывах метана и угольной пыли»;

– разработать программный комплекс, реализующий «Методику расчета нормального и аварийного расчёта потокораспределения в вентиляционной сети горных выработок при взрывах метана и угольной пыли».

Выводы. Сложность разработки программного комплекса нового типа заключается не только в численной реализации системы нестационарных уравнений газовой динамики, включающей горение метана и угольной пыли и их взрыва, но и в необходимости сокращения времени расчета на персональном компьютере до пределов, позволяющих быстро проводить оперативные расчеты в ходе ликвидации аварии. Такой программный комплекс необходим при разработке Планов ликвидации аварий, составлении оперативных планов во время ликвидации аварий и ведения технических работ, а также при проектировании противоаварийной защиты шахт.

Список литературы

1. Воронин В.Н. Основы рудничной аэрогазодинамики. – М.-Л.: Углетехиздат, 1951. – 492 с.

2. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт: утв. 15 августа 1989 г. – Макеевка-Донбасс, 1989. – 319 с.

3. Kirchhoff G. Ueber die Auflosung de Gleichungen, auf welche man bei Untersuchung der linearen Vertheilung, galvanische Strome gefuhrt wird // Ltipzig; Annalen der Physic und Chemie. – 1847. – Vol. 12. – PP. 497-508.

4. Андрияшев М.М. Техника расчета водопроводной сети. – М., Л. Министерство коммунального хозяйства РСФСР, 1949. – 110 с.

5. Разработка программно-вычислительного комплекса «Аэросеть» для вентиляционных сетей шахт и рудников / Б.П. Казаков, Ю.В. Круглов, А.Г. Исаевич [и др.] // Неделя горняка: сб. науч. тр. по материалам симпозиума. – М.: Изд-во Московского горного университета, 2006. – 240 с.

6. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю. Программа расчета вентиляционных режимов в шахтах и рудниках // Горная промышленность. – 2007 – № 6 (76). – С. 20-23.

7. Автоматизированное рабочее место для решения проблем проветривания шахт / И.Е. Болбат, С.Б. Романченко, М.В. Кравченко [и др.] // Уголь Украины. – 1992. – № 11. – С. 33-36.

8. Иванов В.В., Рязанцев Г.К. Проветривание шахт и рудников с учетом аэротермодинамики. – Алма-Ата, Наука Казахской ССР, 1989. – 144 с.

9. Руководство по эксплуатации программной системы РЕВОД. Версия 4.2. – Донецк: Академия горных наук Украины, Донбасский научный центр, 1999. – 71 с.

10. Иванников А.Л. Математическое моделирование шахтных вентиляционных сетей, содержащих выработки с неустойчивым проветриванием: дисс. … канд. техн. наук. – Москва, 2009. – 127 с.

11. Веденеева Л.М. Исследование аэродинамических процессов в местных сопротивлениях и их влияния на воздухораспределение в вентиляционных сетях с большим эквивалентным отверстием: автореф. дисс. … канд. техн. наук. – Пермь, 1995. – 17 с.

12. Шалимов А.В. Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников: дисс. … д-р техн. наук. – Пермь, 2012. – С. 32-45.

13. Семин М.А. Обоснование параметров систем вентиляции рудников в реверсивных режимах проветривания: дисс. … канд. техн. наук. – Пермь, 2016. – 151 с.

14. Дударь Е.С., Дударь О.И., Мохирев Н.Н. Расчет параметров микроклимата с учетом конденсации влаги в рудничной вентиляционной сети // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 5. – С. 331-344.

15. Зайцев А.В. Разработка способов нормализации микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников: дисс. … канд. техн. наук. – Пермь, 2013. – 170 с.

16. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Разработка математических методов прогнозирования микроклиматических условий в сети горных выработок произвольной топологии // Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых. – 2014. – № 5. – С. 154-161.

17. Левин Л.Ю., Палеев Д.Ю., Семин М.А. Расчет устойчивости воздушных потоков в выработках шахтных вентилояционных сетей по фактору тепловой депрессии // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2020. – № 1. – С. 81-85.

18. Милетич А.Ф. Аэродинамическое управление газовым режимом в шахтных вентиляционных сетях. – М.: Недра, 1968. – 146 с.

19. Клебанов Ф.С. Аэродинамическое управление газовым режимом в шахтных вентиляционных сетях. – М.: Наука, 1974. – 136 с.

20. Фельдман Л.П. Исследование нестационарного движения газовой смеси в выработанном пространстве участка численными методами. – Киев: Техника, 1974. – Вып. 36. – С. 137-143.

21. Палеев Д.Ю. Брабандер О.П. Математическое моделирование активного воздействия на взрывоопасные области и очаги горения в угольных шахтах // Томск: Изд-во Томского ун-та, 1999. – 202 с.

22. Палеев Д.Ю. Сетевая задача проветривания горных выработок и выработанного пространства шахт // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2006. – № 5 (56). – С. 58-62.

23. Методология моделирования фильтрации газовоздушных смесей в выработанном пространстве выемочного участка / Ю.М. Говорухин, А.Н. Домрачев, В.Г. Криволапов [и др.] // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2011. – № 1.– С. 72.

24. Палеев Д.Ю. Балаганский М.Ю., Кнышенко А.Н. О численном методе решения стационарной задачи проветривания горных выработок и выработанного пространства шахты // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2010. – № 1. – С. 31-34.

25. Златицкая Ю.Ф., Фрянов В.Н. Геомеханическое обоснование параметров опасных зон и технологии упрочнения пород в окрестности подземных горных выработок // Новокузнецк: СибГИУ. – 2006. – 160 с.

26. Ващилов В.В. Разработка газодинамической модели и метода расчета нестационарных режимов проветривания угольных шахт: дисс. … канд. техн. наук. – Кемерово, 2010. – 126 с.

27. Палеев Д.Ю., Ващилов В.В. Изменение характеристик вентиляционного потока в горных выработках под влиянием работы вентилятора // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2006. – № 6-1 (57). – С. 23-27.

28. Васенин И.М., Палеев Д.Ю., Ващилов В.В. Изменение характеристик вентиляционного потока при его реверсировании // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2006. – № 6-1 (57). – С. 11-14.

29. Ващилов В.В. Палеев Д.Ю. Изменение характеристик вентиляционного потока при пожаре // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2009. – № 2. – С. 128-132.

30. Численное моделирование пространственного распределения метана в выработанном пространстве / Д.Ю. Палеев, И.М. Васенин, Э.Р. Шрагер [и др.] // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: тр. конф. 28 июня-2 июля 2010 г. В III т. Т. II. Геотехнологии. – Новосибирск: Ин-т горного дела СО РАН, 2010. – С. 367-372.

31. Математическая модель нестационарных аэротермодинамических процессов в выработках и в обрушенной среде выработанных пространств угольной шахты / И.М. Васенин, А.Ю. Крайнов, Э.Р. Шрагер [и др.] // Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент: материалы 6-й международной конференции. – Астана: Изд-во ЕНУ. 2008. – С. 165-169.

32. Математическое моделирование горения и взрыва высокоэнергетических систем / И.М. Васенин, Э.Р. Шрагер, А.Ю. Крайнов [и др.]. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2006. – 322 с.

33. Газодинамический метод расчета взрывобезопасных расстояний / Д.Ю. Палеев, И.М. Васенин, Э.Р. Шрагер [и др.] // Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах: материалы IV межд. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2000. – С. 152-154.

34. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю., Крайнов А.Ю. Программный комплекс для расчета распространения ударных волн по горным выработкам // Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах: материалы IV межд. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2000. – С. 151-143.

35. Моделирование распространения ударных волн от взрыва и горения газопылевой смеси в угольных шахтах / Д.Ю. Палеев, О.Ю. Лукашов, И.М. Васенин [и др.] // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2017. – № 3. – С. 371-377.

УДК 622.831.322

ОПЕРАТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПАСНОСТИ ДЛЯ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА, ОСНОВАННЫХ НА СПЕКТРАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ «ШУМА» РАБОТАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

д.т.н. Шадрин А.В.

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

Аннотация. Приведено обоснование оперативных методов определения критического (порогового) значения показателя опасности проявления геодинамических явлений в угольных шахтах для методов прогноза по медиане спектра и по отношению высокочастотной и низкочастотной компонент спектра «шума» комбайна на основе данных, полученных при одновременном прогнозе по спектру «шума» и инструментальным методом.

Ключевые слова: геодинамические явления, геофизические и инструментальные методы прогноза, спектральный анализ «шума» работающего оборудования, показатели опасности, медиана спектра, высокочастотная и низкочастотная компоненты спектра, достоверность прогноза.

Введение. Геодинамические явления (ГДЯ) в угольных шахтах опасны своими катастрофическими последствиями. Начиная с некоторой глубины они происходят практически во всех угольных бассейнах мира: России, Украины, Китая, Казахстана, США, Австралии, Польши и др. [1-7]. На глубинах, ниже критической по конкретному виду ГДЯ (горный удар или внезапный выброс угля и газа, или прочие явления), применяется текущий прогноз опасности. Методы текущего прогноза подразделяются на геомеханические (традиционное их название инструментальные) и геофизические. Последние требуют «настройки» критериев опасности, например, с помощью данных, предоставляемых геомеханическим методами прогноза [8]. Поскольку геомеханические методы имеют различные алгоритмы определения показателя выбросоопасности и характеризуются разной достоверностью прогноза [9], достоверность одних и тех же геофизических методов, но использующих для «настройки» разные геомеханические методы, также будет различной.

Благодаря тому, что геофизические методы требуют значительно меньше времени на их выполнение и ведут прогноз в процессе проведения выработки, когда возникает наибольшая опасность, в отличие от инструментальных методов, требующих остановки горных работ для взятия проб угля и/или газа, они находят все большее применение.

В последнее время в качестве геофизических для прогноза горных ударов и внезапных выбросов широко применяется метод «по параметрам искусственного акустического сигнала» [10]. Данный метод реализуется путем спектрального анализа «шума» работающего комбайна и основан на том, что с увеличением горного давления высокочастотные гармоники затухают менее сильно, чем низкочастотные. Поэтому при приближении к зонам повышенного горного давления показатель опасности в форме отношения амплитуд специальным образом выделенных высокочастотных и низкочастотных областей спектра возрастает [11-13].

Одним из недостатков указанного метода прогноза является неучет спектральных составляющих, расположенных вне низкочастотной и высокочастотной областей. Для устранения этого недостатка предложен метод прогноза, в котором напряженное состояние оценивается по медиане всего рабочего спектра «шума» комбайна, - она с возрастанием горного давления также возрастает [14].

Одной из сложностей использования указанных методов прогноза, основанных на спектральном анализе «шума» оборудования, является определение для них критического значения показателя опасности.

Цель данной работы: обосновать два алгоритма определения критического значения показателей опасности для методов прогноза по медиане спектра и по отношению высокочастотной и низкочастотной компонент спектра шума комбайна.

Первый алгоритм осуществляется путем усреднения текущих значений показателей опасности за 30 циклов ведения выработки по неопасному участку.

Второй алгоритм основан на сравнении для одного и того же участка пласта текущих и критических значений показателей опасности методов прогноза по медиане спектра и по отношению высокочастотной и низкочастотной компонент спектра шума комбайна с показателем опасности, определенным инструментальным методом.

Применяемое оборудование. Для регистрации параметров «шума» комбайна рассматривается применение аппаратуры «Микон-Гео» с тремя одновременно подключенными сейсмоприемниками. Для уменьшения влияния интерференции различных типов волн по мере удаления сейсмоприемника от забоя выработки в качестве показателя опасности проявления ГДЯ рассчитывается усредненное по трем сейсмоприемникам значение коэффициента относительных и усредненное по трем сейсмоприемникам значение медианы спектра.

Обозначения: $f_{м,т}$ и $f_{м,кр}$ – соответственно текущее и критическое значения медианы спектра; $K_{он,т}$ и $K_{он,кр}$ – соответственно текущее и критическое значения коэффициента

относительных напряжений. В нашем случае рассчитываем значения $K_{он,т}$ и $K_{он,кр}$ отдельно для упрощенного и усложненного вариантов определения низкочастотной и высокочастотной областей.

Для выделения низкочастотной и высокочастотной областей рабочий диапазон сейсмоприемников в соответствии с [10] разбивают на три октавные окна. В спектре сигнала определяют гармонику с максимальной амплитудой A_{max}, рассчитывают значения $0{,}75A_{max}$ и $0{,}5A_{max}$.

В упрощенном варианте в качестве низкочастотной области выбираются гармоники, расположенные левее гармоники с A_{max} в промежутке между гармониками с $0{,}75A_{max}$ и $0{,}5A_{max}$. В качестве высокочастотной области принимаются все октавные окна, находящиеся правее окна с A_{max}.

В усложненном варианте низкочастотная область выбирается, так же, как и в упрощенном варианте. В качестве высокочастотной области выбираются гармоники, расположенные правее гармоники с A_{max} в промежутке между гармониками с $0{,}75A_{max}$ и $0{,}5A_{max}$.

Текущими значениями $f_{м,т}$ и $K_{он,т}$ являются значения этих показателей, определенные в течения одного цикла проведения выработки – между операциями крепления боков выработки. Если в течение одного цикла ведения выработки были определены текущие значения показателей в течение нескольких временных интервалов, текущее значение этих показателей за один цикл определяется как среднее значение по всем временным интервалам за данный цикл.

Первый алгоритм определения критического значения показателей опасности для методов прогноза по медиане спектра и по отношению высокочастотной и низкочастотной компонент спектра шума комбайна путем усреднения текущих значений показателей опасности за 30 циклов ведения выработки на неопасном участке.

Метод основан на следующем утверждении. Известно, что граница между опасной и неопасной зонами пласта при ведении подготовительной выработки составляет очень малую величину – 1-2 м. Поэтому зона неснижаемого опережения при текущем прогнозе выбросоопасности инструментальными методами составляет 2 м, а для метода «по параметрам искусственного акустического сигнала» - 1 м [10]. Таким образом, если определить среднее значение показателя опасности на достаточно большом протяжении выработки на неопасном участке, то при вхождении в опасную зону показатель опасности должен заметно превышать это среднее значение.

Алгоритм определения в соответствии с этим утверждением критических значений обоих показателей опасности (по медиане f_m спектра и по коэффициенту $K_{он}$) одинаков и представляет собой следующую последовательность действий.

Выбирается участок выработки, о котором заранее известно, что он не опасен по проявлению ГДЯ. При проведении горных работ на выбранном участке для каждого i-го цикла проходки (один цикл – время между интервалами крепления боков) определяются текущие значения медианы спектра $f_{м.т,i}$ и коэффициента относительных напряжений для упрощенного $K_{он,1,i}$ и усложненного $K_{он,2,i}$ вариантов их расчета. По мере выполнения расчетов значений $f_{м.т,i}$, $K_{он,1,i}$ и $K_{он,2,i}$, рассчитывают средние значения этих параметров $f_{м.т,ср}$, $K_{он,1,ср}$ и $K_{он,2,ср}$ для n циклов вплоть до 30-го цикла n=30:

$$\left.\begin{aligned} f_{м.т,ср} &= \frac{\sum_{i=1}^{n} f_{м.т,i}}{n}; \\ K_{он,1,ср} &= \frac{\sum_{i=1}^{n} K_{он,1,i}}{n}; \\ K_{он,2,ср} &= \frac{\sum_{i=1}^{n} K_{он,2,i}}{n}. \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

Далее рассчитываются средние квадратические отклонения этих параметров $S(f_м)$, $S(K_{он,1})$ и $S(K_{он,2})$ по формулам:

$$\left.\begin{aligned} S(f_м) &= \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(f_{м.т,i} - f_{м.т,ср})^2}\,; \\ S(K_{он,1}) &= \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(K_{он,1,i} - K_{он,1,ср})^2}\,; \\ S(K_{он,2}) &= \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(K_{он,2,i} - K_{он,2,ср})^2} \end{aligned}\right\}. \quad (2)$$

Подготовка к определению критических значений $f_{м.т,кр}$, $K_{он,1,кр,i}$ и $K_{он,2,кр}$ заканчивается после проходки 30-го цикла ведения выработки. По формулам (1) и (2) определяют при n=30 средние значения параметров $f_{м.т,ср}$, $K_{он,1,ср}$ и $K_{он,2,ср}$, а также их средне квадратические отклонения S($f_м$), S($K_{он,1}$) и S($K_{он,2}$). Текущее критические значения $f_{м.т,кр}$, $K_{он,1,т,кр,}$ и $K_{он,2,т,кр}$ предлагается рассчитывать как сумму среднего значения показателя опасности и двух значений средне квадратических отклонений от среднего по следующим формулам:

$$\left.\begin{aligned} f_{м.т,кр} &= f_{м.т,ср} + 2S(f_м), \\ K_{он,1,т,кр} &= K_{он,1,ср} + 2S(K_{он,1}), \\ K_{он,2,т,кр} &= K_{он,2,ср} + 2S(K_{он,2}) \end{aligned}\right\}. \quad (3)$$

Такой подход позволит учесть отклонения показателей опасности из-за изменчивости свойств пласта и изменения параметров спектра благодаря интерференции типов волн при удалении сейсмоприемников от забоя выработки даже на неопасном участке.

После того, как будет пройден 30-й цикл, для расчетов средних значений контролируемых параметров и их средне квадратичных отклонений в соответствии с (1) и (2), из последовательности 30 рассчитанных параметров $f_{м.т,i}$, $K_{он,1,i}$ и $K_{он,2,i}$, отбрасываются их значения, измеренные в 1-ом цикле проходки выработки, и добавляются расчетные значения в очередном 31-м цикле. Таким образом, по мере определения текущих значений $f_{м.т,i}$, $K_{он,1,i}$ и $K_{он,2,i}$ за очередной цикл, за счет исключения измеренных значений в 1-м цикле будем иметь новый набор этих значений за очередные 30 циклов проходки. Иными словами, будем иметь средние значения контролируемых параметров и их средних квадратических отклонений за последние 30 циклов проходки. Это позволит непрерывно корректировать критические значения контролируемых параметров путем пересчета в соответствии с (3).

Степень опасности Ψ проявления ГДЯ будем оценивать по величине отношения соответствующего текущего значения контролируемого параметра и его текущего критического значения по следующим формулам:

$$\left.\begin{aligned} \Psi_{i,f_м} &= \frac{f_{м.т,i}}{f_{м.т,кр,i}}, \\ \Psi_{i,Kон,1} &= \frac{K_{он,1,i}}{K_{он,1,кр,i}}, \\ \Psi_{i,Kон,2} &= \frac{K_{он,2,i}}{K_{он,2,кр,i}} \end{aligned}\right\}. \quad (4)$$

Для определения какой из рассмотренных алгоритмов определения степени опасности более достоверен, необходимо иметь достаточно представительную экспериментальную выборку контролируемых данных. Для ее получения необходимо подобрать соответствующий участок горных работ и организовать непрерывный контроль спектров с последующим расчетом параметров, характеризующих опасность проявления ГДЯ, и их критических значений. Одновременно необходимо организовать прогноз инструментальными методами: для прогноза горных ударов – по выходу штыба при бурении контрольных скважин, для прогноза внезапных выбросов угля и газа – по начальной скорости газовыделения из шпуров. Сравнение результатов прогноза геофизических и инструментальных методов позволит оценить достоверность прогноза

геофизических методов по предложенным алгоритмам. Данные работы планируется выполнить на следующем этапе.

Второй алгоритм определения критического значения показателей опасности для геофизических методов прогноза по медиане спектра и по отношению высокочастотной и низкочастотной компонент спектра шума комбайна путем сравнения текущих и критических значений показателей опасности, определенных на одном и том же участке пласта геофизическим и инструментальным методом.

Метод основан на следующем утверждении. Относительная опасность проявления ГДЯ при прохождении одного и того же участка выработки должна быть примерно одинаковой для геофизических и инструментальных методов прогноза.

Алгоритм определения в соответствии с этим утверждением критических значений обоих показателей опасности геофизических методов (по медиане спектра $f_м$ и по коэффициенту относительных напряжений $K_{он}$) одинаков и представляет собой следующую последовательность действий.

Выбирается участок выработки, о котором заранее известно, что он не опасен по проявлению ГДЯ. На этом участке вначале осуществляется прогноз инструментальными методами: для прогноза горных ударов – по выходу штыба, а для прогноза внезапных выбросов угля и газа – по начальной скорости газовыделения при бурении скважины. Последовательность операций следующая.

В соответствии с действующей «Инструкцией по прогнозу динамических явлений....» [10] (далее Инструкция) бурится поинтервально через 1 м скважина (шпур) глубиной l=5,5-6,5 м. С каждого n-го погонного метра (кроме первого, протяженностью 0,5 м) ($n\epsilon$[1; 5-6]) скважины снимаются показания о выходе штыба (буровой мелочи) P^v_n (л/м) и начальной скорости газовыделения g_n (л/мин). Данные заносятся в таблицу 1. Для каждого интервала скважины в соответствии с Инструкцией определяется критическое значение выхода штыба $P^v_{n,кр}$ и тоже заносится в таблицу 1.

Таблица 1

Выход штыба P^v_n и его критическое значение $P^v_{n,кр}$ и начальная скорость газовыделения g_n с интервала скважины номер n

n	1	2	3	4	5	6
P^v_n, л/м						
$P^v_{n,кр}$, л/м						
$P^v_n/P^v_{n,кр}$						
g_n, л/мин						

Из таблицы находят экспериментально полученные текущие максимальные значения начальной скорости газовыделения $g_{n,m,max}$, рассчитывают для каждого интервала отношения $P^v_n/P^v_{n,кр}$ и находят его текущее максимальное значение $(P^v_n/P^v_{n,кр})_{m,max}$.

На этом же участке при его проходке комбайном регистрируют тремя сейсмоприемниками «шум» работающего комбайна и осуществляют прогноз опасности ГДЯ по медиане спектра и коэффициенту относительных напряжений на протяжении трех циклов ведения выработки (протяженность цикла – 1,2 м). Последовательность операций следующая.

Для каждого цикла определяют текущие средние значения медианы спектра $f_{м,m,ср}$ и текущие средние значения коэффициента относительных напряжений для упрощенного $K_{он,1ср}$ и усложненного $K_{он,2,ср}$ вариантов их расчета для трех сейсмоприемников. (Поскольку алгоритм определения критических значений показателя опасности для $K_{он,1}$ и $K_{он,2}$ одинаков, далее рассмотрим для одного из них, обозначив $K_{он}$. Текущее среднее значение для него обозначим $K_{он,ср}$). Данные заносятся в таблицу 2.

Таблица 2

Усредненные по трем сейсмоприемникам средние для цикла текущие значения медианы $f_{м,т,ср}$ и коэффициента относительных напряжений $K_{он,ср}$

Номер цикла	1	2	3
$f_{м,т,ср}$, Гц			
$K_{он,т,ср}$			

По таблице из трех циклов находят экспериментально полученные текущее максимальное среднее значение медианы спектра $f_{м,т,ср,max}$ и текущее максимальное среднее значение коэффициента относительных напряжений $K_{он,т,ср,max}$. Определяют приближенно критическое текущее среднее значение медианы спектра $f_{м,т,ср,кр}$ и критическое текущее среднее значение коэффициента относительных напряжений $K_{он,т,ср,кр}$ для прогноза внезапных выбросов угля и газа следующим образом. Полагают, что на данном участке выработки отношение текущего максимального значения начальной скорости газовыделения из шпура $g_{n,т,max}$ к его критическому значению $g_{n,кр}$=4 л/мин (из Инструкции) равно отношению текущего максимального среднего значения медианы спектра $f_{м,т,ср,max}$ (из табл. 2) к его критическому текущему среднему значению $f_{м,ср,кр}$:

$$\frac{g_{n,т,max}}{g_{n,кр}} = \frac{f_{м,т,ср,max}}{f_{м,т,ср,кр}}. \quad (5)$$

Предположение основано на том, что относительная опасность проявления ГДЯ при прохождении одного и того же участка выработки должна быть примерно одинаковой для геофизических и инструментальных методов прогноза.

Из (5) находим для данного участка пласта критическое текущее значение медианы спектра с учетом того, что $g_{n,кр}$=4 л/мин:

$$f_{м,т,ср,кр} = 4\frac{f_{м,т,ср,max}}{g_{n,т,max}}, \text{ Гц}. \quad (6)$$

Далее полагают, что на данном участке выработки отношение текущего максимального значения начальной скорости газовыделения из шпура $g_{n,т,max}$ к его критическому значению $g_{n,кр}$ равно отношению текущего максимального среднего значения коэффициента относительных напряжений $K_{он,т,ср,max}$ (из табл. 2) к его текущему критическому среднему значению $K_{он,т,ср.кр}$:

$$\frac{g_{n,т,max}}{g_{n,кр}} = \frac{K_{он,т,ср,max}}{K_{он,т,ср,кр}}. \quad (7)$$

С учетом того, что $g_{n,кр}$=4 л/мин (из Инструкции), из (7) находят $K_{он,т,ср,кр}$:

$$K_{он,т,ср,кр} = 4\frac{K_{он,ср,max}}{g_{n,т,max}}. \quad (8)$$

Определяют приближенно критическое текущее среднее значение медианы спектра $f_{м,т,ср,кр}$ и критическое текущее среднее значение коэффициента относительных напряжений $K_{он,т,ср,кр}$ для прогноза горных ударов следующим образом.

Полагают, что на данном участке выработки отношение определенного из табл. 1 текущего максимального значения $(P^v{}_n/P^v{}_{n,кр})_{т,max}$ к его текущему критическому значению $(P^v{}_{n,кр}/P^v{}_{n,кр})_{т,кр}$ равно отношению текущего максимального среднего значения медианы спектра $f_{м,т,ср,max}$ (из табл. 2) к его текущему критическому среднему значению $f_{м,ср,кр}$:

$$\frac{(P^v{}_n/P^v{}_{n,кр})_{т,max}}{(P^v{}_{n,кр}/P^v{}_{n,кр})_{т,кр}} = \frac{f_{м,т,ср,max}}{f_{м,т,ср,кр}}. \quad (9)$$

Но $(P^v{}_{n,кр} / P^v{}_{n,кр})_{т,кр}$=1. Тогда из (9) находим для данного участка пласта текущее критическое значение медианы спектра:

$$f_{м,т,ср,кр} = \frac{f_{м,т,ср,max}}{(P^v{}_n/P^v{}_{n,кр})_{т,max}}. \quad (10)$$

Полагают, что на данном участке выработки отношение определенного из табл. 1 текущего максимального значения $(P^v{}_n/P^v{}_{n,кр})_{т,max}$ к его текущему критическому значению $(P^v{}_{n,кр}/P^v{}_{n,кр})_{т,кр}$ равно отношению текущего максимального среднего значения

коэффициента относительных напряжений $K_{он,ср,max}$ (из табл. 2) к его текущему критическому среднему значению $K_{он,ср,кр}$:

$$\frac{(P^{v}{}_{n}/P^{v}{}_{n,кр})_{m,max}}{(P^{v}{}_{n,кр}/P^{v}{}_{n,кр})_{m,кр}} = \frac{K_{он,m,ср,max}}{K_{он,m,ср,кр}}. \quad (11)$$

Учитывая, что $(P^{v}{}_{n,кр} / P^{v}{}_{n,кр})_{m,кр}=1$, из (11) находим для данного участка пласта критическое значение коэффициента относительных напряжений:

$$K_{он,m,ср,кр} = \frac{K_{он,m,ср,max}}{(P^{v}{}_{n}/P^{v}{}_{n,кр})_{m,max}}. \quad (12)$$

Обсуждение результатов. Предложенные два алгоритма определения критического значения показателей опасности для методов прогноза по медиане спектра и отношению высокочастотной и низкочастотной компонент спектра шума комбайна имеют как преимущества, так и недостатки. Рассмотрим их.

1. Первый алгоритм (назовем его статистическим) основан на том, что, во-первых, протяженность опасных зон по всей совокупности типов ГДЯ в Кузбассе не превышает 20% от всей протяженности подготовительных выработок, на глубинах, ниже критической по этим типам ГДЯ [15]. И, во-вторых, - граница между опасной и неопасной зонами пласта при ведении подготовительной выработки составляет очень малую величину – 1-2 м. Поэтому если определить среднее значение показателя опасности на протяжении 30-40 м в неопасной зоне, то заметное превышение этого значения на сравнительно коротком участке в 1-2 м свидетельствует о входе в опасную зону.

Преимущества этого алгоритма определения критического значения показателя опасности заключаются в следующем:

– относительная простота определения; не требующая привлечения других методов прогноза, в том числе инструментальных;

– алгоритм позволяет осуществлять автоматическое определение критического значения показателя опасности.

К недостаткам этого алгоритма следует отнести следующее:

– истинная величина критического (порогового) значения не установлена. Поэтому при плавном повышении показателя опасности, например, в связи с увеличением глубина залегания пласта, будет плавно возрастать и среднее квадратичное отклонение от среднего значения. Это может привести к тому, что реальный показатель опасности окажется меньше установленного автоматически аппаратурой;

– неучет газового фактора опасности проявления ГДЯ, поскольку на спектр «шума» комбайна внутрипластовое давление газа влияния практически не оказывает, а инструментальные методы прогноза, учитывающие этот фактор опасности, в этом алгоритме не применяются.

2. Второй алгоритм (назовем его «геофизическим с настройкой по параметрам инструментального метода») определения критического значения показателей опасности основан на предположении о том, что относительная опасность (отношение текущего значения показателя опасности к его критическому значению) должна быть одинаковой для инструментального и геофизического методов прогноза для одного и того же участка массива. Поэтому, измерив текущие значения показателей опасности инструментального и геофизического метода, и, зная величину критического значения показателя инструментального метода из [10], легко определить критическое значение показателя опасности геофизического метода.

Исходя из сказанного, преимуществом этого алгоритма являются:

– для участка массива, где произведено определение критического значения показателя опасности геофизического метода, за счет учета всех основных факторов инструментальным методом прогноза полученное критическое значение близко по величине к реальному значению. На этом участке можно путем сравнения критических значений показателя опасности для статистического алгоритма определения и для

алгоритма «геофизическим методом с настройкой по параметрам инструментального метода» оценить достоверность статистического алгоритма определения;

– достаточно высокая достоверность определенного таким образом критерия, обусловленная тем, что инструментальные методы прогноза ГДЯ более достоверны нежели геофизические, поскольку контролируют непосредственно те физико-механические параметры горного массива, которые определяют опасность. Тогда как геофизические методы прогноза эти параметры оценивают опосредованно за счет функциональной связи их с параметрами зондирующих массив акустических колебаний.

Однако этот алгоритм имеет ряд существенных недостатков:

– алгоритм реализовать существенно сложнее, чем предыдущий: требуется осуществить прогноз одновременно геофизическим и инструментальным методом; в расчетах используется достаточно большое количество параметров;

– алгоритм позволяет определить текущее значение критерия опасности только для того участка массива, где были одновременно выполнены геофизический и инструментальный методы прогноза. Установленное таким образом критическое значение показателя можно использовать при ведении выработки если не контролируемый газовый фактор примерно сохраняется. При его изменении необходимо процедуру определения критерия опасности повторить.

3. В работе рассмотрены два метода прогноза по спектру «шума» комбайна: по медиане спектра и по отношению высокочастотной и низкочастотной областей спектра. Оценить какой из этих методов дает более достоверный результат можно будет только на основании экспериментальных исследований.

Выводы. В приведенном материале изложены результаты обоснования оперативного метода определения критического (порогового) значения показателя опасности для метода прогноза по медиане спектра и по отношению высокочастотной и низкочастотной компонент спектра шума комбайна на основе данных, полученных при одновременном прогнозе по спектру шума и инструментальным методом.

Проверить корректность предложенных алгоритмов и сделанных выводов можно только экспериментальным путем. Эту работу предполагается выполнить на одной из шахт Кузбасса.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0001 «Создание многофункциональных систем мониторинга и прогноза газодинамических явлений, контроля напряженного состояния, разработка методов их предотвращения и оценки эффективности при подземной разработке угольных месторождений» (рег. № АААА-А21-121012290020-4).

Список литературы

1. Ходот В.В. Внезапные выбросы угля и газа. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит-ры по горному делу, 1961. – 364 с.

2. Чернов О.И., Пузырев В.Н. Прогноз внезапных выбросов угля и газа. – М.: «Недра», 1979. – 296 с.

3. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. - М.: - «Недра», 1983. – 280 с.

4. International symposium-cum-workshop on management and control of high gas emissions and outbursts in underground coal mines. 20-24 march, 1995. – Wollongong, NSW, Australia. – 620 p.

5. Q.X. Yu. Mine gas prevention and control. – China University of Mining and Technology, Xuzhou, 1992. – P. 1-19.

6. Coal and gas outburst dynamic system / C.J. Fan, S. Li, M.K. Luo [et al.] // International Journal of Mining Science and Technology. – 2017. № 1. – P. 49-55.

7. Black D.J. Review of coal and gas outburst in Australian underground coal mines // International Journal of Mining Science and Technology. – 2019. – Vol. 29. – Issue 6. – PP. 815-824.

8. Шадрин А.В., Диюк Ю.А., Ли Хи Ун. Определение критерия выбросоопасности угольных пластов для методов текущего прогноза, основанных на спектральном анализе «шума» работающего оборудования // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2022. – №4. – С. 5-18.

9. Шадрин А.В., Телегуз А.С., Диюк Ю.А. Анализ учета основных факторов выбросоопасности существующими методами текущего прогноза // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2021. – №2. – С. 56-72.

10. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений». – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2021. – Сер. 05. – Вып. 49. – 128 с.

11. Мирер С.В., Хмара О.И., Шадрин А.В. Спектрально-акустический прогноз выбросоопасности угольных пластов. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 1999. – 92 с.

12. Король В.И., Скобенко А.В. Акустический способ прогноза газодинамических явлений в угольных шахтах. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2013. – 181 с.

13. Автоматизированная система контроля состояния массива горных пород и прогноза динамических явлений / К.Н. Копылов, О.В. Смирнов, А.И. Кулик [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – №8. – С. 32-37.

14. Шадрин А.В., Контримас А.А. Медиана амплитудно-частотной характеристики шумов работающего горного оборудования как показатель выбросоопасности // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – №12. – С. 37-45.

15. Зыков В.С. Внезапные выбросы угля и газа и другие газодинамические явления в угольных шахтах. – Кемерово: Институт угля и углехимии СО РАН, 2010. – 333 с.

УДК 622.41:622.831.3

О ПЕРСПЕКТИВНОМ НАПРАВЛЕНИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕМ НА ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

[1]к.т.н. Говорухин Ю.М., [2]д.т.н. Кубрин С.С.

1 – ФГКУ «Национальный горноспасательный центр», г. Новокузнецк, Россия

2 – Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Россия

Аннотация. Проведены сбор, анализ и обобщение данных о динамике давления в гидросистеме секций механизированной крепи по мере отработки выемочного столба. Полученные результаты соотнесены с динамикой концентрации метана на исходящей струе из очистного забоя. Предложено перспективное направление повышения эффективности управления газовыделением на выемочных участках угольных шахт при отработке пологих пластов.

Ключевые слова: Очистной забой, зона обрушения, динамика давления, механизированные крепи, концентрация метана, управление газовыделением, промышленная безопасность.

Основные тенденции в развитии угледобывающей отрасли связаны с интенсификацией и концентрацией горных работ. Для подземных условий в течение последних 20 лет суммарная производственная мощность шахт России сохраняется в пределах 100-110 млн. т угля за год, при общем тренде сокращения количества подземных угледобывающих предприятий. Это обусловлено внедрением высокопроизводительного оборудования, обеспечивающего значительную суточную нагрузку на очистные забои – 20-30 тыс. т (в перспективе до 40 тыс. т). Развитию и поддержанию подобных высоких нагрузок препятствует значительное осложнение горно-геологических и горнотехнических условий, связанное с:

– ростом глубины ведения горных работ (свыше 700-800 м) и газоносности углепородного массива (до 35 $м^3$/т с.б.м.);

– увеличением геометрических размеров подготавливаемых выемочных столбов (длины оконтуривающих выработок достигают 2000-4000 м, очистных забоев – 350-400 м);

– сокращением сроков формирования выработанных пространств (далее – ВП), при управлении кровлей полным обрушением, что приводит к более сложному взаимодействию в пространстве и времени геомеханических и аэрогазодинамических процессов.

В таких условиях появляются ограничения по газу на ритмичную и эффективную работу механизированных комплексов на пологих пластах с высокой газоносностью и требуется разработка и внедрение комплекса эффективных систем управления газовыделением. При этом существенное влияние на проветривание выемочных участков оказывают зоны обрушения, формируемые по мере отработки выемочного столба. В их куполах происходит формирование техногенного резервуара метана (газовый коллектор), из которого он может динамически выдавливаться при обрушении консолей основной кровли (при условии, если основная кровля не подбучена обрушившимися породами непосредственной кровли) [1-8]. Кроме того, при отключении газоотсасывающих установок (в ремонтные смены) на сопряжении очистного забоя с оконтуривающей выработкой, по которой выдаётся исходящая струя, зачастую отмечаются высокие концентрации метана.

Для оценки влияния ВП на метанобезопасность горных работ выполнен сбор, анализ и обобщение фактических данных о динамике давления в гидросистеме секций механизированной крепи (система манометров, установленных на обратном клапане каждой стойки), концентрации метана и скорости потока воздуха на исходящей струе из очистного забоя (датчики, входящие в систему аэрогазового контроля горного предприятия) [9-13].

В качестве объекта исследования выбрана одна из шахт Байдаевского геолого-экономического района Кузнецкого бассейна. Длина очистного забоя составляла 267 м, всего было установлено 153 секции и 4 секции крепи сопряжения (501, 482, 481, 491). Номинальное (максимальное) давление в гидросистеме составляло 600 бар. На стойках предусматривались клапаны избыточного давления, срабатывающие при превышении установленного давления. Вся информация с механизированного комплекса о его состоянии сохранялась в log-файлы и отображалась на АРМ диспетчера, для чего использовалось специализированное программное обеспечение. Автоматизированная обработка этих данных произведена с применением средств языка программирования C++ (notepad++ (vim), gcc/g++) [14]. При обработке осуществлено объединение секций в группы с последующим вычислением среднего давления в них (рис. 1), что позволило нивелировать скачки давления, связанные с передвижкой отдельной секции или неисправностью оборудования.

В табл. 1 указаны данные по расположению участков забоя с выделенными в группы секциями крепи.

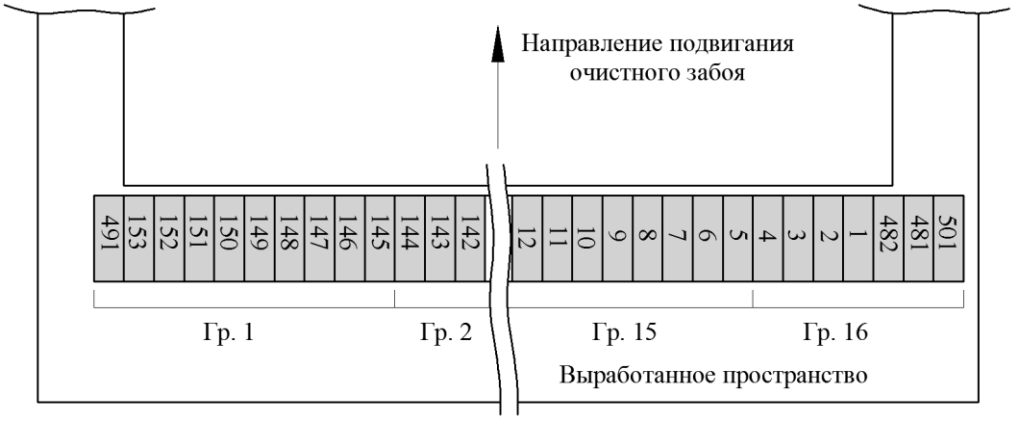


Рис. 1. Схема группирования секций механизированной крепи

Таблица 1

Расположение участков очистного забоя для отдельных групп секций

№ п/п	Группы секций	Протяжённость участка, м	№ п/п	Группы секций	Протяжённость участка, м
1	491, 145-153	1,75 м и 0,00 – 15,75	9	65-74	138,25 – 155,75
2	135-144	15,75 – 33,25	10	55-64	155,75 – 173,25
3	125-134	33,25 – 50,75	11	45-54	173,25 – 190,75
4	115-124	50,75 – 68,25	12	35-44	190,75 – 208,25
5	105-114	68,25 – 85,75	13	25-34	208,25 – 225,75
6	95-104	85,75 – 103,25	14	15-24	225,75 – 243,25
7	85-94	103,25 – 120,75	15	5-14	243,25 – 260,75
8	75-84	120,75 – 138,25	16	501, 481, 482, 1-4	260,75-267,75 и 5,25

На рис. 2 а приведена динамика среднего давления в гидросистеме групп секций механизированной крепи по линии движения очистного забоя в течение двух суток, а на рис. 3 – динамика концентрации метана за этот же период времени. Подвигание очистного забоя за этот период составило 11 м. Пунктирные линии соответствуют моментам возрастания концентрации метана на исходящей струе свыше 1 %.

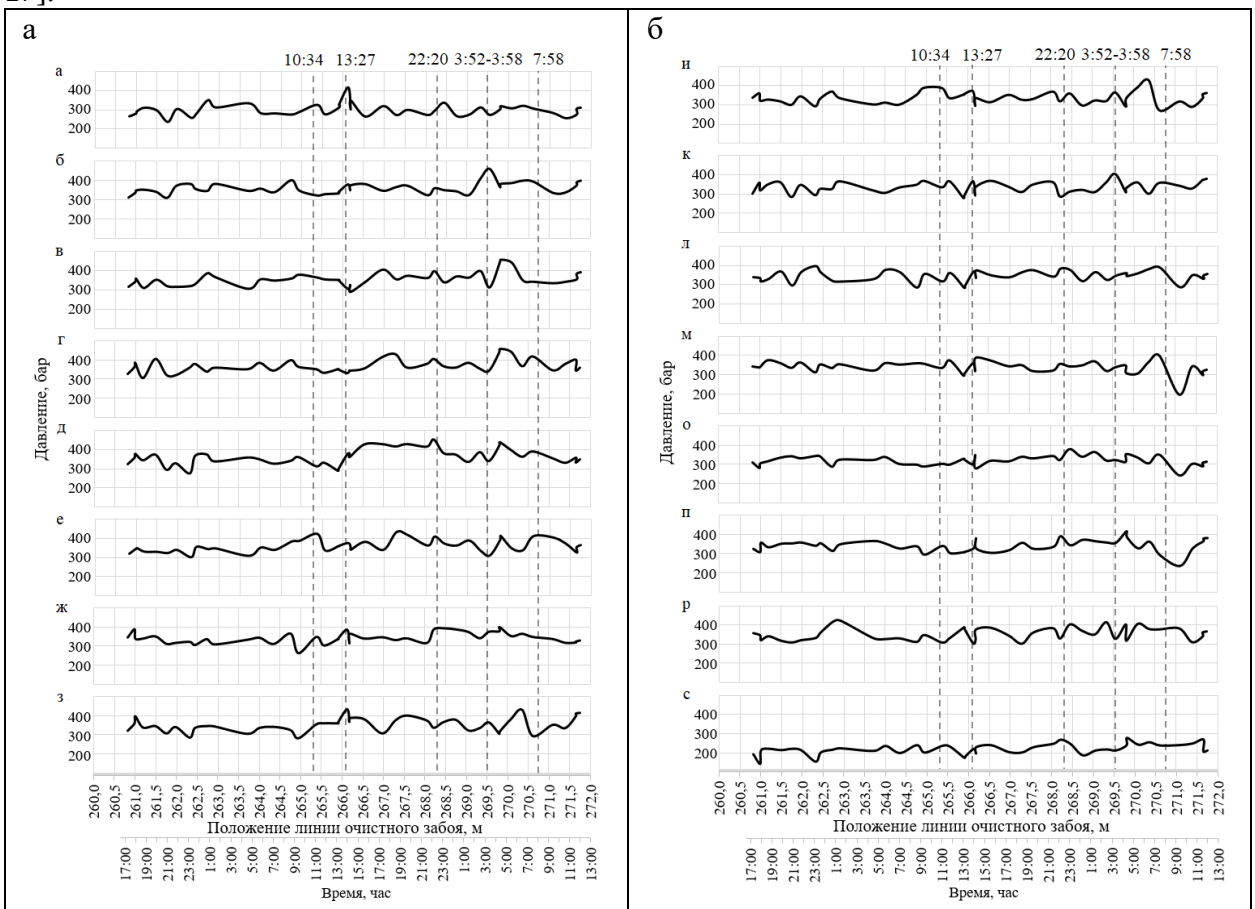
Как видно из рис. 2 и 3 в одних группах секций, в пределах рассматриваемого среза времени, происходит снижение среднего давления, а в то же время в других давление возрастает. Это объясняется тем, что обрушение происходит не единой консольной плитой кровли, а отдельными блоками в результате расслоения по системам трещинам. В результате выдавливается в очистной забой скапливающийся в зоне обрушения метан, что сопровождается ростом его концентрации на исходящей струе.

На рис. 3 выделены концентрации метана, превышающие 1 % [15], а в круглых скобках соответствующие им дебиты метана в $м^3$/мин. Изменения в дебите метана при почти равных его концентрациях вызваны колебаниями расхода воздуха на участке.

На рис. 4 приведена динамика среднего давления в гидросистеме групп секций механизированной крепи вдоль очистного забоя за три среза времени. Как видно из графика происходит изменение среднего давления, вызванное обрушением блоков кровли и перераспределением напряжённо-деформированного состояния пород массива.

Выводы. Для повышения уровня промышленной безопасности при высокоинтенсивной отработке выемочных столбов на пологих пластах и обеспечения ритмичной работы очистного оборудования необходимо увязать модели шахтной вентиляционной сети и зоны обрушения в единую систему «горные выработки – зона

обрушения» с учётом конкретных горно-геологических и горнотехнических условий [16, 17].

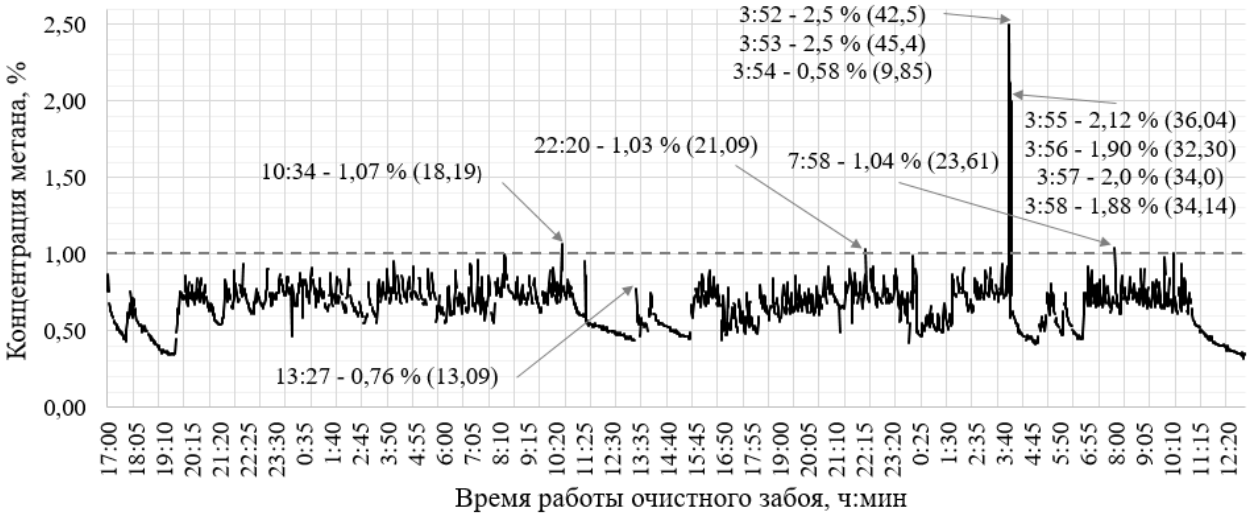


группы секций: а – 491, 143-155; б – 135-144; в – 125-134; г – 115-124; д – 105-114; е – 95-104; ж – 85-94; з – 75-84

Группы секций: и – 65-74; к – 55-64; л – 45-54; м – 35-44; о – 25-34; п – 15-24; р – 5-14; с – 1-4, 482, 481

пунктирные линии – моменты возрастания концентрации метана на исходящей до 1 %

Рис. 2. Динамика среднего давления в гидросистеме групп секций механизированной крепи по линии движения очистного забоя



значения в круглых скобках – дебит метана в м^3/мин

Рис. 3. Динамика концентрации метана при работе очистного забоя

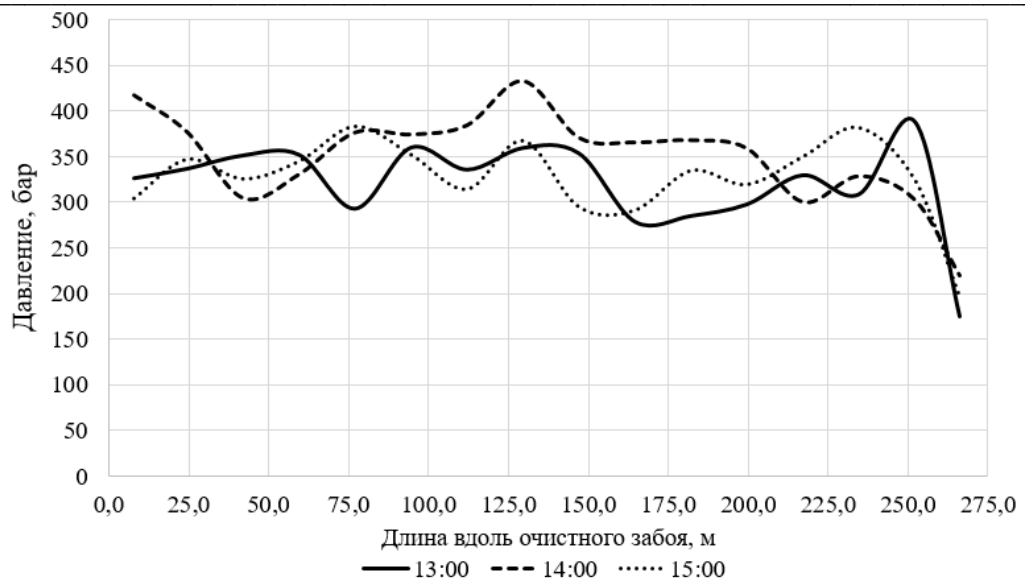


Рис. 4. Динамика среднего давления в гидросистеме групп секций механизированной крепи вдоль очистного забоя

Данное предложение позволит:

– выполнять прогноз и текущий контроль объёмов фильтрационных потоков метановоздушной смеси в высокопористой среде ВП и зоны обрушения в целом;

– выявлять участки зоны обрушения, в которых происходят процессы формирования газового коллектора с большими объёмами метана в условиях реализации различных схем проветривания и дегазации;

– проектировать оптимальные методы управления газовыделением в пределах как зоны обрушения, так и всего выемочного участка;

– выполнять анализ направлений перспективного развития горных предприятий.

Список литературы

1. Фрянов В.Н., Павлова Л.Д. Состояние и направление развития безопасной технологии подземной угледобычи. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2009. – 238 с.

2. Павлова Л.Д., Фрянов В.Н. Влияние геомеханических процессов на параметры газового коллектора в зоне сдвижения пород при отработке свиты угольных пластов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 8. – С.70-78.

3. Пучков Л.А., Каледина Н.О. Динамика метана в выработанных пространствах шахт. – М.: Изд-во МГГУ, 1995. – 313 с.

4. Пучков Л.А., Сластунов С.В., Коликов К.С. Извлечение метана из угольных пластов. – М.: Изд-во МГГУ, 2002. – 383 с.

5. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. – М.: Недра, 1980. – 360 с.

6. Аэрология горных предприятий: учебник для вузов / К.З. Ушаков, А.С. Бурчаков Л.А. Пучков [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 421 с.

7. Ушаков К.З. Газовая динамика шахт. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МГГУ, 2004. – 481 с.

8. Клебанов Ф.С. Воздух в шахте. – М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 576 с.

9. Руководство по безопасности «Рекомендации по аэрологической безопасности угольных шахт»: утверждено Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору России от 01.02.2022. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_408614/.

10. Криволапов В.Г., Говорухин Ю.М. Возможность использования шахтного оборудования для прогнозирования газодинамических явлений при неравномерном

подвигании очистного забоя // Нетрадиционные и интенсивные технологии разработки месторождений полезных ископаемых: сб. науч. статей., вып. 1. – Новокузнецк: СибГИУ, 2008. – С. 128-133.

11. Кубрин С.С., Подчуфаров И.Е. Представление коллекторов метана в геоинформационной модели шахтного поля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № S6. – С. 238-248.

12. Экспериментальные исследования параметров работы очистного комбайна угольной шахты при различных скоростях подачи / К.Н. Копылов, С.С. Кубрин, И.М. Закоршменный [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № S29. – С. 48-55.

13. Коровкин Ю.А., Савченко П.Ф. Теория и практика длиннолавных систем. – М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2012. – 808 с.

14. Программирование на языке С++ в среде Qt Creator / Е.Р. Алексеев, Г.Г. Злобин, Д.А. Костюк [и др.]. – М.: ALT Linux, 2015. – 448 с.

15. Правила безопасности в угольных шахтах»: утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору России от 08.12.2020. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_ 372172/.

16. Об эффективности дегазации выемочных участков для условий пологих пластов юга Кузбасса / Ю.М. Говорухин, А.Н. Домрачев, В.Г. Криволапов [и др.] // Безопасность труда в промышленности: научно-производственный журнал. – М., 2017. – № 12. – С. 11-17.

17. 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. – № 2. – С. 288-299.

УДК 622.868:622.81:004.942

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЗДУШНОЙ ВОЛНЫ С ДИСПЕРГИРОВАННЫМИ СРЕДАМИ (ВОДА)

к.т.н. Говорухин Ю.М., к.т.н. Криволапов В.Г.
ФГКУ «Национальный горноспасательный центр», г. Новокузнецк, Россия

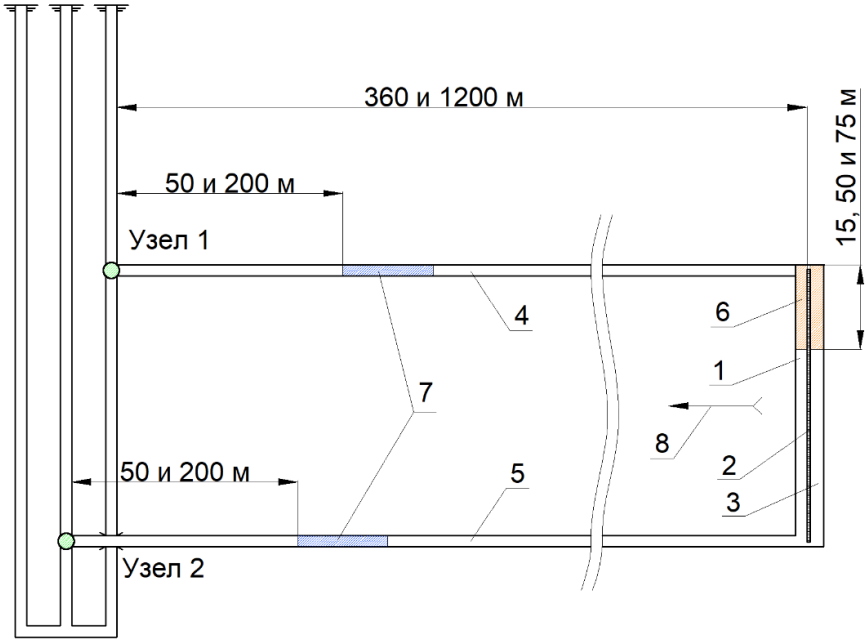
Аннотация. Обоснован способ внесения закрепного пространства в модель шахтной вентиляционной сети. Выполнено численное моделирование процессов взаимодействия ударной воздушной волны с диспергированными средами (вода). Произведена оценка эффективности различных способов установки комплектов противовзрывных быстровозводимых – взрывозащитный заслон. Получена зависимость эффективности срабатывания заслонов от избыточного давления в набегающей ударно-воздушной волне (УВВ) при их оптимальном расположении.

Ключевые слова: аварийно-спасательные работы, взрыв, метановоздушная смесь и угольная пыль, ударная воздушная волна, преграда, безопасные расстояния.

Введение. В качестве вспомогательного инженерного сооружения для защиты горноспасателей при ведении аварийно-спасательных работ применяется комплект противовзрывной быстровозводимый – взрывозащитный заслон (далее – комплект ВЗ) [1, 2]. Комплект ВЗ при взаимодействии с избыточным давлением во фронте УВВ разрушается и образует взвешенную газокапельную смесь, которая вовлекается волной в движение [3-6]. В результате этого сложного процесса происходит снижение интенсивности УВВ после прохождения ею преграды. С целью оценки оптимальных параметров размещения секций

комплекта ВЗ и их количества выполнено численное моделирование процесса взаимодействия УВВ с данным инженерным сооружением.

Геометрия расчётной области, начальные и граничные условия. Построена компьютерная модель условного выемочного участка (рис. 1) и использован программный комплекс «Ударная волна» с реализованным в нём дополнительным расчётным модулем [7-10].



1 – очистной забой; 2 – секции механизированной крепи; 3 – закрепное пространство; 4, 5 – вентиляционный и конвейерный штреки, соответственно; 6 – исходная зона загазования (15, 50 и 75 м); 7 – место установки секций комплекта ВЗ (от 1 до 16 секций) Узел 1 и Узел 2 – контрольные узлы для оценки избыточного давления ΔP

Рис. 1. Модель условного выемочного участка, разработанная для исследования процессов взаимодействия УВВ с секциями комплекта ВЗ

Моделирование проведено для начальных условий, указанных в табл. 1. Исходное избыточное давление в зоне взрыва определено для условий взрыва метановоздушной смеси (далее – МВС) и угольной пыли согласно [7].

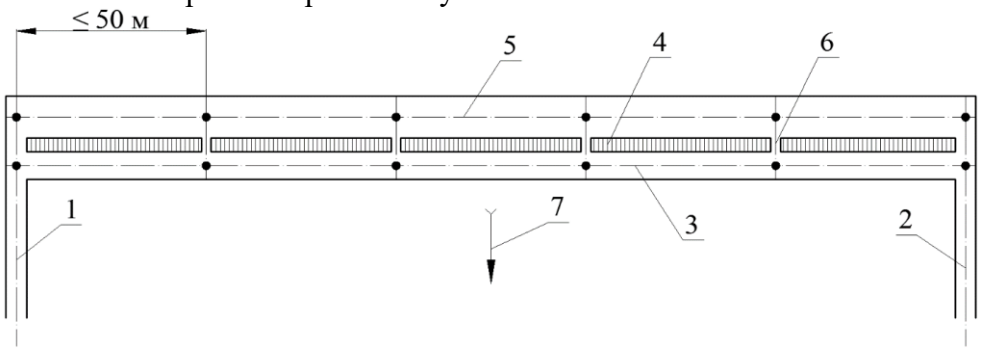
Таблица 1

Начальные условия

№ п/п	Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
1	Количество секций комплекта ВЗ	шт.	от 1 до 16
2	Протяжённость зоны загазования	м	15, 50 и 75
3	Расстояние от сопряжения до места установки секций комплекта ВЗ	м	50 и 200
4	Расстояние между секциями комплекта ВЗ	м	2 и 5
5	Количество мешков с водой в 1 секции	шт.	15
6	Общий расход воды на 1 секцию	кг	600

Обоснование способа внесения закрепного пространства в модель. При задании зоны загазования в очистном забое учтён тот факт, что при управлении кровлей полным обрушением, загазованными могут быть закрепное пространство на длину шага обрушения непосредственной кровли и «купола» зоны обрушения в случае, если породы основной кровли не подбучены разрыхленной породной массой [8, 11-13]. Важным моментом является то, что данные объёмы в зоне обрушения следует задавать вводом в модель

шахтной вентиляционной сети (далее – ШВС) дополнительных ветвей с соответствующими размерами (рис. 2). Простое увеличение сечения очистного забоя приводит к существенным погрешностям при выполнении вычислений взрывобезопасных расстояний. Это связано с тем, что на сопряжениях с оконтуривающими выемочный столб горными выработками происходит резкое уменьшение площади поперечного сечения (сужение), что не соответствует действительному положению, и ударно-волновой процесс в модели может затухнуть на сопряжении (либо потерять значительную часть своей энергии), а не распространяться по горным выработкам участка.



1, 2 – вентиляционный и конвейерный штрек, соответственно; 3 – очистной забой; 4 – секции механизированной крепи; 5 – закрепное пространство; 6 – фиктивные ветви, учитывающие аэродинамическую связь между призабойным и закрепным пространствами; 7 – направление подвигания очистного забоя

Рис. 2. Схема ввода в компьютерную модель ШВС дополнительных ветвей и соединения их с очистным забоем

Предложено дополнительные ветви закрепного пространства соединять с очистным забоем фиктивными ветвями, учитывающими аэродинамическую связь между призабойным и закрепным пространствами через технологические зазоры в секциях механизированной крепи. Принято, что шаг соединения не превышает 50 м. Геометрические размеры фиктивных ветвей установлены исходя из минимальных значений для поперечных сечений в программном комплексе «Ударная волна» [8].

С использованием модели условного выемочного участка (рис. 1), выполнен расчёт распространения поражающих факторов взрыва МВС и угольной пыли для нескольких вариантов задания зон загазования. Длина оконтуривающих штреков принята равной 360 м, протяжённость зоны загазования – 15 м. В качестве контрольного узла для оценки избыточного давления ΔP, МПа, принято сопряжение вентиляционного штрека с капитальной горной выработкой – узел 1. Рассмотрено два варианта реализации модели ШВС:

– очистной забой и закрепное пространство представлены одной ветвью за счёт эквивалентного увеличения её площади сечения (далее – вариант 1);

– закрепное пространство учтено вводом дополнительной ветви, которая соединена с очистным забоем фиктивными ветвями и без них (далее – вариант 2, рис. 2). Данный вариант позволяет указывать несколько участков загазования и воспламенение одного из них (точечный источник воспламенения МВС).

Результаты расчётов по двум вариантам представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, наибольшее избыточное давление в контрольном узле отмечено в случае реализации варианта 2 с введением в модель ШВС фиктивных ветвей с загазованием очистного забоя и закрепного пространства (позиция 5 в табл. 2 – увеличение на 53,4 % относительно позиции 1). По результатам численного моделирования установлено, что внесение в модель ШВС дополнительных ветвей и их соединение с очистным забоем фиктивными ветвями позволяет более точно оценивать расстояния, на которые распространяются поражающие факторы взрыва.

Таблица 2

Избыточное давление ΔP, МПа, в Узле 1 для различных вариантов реализации модели ШВС

№ п/п	Варианты реализации модели ШВС	Время с момента взрыва $t_{у1}$, с	Максимальное ΔP в узле 1 в момент времени $t_{у1}$, МПа	Изменение ΔP относительно Варианта 1, %
1	Вариант 1	0,9836	0,00834	100,0
2	Вариант 2. Загазован только очистной забой. Фиктивные ветви не введены	0,9964	0,00662	79,4
3	Вариант 2. Загазован очистной забой и закрепное пространство. Фиктивные ветви не введены	0,9771	0,01025	122,9
4	Вариант 2. Введены фиктивные ветви. Загазован только очистной забой	1,0098	0,00655	78,5
5	Вариант 2. Введены фиктивные ветви. Загазован очистной забой и закрепное пространство	0,9377	0,01279	153,4

Оценка эффективности различных способов установки комплектов ВЗ. При моделировании процессов взаимодействия УВВ с диспергированными средами (вода) величина избыточного давления ΔP, МПа, оценивалась на сопряжениях вентиляционного и конвейерного штреков с капитальными выработками – Узлы 1 и 2 (рис. 1). Результаты моделирования приведены ниже в соответствии с направлениями расчётов (рис. 3-6). Использованы следующие обозначения: $\Delta P_{0вш}$, $\Delta P_{0кш}$, $\Delta P_{10вш}$, $\Delta P_{10кш}$ – величины избыточного давления во фронте УВВ, МПа, в контрольных узлах вентиляционного и конвейерного штреков, соответственно, при отсутствии секций комплекта ВЗ и при установке указанного в индексе их количества.

1) Протяжённость зоны загазования – 50 м, количество секций комплекта ВЗ – от 0 до 10 ед., установленных начиная с расстояния 50 м от сопряжения с капитальной горной выработкой. Расстояние между секциями – 5 м.

Согласно рис. 3, по мере увеличения количества секций комплекта ВЗ происходит постепенное снижение величины избыточного давления на сопряжениях до некоторой постоянной величины. Установка более 6 секций не оказывает заметного влияния на величину ΔP на сопряжениях.

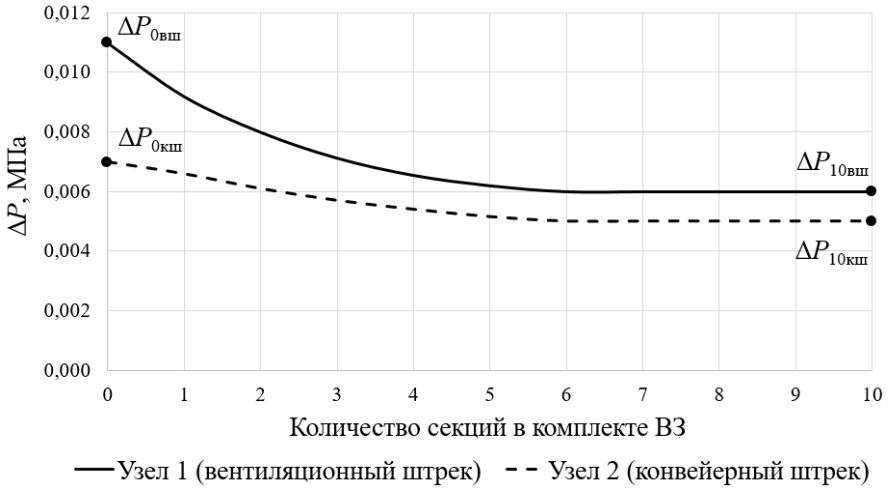


Рис. 3. Динамика величины ΔP, МПа, на сопряжениях (направление расчёта 1)

Максимальное изменение величины избыточного давления ΔP во фронте УВВ при её взаимодействии с секциями комплекта ВЗ:

в узле 1: $\Delta P_{0вш} - \Delta P_{10вш} = 0{,}011 - 0{,}006 = 0{,}0050$ МПа;

в узле 2: $\Delta P_{0кш} - \Delta P_{10кш} = 0{,}007 - 0{,}005 = 0{,}0020$ МПа.

2) Протяжённость зоны загазования очистного забоя – 75 м, количество секций комплекта ВЗ – от 0 до 16 ед., установленных начиная с расстояния 50 м от сопряжения с капитальной горной выработкой. Расстояние между секциями – 5 м.

Согласно рис. 4, снижение величины ΔP на сопряжениях происходит при установке до 6-8 секций комплекта ВЗ.

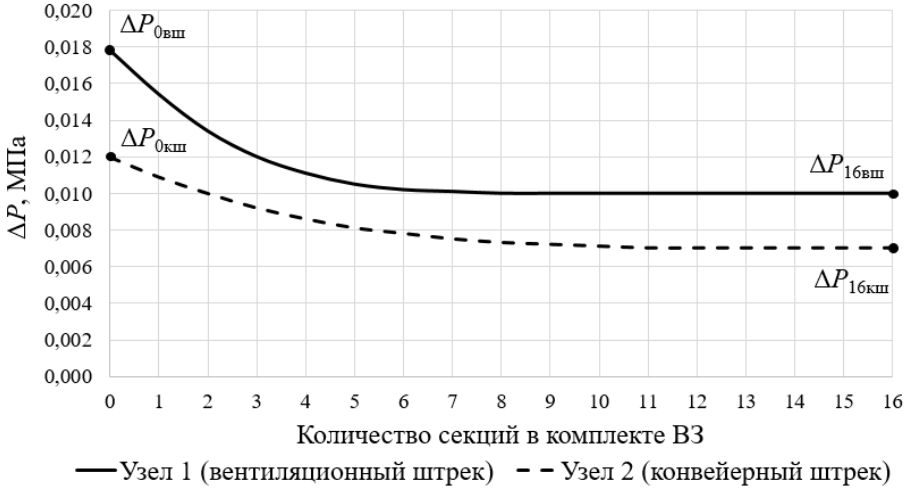


Рис. 4. Динамика величины ΔP, МПа, на сопряжениях (направление расчёта 2)

Максимальное изменение величины избыточного давления ΔP во фронте УВВ при её взаимодействии с секциями комплекта ВЗ:

в узле 1: $\Delta P_{0вш} - \Delta P_{16вш} = 0{,}0178 - 0{,}0100 = 0{,}0078$ МПа;

в узле 2: $\Delta P_{0кш} - \Delta P_{16кш} = 0{,}0120 - 0{,}0070 = 0{,}0050$ МПа.

3) Протяжённость зоны загазования очистного забоя – 50 м, количество секций комплекта ВЗ – от 0 до 16 ед., установленных начиная с расстояния 50 м от сопряжения с капитальной горной выработкой. Расстояние между секциями – 2 м.

Согласно рис. 5, снижение величины ΔP на сопряжениях происходит при установке до 8 секций комплекта ВЗ.

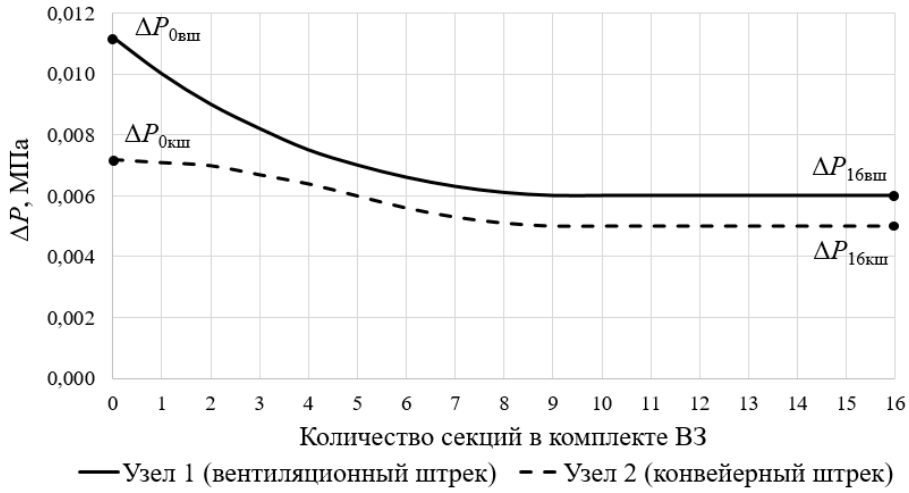


Рис. 5. Динамика величины ΔP, МПа, на сопряжениях (направление расчёта 3)

Максимальное изменение величины избыточного давления ΔP во фронте УВВ при её взаимодействии с секциями комплекта ВЗ:

в узле 1: $\Delta P_{0вш} - \Delta P_{16вш} = 0{,}0112 - 0{,}0060 = 0{,}0052$ МПа;

в узле 2: $\Delta P_{0кш} - \Delta P_{16кш}$ = 0,0072 – 0,0050 = 0,0022 МПа.

4) Протяжённость зоны загазования очистного забоя – 50 м, количество секций комплекта ВЗ – от 0 до 5 ед., установленных начиная с расстояния 200 м от сопряжения с капитальной горной выработкой. Расстояние между секциями – 5 м.

Согласно рис. 6, снижение величины ΔP на сопряжениях происходит при установке до 3-5 секций комплекта ВЗ.

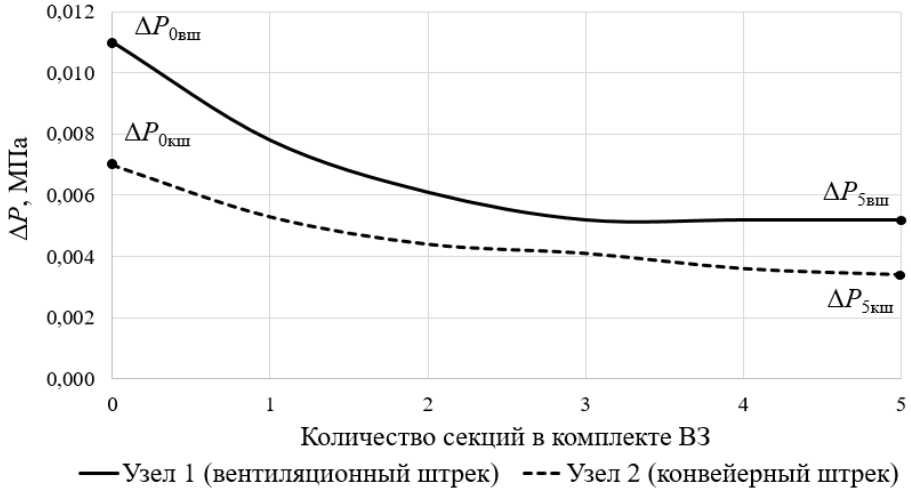


Рис 6. Динамика величины ΔP, МПа, на сопряжениях (направление расчёта 4)

Максимальное изменение величины избыточного давления ΔP во фронте УВВ при её взаимодействии с секциями комплекта ВЗ:

в узле 1: $\Delta P_{0вш} - \Delta P_{16вш}$ = 0,0110 – 0,0052 = 0,0058 МПа;

в узле 2: $\Delta P_{0кш} - \Delta P_{16кш}$ = 0,0070 – 0,0034 = 0,0036 МПа.

На рис. 7 приведено сравнение максимальных изменений величины ΔP во фронте УВВ при её взаимодействии с секциями комплекта ВЗ по направлениям расчёта. Наиболее эффективно гашение энергии УВВ происходит при размещении секции комплекта ВЗ согласно второму и четвёртому направлениям расчёта.

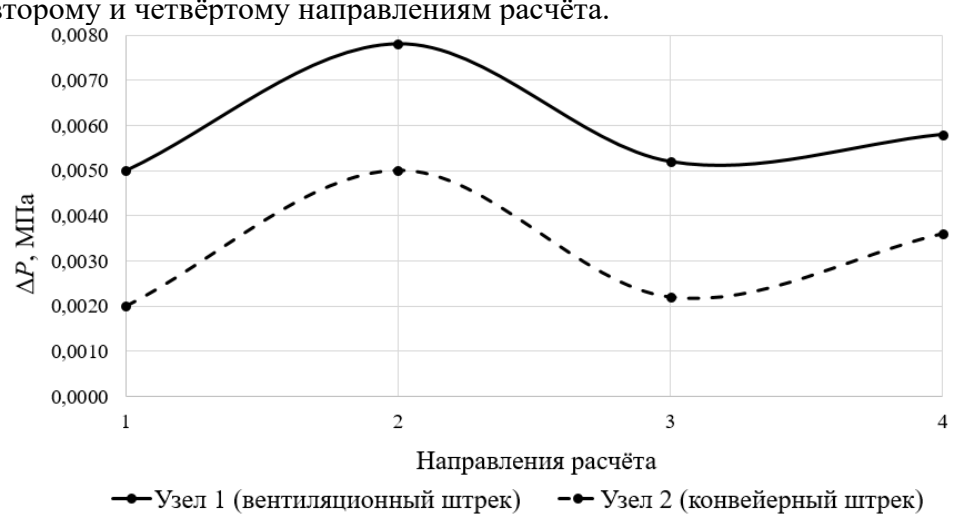


Рис. 7. Сравнение максимальных изменений ΔP по направлениям расчёта

Применение комплекта ВЗ для снижения интенсивности УВВ. Дополнительно составлена модель подготовительной выработки, с использованием которой выполнен расчёт распространения поражающих факторов взрыва МВС и угольной пыли с применением комплекта ВЗ и без него. Длина выработки принята равной 1500 м, протяжённость зоны загазования – от 10 до 250 м, количество секций комплекта ВЗ – 5 шт., расстояние между секциями – 5 м, установка первой секции на расстоянии 50 м от сопряжения. Всего выполнено 25 расчётов, результаты которых приведены на рис. 8.

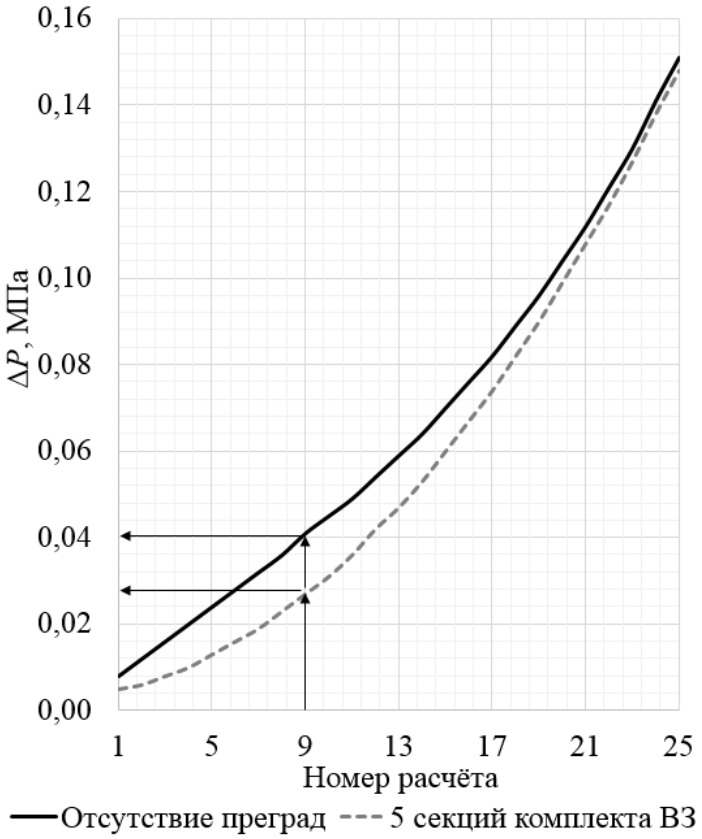


Рис. 8. Сравнение эффективности снижения интенсивности УВВ при использовании комплекта ВЗ

Как видно из рис. 8 эффективность применения комплекта ВЗ снижается с возрастанием избыточного давления в набегающей УВВ. Максимальное избыточное давление в набегающей УВВ, при котором применение комплекта ВЗ целесообразно, по результатам численного моделирования составляет 0,041-0,045 МПа. При этом интенсивность УВВ, прошедшей 5 секций комплекта ВЗ, составляет 0,027-0,031 МПа.

На рис. 9 приведён полученный график зависимости интенсивности УВВ, прошедшей за 5 секций комплекта ВЗ, от избыточного давления Δ*P* в набегающей УВВ.

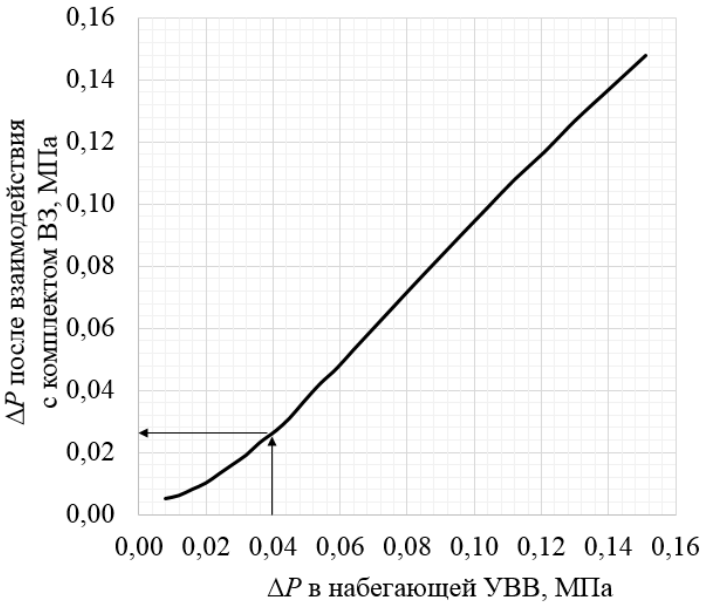


Рис. 9. График зависимости интенсивности УВВ, прошедшей за 5 секций комплекта ВЗ от избыточного давления в набегающей УВВ

Вывод. В настоящее время ведутся работы по доводке дополнительно разработанного вычислительного модуля для программы «Ударная волна», позволяющего выполнять расчёты взаимодействия УВВ с преградами, в качестве которых выступают диспергированные среды.

Список литературы

1. Инструкция по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах, на которых ведутся горные работы, утверждена Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11.12.2020. – URL: https://www.consultant.ru/document/ cons_doc_LAW_372027.

2. Мясников А.А., Миллер Ю.А., Комаров Н.Е. Вентиляционные сооружения в угольных шахтах. – М.: Недра, 1983. – 270 с.

3. Бойко В.М., Папырин А.Н., Поплавский С.В. О динамике дробления капель в ударных волнах// ПМТФ. – 1987. – № 2. – С.108–115.

4. Бойко В.М., Поплавский С.В. Особенности динамики капли воды в потоке за ударной волной // Вестник НГУ. Серия: Физика, 2008. – Т.3. – Вып.2. – С.28-33.

5. Бойко В.М., Поплавский С.В. Физическая модель разрушения капли за ударной волной по срывным механизмам // Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика: тез. докл. Междунар. науч. – практ. конф., посвящённой 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко, 30 мая – 4 июня 2011г., Новосибирск. – Новосибирск: Академгородок, 2011. – С.114-119.

6. Гашение энергии ударной волны водяным заслоном при взрыве слоевого скопления метана / Д.Ю. Палеев, О.Ю. Лукашов, И.М. Васенин [и др.] // Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2017. – Т. 3. – С.385-389.

7. Методика газодинамического расчёта параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли: введена в действие Ростехнадзором от 27.04.2004. – URL: http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=331468#01924840057764 0212.

8. Говорухин Ю.М., Криволапов В.Г., Палеев Д.Ю. О способе внесения в модель топологии объёмов загазования в закрепном пространстве выемочных участков при расчётах взрывобезопасных расстояний // Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – № 6. – С.373-375.

9. Ударные волны при взрывах в угольных шахтах / Д.Ю. Палеев, И.М. Васенин, В.Н. Костеренко [и др.]. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 312 с.

10. Компьютерные технологии для решения задач плана ликвидации аварий / Д.Ю. Палеев, О.Ю. Лукашов, В.Н. Костеренко [и др.]. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 160 с.

11. Повышение качества и оперативности выполнения инженерных расчётов при ведении горноспасательных работ / Ю.М. Говорухин, В.Г. Криволапов, Д.Ю. Палеев [и др.] // Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2019. – № 5. – С.450-453.

12. Анализ и прогноз динамики аварий и инцидентов на предприятиях горной промышленности и подземного строительства российской федерации / А.Н. Домрачев, Ю.М. Говорухин, В.Г. Криволапов [и др.] // Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2019. – № 5. С.448-450.

13. О методе оценки объёмов загазования взрывоопасной метановоздушной смесью горных выработок угольных шахт / Ю.М. Говорухин, А.Н. Домрачев, В.Г., Криволапов [и др.] // Безопасность технологических процессов и производств: тр. III междунар. науч.-практ. конф.. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2021. – С.13-18.

УДК 622.868:622.81:004.942

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОРЯДНОЙ СИСТЕМЫ ПЕРФОРИРОВАННЫХ ПРЕГРАД ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ВО ФРОНТЕ УДАРНОЙ ВОЗДУШНОЙ ВОЛНЫ

[1]к.т.н. Говорухин Ю.М., [1]к.т.н. Криволапов В.Г., [2]к.т.н. Сенкус Вал.В., [1]Мясников Н.В.

1 – ФГКУ «Национальный горноспасательный центр», г. Новокузнецк, Россия

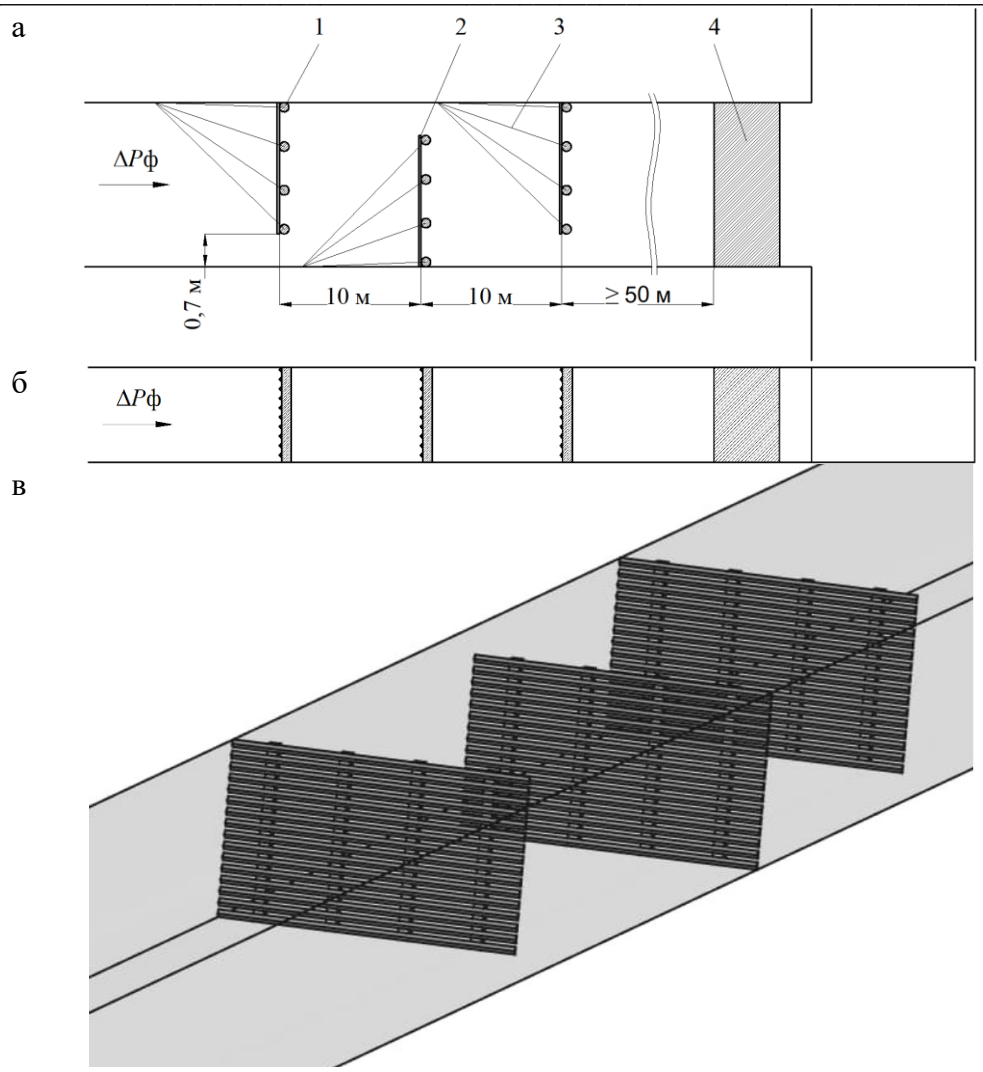
2 – «Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Предложена конструкция многорядной системы перфорированных преград, обладающая небольшой массой и которую возможно оперативно сооружать в подземных горных выработках для защиты горноспасателей при ведении аварийно-спасательных работ. По результатам численного моделирования обоснована эффективность снижения ею интенсивности ударной воздушной волны.

Ключевые слова: аварийно-спасательные работы, взрыв метановоздушной смеси и угольной пыли, ударная воздушная волна, избыточное давление, безопасные расстояния.

Введение. Выполнение аварийно-спасательных работ (далее – АСР) по изоляции подземных горных выработок при пожарах сопряжено с риском формирования взрывоопасных скоплений горючих газов из-за нарушенного проветривания вблизи источников высокой температуры. Весьма важным в этом случае является определение взрывобезопасных расстояний, на которых возможно возведение взрывоустойчивых изолирующих сооружений [1-4]. Как показывает практика, в условиях наличия неопределённости исходных данных, во избежание травмирования людей, АСР необходимо вести под защитой различных взрывозащитных сооружений в целях минимизации поражающих факторов ударной воздушной волны (далее – УВВ) при потенциальной возможности взрыва. Без их применения УВВ за короткий период времени может выйти за границы участка в капитальные выработки и по ним распространиться до поверхности. В данных условиях безопасные расстояния для ведения работ по возведению взрывоустойчивых перемычек могут располагаться на границах выемочной ступени, крыла шахты или у поверхности. Основные требования, предъявляемые к конструкциям такого рода преград: наименьшие трудозатраты по доставке материалов или готовых элементов конструкции к местам их возведения; минимальное время разворачивания; максимальная эффективность гашения избыточного давления во фронте УВВ. На основе данных требований авторами предложена конструкция многорядной системы перфорированных преград.

Предлагаемая конструкция многорядной системы перфорированных преград. Инженерное сооружение состоит из механических стоек временной крепи ВК (ВК7, ВК8, ВКМ) и композитных (стекловолокно) уголков (угол раствора равен 90°, рис. 1) [5, 6]. Уголки крепятся к стойкам с помощью специально приваренных петель. В целом преграда составляется из трёх модулей, устанавливаемых на расстоянии 10 м друг от друга в шахматном порядке с оставлением 0,7 м у бока выработки для обеспечения прохода людей и рассчитанного безопасного минимального расхода воздуха на аварийном участке. При этом сооружение должно устанавливаться на расстоянии от возводимой изолирующей взрывоустойчивой перемычки не менее, чем 50 м. Возможно дополнительное применение кевларовой (или композитной) сетки для усиления конструкции и улавливания летящих предметов. Её крепление осуществляется за верхний (у кровли) и нижний (у почвы) уголки.



а – вид с сверху; б – вид сбоку; в – общий вид в выработке; 1 – стойки временной крепи; 2 – равнополочные композитные уголки; 3 – тросы для дополнительного повышения устойчивости стоек; 4 – место возведения изолирующей взрывоустойчивой перемычки

Рис. 1. Схема конструкции предлагаемой многорядной системы перфорированных преград

Композитные уголки, изготовленные из нитей-волокон и стеклотканей, обеспечивают прочность и жёсткость, превосходящую металлические аналоги (табл. 1).

Таблица 1

Физико-химические свойства производимых композитных уголков [5]

Свойство	Ед. изм.	Значение
Предел прочности при растяжении: вдоль/поперёк	МПа	226,9/51,6
Предел прочности при сжатии: вдоль/поперёк	МПа	226,9/113,4
Предел прочности при сжатии: вдоль/поперёк	МПа	226,9/75,6
Модуль упругости при растяжении: вдоль/поперёк	ГПа	17,2/5,5
Модуль упругости при сжатии: вдоль/поперёк	ГПа	20,6/6,9
Модуль упругости при изгибе: вдоль/поперёк	ГПа	11,0/5,5
Модуль упругости	ГПа	19,2-22,0
Модуль сдвига	ГПа	2,9
Коэффициент Пуассона: вдоль/поперёк	мм/мм	0,35/0,15

При их производстве ровинг пропитывается многокомпонентными составами из смол. Феноловая смола обеспечивает повышенную термическую стойкость. Стеклопластиковый уголок существенно легче металла, в связи с чем монтаж сооружений выполняется оперативно и с меньшими трудозатратами (табл. 2). В табл. 3 приведены технические характеристики механических стоек ВК-7, ВК-8 и ВКМ.

Таблица 2

Сортамент производимого уголка равнополочного [5]

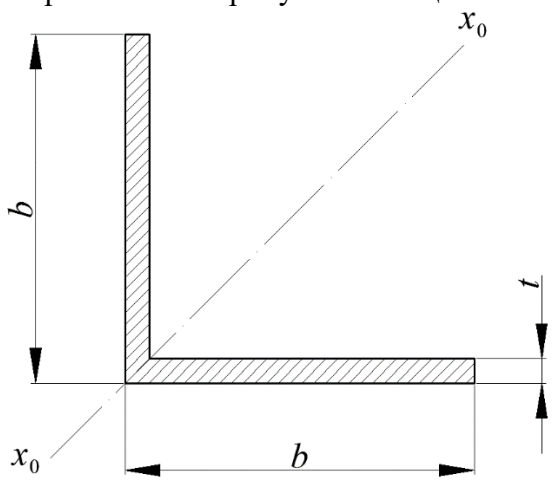
Высота полки *b*, мм	Толщина уголка *t*, мм	Масса *m*, кг/п. м.
25	3	0,26
40	3	0,43
50	5	0,84
75	6	1,62

Таблица 3

Технические характеристики стоек ВК-7, ВК-8, ВКМ [6]

№ п/п	Наименование параметра	Ед. изм.	Значение	
			ВК-7	ВК-8
1	Высота стойки в сдвинутом положении	мм	1550	2000
2	Высота стойки в раздвинутом положении	мм	2550	2950
3	Раздвижность	мм	950	
4	Номинальное рабочее сопротивление	кН	100±20	
5	Начальный распор стойки, не менее	кН	30	
6	Усилие на рукоятке при распоре стойки, не более	кН	0,4	
7	Максимальный угол падения пласта, не более	град	35°	
8	Масса, не более	кг	35	40

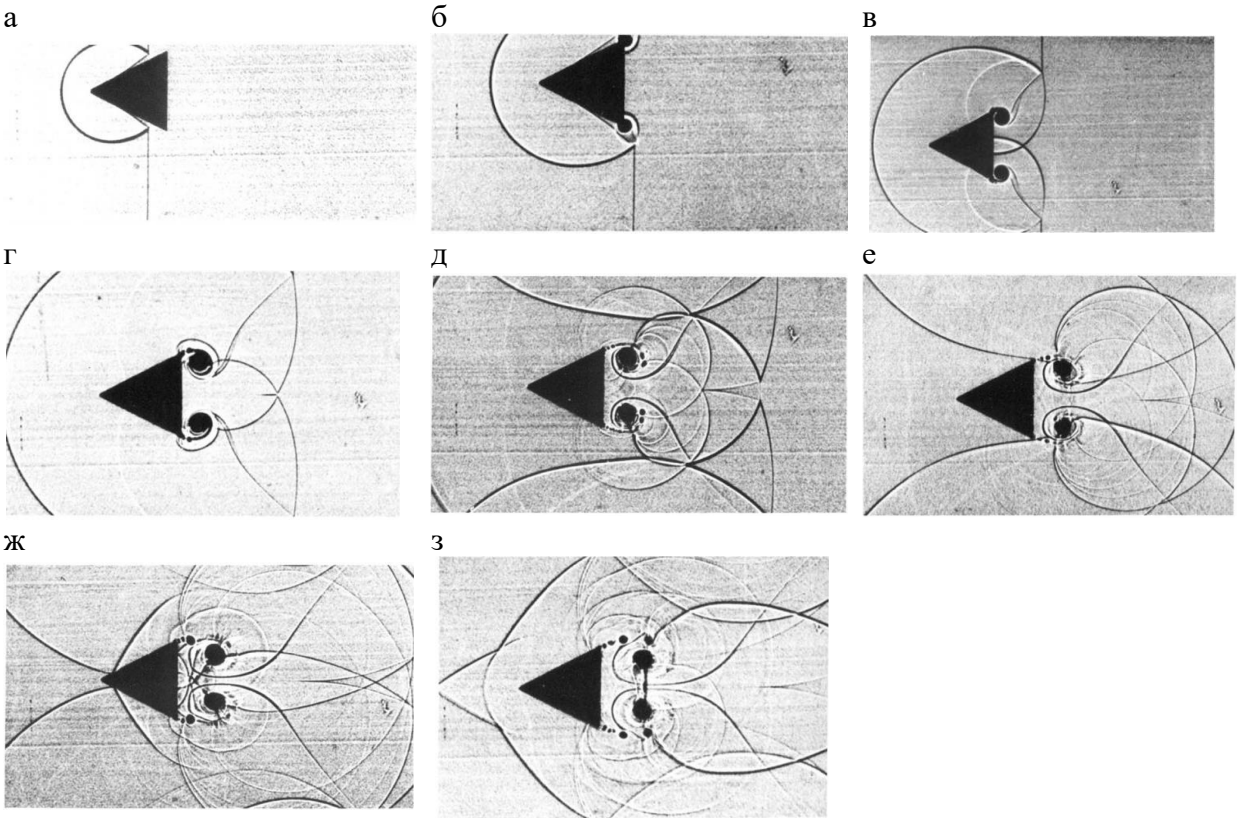
При развёртывании системы в месте установки каждого модуля необходимо выполнять выборку породы в почве и кровле горной выработки. После этого производится установка механических стоек ВК по ширине выработки; шаг их установки должен составлять 0,75-1,0 м. Параллельно почве выработки по направлению от кровли, с закреплением на стойках в специальных петлях, устанавливаются композитные равнополочные уголки. Предполагается установка в одной линии двух и более уголков внахлёст для обеспечения, при их раздвижке, заданной ширины преграды. Уголки крепятся таким образом, чтобы его полки упирались в стойки ВК, а острый край (ось x_0-x_0, рис. 2) был направлен вдоль оси выработки в сторону набегающей УВВ.



b – высота и ширина полок, мм; *t* – толщина, мм

Рис. 2. Основные параметры равнополочного уголка

При таком расположении клина уголка обеспечивается отражение части энергии УВВ и образование сложного процесса взаимодействия отражённых волн от смежных уголков, в результате чего происходит самогашение части энергии УВВ (рис. 3). Кроме того, после того как ударная воздушная волна проходит основание клина, происходит отрыв потока и зарождаются вихревые слои, которые в дальнейшем сворачиваются, на что также тратится часть энергии УВВ [7]. Дальнейшее взаимодействие клина с ударной воздушной волной приводит к возникновению всё усложняющейся картины из УВВ, линий скольжения и вихрей.



а-з – развитие процесса обыкновенного маховского отражения плоской ударной воздушной волны

Рис. 3. Дифракция ударной воздушной волны на конечном клине [7]

Численное моделирование процессов взаимодействия ударной воздушной волны с многорядной системой перфорированных преград. С целью оценки эффективности применения предложенной системы преград выполнено численное исследование процессов её взаимодействия с ударной воздушной волной. Для этой цели использован математический аппарат, приведённый в [8]. Моделирование выполнено с применением C++-библиотеки OpenFOAM [9, 15, 16]. Stl-модель данной преграды построена с использованием САПР-системы FreeCAD (рис. 1 в). Принято, что внутренняя часть уголка заполнена (рис. 4 а), а стойки имеют квадратную форму поперечного сечения (рис. 4 б).

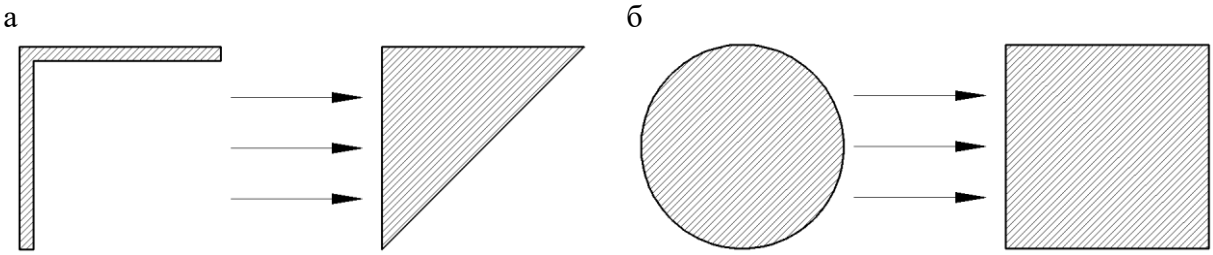


Рис. 4. Принимаемые геометрические допущения при построении модели

В качестве базовой модели вычислительной области принята модель подготовительной выработки, основные геометрические параметры и аэродинамические характеристики которой приведены в табл. 4.

Таблица 4

Геометрические параметры модели и аэродинамические характеристики выработки

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Ед. изм.	Значение
1	Ширина	w	м	5,0
2	Высота	h	м	2,5
3	Площадь поперечного сечения	S	м^2	12,5
4	Периметр	P	м	15,0
5	Длина	$l_{г.в}$	м	350
6	Относительная шероховатость стенок выработки	$\varepsilon_ш$	-	0,03003
7	Коэффициент сопротивления трения	$\alpha \cdot 10^3$	Н·с^2/м^4	8,5843
8	Расстояние от устья выработки до места возведения перемычки	$l_п$	м	6,0
9	Расстояние от забоя выработки до первого модуля системы	$l_{уст}$	м	250
10	Расстояние между модулями системы	$L_{мод}$	м	10

В табл. 5 указаны основные параметры для одного модуля системы перфорированных преград. Настройка модели в части начальных условий выполнена на основе рекомендаций, приведённых в [10], результатов исследований, полученных в ФИЦ УУХ СО РАН и НИ ТГУ [11, 12], а также выполненных ранее авторами исследований [8, 13]. Протяжённость исходной зоны загазования принята равной L_0 = 30 м, что соответствует для условий взрыва метановоздушной смеси и угольной пыли избыточному давлению в зоне взрыва $\Delta P_{ф.зв}$ = 0,42 МПа [11].

Таблица 5

Основные параметры для одного модуля системы преград

b, мм	$w_{осн}$, мм	$S_{ст1}$, м^2	Количество линий композитных уголков n, шт., и коэффициент перфорации $\alpha_{перф}$, доли ед., при приблизительном шаге для регулярной установки уголков по вертикали (от кровли до почвы) $l_ш$, равном 0,05м	
			$n_{шт}$	$\alpha_{перф}$
25	35,4	0,0885	30	0,57
50	70,7	0,1768	21	0,44
75	106,1	0,2653	16	0,38

Примечание. b – высота полки, мм; $w_{осн}$, $S_{ст1}$ – ширина и площадь, соответственно, уголка по основанию, мм, м^2

Моделирование выполнено для условий установки одного, двух и трёх модулей перфорированных преград многорядной системы. Всего проведено 9 численных расчётов. В виду большой стоимости вычислений, связанной с применением мелкой сетки (поэтапное её сгущение перед участком с установленным модулем перфорированной преграды) использован масштабируемый вычислительный кластер типа Beowulf (GNU\Linux) [14].

Результаты расчётов приведены на рис. 5-6. Использованы следующие обозначения: 1 – первый модуль; 2 – второй модуль; 3 – третий модуль; 4 - $\Delta p_{335м}$ – место измерения избыточного давления во фронте набегающей ударной воздушной волны (335 м от забоя выработки); 5 – место возведения изолирующей взрывоустойчивой перемычки.

В табл. 6 и на рис. 5 приведена эффективность гашения ударной воздушной волны при использовании многорядной системы перфорированных преград в зависимости от высоты полки уголка и количества модулей системы.

Таблица 6

Эффективность гашения УВВ при использовании многорядной системы перфорированных преград

b, мм	0 модулей	1 модуль		2 модуля		3 модуля	
	$\Delta p_{335м}$, МПа	$\Delta p_{335м}$, МПа	$k_{эф}$	$\Delta p_{335м}$, МПа	$k_{эф}$	$\Delta p_{335м}$, МПа	$k_{эф}$
25	0,085	0,071	0,16	0,065	0,24	0,058	0,32
50		0,065	0,24	0,055	0,35	0,046	0,46
75		0,060	0,29	0,048	0,44	0,037	0,56

Примечание. В таблице использованы следующие обозначения:
b – высота полки, мм;
$\Delta p_{335м}$ – избыточное давление во фронте набегающей волне перед местом возведения перемычки, МПа (позиция 4 - $\Delta p_{335м}$ на рис. 6-8);
$k_{эф}$ – эффективность гашения УВВ, доли ед.

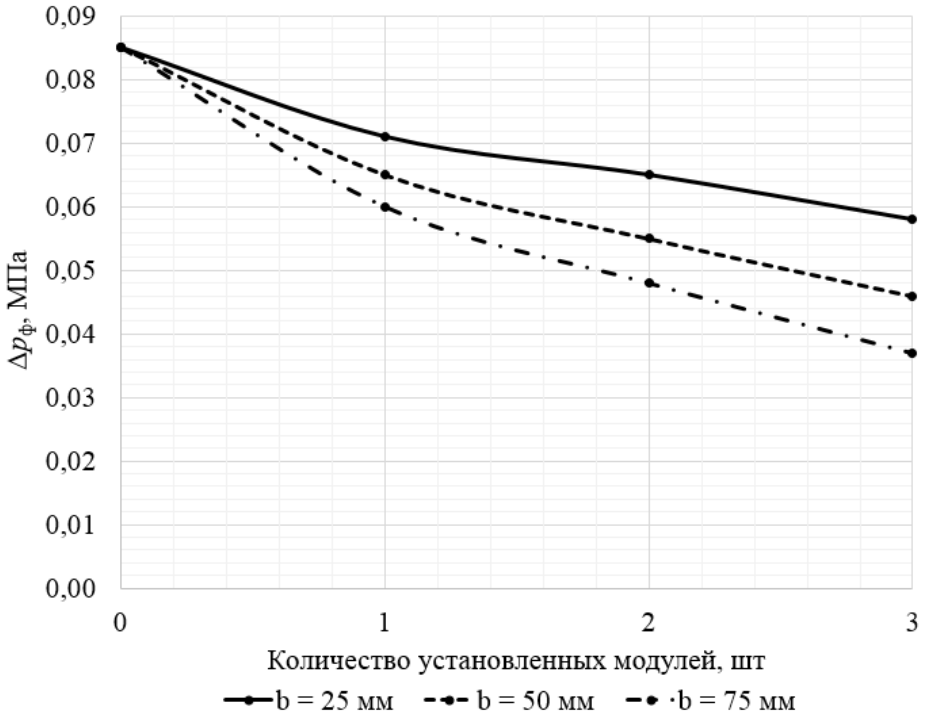


Рис. 5. Динамика избыточного давления $\Delta p_{ф}$ в т.4 - $\Delta p_{335м}$ (рис. 6-8) в зависимости от количества модулей и ширины полки уголка

Выводы. По результатам численного моделирования обоснована эффективность работы многорядной системы перфорированных преград: при размере полки уголков 75 мм и установке 3 модулей системы коэффициент эффективности гашения ударной воздушной волны составляет 56 %.

Сформирована и подана заявка на государственную регистрацию изобретения (патент). Для подтверждения фактической эффективности разработанной многорядной системы требуются дополнительные экспериментальные исследования.

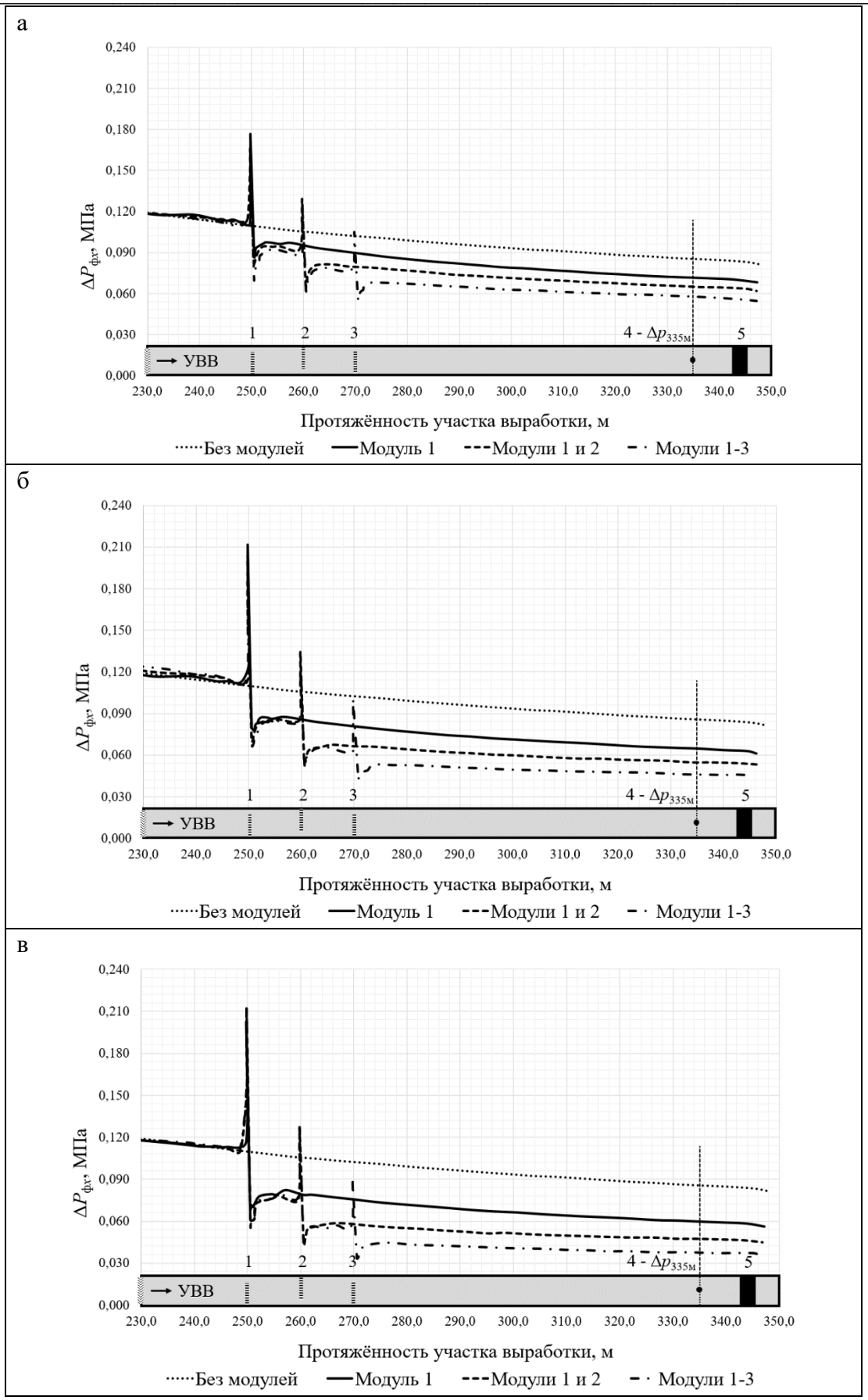


Рис. 6. Динамика избыточного давления $\Delta p_{фх}$ во фронте УВВ на прямолинейном участке горной выработки при компоновке модулей системы перфорированных преград уголком с размером полки: а – 25 мм, б – 50 мм; в – 75 мм

Список литературы

1. Инструкция по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах, на которых ведутся горные работы: утверждена Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11.12.2020. – URL: https://www.consultant.ru/document/ cons_doc_LAW_372027.

2. Мясников А.А., Миллер Ю.А., Комаров Н.Е. Вентиляционные сооружения в угольных шахтах. – М.: Недра, 1983. – 270 с.

3. Методика оценки толщины изолирующих взрывоустойчивых перемычек / Ю.М. Говорухин, А.Н. Домрачев, В.Г. Криволапов [и др.] // Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2023. – № 9. – С.333-336.

4. К вопросу о формализации оценки действий руководителя ликвидации аварии при ведении аварийно-спасательных работ на горных предприятиях / А.Н. Домрачев, В.Г. Криволапов, Ю.М. Говорухин [и др.] // Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2018. – № 4. – С.476-479.

5. Уголок композитный стеклопластиковый. – URL: https://arm-plast.ru/czenyi/kompozitnyij-profil/ugolok-kompozitnyij.html.

6. Стойка временной крепи ВК (ВК7, ВК8, ВКМ). – URL: https://stt-trading.ru/catalog/struts.

7. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. – М.: Мир, 1986. – 84 с.

8. Моделирование процессов распространения параметров ударной воздушной волны по выработкам и её взаимодействия с инженерными сооружениями / Ю.М. Говорухин, А.Н. Домрачев, В.Г. Криволапов [и др.] // Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2023. – № 9. – С.322-333.

9. Программирование на языке C++ в среде Qt Creator / Е.Р. Алексеев, Г.Г. Злобин Д.А. Костюк [и др.]. – М.: ALT Linux, 2015. – 448 с.

10. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

11. Методика газодинамического расчёта параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли: введена в действие Ростехнадзором от 27.04.2004. – URL: http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=331468#0192484005776400212.

12. Ударные волны при взрывах в угольных шахтах / Д.Ю. Палеев, И.М. Васенин, В.Н. Костеренко [и др.]. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 312 с.

13. О фактических аэродинамических сопротивлениях горных выработок, полученных в ходе воздушно-депрессионных съёмок на угольных шахтах / Ю.М. Говорухин, А.Н. Домрачев, В.Г. Криволапов [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2022. – № 3. – С. 251-261.

14. Говорухин Ю.М., Криволапов В.Г., Палеев Д.Ю. Исследование аэродинамических особенностей тупиковых выработок, проветриваемых за счёт турбулентной диффузии // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 1. – С. 392-400.

15. Jasac H. Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Application to Fluid Flows. – Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy of the University of London and Diploma of Imperial College. – June 1996. – 396 p.

16. Moukalled F., Mangani L., Darwish M. The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM and Matlab. – Springer, 2016. – 817 p.

УДК 622.411.5: 622.33

ТОНКОДИСПЕРСНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПЫЛИ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ДОБЫЧЕ И ПЕРЕРАБОТКЕ УГЛЕЙ

[1,2]д.т.н. Журавлева Н.В., [3]Журавлева Е.В., [1]Кутищев А.С.
1 – АО «Западно-Сибирский испытательный центр», г. Новокузнецк, Россия
2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия
3 – АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В данной работе представлен обзор методов и подходов к контролю тонкодисперсной пыли в атмосферном воздухе промышленного города, а также в зоне действия предприятий по добыче и переработке углей. Данные о гранулометрическом составе угольной пыли, золы уноса ТЭЦ получены методом лазерной гранулометрии.

Ключевые слова: добыча и переработка углей, пыль каменного угля, зола уноса, взвешенные частицы PM10 и PM2,5 в атмосферном воздухе.

Вопросы качества атмосферного воздуха в промышленных городах России находятся под постоянным контролем. С 2019 года в России в составе национального проекта «Экология» реализуется федеральный проект «Чистый воздух», который направлен на улучшение экологической обстановки и снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. На первом этапе в него вошли 12 городов – промышленных центров с высоким и очень высоким уровнем загрязнения воздуха: Братск, Красноярск, Липецк, Магнитогорск, Медногорск, Нижний Тагил, Новокузнецк, Норильск, Омск, Челябинск, Череповец и Чита. Ключевой задачей проекта является к 2030 году вдвое сократить выбросы во всех этих городах относительно 2017 года. Достигнуть целей планируется за счёт мероприятий по снижению выбросов от промышленных предприятий, объектов коммунальной и транспортной инфраструктуры. С 1 сентября 2023 года в «Чистом воздухе» 43 города, к федеральному проекту присоединились ещё 31, большинство которых находятся в Сибири и на Дальнем Востоке. Одной из основных проблем при достижении ключевых показателей проекта «Чистый воздух» является сокращение выбросов различных видов пыли предприятиями горно-металлургического и теплоэнергетического комплексов [1]. Поскольку в этих регионах осуществляется активная добыча и переработка угля, то вопросы контроля в атмосферном воздухе показателей, связанных с этой отраслью, являются актуальными.

Распоряжением Правительства Российской Федерации № 2909-р от 20.10.2023 г. расширен перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды [2]. В обновлённый перечень добавлены 79 веществ, загрязняющих воздух, водные объекты и почвы. Среди них углерод (сажа), абразивная и асбестосодержащая пыль, смолистые вещества в составе выбросов производства алюминия и др. Перечень актуализирован на основании предложений Росгидромета, Росприроднадзора, Роспотребнадзора и научных организаций, в том числе на основании опыта реализации проекта «Чистый воздух» с 2019 г.

В табл. 1 приведены нормативы содержания взвешенных веществ, пыли, сажи, золы твердого топлива в атмосферном воздухе населенных мест, которые вошли в перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды.

Таблица 1

Нормативы содержания взвешенных веществ, пыли неорганической, сажи, золы твердого топлива в атмосферном воздухе населенных мест [3]

Наименование показателя	ПДК в атмосферном воздухе, мг/м^3			Класс опасности
	максимально разовая	средне-суточная	средне-годовая	
Взвешенные частицы PM10	0,3	0,06	0,04	–
Взвешенные частицы PM2,5	0,16	0,035	0,025	–
Взвешенные вещества	0,5	0,15	0,075	3
Пыль каменного угля	0,3	0,1	–	3
Пыль неорганическая с содержанием кремния менее 20 процентов	0,5	0,15	–	3
Пыль неорганическая с содержанием кремния 20 – 70 процентов	0,3	0,1	–	3
Пыль неорганическая с содержанием кремния более 70 процентов	0,15	0,05	–	3
Углерод (пигмент черный или углеродсодержащий аэрозоль (сажа))	0,15	0,05	0,025	3
Зола твердого топлива	0,3 (ОБУВ)	–	–	–

Примечание: «–» значение не установлено.

По данным Росгидромета Сибирский федеральный округ расположен в зоне высокого и очень высокого потенциала загрязнения атмосферы и характеризуется неблагоприятными метеорологическими условиями (высокая повторяемость приземных инверсий, застоев воздуха, слабых ветров, туманов и др.). Эти факторы приводят к накоплению загрязняющих веществ в приземном слое воздуха и созданию высоких уровней загрязнения атмосферного воздуха городов.

В Кемеровской области климатические условия рассеивания загрязняющих веществ также неблагоприятные, регион относится к зоне повышенного потенциала загрязнения атмосферы. Сеть мониторинга загрязнения атмосферы состоит из 18-ти станций регулярных наблюдений в 3-х городах. Уровень загрязнения воздуха в Новокузнецке оценен как очень высокий, город включен в Приоритетный список городов России с наибольшим уровнем загрязнения воздуха. В Кемерово уровень загрязнения характеризуется, как высокий, в Прокопьевске — низкий.

По данным ежегодного отчета Росгидромета о состоянии загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2023 год [4] среднегодовые концентрации превышают 1 ПДК для взвешенных веществ в Новокузнецке и Прокопьевске. В Новокузнецке зафиксированы среднегодовые концентрации взвешенных частиц PM10 и PM2,5 и семи загрязняющих веществ выше 1 ПДК.

По данным Кемеровского ЦГМС – филиала ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» за 2023 год [5] количество проб атмосферного воздуха с превышением ПДК загрязняющих веществ на территории Новокузнецкого городского округа составило: для взвешенных веществ – 95 из 9362 проб, для взвешенных частиц PM2,5 – 104 из 5611 проб, для взвешенных частиц PM10 – 29 из 5611 проб.

Средняя за год концентрация взвешенных веществ уменьшилась в 1,2 раза. Максимальные из разовых концентраций зарегистрированы в Центральном районе и составили по взвешенным веществам 2,6 ПДК. Средние за год концентрации взвешенных

частиц PM2,5 относительно 2022 года уменьшились в 1,6 раза, взвешенных частиц PM10 – в 1,5 раза. Максимальные из разовых концентраций составили 3,8 ПДК и 2,3 ПДК соответственно в Центральном районе. Загрязнение воздушного бассейна металлами невелико: максимальные концентрации из среднемесячных значений не превышали допустимые санитарные нормы. За пятилетний период (2019-2023 гг.) среднегодовая концентрация взвешенных веществ увеличилась в 1,7 раза. За период 2019-2021 гг. наблюдения по взвешенным частицам PM2,5 и PM10 в Новокузнецке не проводились.

Таким образом, в Кемеровской области в целом и в Новокузнецке в особенности климатические условия рассеивания взвешенных веществ и взвешенных частиц PM2,5 и PM10, а также функционирование угледобывающих и углеперерабатывающих производств создают условия для формирования повышенного уровня загрязнения атмосферного воздуха частицами промышленной пыли. Учитывая эти факты актуальной является задача изучения источников, состава и свойств промышленных тонкодисперсных пылей и, прежде всего, пыли каменного угля и зол уноса.

Вопросы изучения состава тонкодисперсных промышленных пылей и особенности их распределения в зонах влияния промышленных предприятий на территориях крупных поселений Пермского края – в городах Пермь, Березники, Чусовой, Соликамск, рассмотрены в работе [6]. Авторы показали наличие мелкодисперсных частиц в выбросах различных производств: в машиностроении – до 13 % PM2,5, до 40 % PM10; в чёрной металлургии – до 79 % PM2,5, до 84 % PM10; в цветной металлургии – до 43 % PM2,5, до 88 % PM10; в горнодобывающей промышленности – до 21% PM2,5, до 49 % PM10; при переработке горных отходов – до 57 % PM2,5, до 59 % PM10 [6]. В работе установлено, что концентрации PM2,5 и PM10 в атмосферном воздухе в зонах влияния предприятий нередко превышают установленные гигиенические нормативы, а зоны влияния выбросов мелкодисперсных частиц как правило перекрывают зоны влияния выбросов «взвешенных веществ».

В статье [7] приведены результаты инструментального определения массовой концентрации взвешенных частиц PM2.5, PM10 и общей пыли (TSP), содержащихся в атмосферном воздухе г. Перми вблизи автомобильных дорог. Измерения проводили с использованием лазерного анализатора аэрозолей DustTrak 8533. Полученные данные авторы рекомендуют использовать для расчета рисков для здоровья населения от воздействия выбросов автотранспортных средств, оценки содержания мелкодисперсных частиц PM2.5 и PM10 вблизи автомагистралей крупного промышленного центра и планирования исследований по мониторингу.

В статье [8] рассмотрен вопрос о запыленности жилых зон Волгограда взвешенными частицами PM10 и PM2,5. Авторы определили, что источниками выделения мелкодисперсной пыли в жилые районы являются транспорт и находящаяся рядом промышленность. Полученные данные свидетельствуют о том, что содержание частиц PM10 в воздушной среде города составляет от 15 до 80 %, большая их часть поступает в атмосферный воздух в районах, на территории которых расположены крупные промышленные предприятия.

В работе [9] авторы показали, что при изучении загрязнения атмосферного воздуха тонкодисперсными частицами необходимо учитывать и природные факторы. Представленные в работе данные свидетельствуют о том, что в глобальном масштабе на долю природной пыли в загрязнении атмосферы частицами PM2,5 в среднем приходится 22 %, однако взносы по категориям источников существенно варьируются по регионам. Так, природная пыль является основным донором PM2,5 на Ближнем Востоке (52 %), в Океании (25 %), Бразилии и Африке (22 %). Во всем мире 22 % частиц PM10 в городскую окружающую среду вносится пылью естественного происхождения.

В работе [10] автор проводил определение PM2,5 и PM10 в различных функциональных зонах города Тобольск и показал, что их содержание невелико, средние

геометрические значения составляют 5 и 7 мкг/м^3 соответственно, что значительно ниже установленных максимальных разовых концентраций по этому показателю. В работе не выявлено значимых корреляционных связей между концентрациями PM2,5 и PM10 и показателями температуры и влажности воздуха.

При изучении распределения PM10 и PM2.5 в атмосферном воздухе на территории жилой зоны города Белгорода показано, что основной вклад в уровень загрязнения мелкодисперсными взвешенными частицами вносит ЗАО «Белгородский цемент» [11]. Автором получено соотношение PM10 : PM2.5 : TSP – 0,57 : 0,28 : 1,0. И установлено, что доля частиц фракции PM10 в составе суммы твердых частиц составляет от 55,1 до 58,6 %, PM2.5 – 25,5–32,4 %.

Автор [12] определил содержание взвешенных частиц PM2,5 и PM10 в приземном слое атмосферы Тюмени с помощью ручного портативного счетчика частиц AIR TESTER CW-HAT 200. Показано, что содержание частиц PM2,5 и PM10 в воздушной среде города в несколько раз меньше максимальных разовых предельно допустимых концентраций, что позволяет сделать вывод об умеренном загрязнении приземного воздуха Тюмени взвешенными частицами. При помощи программного обеспечения ArcGIS 10.6.1 были построены схемы распределения PM2,5 и PM10 по территории города, выявлены два участка с повышенным уровнем загрязнения, причинами которого следует считать высокую автотранспортную нагрузку и режим ветров соответственно. В работе не выявлено значимых корреляций между содержанием PM2,5 и PM10 и температурой воздуха; отмечена слабая отрицательная корреляция с относительной влажностью воздуха.

Процессы добычи, транспортировки и переработки угля являются одними из самых значительных источников поступления тонкодисперсных пылей в атмосферный воздух.

В обзоре [13] при оценке экологических проблем добычи угля показано, что при массовых взрывах в карьерах образуется пылегазовое облако объемом до 15–20 млн. м^3, высотой до 1500–1600 м, из которого в течение нескольких дней в радиусе 3–4 км рассеивается 200–500 т мелкодисперсной (диаметром менее 5 мкм) пыли, ее концентрация в карьере составляет 0,134–0,216 кг/м^3 [14].

Загрязнение воздуха в районе предприятий угольной промышленности зависит от климатических и горно-геологических условий [15]. Например, при сухом континентальном климате, особенно при сильных ветрах, создаются условия для интенсификации поступления в приземные слои атмосферы и перемещения в них пыли. Уже при скорости ветра 2 м/с сухая пыль сдувается и переносится на значительные расстояния. Росту выбросов пыли в атмосферу также способствует сооружение высоких отвалов, поскольку скорость ветра увеличивается по мере роста их высоты. Всего при добыче и обогащении угля в 2016 г. в России в воздух поступило 58,4 тыс. т пыли, что составляет 0,15 кг пыли/т добытого угля.

В работах авторов [16, 17] изучены вопросы количественной оценки содержания в углях взвешенной пыли и ее влияния на объекты окружающей среды.

Нами ранее было показано, что пыль каменного угля может быть источником поступления в окружающую среду токсичных микроэлементов и канцерогенных соединений [18, 19], а содержание частиц PM10 и PM2,5 в пыли каменного угля, образующейся на предприятии по перевалке углей, может достигать 30 % [20].

Метод лазерной гранулометрии в исследовании тонкодисперсной пыли. Определение гранулометрического состава образцов пыли каменного угля и золы уноса от сжигания угля проводили методом лазерной дифракции с использованием анализатора крупности частиц *Analysette 22 MicroTec plus* («*FRITSCH*», Германия). Измерительный блок анализатора имеет два полупроводниковых лазера: зеленый (λ=532 нм, 7 мВт) и инфракрасный (λ=850 нм, 9 мВт), которые позволяют проводить измерения в диапазоне 0,08-2000 мкм. При этом детектор регистрирует 108 классов размеров частиц. Блок диспергирования имеет объем жидкости 300-500 мл, оснащен центробежным насосом с

регулируемой производительностью и ультразвуковым излучателем с регулируемой мощностью (максимальная мощность 60 Вт, частота 40 кГц). В контуре пробы используются следующие материалы: нержавеющая сталь, тефлон, стекло ВК7, *Viton Extreme*, шланги из *Norprene A-60-G*. В качестве рабочей жидкости в блоке диспергирования использовалась водопроводная вода, дополнительно очищенная системой катриджных фильтров. Для создания дисперсионной среды применяли поверхностно-активное вещество ПАВ–901 – *Dusazin 901* (*Fritsch*, Германия). Условия проведения определений подробно описаны в работе [21].

Распределение частиц по размерам в образце пыли каменного угля, образующейся на предприятии по перевалке углей, приведено в табл. 2; гистограмма распределения частиц по размерам представлены на рис. 1.

Таблица 2

Распределение частиц по размерам в образце пыли каменного угля, образующейся на предприятии по перевалке углей

Содержание фракций пробы, %	Размер частиц, мкм
от 0 до 10	2,38
от 0 до 50	8,05
от 0 до 90	55,09

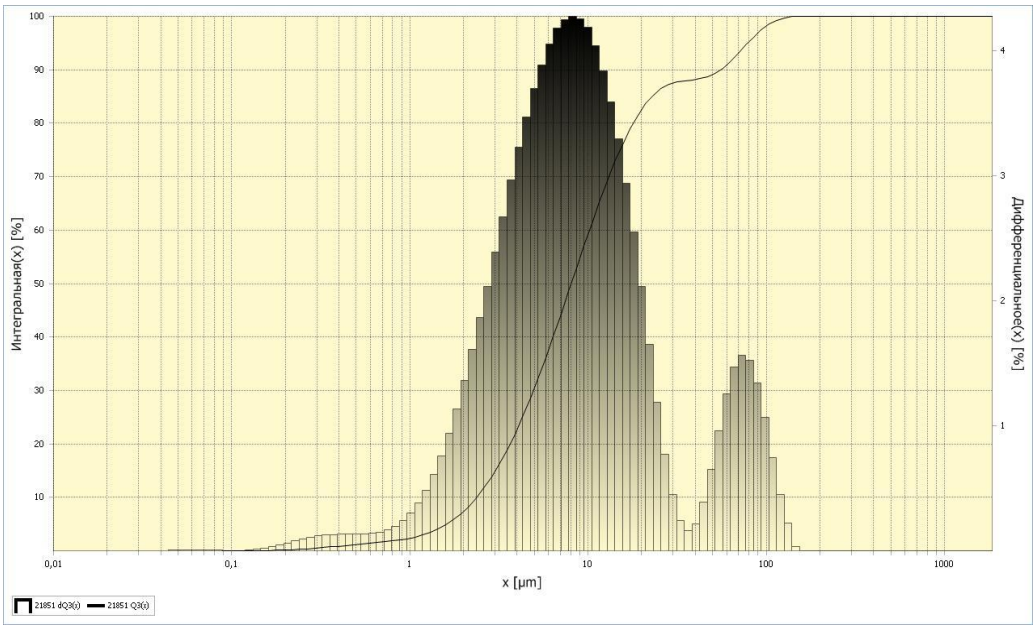


Рис. 1. Гистограмма распределения частиц по размерам в образце угольной пыли, образующейся на предприятии по перевалке углей

Распределение частиц по размерам в образце золы уноса от сжигания угля приведено в табл. 3; гистограмма распределения частиц по размерам представлены на рис. 2.

Таблица 3

Распределение частиц по размерам в образце золы уноса от сжигания угля

Содержание фракций пробы, %	Размер частиц, мкм
от 0 до 10	0,99
от 0 до 50	3,89
от 0 до 90	12,14

Согласно данным гранулометрического анализа в данных образцах пыли и золы уноса содержится более 50 % частиц с размером менее 10 мкм.

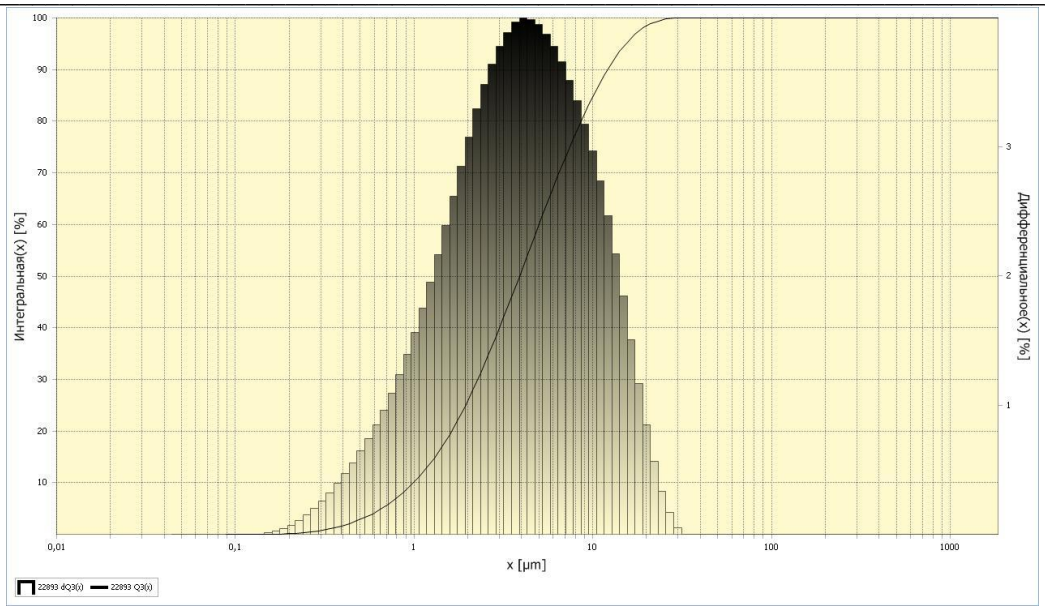


Рис. 2. Гистограмма распределения частиц по размерам в образце золы уноса от сжигания угля

Для оценки токсичности тонкодисперсных угольных систем необходимо выполнять измерение распределения частиц по размерам с определением доли наиболее опасных классов. В РФ взвешенные частицы PM10 и PM2,5 включены в перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды.

Определение взвешенных частиц PM10 и PM2,5 в атмосферном воздухе должно быть обязательным для предприятий по добыче и переработке углей. Содержание этих частиц в атмосферном воздухе нормировано, разработаны методики определения, доступны средства измерения. Для этих целей наиболее информативным и достоверным является метод лазерной дифракции.

Разрабатываемые программы производственного экологического контроля на данных предприятиях должны включать инвентаризацию выбросов, изучение состава и свойств промышленных тонкодисперсных пылей, определение частиц PM2,5 и PM10, учитывая, что пыль каменного угля является источником поступления в объекты окружающей среды определенного ряда токсичных металлов и канцерогенных соединений (ртуть, свинец, железо, медь, полициклические ароматические углеводороды и др.)

Определение этих элементов/соединений, как составной части пыли каменного угля, поступающих в составе угольной пыли в объекты окружающей среды, также должно входить в программы мониторинга атмосферного воздуха.

Список литературы

1. Национальный проект Экология. Федеральный проект «Чистый воздух». – URL: https://mnr-air.ru/.

2. Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды» (с изменениями на 23 декабря 2023 года): распоряжение Правительства Российской Федерации от 20 октября 2023 года № 2909-р. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1303478770?marker=6560IO (дата обращения 01.05.2024 г.).

3. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 г. № 2.

4. Ежегодник состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2022 г. / М.Л. Довольская, М.С. Загайнова, Т.П. Ивлева [и др.]. – Санкт-Петербург: РОСГИДРОМЕТ, ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова», 2023 – 256 с.

5. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области – Кузбасса в 2023 году // Администрация правительства Кузбасса министерство природных ресурсов и экологии Кузбасса. Кемерово, 2024 – 290 с. – URL: http://kuzbasseco.ru/wp-content/uploads/2024/04/Doklad_za_2023.pdf.

6. Загороднов С.Ю., Май И.В. Кокоулина А.А. Мелкодисперсные частицы (PM2,5 и PM10) в атмосферном воздухе крупного промышленного региона: проблемы мониторинга и нормирования в составе производственных выбросов // Гигиена и санитария. – 2019. – 98(2). – С. 142-147. – DOI: http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-2-142-147.

7. Исследование содержания мелкодисперсных частиц в атмосферном воздухе вблизи автомобильных дорог / Т.С. Уланова, М.В. Антипьева, М.В. Волкова [и др.] // Анализ риска здоровью. – 2016. – № 4. – С. 38–45. – DOI: 10.21668/health.risk/2016.4.05.

8. Орлов Р.В., Стреляева А.Б., Барикаева Н.С. Оценка взвешенных частиц PM10 и PM2.5 в атмосферном воздухе жилых зон // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 12 (134). – С. 39-41.

9. Горшков Е.В., Насими М.Х. Исследование загрязнения городской воздушной среды мелкодисперсной пылью природного происхождения // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4. – URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_160_gorshkov_nasimi.pdf_90b8c98b67.pdf.

10. Пожитков Р.Ю. Разовые концентрации взвешенных частиц PM2,5 и PM10 в приземных слоях атмосферы г. Тобольск // Вестник НВГУ. – 2021. – № 2(54). – С. 119-126.

11. Боровлев А.Э. Исследование содержания мелкодисперсных частиц в атмосферном воздухе жилых зон // Региональные геосистемы. – 2020. – Т. 44. – № 1. – С. 97-103. – DOI 10.18413/2712-7443-2020-44-1-97-103.

12. Пожитков Р.Ю. Содержание взвешенных частиц PM2,5 и PM10 в приземном слое атмосферы г. Тюмени в июне 2020 г. // Оптика атмосферы и океана. – 2020. – 33. – № 12. – С. 913-917. – DOI: 10.15372/AOO20201202.

13. Янин Е.П. Особенности воздействия на окружающую среду разработки угольных месторождений // Экологическая экспертиза. – 2019. – № 6. – С. 2-59. DOI: 10.36535/0869-1010-2019-06-1.

14. Сенкус В.В. Экологические проблемы горнодобывающих предприятий в Кузбассе // ЭКО-бюллетень ИнЭкА. – 2002. – Т. 73. – № 2. – С. 73–78.

15. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 37 – 2017. Добыча и обогащение угля // Бюро НДТ. Москва. – 2017. – 294 с.

16. Методическое и инструментальное обеспечение количественной оценки содержания в углях взвешенной пыли / С.А. Эпштейн, В.А. Красилова, Е.Л. Коссович [и др.] // Горный журнал. – 2023. – №6. – С. 77-83. – DOI: 10.17580/gzh.2023.06.11.

17. Красилова В.А. Обоснование и разработка методов определения состава угольной пыли для оценки загрязнения окружающей среды при добыче и переработке углей: автореф. дис. на соиск. учен. степ. кан. техн. наук. – Москва, 2023. – 34 с.

18. Вопросы контроля концентраций углеродсодержащей пыли в атмосферном воздухе при добыче и переработке угля / Н.В. Журавлева, Е.Р. Хабибулина, Е.В. Журавлева [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2020. – № 3. – С. 33-44. – DOI: 10.26730/1999-4125-2020-3-33-44.

19. Журавлева Н.В. Обоснование, разработка и развитие методов оценки влияния добычи и переработки углей Кузнецкого угольного бассейна на экологическое состояние природной среды: дис. … докт. техн. наук. – Кемерово, 2017. – 341 с.

20. Журавлева Е.В., Красилова В.А., Журавлева Н.В. Определение концентрации полициклических ароматических углеводородов в пыли каменного угля, образующейся на предприятиях по транспортировке и переработке угля // Вестник Кузбасского государственного технического университета – 2022. – №4 (152). – С. 43-51. – DOI: 10.26730/1999-4125-2022-4-43-51.

21. Журавлева Н.В., Потокина Р.Р., Исмагилов З.Р. Определение гранулометрического состава угольных порошков методом лазерной дифракции // Химия твердого топлива. – 2016. – № 5. – С. 56–62.

УДК 339.5, 338.2

ТЕХНОЛОГИИ УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ И ТЕХНОЛОГИИ НИЗКОУГЛЕРОДНОЙ ЭКОНОМИКИ – СУБСИТУТЫ ИЛИ КОМПЛЕМЕНТАРИИ?

к.э.н. Федюнина А.А., к.т.н. Симачев Ю.В.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия

Аннотация. В статье обсуждаются долгосрочные тренды международной торговли углем и товарами низкоуглеродной экономики (НУТ). Показано, что увеличение экспорта НУТ заметно в развивающихся странах, особенно в Китае; в России растёт импорт НУТ при параллельном увеличении экспорта угля. Оценена торговля НУТ для российских регионов. Выявлено, что участие в мировой торговле НУТ положительно связано со снижением выбросов в атмосферу углекислого газа в российских регионах.

Ключевые слова: угольная отрасль, низкоуглеродные товары, развивающиеся страны, российские регионы, выбросы углекислого газа.

В последние десять лет существенно вырос интерес к анализу производства и использования товаров низкоуглеродной экономики (НУТ). Это связано с нарастанием количества и частоты возникающих экологических катастроф, проблемами с достижением целей устойчивого развития ООН. Однако развитие зеленых технологий существенно ограничивается неопределенностью, связанной как с развитием климата, технологическим развитием и экологической политикой (Haas et al., 2023; Way et al., 2022; Портанский, 2014). При этом, за последние двадцать лет доля экспорта зеленых и возобновляемых продуктов в общем объеме торговли не выросла (Mealy, Teytelboym, 2022). Причина в том, что, многие зеленые и возобновляемые энергетические продукты имеют не только преимущества по сравнению с традиционными технологиями, но и недостатки.

Вклад торговли товарами угольной промышленности и товарами низкоуглеродной экономики в мировую торговлю за рассматриваемый период 2000-2022 годов вырос. Доля угля в мировом экспорте с 2000 по 2022 год колеблется, но в целом наблюдается устойчивый тренд к увеличению. Начиная с относительно низких значений в начале рассматриваемого периода (около 0,3% в 2000 году), доля угля постепенно увеличивается, достигая пика в 2022 году (0,98%). Это может быть связано с ростом мирового спроса на энергию, особенно в развивающихся странах, где уголь по-прежнему остается важным источником энергии.

В структуре спроса на уголь и товары с низкоуглеродными технологиями по странам по уровню развития наблюдаются существенные различия, которые стали особенно характерны после мирового экономического кризиса 2008-2009 гг. Страны с высоким уровнем доходов стали резко наращивать свою долю в мировом импорте НУТ, при этом несколько сокращая свой вклад в мировой импорт угля. Таким образом, можно говорить о

некотором замещении импорта угля НУТ в развитых странах. В развивающихся странах импорт НУТ и угля носит скорее комплементарный характер (рис. 1).

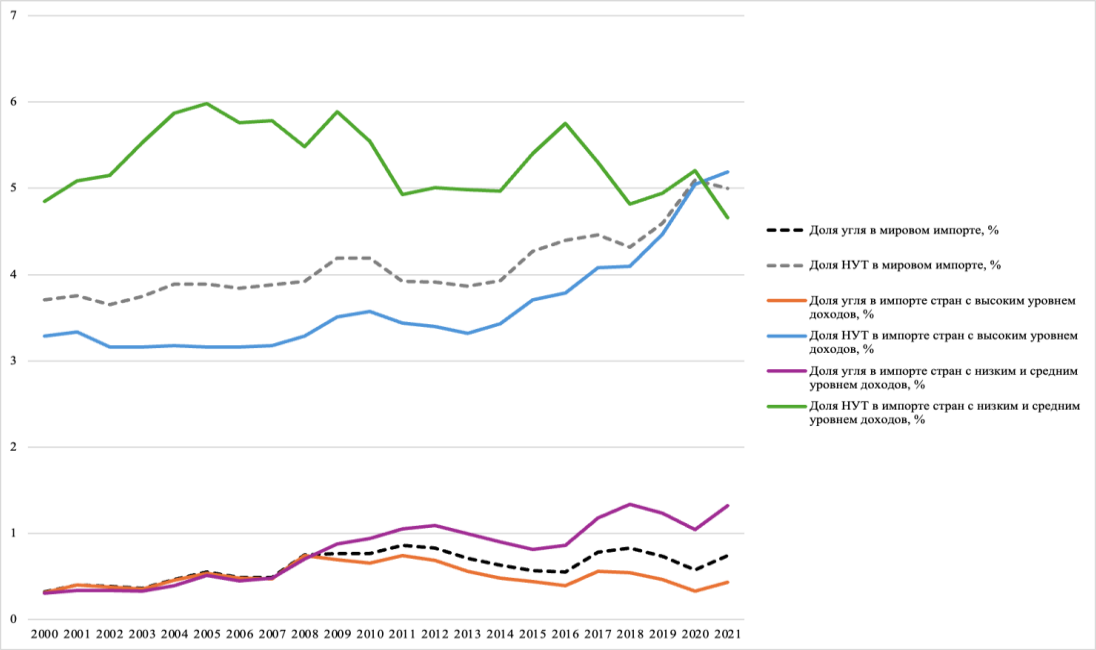


Рис. 1. Доля угля и НУТ в импорте стран по уровню доходов, 2000-2021 гг.

Доля товаров низкоуглеродной экономики в мировом экспорте также показывает некоторые колебания, но общий тренд указывает на увеличение с 2000 по 2022 год. Начиная с уровня около 3,7% в 2000 году, эта доля достигает своего максимума в 2020 году, составляя 5,3%. Это свидетельствует о том, что в мировой экономике происходит постепенное увеличение производства и экспорта более экологически чистых товаров и услуг. Отметим, что наблюдаемое на рисунке сближение двух линий объясняется во многом санкциями против России, введенными в 2022 году. Это привело к росту цен на уголь и, как следствие, росту вклада угля в мировую торговлю, при этом возросшая в большинстве стран мировой экономики инфляция привела к сокращению торговли низкоуглеродными товарами (рис. 2).

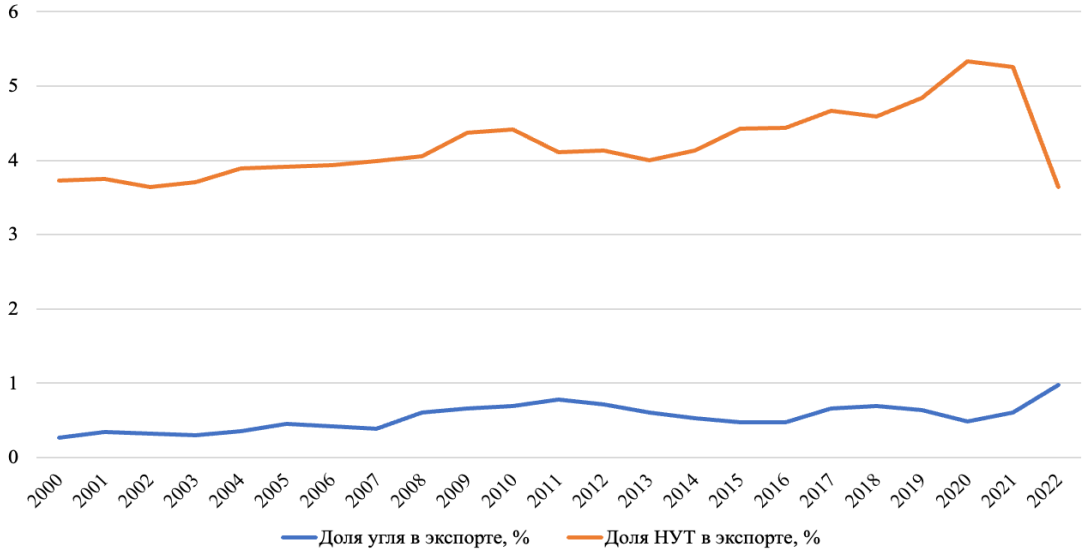


Рис. 2. Доля угля и НУТ в мировом экспорте, 2000-2022 гг. (данные IMF)

Тем не менее, представляется, что этот эффект будет краткосрочным и далее следует ожидать восстановления доли НУТ в мировом экспорте. Однако в долгосрочной

перспективе расширение НУТ в мировой торговле будет в существенной степени находиться под влиянием торговой политики, которая последнее время носит все более запретительный характер в отношении экологических товаров.

Рассмотрим особенности соотношения торговли углем и НУТ в отдельных странах – Китае, России, США, а также ЕС-27 (рис. 3).

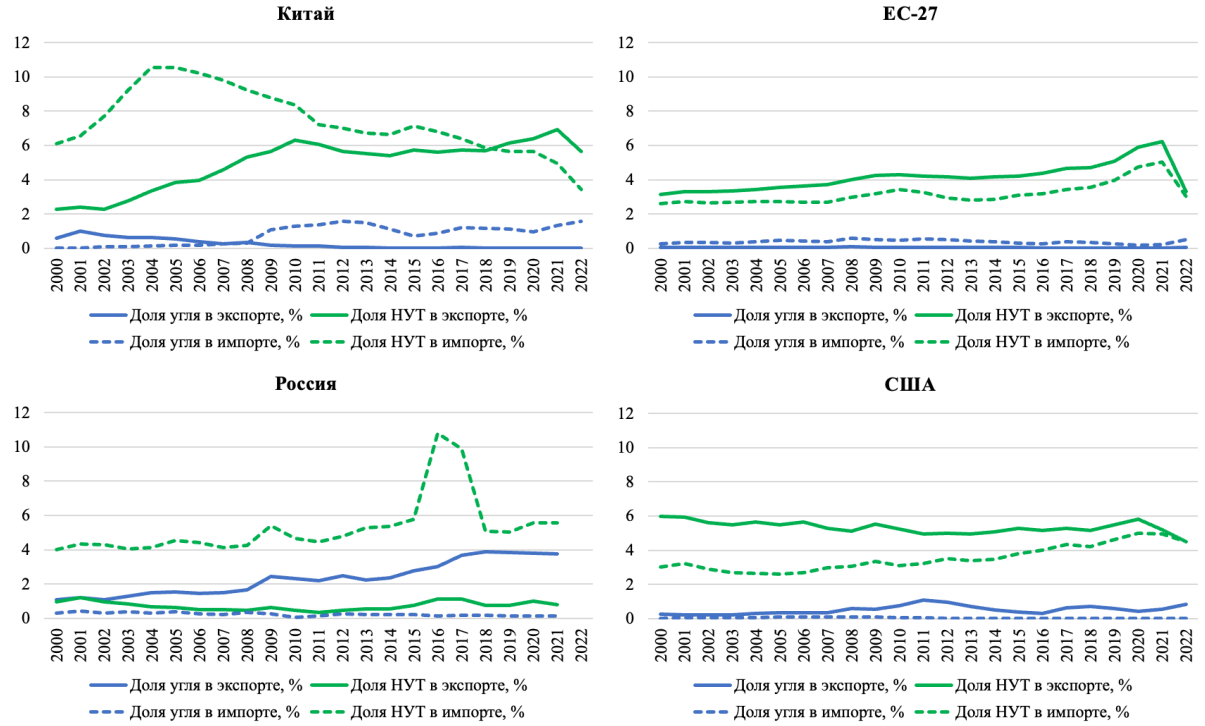


Рис. 3. Доля угля и НУТ в экспорте и импорте Китая, ЕС-27, России и США, 2000-2022 гг. (данные IMF, World Bank)

Торговля НУТ и углем в Китае в рассматриваемом периоде претерпевает радикальные структурные сдвиги – с 2008 года доля угля в экспорте стала ниже его доли в импорте (страна стала более активно импортировать сырье), а с 2018 года доля НУТ в экспорте стала больше доли этих товаров в импорте (научились приводить конкурентоспособные НУТ). Доля угля в экспорте Китая с 2000 по 2022 год колеблется, но в целом снижается, начиная с относительно высоких значений в начале периода (от 0,6% до 1% в 2000-2005 гг.) и достигая менее 0,04% к 2022 году. Это указывает на стремление Китая сократить долю угольной продукции в своем экспорте и рост спроса на внутреннем рынке. В то же время, доля товаров низкоуглеродной экономики (НУТ) в экспорте страны продолжает стабильно расти. Начиная с уровня около 2,3% в 2000 году, она увеличивается до 6,9% к 2022 году. Это свидетельствует о стратегическом курсе Китая на переход к более экологически устойчивой экономике и увеличение доли экспорта более экологически чистых товаров и услуг. Такие тенденции могут быть вызваны как внутренними факторами (рост спроса на уголь на внутреннем рынке), так и внешними требованиями, включая растущее осознание экологических проблем и запросы рынков, ориентированных на устойчивость.

Доля угля в импорте Европейского союза (ЕС-27) с 2000 по 2022 годы демонстрирует некоторые колебания, но в целом остается относительно стабильной. Начиная с уровня около 0,28% в 2000 году, она изменяется в пределах примерно от 0,17% до 0,5% в период наблюдения. Доля товаров низкоуглеродной экономики в импорте ЕС-27 с 2000 по 2022 годы также показывает некоторую волатильность, но общий тренд указывает на увеличение. Начиная с уровня около 2,6% в 2000 году, она возрастает до около 5,1% к 2022 году. Сравнивая долю угля и НУТ в импорте ЕС-27, видно, что увеличение доли НУТ

сопровождается относительной стабильностью доли угля. Это может указывать на стратегический курс ЕС-27 на увеличение импорта экологически чистых товаров и услуг, одновременно сохраняя некоторую зависимость от углеводородных источников энергии в качестве импортных ресурсов.

Доля угля в экспорте и импорта США очень мала. Доля НУТ в экспорте США с 2000 по 2022 годы показывает некоторую волатильность, но общий тренд указывает на относительную стабильность. Начиная с уровня около 4,5% в 2000 году, она изменяется в пределах примерно от 4,5% до 5,8% к 2022 году. Доля НУТ в импорте США с 2000 по 2022 годы также демонстрирует некоторую волатильность, но в целом сохраняет относительную стабильность. Начиная с уровня около 2,7% в 2000 году, она изменяется в пределах примерно от 2,6% до 5,0% к 2022 году. Сравнивая долю угля и НУТ в экспорте и импорте США, можно отметить, что доля угля как в экспорте, так и в импорте остается незначительной и относительно стабильной, в то время как доля НУТ в обоих направлениях торговли относительно стабильна или увеличивается. Это может указывать на стремление США к разнообразию торговых потоков и переходу к более экологически чистым товарам и услугам.

Доля угля в экспорте России с 2000 по 2022 годы демонстрирует некоторые колебания, но в целом сохраняет тенденцию к росту. Начиная с уровня около 1,1% в 2000 году, она изменяется в пределах примерно от 1,1% до 3,75% в период наблюдения. Доля товаров низкоуглеродной экономики (НУТ) в экспорте России с 2000 по 2022 годы также показывает некоторую волатильность, но общий тренд указывает на изменчивость и относительную стабильность. Начиная с уровня около 0,96% в 2000 году, она изменяется в пределах примерно от 0,34% до 1,1% к 2022 году. Можно заключить, что доля угля в экспорте России растет, опережая экспорт НУТ. Это при том, что в товарах НУТ в российском экспорте (в отличие от мира в целом) преобладают не только товары высоких переделов, но и сырьевые товары, например, метанол, аммиак. Доля НУТ в импорте России с 2000 по 2022 годы также показывает некоторую волатильность, но общий тренд указывает на изменчивость и относительную стабильность. Начиная с уровня около 4.02% в 2000 году, она изменяется в пределах примерно от 4.02% до 10.80% к 2020 году, а затем вновь возвращается к тренду, приблизившись к 6% в 2021 году. Рост доли НУТ в импорте России в 2009 и 2015 годах - это, вероятно, следствие девальвационных эффектов и сокращения импорта капиталоемкой продукции.

В настоящем исследовании мы определяем торговлю НУТ российских регионов на уровне 6 знаков ТН ВЭД аналогично подходу (Pigato et al., 2020). Перечислим ключевые результаты.

Объемы экспорта и импорта НУТ в российских регионах в существенной степени связаны. Выделяются крупные высокоразвитые регионы - Москва, Санкт-Петербург, а также связанные с ними агломерации - Московская и Ленинградская области, для которых характерны наибольшие объемы как экспорта, так и импорта НУТ. Существенные объемы торговли НУТ также характерны и для регионов-интенсивных экспортеров угля, например, Кемеровской области.

Наше исследование также выявило интересные взаимосвязи между импортом НУТ и расходами регионов на окружающую среду и ВВП на душу населения. Обнаружена положительная корреляция между импортом НУТ и расходами на окружающую среду. Это означает, что регионы, импортирующие больше НУТ, тратят больше средств на защиту окружающей среды. Это может указывать на стремление этих регионов к уменьшению негативного воздействия на окружающую среду и увеличению экологической ответственности.

Новизна нашего исследования заключается в том, что мы, в отличие от предыдущих исследований, в качестве ключевого фактора, объясняющего выбросы в атмосферу от сжигания топлива, используем объемы экспорта и импорта НУТ, а также включаем в

модель число используемых в регионе передовых производственных технологий, как дополнительную переменную, отражающую технологический уровень производств в регионе.

Исходя из результатов анализа тобит-модели, переменные, отражающие импорт и экспорт товаров с низким уровнем углерода, демонстрируют отрицательные и статистически значимые коэффициенты. Это указывает на связь увеличения импорта и экспорта таких товаров с уменьшением выбросов загрязняющих веществ в российских регионах. Расширение использования импортных низкоуглеродных технологий способствует сокращению выбросов, а также увеличение экспорта товаров с низким уровнем углерода, что может свидетельствовать о развитии соответствующих технологий внутри страны.

Переменные, отражающие ВРП на душу населения и его квадрат, статистически не значимы, что не позволяет подтвердить гипотезу экологической кривой Кузнеца на текущем этапе. Приток прямых иностранных инвестиций, согласно первой модели, связан с уменьшением выбросов, также имеет отрицательный и статистически значимый коэффициент. Это указывает на положительный эффект увеличения притока таких инвестиций на экологическую ситуацию.

Переменные числа передовых производственных технологий и потребления электроэнергии обладают положительными и статистически значимыми коэффициентами, что свидетельствует об увеличении выбросов при увеличении их использования. Это может быть объяснено более высоким уровнем индустриализации и энергоемкостью передовых технологий, что в целом приводит к увеличению выбросов при равных условиях.

Выводы. Результаты с использованием квантильной регрессии позволяют уточнить результаты модели. Чем больше объем импорта НУТ, тем выше его влияние на снижение выбросов от сжигания топлива, однако можно сказать, что эффект имеет падающую предельную полезность - для оценок 90 квантиля, то есть, когда импорт НУТ является наибольшим по всей выборке регионов, эффект на снижение выбросов немного снижается.

Влияние экспорта НУТ на выбросы в атмосферу убывает с 10 по 90 квантили – это означает, что в регионах со слишком малым объемом экспорта НУТ не наблюдается взаимосвязи между производством и экспортом НУТ и снижением выбросов. При этом мы полагаем, что выявленный убывающий эффект объясняется самой природой нашей зависимой переменной - экспорт является лишь прокси-оценкой для наличия производств с НУТ в регионе.

Благодарности. Статья подготовлена в рамках проекта «Зеркальные лаборатории» НИУ «Высшая школа экономики» и ФИЦ УУХ СО РАН по теме «Трансформации цепочек создания стоимости угольной отрасли и связанных с ней отраслей в условиях глобального энергоперехода и санкционного давления на российскую экономику» (Соглашение № 6.13.1-02/210723–1 от 21.07.2023 г.).

Список литературы

1. Портанский А.П. Торговля товарами и услугами, связанными с окружающей средой // Российский внешнеэкономический вестник. – 2014. – №. 7. – С. 89-96.

2. Deep uncertainty and the transition to a low-carbon economy / C. Haas [et al.] // Energy Research & Social Science. – 2023. – Т. 100. – С. 103060.

3. Mealy P., Teytelboym A. Economic complexity and the green economy // Research Policy. – 2022. – Т. 51. – №. 8. – С. 103948.

4. Technology transfer and innovation for low-carbon development / M. Pigato [et al.]. – World Bank Publications, 2020.

5. Empirically grounded technology forecasts and the energy transition / R. Way [et al.] // Joule. – 2022. – Т. 6. – №. 9. – С. 2057-2082.

УДК 622.333

ИЗОЛЯЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ УГОЛЬНЫХ ТЕРРИКОНОВ, СОЛЕОТВАЛОВ И ДАМБ СОВРЕМЕННЫМИ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫМИ СРЕДСТВАМИ ПРОИЗВОДСТВА ГК «МИАКОМ»

[1]Новиков Р.П., [1]Филиппов М.С., [2]д.т.н. Земсков А.Н.
1 – ГК «Миаком», г. Санкт-Петербург, Россия
2 – АО «Гипроцветмет», г. Пермь, Россия

Аннотация. За продолжительное время эксплуатации угольных шахт и калийных рудников накопились огромные объемы отходов производства в виде терриконов и солеотвалов, которые оказывают негативное влияние на все компоненты окружающей среды в виде деградации природного ландшафта и загрязнения водных источников, почв и атмосферного воздуха. Существенно снизить отрицательное воздействие терриконов и солеотвалов позволяет применение современных геомембран и армирующих материалов.

Ключевые слова: угольный бассейн, изоляция отвалов, охрана природы, геомемраны, армирующие материалы.

Специфика отработки угольных месторождений предполагает складирование на земной поверхности огромных объемов отходов производства, оказывающих большой негативный эффект на окружающую среду. Так, для условий уже неработающего Кизеловского угольного бассейна в Пермском крае, где скопилось не менее чем 20 миллионов кубических метров угольно-породных отвалов, сотни тысяч кубометров кислых вод поступают в реки и водоемы в результате смыва загрязняющих веществ солеотвалов вместе с осадками [1]. Не лучше ситуация и в Кузбассе, где в терриконах скопились миллионы тонн отходов производства.

В окрестности калийных рудников, разрабатывающих запасы Верхнекамского месторождения в Пермском крае и Старобинского в Беларуси, образовались солеотвалы объемами в несколько миллиардов кубометров отходов производства, которые представляют опасность для окружающей среды [2].

В данный момент наиболее эффективно противостоять распространению негативного воздействия от поверхностей терриконов возможно с применением геосинтетических материалов, придающих необходимые прочностные и изоляционные свойства рекультивационным экранам.

Факторы, обеспечивающие длительную эффективную эксплуатацию рекультивационного экрана:

– прочность конструкции экрана;
– гидроизоляция поверхности террикона;
– защита откосов от эрозии;
– водоотведение (дренаж) откосов террикона.

Рассмотрим решения, обеспечивающие соблюдение необходимых условий эффективной эксплуатации рекультивационных экранов с применением геосинтетических материалов производства ГК «МИАКОМ».

Прочность конструкции экрана (армирующие материалы АРМОСТАБ)

Армирующие геосинтетические материалы применяются для увеличения прочности грунтовых конструкций за счет восприятия растягивающих усилий. Таким образом, при неравномерных осадках армирующий материал связывает неравномерно оседающие части конструкции и предотвращает разрушение. Применение подобных материалов актуально при строительстве грунтовых конструкций на слабом основании. Например, при отсыпке защинтого экрана на поверхности шламохранилища.

К армирующим материалам АРМОСТАБ относятся:

– георешетки (рис. 1а) (полиэфирные (АРМОСТАБ АР1П/АРМОСТАБ АР2П), стальные (АРМОСТАБ РД) с покрытием из полиэтилена с повышенной жесткостью, объёмные (геокаркас);

– геокомпозиты (рис. 1б): полиэфирная георешетка, скрепленная с нетканым геотекстилем (АРМОТАБ ГРУНТ Д), геокомпозит с подложкой из геотекстиля тканого, прошитой полиэфирными нитями (АРМОСТАБ ГРУНТ И/Т), геокомпозит с подложкой из геотекстиля нетканого, прошитой полиэфирными нитями (АРМОСТАБ ГРУНТ И/Н). Геокомпозит, по сравнению с георешетками, за счет подложки из геотекстиля, обеспечивает помимо функции армирования, функции фильтрации и разделения;

– геополотно (АРМОСТАБ ПЭТ): произведенное по ткацкой и основовязальной технологиям. Обладает так же функциями армирования, разделения и фильтрации. Отличается меньшим относительным удлинением, что при равной с геокомпозитом прочности дает больший эффект для повышения устойчивости конструкции (рис. 1в).

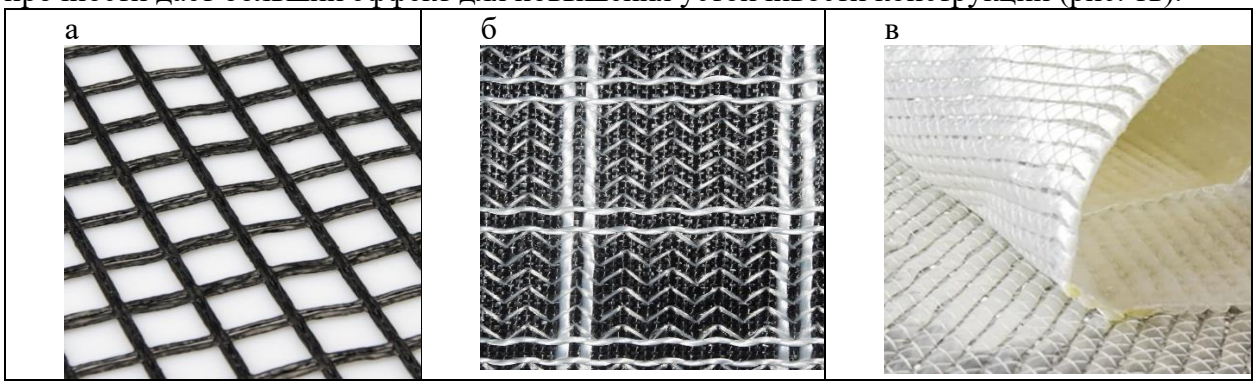


Рис. 1. Армирующие материалы: а – георешетка; б – геокомпозит; в – геополотно

В составе рекультивационного экрана армирующие материалы укладываются в основание, на поверхность террикона. Для того, чтобы армирующая прослойка включилась в работу, необходимо обеспечить её анкеровку по всему контуру сооружения в анкерную траншею.

При отсыпке грунтовых слоев, армирующая прослойка будет натягиваться и удерживать конструкцию защитного экрана в проектном положении, предотвращая разрушение.

Гидроизоляция поверхности террикона (Геомембрана ГММ)

Гидроизоляция поверхности терриконов выполняется для предотвращения попадания атмосферных осадков в тело сооружения и попадания этой воды в грунтовое основание в виде вредоносного фильтрата. Гидроизоляционная прослойка герметизирует террикон, препятствуя попаданию воды и газов внутрь и наружу него.

Геомембрана ГММ – гидроизоляционный рулонный материал, изготавливаемый из полиэтилена высокой плотности HDPE или линейного полиэтилена низкой плотности LLDPE с добавлением антиоксидантов и технического углерода (не менее 2%).

Геомемраны бывают четырех видов:

Гладкая (ГММ Smooth). В основном, применяется на ровных поверхностях без уклона или с малым уклоном. Например, в составе защитных слоев основания полигонов, хранилищ, прудов-накопителей и пр. (рис. 2а).

С сигнальным слоем (ГММ Signal). Гладкая геомембрана, покрытая с одной или двух сторон цветным слоем (чаще всего белым или желтым) для более простого контроля целостности материала. Если в процессе монтажа или эксплуатации образуется повреждение, то оно сразу будет заметно за счет контраста черного цвета самой геомембраны с цветным покрытием на поверхности (рис. 2б).

Композитная (ГММ Composite)**.** Представляет собой геомембрану, скреплённую с одной или с двух сторон с геотекстилем. Данный материал применяется в случаях, когда геомембрану необходимо защитить геотекстилем от механических повреждений. Благодаря композиту, существенно упрощается и ускоряется процесс монтажа (рис. 2в).

Текстурированная (ГММ Textured)**.** Имеет шероховатую поверхность, достигаемую за счет множества выемок. Чаще всего применяется на откосах. За счет своей особой текстуры, хорошо удерживает грунтовые и геосинтетические слои и упрощает монтаж, поскольку по гладкой мембране на откосах рабочим тяжелее перемещаться (рис. 2г).

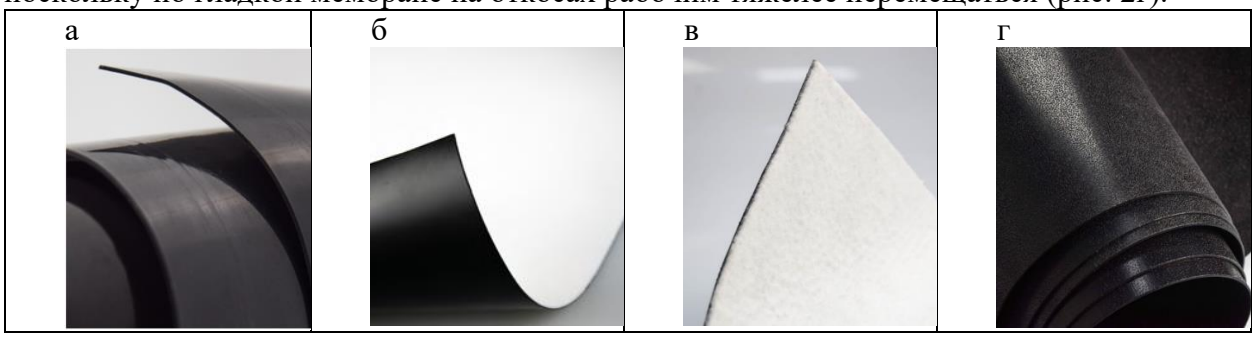


Рис. 2. Геомембрана: а – гладкая; б – с сигнальным слоем; в – композитная; г – текстурированная

Гидроизоляционная прослойка укладывается на подготовленную грунтовую поверхность из утрамбованного песка. Рекомендуется под геомембрану и на нее укладывать нетканый геотекстиль для защиты от механических повреждений в процессе строительства и эксплуатации сооружения.

Геомембрану необходимо анкеровать по всему контуру сооружения в анкерную траншею для обеспечения герметичности и предотвращения загиба её краев. Не рекомендуется фиксировать геомембрану анкерами, поскольку нарушается целостность гидроизоляционного слоя, что может привести к значительному снижению эффективности эксплуатации сооружения.

Защита откосов от эрозии (Противоэрозионные геоматы СТАБИМАТ и объемная георешетка ГЕОКАРКАС)

Противоэрозионная защита выполняется с целью предотвращения вымывания или выветривания грунтовых откосов. Аналогичные мероприятия предпринимаются для обеспечения необходимой устойчивости против скатывания защитных грунтовых слоев на откосах с уклоном круче 1:3.

В основу всех материалов марки СТАБИМАТ входит геомат СТАБИМАТ СМТ (рис. 3а), представляющий собой гибкий, легкий воздухо- и водопроницаемый геосинтетический материал хаотичной трехмерной структуры, изготовленный из термоскрепленных полимерных волокон, беспорядочно переплетенных в виде «мочалки». Открытая хаотичная структура материала обеспечивает эффективную защиту от эрозии почв как с растительностью, так и до ее появления. Эти материалы позволяют обеспечить необходимую устойчивость против скатывания защитных грунтовых слоев при достаточно крутых откосах.

На откосах повышенной протяженности или в иных случаях, когда прочности на растяжение базового геомата СТАБИМАТ СМТ недостаточно, применяется геомат противоэрозионный СТАБИМАТ СМТ-К (рис. 3б) представляет собой композит геомата СТАБИМАТ СМТ и георешетки АРМОСТАБ АР2П. Совмещает в себе функции геомата и георешетки.

Противоэрозионные геоматы укладываются на поверхности откосов терриконов или рекультивационных экранов для сохранения целостности растительного слоя до полного развития корневой системы растительности и защиты её от вымывания и выветривания в процессе эксплуатации.

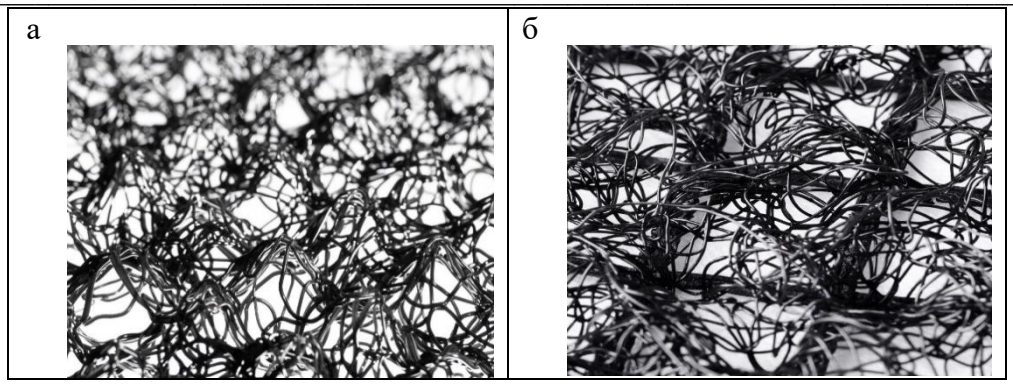


Рис. 3. Геомат противоэрозионный: а – стандартный; б – композитный

Верхний и нижний края геомата заводятся в анкерные траншеи по контуру и фиксируются на откосах анкерами. В случае применения геоматов в составе рекультивационного экрана, необходимо предусмотреть крепление геоматов за счет одних анкерных траншей, поскольку применение анкеров может привести к повреждению гидроизоляционного слоя.

ГЕОКАРКАС – перфорированная объёмная георешетка (рис. 4). Гибкая и в то же время прочная трехмерная конструкция, представляющая собой надежно скрепленные друг с другом ультразвуковым соединением пластиковые ленты из полимерного материала, формирующие ячейки одинакового размера, расположенные в определенной последовательности.

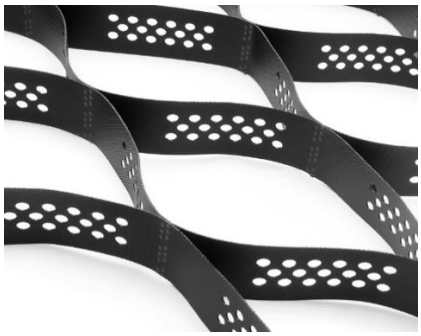


Рис. 4. Объемная георешетка

На подготовленную поверхность откоса в первую очередь расстилается нетканый геотекстиль для предотвращения вымывания грунта-заполнителя из ячеек. Ячейки георешетки заполняются либо растительным грунтом для создания травяного покрова, либо сыпучими материалами (щебень, ПГС и т.д.) для защиты откосов от водной эрозии, например, на подтопляемых насыпях. Верхний и нижний края объемной георешетки фиксируется в анкерных траншеях по контуру сооружения. На поверхности откосов ГЕОКАРКАС фиксируется анкерами.

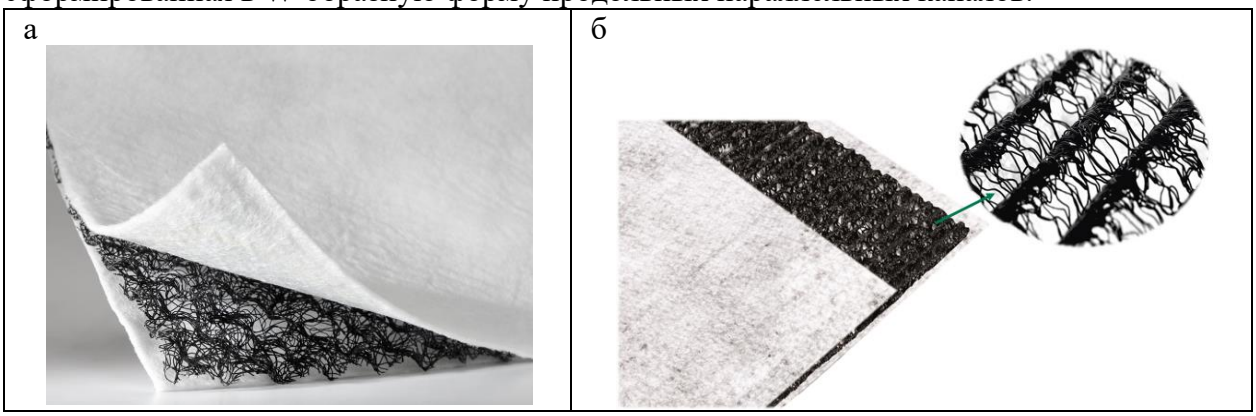
Если ГЕОКАРКАС укладывается для защиты геомембраны от механических повреждений, необходимо применить тросовое крепление георешетки. В подобном конструктиве фиксация ГЕОКАРКАСА на откосах анкерами приведет к повреждению геомембраны.

Водоотведение (дренаж) откосов террикона (Геоматы дренажные СТАБИМАТ СМТ-Д и СТАБИМАТ СМТ-Н и дренажный геокомпозит ГЕО ДР)

Водоотведение в конструкции рекультивационного экрана играет важную роль. Застоявшаяся вода внутри грунтовых слоев защитного экрана увеличивает вес конструкции, что вызывает большие осадки и снижает устойчивость против скатывания на откосах. Так же при перепаде температур застоявшаяся вода напрямую разрушает защитный экран путем увеличения и снижения собственного объема.

Геосинтетические материалы, выполняющие дренажную функцию, представляют собой дренажное ядро (канал), формирующее сечение, через которое движется вода, и два слоя нетканого геотекстиля (фильтры) с обеих сторон дренажного ядра, предотвращающие засорение канала частицами грунта.

В геомате дренажном СТАБИМАТ СМТ-Д в качестве дренажного ядра применяется хаотичная трехмерная структура, изготовленная из термоскрепленных полимерных волокон. А в геомате дренажном направленном СТАБИМАТ СМТ-Н (рис. 5б) применяется та же структура из экструдированных полипропиленовых мононитей, однако сформированная в W-образную форму продольных параллельных каналов.



Рису. 5. Геомат дренажный: а – ненаправленный; б – направленный

ГЕО ДР – геокомпозит с дренажным ядром из полиэтилена с нетканым геотекстилем с двух сторон. Тип дренажного ядра: жесткая полиэтиленовая решётка. Более жесткое дренажное ядро (рис. 6).

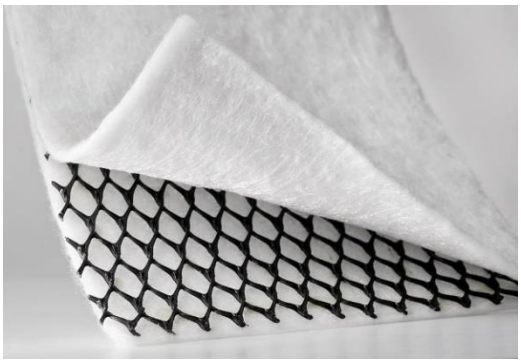


Рис. 6. Геокомпозит дренажный

Выбор дренажного геокомпозита определяется проектным решением, расчетными методиками или отраслевыми требованиями. Наиболее эффективное применение дренажных материалов обеспечивается при укладке их на гидроизоляционный слой (геомембрану). Полотна дренажных материалов заводятся в дренажную траншею по контуру для дальнейшего отвода воды в систему дренажных труб.

Выводы. Все перечисленные способы и средства изоляции поверхностей терриконов, солеотвалов и дамб, разработанные ГК «МИАКОМ», позволяют значительно снизить отрицательное воздействие осадков и ветра на окружающую среду, обеспечить устойчивость дамб и других инженерных сооружений.

Список литературы

1. Земсков А.Н. Кизеловский угольный бассейн: прошлое и будущее // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2023. – №9. – С.96-100.

2. Старков Л.И., Земсков А.Н., Кондрашев П.И. Развитие механизированной разработки руд. – Пермь; изд-во Пермского гос. политехн. университета, 2007. – 522 с.

УДК 622.831+502.604

ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЙ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ И КАЛИЙНЫХ РУДНИКАХ

[1]д.т.н. Земсков А.Н., [1]Липницкий Н.А., [2] к.т.н. Смирняков В.В.
1 – АО «Гипроцветмет», г. Пермь, Россия
2 – Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт –Петербург, Россия

Аннотация. Основным источником газовыделений в породах калийных пластов при столбовой системе разработки с полным обрушением пород кровли является выработанное пространство, причем преобладающее количество газовыделений обусловлено резким падением барометрического давления и в меньшей степени – выносом газов при обрушении основной и непосредственной кровли.

Ключевые слова: метеорологические факторы, атмосферное давление, режим газовыделений, метан, рудничная атмосфера, прогноз.

В горнотехнической литературе имеются многочисленные сведения об изменении частоты и интенсивности газовыделений, количества выбросов породы газа и горных ударов при изменении метеорологических факторов (количества осадков, атмосферного давления и т.д.). Такие данные получены для угольных шахт Кузбасса, рудников Криворожского и Егоршинского месторождений. На шахтах Кузбасса и Урала, по данным А.П. Кузнецова, соответственно, 81 и 70% всех внезапных выбросов произошло при выпадении атмосферных осадков над шахтными полями [1]. На рудниках Криворожского бассейна отмечается увеличение частоты и интенсивности газовыделений в дождливые периоды и при снижении атмосферного давления [2].

При оценке зависимости частоты газовыделений от изменения метеорологических факторов до сих пор нет общей точки зрения. Более того, многие исследования дают взаимоисключающие результаты. Так Г. Флюгге полагает, что интенсивные газовыделения и взрывы горючих газов чаще происходят при повышающемся барометрическом давлении в теплые месяцы (с апреля по июль), К. Винтер же считает, что наибольшая вероятность взрывов газа в шахтах центральной Европы существует в холодные зимние месяцы с высоким и неустойчивым барометрическим давлением [3]. При высоком барометрическом давлении газ накапливается в щелях и пустотах и при падении давления на 2 мм рт. ст. начинает настолько интенсивно поступать в горные выработки, что создает взрывоопасные ситуации.

Для угольных шахт Карагандинского бассейна установлено влияние атмосферного давления на дневной поверхности, объема добычи и количества поступающего в шахту воздуха на изменение режима газовыделений. Выявлено, что интенсивность газовыделений растет как вследствие резкого падения барометрического давления, так и с повышением дебита поступающего в шахту воздуха [4].

Оценка степени влияния различных метеофакторов на газовую обстановку в шахтах и рудниках показывает, что определяющую роль среди них играет изменение атмосферного давления.

Следует иметь в виду, что перепады атмосферного давления сказываются на изменении барометрического давления в шахтах с определенной степенью сглаживания. В выработках глубоких угольных шахт барометрическое давление разнится от атмосферного давления на дневной поверхности на величину $y_b H/13,6$ (мм рт. ст.), где y_b – плотность воздуха в стволе, кг/м^3; Н – глубина ствола, м; 13,6 – плотность ртути, г/см^3. При глубине стволов 1000 - 1500 м эта разница может достигать 95 - 143 мм рт. ст.

Таким образом, изменение барометрического давления в шахтах и рудниках обусловлено двумя основными факторами: колебаниями атмосферного давления и депрессией вентиляционной струи.

Воздействие метеофакторов на изменение газовой обстановки для условий калийных рудников до сих пор изучено недостаточно полно. Значимость метеофакторов в формировании газовой среды в рабочих выработках и в выработанных пространствах калийных рудников проявляется неоднозначно.

С одной стороны колебания газовыделения должны сглаживаться поступлением в рудники очень большого количества воздуха (в среднем 350-500 $м^3/с$); применением значительного числа вентиляторов местного проветривания, устанавливаемых в труднопроветриваемых зонах; невысокой, по сравнению с угольными шахтами, газоносностью пород и газообильностью горных выработок.

С другой стороны, на колебания газовыделений могут оказывать влияние такие факторы, как неравномерное, «пятнистое» расположение газонасыщенных зон, огромные объемы выработанных пространств (особенно для рудников Старобинского месторождения). Режимы газовыделения, существенно различаются: для рудников АО «Беларуськалий», разрабатывающих полезное ископаемое для рудников с камерной системой с полным обрушением пород кровли и для рудников с камерной системой разработки (ПАО «Уралкалий», «Еврохим –Усольский калийный комбинат»).

Как следует из результатов наших исследований при обрушении пород глинисто-карналлитовой толщи Старобинского месторождения, расположенных выше III-го калийного горизонта, высвобождается очень большое количество горючих газов, скапливающихся в выработанном пространстве.

Оценка изменчивости метеоусловий в районе Старобинского месторождения была произведена по данным наиболее близко расположенной к калийным рудникам Слуцкой метеорологической станции. Всего было проанализировано более 30-ти тысяч метеоданных, а также вся информация по случаям обнаружения газов в атмосфере рудников.

В общей сложности были обработаны данные по 73069 газовым пробам по II-му горизонту и 70551 – по III-му. Всего -143580, из них метан был обнаружен в 423-х пробах по II-му горизонту и в 139-ти – по III- му (всего 562 случая).

Выполненный нами обзор материалов по случаям газовыделений на рудниках АО «Беларуськалий» показал, что удельный вес газовыделений из выработанного пространства, например, для третьего Солигорского рудника составляет 91%, в том числе 89,7% – для II-го горизонта и 92,5% – для III-го. Подобные соотношения характерны и для газовыделений, отмеченных на других рудниках [5].

Сопоставление данных по газовыделениям с изменением метеопараметров и объема добычи по горизонтам позволило сделать следующие выводы:

– увеличение количества зафиксированных газовыделений не связано с ростом добычи руды и с увеличением количества отбираемых в отдельные месяцы проб;

– отмечается увеличение числа газовыделений в теплое время года (май-сентябрь);

Газовыделения чаще происходят при колебаниях атмосферного давления и особенно часто – при его падении.

Нами была проанализирована зависимость вероятности газопроявлений от скорости падения атмосферного давления в течение суток. Выявлено, что 75% вероятность газовыделений имеет место при скорости падения атмосферного давления 7мбар/сутки, а 100% вероятность – при падении давления в сутки на 10 и более мбар. Эти данные получены для среднегодовых значений давления и не отражают изменения приведенных зависимостей от времени года.

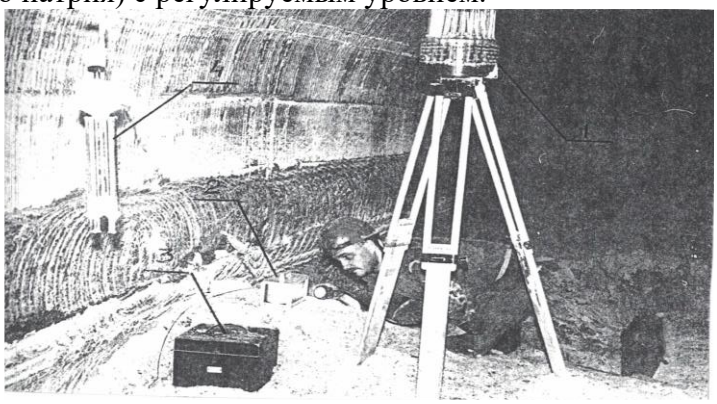
Для подтверждения обнаруженных закономерностей и их уточнения были проведены шахтные исследования. В качестве объекта наблюдений выбрана 19 лава III-го горизонта третьего Солигорского рудника.

Пункт наблюдения располагался на исходящей струе из выработанного пространства в разгрузочном штреке. Наблюдения проводились в четыре этапа продолжительностью каждый по две недели, соответственно. В зимний, весенний (холодное время), летний и осенний (теплое время) периоды в течение двух лет.

Методика и порядок наблюдений заключались в следующем.

В пункте наблюдений была установлена аппаратура для автоматического отбора проб рудничного воздуха и регистрация барометрического давления (рис. 1) [5, 6]

Пробоотборник работал следующим образом. В поддон его перфорированного корпуса помещался часовой механизм со скобой – и туда же наливалась затворная жидкость (раствор хлористого натрия) с регулируемым уровнем.



1 – автоматический пробоотборник; 2 – самопишущий барограф МД-22Е;
3 – барометр-анероид

Рис. 1. Общий вид пункта наблюдений

Специально для этих исследований нами был разработан и изготовлен автоматический пробоотборник (рис. 2).

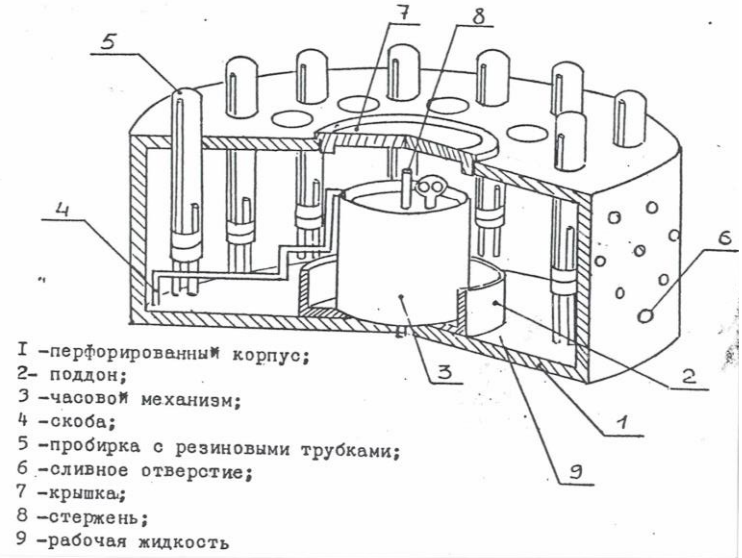


Рис. 2. Конструкция автоматического пробоотборника

В отверстия корпуса по кругу помещались пробирки с раствором хлористого натрия, закупоренные резиновыми пробками со стеклянными трубками с надетыми на их концы отрезками резиновых трубок. Отрезки резиновых трубок были опущены в рабочую жидкость с таким расчетом, чтобы жидкость из пробирок не вытекала. При вращении

часового механизма резиновые трубки приподнимались скобой так, что жидкость вытекала из пробирок в поддон. При этом, в пробирки поступала газовоздушная смесь из окружающей среды, затем резиновые трубки возвращались в исходное положение, обеспечивая герметичность отобранной газовой пробы. В зависимости от поставленной задачи применялись часовые механизмы с временем отбора всех проб – 24 часа или 7 дней. Для непрерывной регистрации и записи барометрического давления использовался самопишущий барограф типа МД-22Е.

По содержанию горючих газов в отобранных пробах и количеству проходящего через пункт замеров воздуха определялось абсолютное газовыделение из выработанного пространства лавы. На ленте барографа фиксировались значения барометрического давления за все время отбора газовых проб. Периодическая привязка времени отбора пробы к значению барометрического давления упрощалась тем, что для приведения в действие барографа и автоматического пробоотборника использовался один и тот же часовой механизм.

На барографической ленте отчетливо отмечались также перепады давления, произошедшие в результате динамических обрушений основной кровли.

Анализируя полученные в шахтных условиях результаты, можно сделать следующие выводы.

1) Изменение барометрического давления оказывает значительное влияние на динамику газовыделения из выработанного пространства.

2) Наибольшая вероятность прироста газовыделения из выработанного пространства наблюдается при падении барометрического давления.

3) В весенне-осеннее время колебания барометрического давления имеет большую амплитуду, чем в летне-зимнее время.

4) Наиболее интенсивные газовыделения из выработанного пространства происходят в теплое время года (апрель-сентябрь), при этом в наиболее жаркие месяцы (июнь, июль, август) значительный прирост газовыделений (в два и более раза) может быть вызван даже незначительным падением барометрического давления (3-5 мбар/сутки).

5) Время запаздывания прироста газовыделения, обусловленного изменением барометрического давления, может составлять от нескольких часов до суток, что позволяет принять превентивные меры для предотвращения загазования рабочих пространств.

Зависимость между изменением атмосферного давления и интенсивностью газовыделений в лавах была выявлена в результате продолжительных синхронных замеров на дневной поверхности и в рудниках. Сопоставление данных по изменению атмосферного (на поверхности) и барометрического (в шахте) давления показали, что в выработанных пространствах длинных очистных забоев наблюдается задержка изменения давления по сравнению с рабочими выработками. При снижении атмосферного давления это приводит к образованию в выработанных пространствах избыточного повышенного давления относительно рабочих пространств выработок.

Полученные данные явились основой для разработки способа прогноза газовыделений из выработанных пространств лав по изменению барометрического давления.

Для практической реализации разработанного способа прогноза газовыделений была разработана соответствующая аппаратура. Прибор прогноза автоматически измеряет скорость изменения атмосферного давления (при расположении на дневной поверхности), сравнивает ее с критической величиной, характерной для данного времени года (установкой) и выдает звуковой или световой сигнал при превышении пороговых показателей.

При разработке действующего макета устройства в качестве первичного преобразователя давления в электрический сигнал был использован широко распространенный и недорогой барограф МД-22Е, снабженный преобразователем

микроперемещений штока блока анероидных коробок в электрический сигнал. Преобразователь выполнен по дифференциально-емкостной схеме. Устройство отработки сигнала, включающее блок питания, электронную схему, устройство ввода уставки и устройство индикации и сигнализации, расположенные в отдельном отсеке в нижней части барографа. Основные функции прибора при этом не нарушались. Вариант компоновки устройств на передней панели приведен на рис. 3.

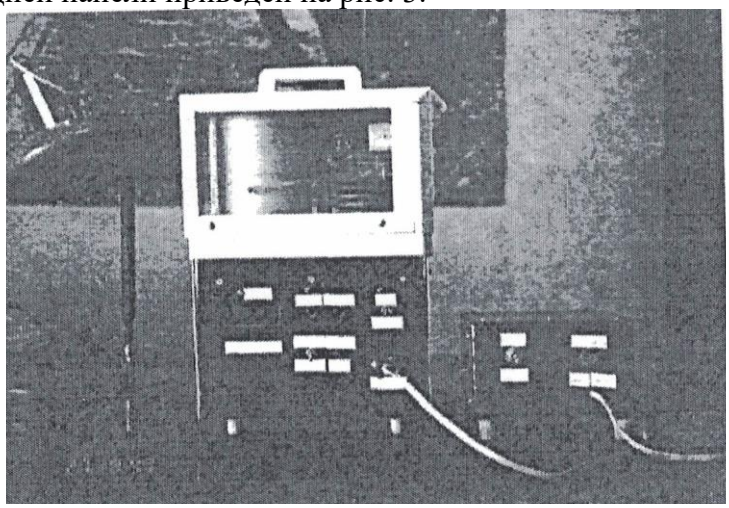


Рис. 3. Общий вид прибора

Вывод. Разработанный прибор может быть использован как средство контроля состояния рудничной атмосферы на добычных участках калийных рудников и угольных шахт. Он может быть установлен на участке вентиляции, либо в диспетчерской рудника. При выдаче прибором сигнала опасности главным инженером рудника или начальником участка вентиляции должны приниматься соответствующие меры.

Список литературы

1. Кузнецов А.П. Исследование явлений внезапных выбросов угля и газа при разработке угольных пластов Кузнецкого бассейна: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – Томск, 1959. – 15 с.

2. Слюсаренко В.Г. исследование газовыделений и способов их устранения на шахтах Криворожского бассейна: автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. – М., 1972. – 41 с.

3. Винтер К. Газовыделения - важный фактор при решении вопросов производства и безопасности горных работ: сб. трудов науч. конф., посвященной 75-летию испытательной станции рудничной вентиляции Вестфальскго горнопромышленного товарищества, 6 октября 1978г., Бохум, Германия.

4. Устинов А.М. Зависимость газовыделения на выемочном участке от производственных процессов и барометрического давления // Вопросы борьбы с газом и пылью в горной промышленности: сб. науч. тр. КНИУИ. – М.: Госгортехиздат, вып. 7, 1963. – С. 181-191.

5. Земсков А.Н., Кондрашев П.И., Травникова Л.Г. Природные газы калийных месторождений и меры борьбы с ними. – Пермь: Издательский дом «Типография купца Тарасова», 2008 – 414 с.

6. Смирняков В.В. Разработка методов прогноза и способов управления газовыделением при выемке калийных пластов: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. –С-Петербург, 1996. – 24 с.

УДК 622.8:622.33

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОСВЕЩЕНИЮ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ. ОПЫТ КОМПАНИИ «СВЕТКОНСАЛТ» В ОПТИМИЗАЦИИ ЗАТРАТ НА ОСВЕЩЕНИЕ

[1]Сасонко П.П., [1]Бакатнюков В.С., [2]д.т.н. Земсков А.Н.
1 – ООО «Светконсалт», г. Санкт-Петербург, Россия
2 – АО «Гипроцветмет», г. Пермь, Россия

Аннотация. Неблагоприятные санитарно-гигиенические условия труда на производстве (шум, загазованность производственной атмосферы, высокое содержание пыли в воздухе и т.д.) способствуют увеличению числа несчастных случаев и ухудшают технико-экономические показатели также работы предприятий. Одним из основных негативных факторов является также плохая освещенность рабочих мест.

Ключевые слова: промышленное освещение, энергоэффективные светильники, система управления освещением, безопасность труда.

Научно-технический прогресс на горных предприятиях наряду с осуществлением ряда технологических мероприятий и разработки технических новинок по улучшению состояния безопасности труда, к сожалению, сопровождается и негативными явлениями с позиции охраны труда и техники безопасности. Это большая концентрация горных работ, увеличение энергетической мощности горно-добычного оборудования, увеличение потенциалов взрывной и пожарной опасности производства и т.д.

По данным германского агентства ДПА 145 из 1000 горняков ежегодно во время работы получают травмы. У строителей этот показатель несколько меньше – 139 случаев. Среди работников промышленных предприятий и торговли лишь 38 из 1000 человек получают повреждения, вызывающие временную нетрудоспособность.

Причины высокого травматизма следует искать в специфике горных предприятий, включающих большое число неблагоприятных производственных факторов. Кроме необходимости работать в стесненных условиях подземных горных выработок, без солнечного света, в окружении мощных современных «недружелюбных» механизмов, - человек с момента спуска в шахту (с резкой сменой микроклимата) сразу окунается в загазованную, запыленную атмосферу. И еще до того, как горняк доберется до своего рабочего места, он уже будет достаточно плотно экологически, а значит и психологически «нагружен».

Подземные рабочие систематически подвергаются воздействию перепадов температуры и давления.

Лишь незначительно в лучшую сторону отличаются условия труда работников обогатительных фабрик, энергоцехов и других производств.

Неблагоприятные санитарно-гигиенические условия труда (шум, загазованность производственной атмосферы, высокое содержание пыли в воздухе) способствует увеличению числа несчастных случаев.

К сожалению, в научно-технической литературе имеется ограниченное число публикаций по оценке вклада каждого опасного фактора в общий баланс. Из известных в литературе материалов и в соответствии с иерархической структурой оценки вредных физических и химических факторов производственной среды угольных шахт складывается такая картина (табл. 1).

Следует отметить, что указанная в таблице иерархическая структура весомости различных факторов приведена для условий угольных шахт, имеющих свою особую

специфичность. По нашему мнению, для условий труда в калийных рудниках упадёт весомость вибрации, но вырастет значимость освещенности.

В реальных производственных условиях систематически возникает опасность совершения рабочими ошибочных действий, нередко ведущих к травматизму.

Таблица 1

Весомости вредных физических и химических факторов [1]

Наименование фактора	Весомость, %
Запыленность воздуха	27
Микроклимат	22
Вредные химические факторы	18
Шум	17
Вибрация	13
Освещенность	3

В данной статье более детально рассмотрено влияние освещенности рабочих мест на ухудшение условий труда и травматизм.

Интересные данные были получены при анкетировании и опросах 60-ти работников машиностроительного завода в Казахстане [2]. Наибольшее количество опрошенных работников (58,4%) не удовлетворены условиями труда по фактору уровня освещенности. По результатам инструментальных замеров освещённости рабочих мест в нескольких цехах установлено, что в 40,9-46,6 % случаев условия труда являются вредными и опасными.

В связи с вышеизложенным очень актуальными являются новые разработки в области совершенствования способов и средств освещенности рабочих мест. Одной из успешных организаций в этой области является компания «СветКонсалт».

Промышленное освещение – это сложная система, включающая различное комбинированное освещение, которое создает комфортные условия для трудовой деятельности людей. Из-за своей специфики, промышленное освещение должно быть качественным, защищенным, энергоэффективным, простым в обслуживании, иметь несложную конструкцию и наименьшую массу. Именно поэтому затраты на приобретение светильников при строительстве новых или модернизации существующих предприятий могут быть весьма существенными. Вследствие чего оптимизация этих затрат и повышение энергоэффективности предприятий крайне важно.

Любое предприятие начинается с подъездной дороги. Дороги освещают уличными светильниками, расположенными на опорах. Из-за неверного выбора оптики, кривой силы света светового прибора светильники часто располагают в шахматном порядке по разным сторонам дорог. Нельзя утверждать, что это неправильно, но уже давно применяются широкие боковые линзы для уличных светильников. При правильном расположении и регулировки светильников можно добиться хорошей картины освещенности дороги и при расположении опор со светильниками по одной стороне дороги. Это позволяет существенно снизить расходы на закупку опор освещения, кабеля и работ по прокладке дополнительной линии освещения. Так же в уличном освещении необходимо учитывать ремонтопригодность оборудования. Поэтому рекомендуется применять светильники с быстросъемным отсеком с блоком питания и ножевым механизмом. Эти светильники позволяют быстро менять блок питания светильника без отключения линии электропередач.

Промышленная площадка предприятия состоит из различных зданий, цехов, баз, складов и т.п. Чаще всего подобные площадки освещаются с высоких мачт высотой 25-30 м. Подобное освещение порой делается «на глаз», а должно обязательно осуществляться при участии проектной организации, выполняющие проектирование не только освещения, но и всех систем. Применяя круговую корону на мачте освещения, возможно располагать

прожектора на 360 градусов и освещать много точек с одной мачты. При применении большего количества прожекторов увеличивается нагрузка на мачты, поэтому для высокомачтового освещения используются более энергоэффективные светильники, имеющие меньшую массу относительно конкурентов и более высокую ветроустойчивость. Благодаря всему этому оптимизируется количество мачт в меньшую сторону и снижаются затраты заказчика на их закупку. Сейчас на рынке светодиодного освещения много моделей со средней энергоэффективностью 130-140 Лм/Вт. Однако значительно целесообразнее использовать высоко энергоэффективные светильники до 180 Лм/Вт.

Основная деятельность горно-обогатительных предприятий: переработка угля и руд, обработка материалов, выпуск конечной продукции происходит в главном здании обогатительной фабрики и других производственных помещениях, там где сосредоточено основное скопление светодиодного освещения. Отсутствие адекватного освещения может привести к серьезным последствиям, таким как появление или увеличение несчастных случаев на производстве, снижение производительности и качества выпускаемой продукции, ухудшение условий труда для сотрудников и другие негативные последствия. Основные проблемы, связанные с освещенностью на промышленных предприятиях, могут включать в себя: неправильное размещение и тип осветительных приборов, низкая равномерность, недостаточное освещение рабочих мест. В реальных производственных условиях, все это влияет на совершение рабочими ошибочных действий, нередко ведущих к травматизму.

Опасные ситуации на предприятиях возникают очень часто и быстро. Почти 80% из них-следствие причин, возникших меньше, чем за 15 минут до травмирования. Неравномерная освещенность различных участков рабочих мест, недостаточная контрастность предметов и фона, наличие глубоких теней, мерцающий свет и блики вместе со слабым освещением, приводит к снижению степени реакции человека на возникающую опасность. Опасно и ослепление резким светом, которое является частью неравномерного освещения. Человек, резко попадая из зоны низкого освещения в зону достаточного освещения, испытывает ослепление и ему нужно от нескольких секунд до нескольких десятков секунд на привыкание. Это время могло быть решающим при возникновении аварийной ситуации.

Кроме этого, использование на промышленном объекте качественного эффективного освещения позволяет сэкономить расходы на электроэнергию на 20-30%.

Финальным пунктом, который позволяет максимально выгодно использовать весь комплекс освещения – это система управления освещением. Оптимальная система управления позволяет выполнить любой сценарий от простого включения/выключения по времени до удаленного доступа и управления каждого отдельного светильника в системе посредством планшета или телефона. Автоматизированная система управления освещением позволяет не включать светильники там, где свет не нужен и будет включаться только при появлении людей; может регулировать яркость светильников в помещении в зависимости от времени суток и изменении естественной освещенности; позволяет видеть реальное местоположение на карте каждого светильника и управлять им; может объединить в себе систему освещения и видеонаблюдения с возможностью распознавания объектов и автоматической активацией освещения; ведет сбор статистики и позволяет отслеживать реальное потребление электроэнергии.

Выводы. Оптимизация расходов на освещение возможна и реальна, главное грамотно подходить к этому вопросу. Нельзя просто уменьшить количество применяемых светильников или занизить мощность, даже с учетом соблюдения норм. Нужно подходить к этому вопросу комплексно: применять нужные типы светильников в помещениях, правильные линзы, использовать локальную досветку, применять более энергоэффективные световые приборы, использовать систему управлением освещения. Тогда, в итоге, можно достичь колоссального снижения затрат на закупку элементов

освещения и сопутствующего оборудования и экономии средств при дальнейшей его эксплуатации на объекте. А главное – обеспечить безопасные комфортные условия труда работников

Список литературы

1. Комплексная оценка условий труда горнорабочих по вредным факторам шахтной среды / М.З. Иткин, В.В. Суханов, Е.А. Перцевой [и др] // Предупреждение травматизма и производственная санитария в шахтах: сб. науч. трудов МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1988. – С.16-21.

2. Ширванов Р.Б. Влияние уровня освещенности рабочих мест на условия труда (на примере Республики Казахстан) // XXI век. Техносферная безопасность. – 2021. http://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-2-189-200

УДК 662.66; 339.13.012.42

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЦЕПОЧКИ В УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ КУЗБАССА

[1]д.т.н. Клишин В.И., [1]д.э.н. Никитенко С.М., [1]к.э.н. Гоосен Е.В., [2]Кавкаева О.
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия
2 – Университет г. Павия, Италия

Аннотация. Исчерпание традиционных энергетических ресурсов, сокращение энергопотребления, снижение и волатильность спроса и цен на традиционные энергоносители, развивающийся энергопереход, сопровождающийся ростом доли возобновляемых источников энергии, неопределенность развития экономики в условиях геополитической ситуации делает отрасли добывающие энергетические ресурсы особенно уязвимыми и заставляют искать новую интенсивную, адаптивную и гибкую модель их развития, опирающуюся на перспективные технологии. Особенно важно это для Кемеровской области – Кузбасса.

Ключевые слова: угольная отрасль, перспективные технологии, технологические цепочки.

Мировая угольная индустрия. Глобальный спрос на уголь по-прежнему остается достаточно высоким. В 2020 году эксперты Международного энергетического агентства (МЭА) прогнозировали, что мировой спрос на уголь «вероятно, достиг своего пика в 2013 году, в настоящее время стагнирует и, скорее всего, в дальнейшем будет снижаться» [1]. Известно, что подобные пессимистические прогнозы развития угольной отрасли делаются еще с 1980-х. В свое время Маргарет Тэтчер заслужила прозвище «железная леди» именно из-за своего стремления во что бы то ни стало закрыть британские шахты. Предполагалось, что спрос на уголь к 2022 году снизится до 7,4 млрд тонн в год и будет оставаться на этом уровне вплоть до 2025 года [2]. Однако события 2021–2023 годов полностью опровергли эти прогнозы. Уже на следующий год после окончания пандемии COVID-19 мировые угольные продажи выросли почти до рекордного уровня 2013-го (7,947 млрд тонн в 2021 году против 7,997 в 2013). А в 2022-м максимум был обновлен и составил 8,025 млрд тонн

Глобальное потребление угля после спада в 2020 году не только восстановилось, но и выросло в 2022 году по сравнению с 2020 годом почти на 7%. Более чем на 7 % выросла и мировая добыча угля (рис. 1). Международная торговля углем оценивается на уровне 1,4 млрд тонн [1].

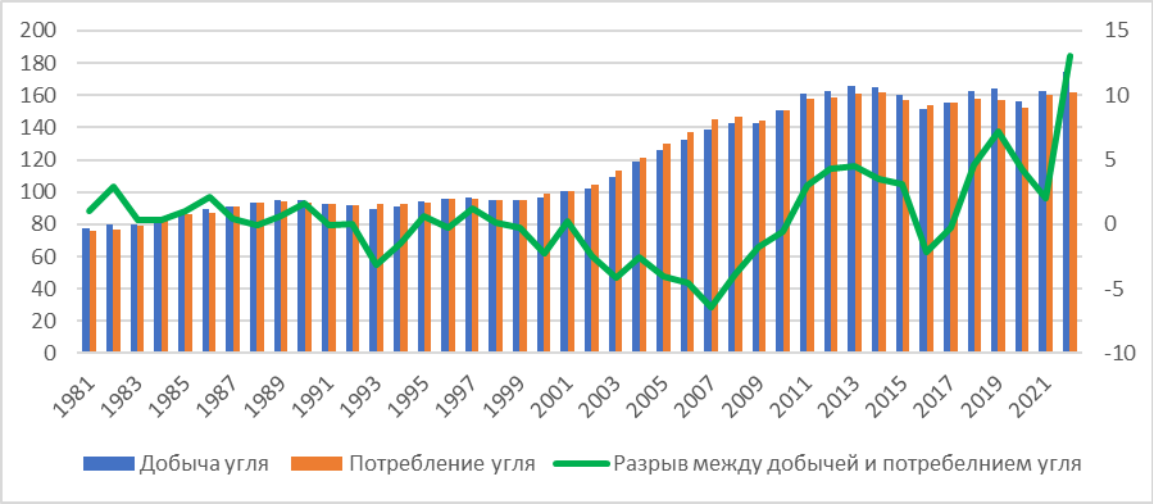


Рис. 4. Динамика мировой добычи и потребления угля (1981-2022гг., эДж) [1]

Все это позволяет сделать вывод, что прогноз о закате угольной отрасли является преждевременным, что высока вероятность реализации оптимистичного сценария развития мировой угольной отрасли, при котором уголь сохранит свою роль основного энергоносителя для угледобывающих и развивающихся стран, а также резервного энергоносителя, обеспечивающего стабильность в том числе ВИЭ в развитых странах.

При этом будущее мировой угольной индустрии отнюдь не безоблачно. Сохраняется целый ряд негативных факторов, что неизбежно ведет к росту рисков развития отрасли. И это не только климатическая повестка. Растущие риски в угольной отрасли вызваны ухудшением геотехнологических условий добычи в основных угледобывающих регионах, усложнением и даже разрывом логистических связей в результате обострения геополитической обстановки, растущей волатильностью цен на уголь, сокращением инвестиций в отрасль.

О ситуации в угольной промышленности Кузбасса. Кузбасс является самым крупным производителем и поставщиком угля в России. В 2022 г. здесь произведено около половины, (50,8%) всего добываемого угля в стране, в том числе 65% особо ценных коксующихся марок. Кузбасс является также крупнейшим экспортером российского угля (57,1%), в том числе для коксования [3].

В Кузбассе по состоянию на 1 сентября 2023 года имеется 295 действующих лицензий на добычу угля с проектной мощностью по добыче до 325 млн тонн угля в год. Для сравнения: в России на добычу угля выдано всего 615 лицензий, почти 50% лицензий приходится на Кузбасс. Фонд действующих угледобывающих предприятий Кузбасса насчитывает 152 предприятия, в том числе 38 шахт и 57 разрезов. Переработка угля осуществляется на 57 обогатительных фабриках и установках [3].

Общий объём добычи по итогам 8 месяцев 2023 года составил 142,7 млн. тонн, имеется тенденция к незначительному уменьшению относительно прошлого года. Рис. 2 составлен авторами на основе [3] и данных угольных компаний.

Из добытых в 2023 году 142,7 млн тонн угля - коксующихся марок 44,3 млн тонн, энергетических – 98,4 млн тонн. При этом доля добываемого коксующего угля выросла, а энергетического уменьшилась. Рис. 3 составлен авторами на основе [3] и данных угольных компаний.

Объём добычи угля открытым способом составил 96 млн тонн, подземным способом – 46,7 млн тонн. [3]

Важно отметить, что за десятилетие с 2008 по 2018 годы, несмотря на разные кризисы в добывающей отрасли, горняки Кузбасса никогда не снижали объемы добычи угля. Впервые снижение уровня добычи угля в Кузбассе произошло в 2019-2020 годы, на это время приходится резкое падение цен на уголь и пандемия. Учитывая новые вызовы

2022 и текущего года объемы добычи ещё незначительно снизились. Следует отметить, что основным ограничивающим фактором в увеличение объёмов угледобычи в регионе являются даже не санкции, а недостаточная пропускная способность сетей ОАО «РЖД» как в восточном, так и западном направлениях [3].

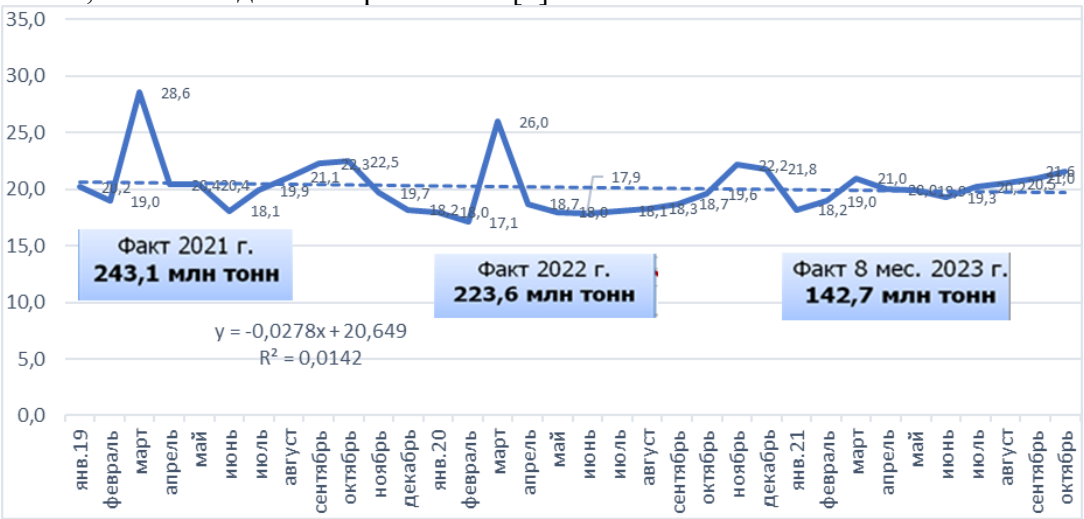


Рис. 2. Динамика добычи угля в Кузбассе 2021- 2023гг (млн. т.) [3]

Несмотря на все сегодняшние сложности, отрасль в Кузбассе продолжает развиваться, вкладываются инвестиции, внедряются современные технологии добычи и переработки угля. В 2022 году инвестиции составили около 151 млрд. рублей, что выше уровня 2021 года на 36,1 млрд. рублей. По прогнозам в текущем 2023 году планируется сохранить уровень 2022 года [3]. В 2024-2025 гг. планируется построить 5 новых обогатительных фабрик общей проектной мощностью по переработке 14,5 млн. тонн угля в год и созданием более 1000 новых профильных рабочих мест: ОФ «Кузбасс-300» АО ХК «СДС-Уголь» (Прокопьевский округ) проектной мощностью по переработке 3,0 млн. тонн угля в год и созданием 208 новых профильных рабочих мест; ЦОФ «Энергетическая» проектной мощностью по переработке 5,0 млн. тонн угля в год и созданием 500 новых профильных рабочих мест; ОФ «Тайлепская» (Новокузнецкий округ) проектной мощностью по переработке 2,0 млн. тонн угля в год и созданием 134 новых профильных рабочих мест; ОФ «Корчакольская» (г. Калтан) проектной мощностью по переработке 1,5 млн. тонн угля в год и созданием 200 новых профильных рабочих мест; ОФ «Кедровская» (модуль обогащения класса 0-13, г. Кемерово) проектной мощностью по переработке 3,0 млн. тонн угля в год, количество рабочих мест по итогам проектирования [3].

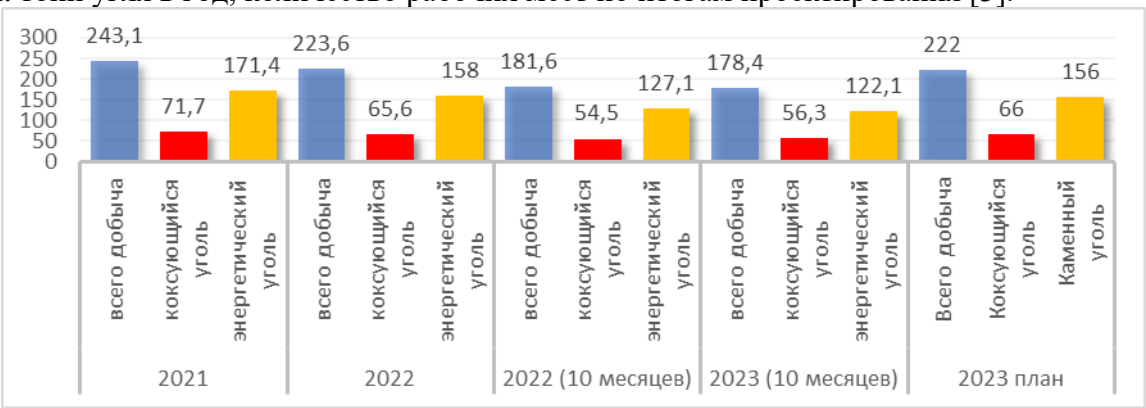


Рис. 3. Динамика добычи угля в Кузбассе 2021- 2023гг по видам угля (млн. т.) [3]

О перспективах. Мировой опыт промышленного развития подтверждает, что масштабные преобразования всегда опираются на глубокие научные и прикладные

исследования. Перспективы развития угольной отрасли изучаются преимущественно в негативном ключе – на это влияет и отсутствие системных, лишенных политической окраски исследований энергоперехода и знаний в области организационно-технологического уклада в энергетическом секторе, учитывающей рациональную специфику и задачи локализации производства, способной предложить оптимальные направления и инструменты регулирования отрасли в новых условиях. Поэтому было бы легкомысленно без детального анализа ситуации претендовать на исчерпывающее представление о программе технологической и структурной трансформации российской угольной отрасли. Тем не менее некоторые возможные направления хотелось бы обозначить.

Общеизвестно, что в основе современного производства лежат технологические цепочки, представляющие собой последовательность операций по переработки сырья в готовую продукцию. Исходя из этого разработка концепции и модели реконфигурации технологических цепочек в угольной отрасли и смежных отраслях в условиях смены технико-экономического уклада развития энергетического сектора и угольной отрасли как его части и ориентированных должна быть направлена на моделирование и формирование гибких и устойчивых технологических цепочек в отрасли [4,5]. Это позволит ориентироваться на внедрение новых технологий на всех этапах технологического процесса от добычи угля и до реализации углепродукции и более взвешено оценить текущую ситуацию в отрасли в контексте текущих и перспективных риск-факторов и предложить более взвешенную стратегию трансформации угольной отрасли как в целом в стране, так и в ее отдельных угледобывающих регионах [6].

Важным моментом моделирования технологических цепочек должно стать выявление перспективных направлений и наилучших технических решений в области чистой угольной энергетики, оценки возможности их внедрения и оптимального размещения производств; выявления новых сегментов рынка и рыночных ниш для перспективных групп технологий и инновационной продукции, не конкурирующих с уже существующими рынками и нишами; поиска альтернативных путей диверсификации на основе комплементарных угольной отрасли производств и сбалансированного развития экономик угледобывающих регионов.

Соответствующие ориентиры могут задать результаты современные методы рекомбинирования, включающие в себя патентную аналитику, опросы экспертов, современные методы статистического анализа. Первые подобные исследования уже появились [7-9], которые говорят о необходимости сместить акцент с интенсивного типа развития отрасли в сторону устойчивого, что исходит из очевидно большей перспективности добиться успеха в увеличении эффективности использования уже имеющегося оборудования, имея ввиду его линейные, объемные и мощностные характеристики, нежели продолжать увеличивать единичную мощность применяемых средств механизации и за счет этого наращивать выработку предприятий. При этом необходимо отметить, что под обеспечение устойчивого развития горнотехнических систем в том числе включает в себя повышение эффективности и безопасности процессов горного производства за счет использования возможности оперативного принятия и реализации управленческих решений, что может быть обеспечено на основе комплексной цифровой трансформации горного производства, когда одним из ключевых факторов, определяющих возможности достижения нового качества осуществления производственных операций, является комплексность. Локальное внедрение тех или иных элементов интеллектуализации не позволит горнодобывающему предприятию, как системе приобрести новое качество. На рис. 4 приведена карта технологических направлений переработки угля и полученной из него продукции, которая может стать основой для моделирования новых гибких производственных цепочек в угольной отрасли и смежных отраслях [10]. Карта адаптирована авторами на основе [10].

При этом важно понимать, что сложившаяся организация производства, иерархические технологические цепочки и преобладающие в угольной отрасли вертикально-интегрированные компаний необходимо сохранить [8]. Они были и будут эффективны как минимум в течение всего периода трансформации отрасли. Однако в период пертурбаций и неопределенности, когда на первый план выходят задачи стабилизации отрасли, они должны быть дополнены различными гибкими технологическими цепочками и формами кооперации между компаниями на горизонтальном уровне. Это позволит, не ломая резко, старые технологические цепочки повысить их текущую гибкость и устойчивость к колебаниям рынка и дифференцированно подойти к поддержке отдельных сегментов угольной отрасли, а также формированию высокотехнологичных секторов экономики в угледобывающих регионах на основе перспективных экологичных инновационных технологий, реализованных в виде новых технологических цепочек [12].

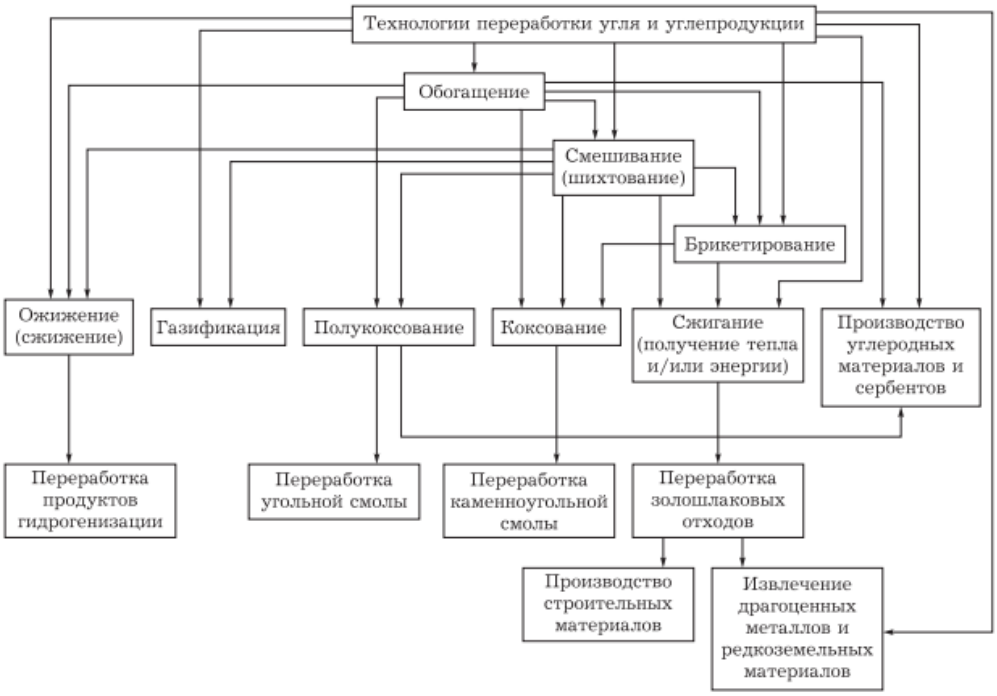


Рис. 4. Карта технологических направлений переработки угля и полученной из него продукции [10]

Для создания перспективных цепочек в угольной отрасли могут быть использованы различные формы государственного регулирования и поддержки кооперации угольных компаний в сфере НИОКР, технологических инвестиций, в рамках проектов, направленных на создание новых производств, общей и специальной инфраструктуры. Партнерами такой кооперации кроме угольщиков могут выступать компании из смежных отраслей (угольного машиностроения, энергетики, углехимии). Такое сотрудничество позволит организационно оформить новые технологические цепочки, стабилизировать поставки оборудования и развивать внутренний рынок и стать основой для трансформации и опережающего развития угольной отрасли в рамках нового технико-экономического уклада [13].

Выводы. Несмотря на преобладающую в настоящее время парадигму безуглеродной концепции развития энергетики в реальности происходит не отказ от добычи угля и угольной генерации, а смена технико-экономического уклада развития всего энергетического сектора и угольной отрасли как его важнейшей части. Главным в этих процессах является смена технологий добычи угля и производства энергии, а не изменение энергобалансов. Регионализация и локализация отраслей ТЭК и связанных с ними отраслей ведет к возрастанию страновых и региональных различий. Это позволяет говорить о том,

что уголь в странах, располагающих его значительными запасами, еще долго будет играть роль основного энергоносителя. При этом для сохранения его роли уже сейчас стоит задача смены модели развития угольной отрасли и смежных с ней отраслей.

Поэтому в целом оптимистичный прогноз развития мировой угольной отрасли не снимает задачи его глубокой трансформации в России. При этом трансформация предполагает смену приоритетов и переход с экспортноориентированной модели развития на модель, ориентированную на преимущественное развитие внутреннего рынка. Также необходим дифференцированный подход к поддержке отдельных сегментов отрасли, на основе перспективных экологичных инновационных технологий, реализованных в виде новых технологических цепочек и кооперативных связей. Кузбасс как ведущий угледобывающий регион может стать ключевой площадкой такой трансформации.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках проекта «Зеркальные лаборатории» НИУ «Высшая школа экономики» по теме «Трансформации цепочек создания стоимости угольной отрасли и связанных с ней отраслей в условиях глобального энергоперехода и санкционного давления на российскую экономику» (Соглашение № 6.13.1-02/210723–1 от 21.07.2023 г.).

Список литературы

1. Energy Institute Statistical Review of World Energy. – 2023. – https://www.energyinst.org/statistical-review

2. IEA – International Energy Agency. – https://www.iea.org/

3. Официальный сайт Министерства угольной промышленности Кузбасса. – https://mupk42.ru/ru/industry/pokazateli/

4. Кондратьев В.Б., Попов В.В., Кедрова Г.В. Трансформация глобальных цепочек стоимости: опыт трех отраслей // Мировая экономика и международные отношения. – 2020. – Т. 64. – № 3. – С. 68-79. – DOI: 10.20542/0131-2227-2020-64-3-68-79.

5. Никитенко С.М., Гоосен Е.В. Цепочки добавленной стоимости как инструмент развития угольной отрасли // ЭКО. 2017. №9 (519);

6. Evolution of VAC in the context of coal industry advance in the conditions of digitization in Russia / E.V. Goosen, S.M. Nikitenko, E.S. Kagan [et al.] // Eurasian mining. – 2019. – No. 2. – PP. 36–40. – DOI: 10.17580/em.2019.02.08

7. Barnewold L., Lottermoser B.G. Identification of digital technologies and digitalisation trends in the mining industry // International Journal of Mining Science and Technology. – 2020. – Vol. 30. – Iss. 6. – P. 747–757.

8. Методические подходы к стандартизации сбора, хранения и анализа данных при управлении горнотехническими системами / В.Н. Захаров, Д.Р. Каплунов, Д.А. Клебанов [и др.] // Горный журнал. – 2022. – № 12.– С. 55-61. – DOI: 10.17580/gzh.2022.12.10.

9. Каплунов Д.Р., Федотенко В.С. Устойчивое развитие горнотехнических систем как переход от добычи полезных ископаемых к освоению георесурсов и сохранению недр // Горный журнал. – 2021. – № 8. – С. 4-7. – DOI: 10.17580/gzh.2021.08.01

10. Королев М.К., Никитенко С.М., Гоосен Е.В. Выявление потенциальных производственных цепочек переработки угля на основе патентной аналитики // Химия в интересах устойчивого развития. – 2023. – № 31. – С. 616–622. – DOI: 10.15372/KhUR2023506. EDN: WLMFLH

11. Трансформация производственных цепочек в угольной отрасли: организационно-технологические аспекты / Е.В. Гоосен, С.М. Никитенко, Е.С. Каган [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 3. – С. 163–179. – DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_163.

12. Muštra M., Šimundić B., Kuliš Z. Does innovation matter for regional labour resilience? The case of EU regions https:// Regional Science Policy & Practice. – 2020. – Vol. 12. – Iss. 5. – PP. 955-970. – https://doi.org/10.1111/rsp3.12348

13. Никитенко С.М., Гоосен Е.В. Цепочки добавленной стоимости как инструмент развития угольной отрасли // ЭКО. – 2017. – № 9 (519). – С. 104-124. EDN: ZEOZYR

УДК 662.66; 339.13.012.42

РОЛЬ ГОСУДАРСТВА В ПОДДЕРЖАНИИ УСТОЙЧИВОСТИ УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ: ПРИОРИТЕТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

к.э.н. Саблин К.С., к.э.н. Гоосен Е.В., Гоосен О.К.
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
г. Кемерово, Россия

Аннотация. Современная экономика представляют собой переплетение глобальных и национальных цепочек создания стоимости (ЦСС). Российская угольная отрасль не является исключением. В мировой науке и практике растет понимание, что именно ЦСС являются средством анализа организации и инструментом развития отраслей и регионов. Данная статья посвящена изучению современных подходов к роли государства в трансформации угольной отрасли с ориентацией на ЦСС. На основе систематизации зарубежных и российских инструментов антикризисного и стратегического развития угольной отраслиавторы предложили три группы возможных направлений и механизмов поддержки устойчивого развития и долговременной трансформации отечественной угольной отрасли и показали роль ЦСС в обеспечении их успешной реализации.

Ключевые слова: угольная отрасль, трансформация цепочек создания стоимости, формы государственной поддержки.

Роль угольной отрасли в современной экономике и необходимость ее поддержки. Развитие мировой цивилизации всегда шло рука об руку с ростом потребления энергии и, как следствие, ростом добычи и потребления ископаемых энергетических ресурсов. Несмотря на энергопереход и сопровождающий его отказ на потребление традиционных энергоносителей, уголь остается важнейшим истопником энергии, обеспечивая около 30% энергопотребления в мире. В текущих условиях угольная отрасль столкнулась с беспрецедентными рисками, связанными с ухудшением геотехнологических условий добычи и растущей озабоченностью общества растущим загрязнением воздуха и выбросов парниковых газов. Все это привело к отказу от угля в развитых странах и резкому ухудшению работы угольной отрасли в странах с формирующимися рынками и развивающихся странах несмотря на то, что уголь до сих является самым дешевым и доступным источником энергии [1-3].

В этих условиях к «традиционным» проблемам российской угольной отрасли добавились новые: нестабильность спроса и цен на внутреннем и внешнем рынках, усугубились внешнеэкономическими санкциями, сказалось слабое развитие инфраструктуры и низкая пропускная способность железной дороги «восточного полигона», высокая конкурентность на азиатском рынке, куда был вынужден развернуться российский экспорт угля после запрета поставок угля в Европу.

Тем не менее угольная отрасль по-прежнему очень важна для России. Она не только является ведущей отечественной отраслью, но до 2023 года постоянно увеличивала объем добычи угля. За последние 20 лет объем добычи угля увеличился почти в 2 раза, являясь шестой страной в мире по добыче и третьей по экспорту угля (15% мирового рынка). Кузбасс остается основным центром добычи угля, производя более 200 млн. тонн в год. [4]. Все вышеперечисленное, с одной стороны, делает отечественную угольную отрасль крайне уязвимой, с другой очень важной для страны и требует поиска новых форм ее развития и поддержки.

Современные подходы к участию государства в развитии ЦСС в угольной отрасли. Длительное время в научных исследованиях, посвященных добывающим отраслям и энергетическому сектору роль государства, была достаточно пассивна и сводилась к поддержанию конкуренции и создании общих институциональных условий развития рынка. В исследованиях основной акцент делался на преодоление ресурсного проклятия. Сначала финансовый кризис 2008 г., энергетический кризис 2014 г., и в наибольшей степени кризис пандемии Ковид-2019 привели к возврату научного интереса к роли государства в экономике в целом и добывающих секторах в частности. При этом появился новый подход к изучению этой проблемы – с позиций цепочек создания стоимости (ЦСС) [5-8]. Формирование полноценных глобальных и национальных цепочек создания стоимости в добывающих отраслях России, Китая, Индии, Вьетнама показало, что государства должны играть более активную роль в развитии и трансформации [9-11]. Все это заставляет обратиться к опыту участия государства в создании глобальных и национальных цепочек создания стоимости.

Под цепочками создания стоимости в современной экономической литературе в самом общем виде понимается вся последовательность этапов (операций) от закупки сырья до производства и реализации готовой продукции. При этом в ЦСС могут входить как одна, так и несколько независимых фирм [12]. Сейчас в литературе можно увидеть четыре основных направления изучения роли государства в добывающих и энергетических ЦСС:

– переход от «фирма ориентированного» подхода к «государственно-центричному» анализу ЦСС [13]. В рамках этого направления выделены ключевые функции государства в ЦСС: стимулирование, регулирование, организация производства, создание рынков и покупка продукции (табл.1).

– анализ роли и особенностей участия государственных фирм в ЦСС, преимущества и риски их участия в ЦСС в качестве ведущих фирм [14];

– изучение тенденций расширения сфер и форм государственного контроля за ЦСС в добывающих секторах [15-16];

– участие государства в энергетических ЦСС в рамках энергоперехода [17, 18], в том числе и в рамках отечественных исследований [10, 11, 19].

Это привело к более взвешенному исследованию роли государства в цепочках создания стоимости и показало возможности использования этого опыта для трансформации отечественных ЦСС в угольной отрасли. и обоснованию его ключевых функций в ЦСС.

Особенности участия государства в угольных цепочках создания стоимости во многом определяются отраслевыми особенностями ЦСС. В первую очередь это ресурсно-сырьевой характер ЦСС в угольной отрасли по таксономии Павитта [20]. Добыча угля находится в самом начале цепочки, уголь является отправной точкой ЦСС, которые включают в себя: подготовку проекта (геологоразведка, проектирование и строительство угледобывающего предприятия), добычу (в том числе обогащение), логистику и продажи. Цепочки создания стоимости в угольной отрасли формируются на основе аддитивного производства, представляющего собой жесткую последовательность технологических операций, при этом НИР и снабжение в состав цепочек не входят (рис.1). Поэтому ЦСС в угольной отрасли короткие, тонкие (lean) и не гибкие [10,11,19]. ЦСС в угольной отрасли относятся к цепочкам, управляемым покупателем (buyer-driven chain) [12] и формируются сверху вниз (backward integration) 2019 [21]. Они пространственно привязаны к месту локализации угольных запасов и ключевых потребителей, основным источником добавленной стоимости в ЦСС является природная и монопольная рента, формирующаяся за счет разницы в качестве, местоположении угольных месторождений и способности компаний, входящих в ЦСС контролировать рынок. Поэтому ЦСС в угольной отрасли носят закрытый анклавный характер [18] и создают риски ресурсного проклятия в регионах базирования. В сочетании со значительной капиталоемкостью угледобычи это приводит к

относительно слабой восприимчивости ЦСС в угольной отрасли к инновациям и ориентации их на преимущественно экстенсивный характер развития.

Таблица 1

Ключевые функции государства в ЦСС в угольной отрасли

Функция	Определение	Примеры
Стимулирование	Помощь фирмам в ЦСС в решении проблем глобальной и национальной экономики	налоговые льготы, национальные и региональные субсидии, ОЭЗ, стимулы для НИОКР, торговая политика, межгосударственное лоббирование
Регулирование	Меры, регулирующие и ограничивающие деятельность фирм внутри ГПН	государственные советы и корпорации, занимающиеся регулированием сбыта, контроль цен на внутреннем рынке, ограничения на иностранные инвестиции, патентное законодательство, регулирование занятости в добывающих отраслях, технический контроль, регламенты и стандарты
Организация производства	Государственные компании, конкурирующие за долю рынка с другими фирмами	государственные добывающие, транспортные компании и компании с государственным участием, совместные предприятия.
Создание рынков	Государственные закупки продукции фирмы	государственные закупки, различные формы содействия экспорту продукции

Источник: адаптировано авторами на основе [13].

Эти особенности цепочек в угольной отрасли объясняют их основной риск - подверженность внешним шокам. В табл. 2 показана оценка подверженности шокам ЦСС в отдельных отраслях в период кризиса 2019-2020гг. Угольная отрасль имеет один из самых высоких рангов уязвимости. Именно поэтому институты, государство и гражданское общество так важны в обеспечении их стабильности

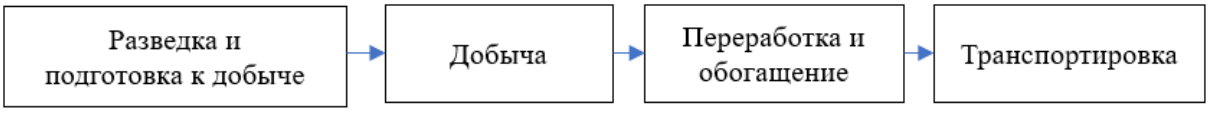


Рис. 1. Схема типичной ЦСС в угольной отрасли
(составлено авторами на основе данных угольных компаний, базы данных системы «СБИС»: https://sbis.ru/)

При этом важно подчеркнуть, что выбор конкретных направлений и форм участия государства в ЦСС помимо отраслевых особенностей определяется уровенем развития страны и отрасли, местом страны в глобальных ЦСС и его динамикой (upgrade/downgrade); наличием в стране политики, ориентированной на создание и поддержание / трансформацию оптимальных ЦСС (VC-oriented state policies) [22].

Текущее состояние организации поддержки угольной отрасли в России и возможные направления ее совершенствования. На сегодняшний день государственная поддержка отрасли достаточно ограничена. Она сдерживается такими факторами как:

– ограничение государственных функций в экономике косвенными мерами участия, нормативно-правовым регулированием отраслей и надзором;

– узкое представление об энергопереходе как климатической повестке, которая предполагает отказ от невозобновляемых энергоресурсов, в первую очередь от угля;

– преимущественно экспортноориентированное развитие отрасли. (Угольная отрасль до последнего времени рассматривалось федеральным правительством и региональными властями в контексте обеспечения доходов бюджетов за счет изъятия сверх доходов. В результате регулирование развития отрасли и стимулирование инвестиций неизбежно уходило на второй план, а меры поддержки носили краткосрочный характер и часто менялись);

– приоритет мер антикризисной поддержки отрасли (обеспечение оборотными средствами, возврат текущих кредитов) [23].

До последнего времени меры государственной поддержки отечественной угольной отрасли включали в себя такие формы как: льготные тарифы и квоты на перевозку угля, получение угольной компанией статуса системообразующего предприятия. Остановимся на последних.

Системообразующее предприятие – это компания, продукция или услуги которой важны для обеспечения жизни территории, функционирования определённой отрасли или социально-экономической системы региона (фактически стратегическое предприятие). Впервые этот статус был введён во время мирового экономического кризиса 2008 г., когда российские власти задумались о необходимости спасения крупных компаний. На сегодня статус системообразующего предприятия имеют 19 угольных компаний (табл.2).

Таблица 2

Список системообразующих угольных компаний России

№	Место регистрации	Название компаний
1	г. Москва	АО "Колмар груп"
2	г. Москва	АО "Русский уголь"
3	г. Москва	АО "СУЭК"
4	г. Москва	ООО "Восточная горнорудная компания"
5	г. Москва	ООО "Коулстар"
6	г. Москва	ООО "УК "Сибантрацит"
7	г. Москва	АО "ТАЛТЭК"
8	Иркутская область	ООО "Компания "Востсибуголь"
9	Кемеровская область	АО "ОУК "Южкузбассуголь" (Евраз)
10	Кемеровская область	АО "Стройсервис"
11	Кемеровская область	АО "УК "Кузбассразрезуголь"
12	Кемеровская область	АО "ХК "СДС-Уголь"
13	Кемеровская область	ООО "ММК-Уголь"
14	Кемеровская область	ООО "Распадская угольная компания" (Евраз)
15	Кемеровская область	ООО "Ресурс"
16	Кемеровская область	ПАО "Кузбасская топливная компания"
17	Кемеровская область	ПАО "Южный Кузбасс" (ПАО "Мечел")
18	Республика Коми	АО по добыче угля "Воркутауголь"
19	Республика Саха (Якутия)	АО ХК "Якутуголь" (ПАО "Мечел")

Источник: [24]

Критерии и порядок включения организаций в перечень системообразующих предприятий российской экономики был определен в протоколе заседания Подкомиссии по повышению устойчивости финансового сектора и отдельных отраслей экономики Правительственной комиссии по повышению устойчивости развития российской

экономики в условиях санкций от 22 апреля 2022 г. [24]. Компании, получившие статус системообразующего предприятия, получают отсрочку или рассрочку уплаты ввозных таможенных пошлин без уплаты процентов при ввозе на таможенную территорию ЕАЭС товаров, если этим организациям оказывается поддержка по законодательству государств - членов ЕАЭС. Они имеют право на субсидирование процентной ставки по кредитам.

В текущих условиях государство пытается систематизировать формы поддержки угольных ЦСС и сделать их более долговременными. Так в Программа развития угольной отрасли до 2035 года (далее Программа развития) определены приоритеты развития угольной отрасли. К ним отнесены:

– развитие сырьевой базы угольной промышленности и рациональное недропользование;

– формирование производственного потенциала угольной промышленности;

– расширение внутреннего рынка угольной продукции и укрепление позиций российских угольных компаний на мировом рынке угля;

– создание условий для технологического развития угольной промышленности; обеспечение промышленной безопасности и охраны труда в угольной промышленности; гарантии экологической безопасности и социальной стабильности в угольной промышленности [23].

Также Программа предусматривает перечень основных мер поддержки отрасли: предоставление налоговых льгот; субсидирование части процентных ставок по кредитам инвестиционного характера; предоставление государственных гарантий под рефинансирование долговых обязательств; программы поддержки угольных моногородов; создание кластеров и территорий опережающего социально-экономического развития в угледобывающих регионах; механизмы ГЧП - для реализации инвестиционных проектов освоения угольных объектов, в том числе с выделением средств федерального бюджета [23].

Несмотря на определение приоритетов и значительное расширение мер поддержки угольной отрасли в Программе сохранены прежние системные либеральные недостатки: приоритет краткосрочных антикризисных мер (обеспечение оборотными средствами, возврат текущих кредитов), меры господдержки и стимулирования отрасли носят точечный и косвенный характер. В Программе отсутствуют регуляторные меры поддержки отрасли, нет конкретных форм участия государства в поддержании стабильности внутреннего и внешнего рынков. Формы взаимодействия государства и угольных компаний только перечислены и никак не связаны с приоритетами. Государство по-прежнему оставляет за собой сферу нормативно-правового регулирования и надзора. Вместо приоритетов и направлений партнерства власти и бизнеса - жесткое разграничение полномочий и сфер деятельности бизнеса и государства. Особенно явно видна недостаточность государственного участия в ЦСС угольной отрасли приоритете, направленном на создание условий для технологического развития, обеспечении экологической безопасности и социальной стабильности в угольной отрасли [24].

Для преодоления этих проблем в Программу развития угольной отрасли и в нормативно-правовые акты, регулирующие угольную отрасль и смежные с ней отрасли по мнению авторов необходимо внести следующие изменения:

Разделить формы и направления поддержки российской угольной отрасли на три группы:

– антикризисные меры, направленные на снижение текущих негативных факторов в угольной отрасли;

– меры стимулирующие инвестиции и обеспечивающие среднесрочную устойчивость угольной отрасли;

– механизмы стратегической поддержки отрасли, ориентированные на ее трансформацию и долговременное развитие (табл. 3).

Таблица 3

Направления и примеры форм поддержки отечественной угольной отрасли

Группы мер	Примеры
Антикризисные меры	мораторий на рост налоговой нагрузки компаний; дифференцированный подход к определению налоговой базы НДПИ, учитывающий геологические особенности добычи; установление квот и потолка роста цен на железнодорожные тарифы на перевозку угля; льготные условия и комплексные механизмы целевого кредитования угольных компаний, направляющих средства на приобретение горного оборудования российского производства
Среднесрочные меры	реализация инвестиционных проектов в разработку месторождений с дефицитными и премиальными углями, месторождений в новых районах угледобычи, внедрением критических и опережающих современных технологий, в том числе в смежных отраслях (разработать критерии отнесения к таким технологиям и начать пополняемый реестр таких технологий); участие компаний в развитии транспортной и энергетической инфраструктуры; реализация проектов проведения геологоразведочных работ и научных исследований в угольной сфере и смежных отраслях (НОЦ, отдельные прикладные исследования); участие угольных компаний в проектах по созданию и расширению внутреннего рынка угля (проектах по переработке угля, проектах угольной генерации, в том числе в рамках кластерных инициатив и ТОСЭР)
Механизмы трансформации отрасли на основе ЦСС	заключение соглашений регуляторного типа (создание условий для полноценного участия угольных компаний в проектах специального инвестиционного контракта (СПИК), создание аналога СПИК специально для добывающих и связанных с ними отраслей; использование ГЧП для развития необходимой для угольной отрасли материальной инфраструктуры (развитие восточного полигона); определение списка первоочередных объектов транспортной и иной инфраструктуры в интересах развития угольной отрасли с возможностью возврата вложений за счет предоставления квот и льготных тарифов, налоговых льгот; переориентация ESG проектов на снижение всех видов экологической нагрузки не только на внедрение возобновляемых источников энергии; создание в угольной отрасли и смежных отраслях ЦСС, ориентированных на производство новых и более сложных продуктов на основе угля и отходов угледобычи (товарный и рыночный апгрейд ЦСС)

Источник: составлено авторами на основе [23, 25]

Кроме разделения форм господдержки на группы их необходимо увязать между собой. Помочь сделать это может определение важнейший приоритетов трансформации ЦСС в угольной отрасли в направлении повышения их устойчивости на основе создания

новых и более сложных продуктов на основе продуктов и отходов угледобычи (товарный и рыночный апгрейд ЦСС); перехода на более глубокую переработку угля (функциональный апгрейд) на основе глубокой переработки угля; переход к добыче угля, позволяющей избежать или уменьшить ущерб окружающей среде в том числе выбросов CO_2 (экологическая модернизация). По мнению авторов эти направления не только позволят сделать ЦСС в угольной отрасли более эффективными, но и позволят повысить их стрессоустойчивость.

Выводы. Обзор современной литературы и нормативно-правового регулирования в угольной отрасли позволяет сделать вывод, что в современных непростых условиях государство играет все большую роль в ЦСС. Угольные ЦСС обладают целым рядом особенностей, которые повышают роль государства в их функционировании. Среди выявленных направлений и форм государственного участия наиболее важны те, которые направлены на долгосрочную трансформацию отрасли. При этом они должны быть согласованы с мерами среднесрочной и антикризисной поддержки отрасли.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках проекта «Зеркальные лаборатории» НИУ «Высшая школа экономики» по теме «Трансформации цепочек создания стоимости угольной отрасли и связанных с ней отраслей в условиях глобального энергоперехода и санкционного давления на российскую экономику» (Соглашение № 6.13.1-02/210723–1 от 21.07.2023 г.).

Список литературы

1. Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023. – URL: https://www.energyinst.org/statistical-review.

2. ESG Disclosure and Portfolio Performance / C.R. Bermejo, F.-F.I. Garrigues, I. Paraskevopoulos [et al.] // Risks. – 2021. – Vol. 9. – N 172. – URL: https://doi.org/10.3390/risks9100172.

3. Tavares R.ESG factors and risk-adjusted performance: a new quantitative model / N.C.A. Kumar, C. Smith, L. Badis [et al.] // Journal of Sustainable Finance & Investment. – 2016. – Vol. 6. – N 4. – PP. 292–300.

4. Новак А. Российский ТЭК XXI века: энергия достижений // Энергетическая политика. – 2024. – №2. – URL: https://energypolicy.ru/rossijskij-tek-xxi-veka-energiya-dostizhenij/business/2024/15/02/.

5. Horner R. Beyond Facilitator? State Roles in Global Value Chains and Global Production Networks // Geography Compass. – 2017. – N 11. – e12307. – URL: https://doi.org/10.1111/gec3.12307.

6. Smith A. The state, institutional frameworks and the dynamics of capital in global production networks // Progress in Human Geography. – 2015. – N 39. – P. 290–315.

7. Pickles J, Smith A. Technologies of transition: Foreign investment and the (Re-)articulation of east central Europe into the global economy. Foreign Direct Investment and Regional Development in East Central Europe and the Former Soviet Union: A Collection of Essays in Memory of Professor Francis 'Frank' Carter. – 2017.

8. Alford M., Phillips N. The political economy of state governance in global production networks: Change, crisis and contestation in the South African fruit sector. – 2018. – DOI:10.1080/09692290.2017.1423367

9. Mayer F.W., Phillips N. Outsourcing governance: States and the politics of a ‘Global value chain world’ // New Political Economy. – 2016. – DOI:10.1080/13563467.2016.1273341.

10. Никитенко С.М., Гоосен Е.В. Цепочки добавленной стоимости как инструмент развития угольной отрасли // ЭКО. – 2017. – №9 (519).

11. Гоосен Е.В., Каган Е.С., Рожков А.А. Стрессоустойчивость российской угольной отрасли в условиях энергоперехода, декарбонизации и экономических санкций // Горная промышленность. – 2023. – № S2. – С. 118-125.

12. Gereffi Gary. The Organization of Buyer-Driven Global Commodity Chains: How U.S. Retailers Shape Overseas Production Networks.– 1994. – DOI: 10.1017/9781108559423.003.

13. Horner R. Beyond Facilitator? State Roles in Global Value Chains and Global Production Networks // Geography Compass. – 2017. – N 11. – e12307. – URL: https://doi.org/10.1111/gec3.12307.

14. Lim K.F. Strategic coupling, state capitalism, and the shifting dynamics of global production networks // Geography Compass. – 2018. – 12 (11). – e12406.

15. Andersen A. Innovations in Natural Resource-Based Industries: a Pathway to Development? // Innovation and Development – 2018. – Vol. 8. – P. 1-27.

16. Dorn F.M., Huber Ch. Global production networks and natural resource extraction: adding a political ecology perspective // Geographica Helvetica. – 2020. – N 75 (2). – P. 183-193. – DOI: 10.5194/gh-75-183-2020.

17. De Blasio, Nicola, Derek Zheng. he Future of Energy Value Chains in the Transition to a Low-Carbon Economy: An Evaluation Framework of Integration and Segmentation Scenarios. – Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School, 2023.

18. A Review of Energy Industry Chain and Energy Supply Chain / L. Zhang, S. Fu, J. Tian // Energies. – 2022. – N 15. – 9246. – URL: https:// doi.org/10.3390/en15239246.

19. Кондратьев В., Попов В., Кедрова Г. Трансформация глобальных цепочек стоимости: опыт трех отраслей // Мировая экономика и международные отношения. – 2020. – Т. 64. – № 3. – С. 68-79. – URL: https://doi.org/10.20542/0131-2227-2020-64-3-68-79.

20. Pavitt K. Patterns of technical change: towards a taxonomy and a theory // Research Policy. – 1984. – N 13. – 343-374.

21. Del Prete, Davide, Rungi, Armando. Backward and Forward Integration Along Global Value Chains // SSRN Electronic Journal. – 2019. – DOI:10.2139/ssrn.3489047.

22. Molina O. Innovation in an Unfavorable Context: Local Mining Suppliers in Peru // Resources Policy. – 2018. – Vol. 58. – P. 34-48.

23. Программа развития угольной отрасли до 2035 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 июня 2020 г., № 1582-р.

24. Протокол заседания Подкомиссии по повышению устойчивости финансового сектора и отдельных отраслей экономики Правительственной комиссии по повышению устойчивости развития российской экономики в условиях санкций от 22 апреля 2022 г., № 5кс.

25. Рожков А.А., Гоосен Е.В., Гоосен О.К. Специальный инвестиционный контракт как стратегический инструмент трансформации угольной отрасли // Теория и практика стратегирования: сб. науч. статей и материалов VI междунар. науч.-практ. конф. Сер. Экономическая и финансовая стратегия. Том XI. Книга I. / Под научной редакцией В.Л. Квинта. – Кемерово, 2023.

УДК 622.23.05;346.7

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ КРЕПЕЙ СОПРЯЖЕНИЯ

[1]д.э.н. Никитенко С.М., [1]Королев М.К., [2]PhD Вайс И.
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия
2 – EEP Elektro-Elektronik Pranjic GmbH, Гельзенкирхен, Германия

Аннотация. Конструкционные особенности механизированных крепей сопряжения напрямую зависят от геотехнологических условий. В статье представлены результаты анализа патентной и непатентной информации, относящейся к механизированным крепям

сопряжения, систематизированы требования, предъявляемые к ним, а также определены тенденции и перспективные направления развития их конструкций.

Ключевые слова: механизированные крепи сопряжения, патентная аналитика, горнодобывающая промышленность.

Современная горнодобывающая промышленность характеризуется тенденциями к увеличению глубины добычи полезных ископаемых и автоматизацией все большего числа рабочих процессов горнодобывающего оборудования. Глубина добычи угля подземным способом превысила 1,5 км, а глубина добычи полезных ископаемых в целом превысила 4 км. При большем углублении под землю усугубляются следующие факторы внешней среды, предопределяющие направления развития технологий и устройств, применяемых в горнодобывающей отрасли: повышение концентрации газов и их движение; усложнение процесса откачки подземных и грунтовых вод; перераспределение горного давления (с кровли, с боков, со стороны почвы) и движение горных пород; геотермический градиент – повышение температуры окружающей среды при углублении под землю, в среднем составляющее 3°С на 100 м глубины; неоднородность и пористость горных пород, порождаемые вышеперечисленными факторами и вызывающие непредсказуемость процесса их разрушения [1, 2].

Таким образом, тенденция к интенсификации производственных процессов, увеличение глубины разработки и связанные с этим изменение напряженного состояния массива и ухудшение горно-геологических условий приводят к необходимости пересмотра и дополнения существующих подходов к оценке развития геомеханических процессов в приконтурном массиве на участках сопряжений горных выработок, разработки новых типов крепи сопряжений. Одним из важных направлений является обеспечение поддержания сопряжения очистного забоя и примыкающих горных выработок – наиболее ответственной технологической операции в цепочке добычи угля, так как кровля на сопряжениях подвержена повышенному динамическому опорному горному давлению, в том числе в связи с выносом привода забойного конвейера в подготовительные выработки. В этих условиях возникают дополнительные требования и к определению наиболее эффективной конструкции крепи сопряжения применительно к горно-геологическим условиям [2-6].

Как правило, для крепления сопряжений лавы с примыкающими к ним горными выработками применяются концевые секции призабойной механизированной крепи либо инвентарные (индивидуальные) механизированные крепи различного конструктивного изготовления. В мировой практике горного производства накоплен успешный опыт механизации работ на сопряжениях очистного забоя и примыкающих горных выработок. Но есть еще немало нерешённых вопросов, поэтому в добывающих странах научно-исследовательские работы в этом направлении проводятся по сей день [2].

Механизированные крепи сопряжений (МКС) предназначены для поддержания сопряжения лавы с прилегающими выработками при выносе приводных головок лавного скребкового конвейера на конвейерном и вентиляционном штреках, а также выполнения функции передвижки, разворота этих головок и регулирования высоты разгрузки под лавой на транспортное средство подготовительной выработки (как правило на скребковый конвейер штрека). По сути, эти гидрофицированные распорные крепи выполняют следующие рабочие операции механизированным способом: постоянное поддержание совместно с крепью подготовительной выработки кровли над приводами лавного конвейера, их передвижку с установкой в нужное положение по высоте и наклону относительно конвейера подготовительной выработки, а также подтягивание к ней или отталкивания в лаву става очистного скребкового конвейера. Требуемая многофункциональность МКС выдвигает целый ряд конструктивных требований к ним,

наличия различных распорнонесущих элементов и средств их перемещения. Универсальность МКС заключается в том, что она должна быть адаптирована к различной по форме сечения выработке, а также иметь возможность ее применения в поддерживаемой для повторного использования или погашаемой вслед за проходом лавы выработки.

Целью данной статьи является выявление на основе патентной аналитики тенденций развития механизированных крепей сопряжения для поддержания кровли в местах сопряжения лавы со штреками.

Многосторонняя и глубокая аналитика тенденций патентования – весомый аргумент при утверждении об актуальности выбранных технологических направлений. Сама патентная информация обладает как рядом формальных признаков, поддающихся эффективному и информативному статистическому анализу при применении методик патентного ландшафта, так и конкретными технологическими данными, которые могут позволить выявить конкретные технологические тенденции развития анализируемой области [7].

Для выполнения поставленной цели авторами было проведено патентное исследование на предмет механизированных крепей сопряжения по международным базам в ретроспективе 20 лет.

В результате проведения патентного исследования было выявлено всего 10 патентных семейств, представленных в табл. 1. При этом только 3 патентных семейства обладают действующими патентами на момент проведения анализа и только 1 патентное семейство обладает заявкой, находящейся на рассмотрении. Данные показатели свидетельствуют о крайне низкой изобретательской и патентной активности в данной технологической области. Кроме того, 6 из 10 патентных семейств в рамках данной патентной коллекции имеют российский приоритет, означающий их российское происхождение, что свидетельствует об относительной значимости данного направления для российской горнодобывающей отрасли.

Патентное семейство американской разработки EP2452046 «кровельные опоры для сплошной выемки», обладающее наибольшим показателем силы патента (patent strength), рассчитываемым патентно-аналитической базой данных Orbit Intelligence – 4.38, относится к секциям механизированных крепей, в т.ч. включающим механизированную крепь сопряжения. В рамках данного патентного семейства предложена кровельная опора главного штрека (рис. 1), техническим результатом которой является улучшение работы механизированной крепи, в частности повышение устойчивости и обеспечение постоянного контакта с кровлей выработки в условиях изменения рельефа выемочного поля [8]. При этом, на момент проведения исследования, правовая охрана на данное патентное семейство поддерживается только в 1 из 7 стран, в которых был получен патент (Колумбии), что может свидетельствовать о потере актуальности данной крепи для правообладателя.

Таблица 1

Патентная коллекция «Механизированные крепи сопряжения»

Номер семейства	Статус	Наличие патента в РФ
CN113202532	Заявка на рассмотрении	Нет
RU143967	Не действует	Есть
RU59727	Не действует	Есть
RU162329	Не действует	Есть
RU59728	Не действует	Есть
PL436576	Действует	Нет
RU123065	Не действует	Есть
RU2490468	Не действует	Есть
RU193398	Действует	Есть
EP2452046	Действует	Есть

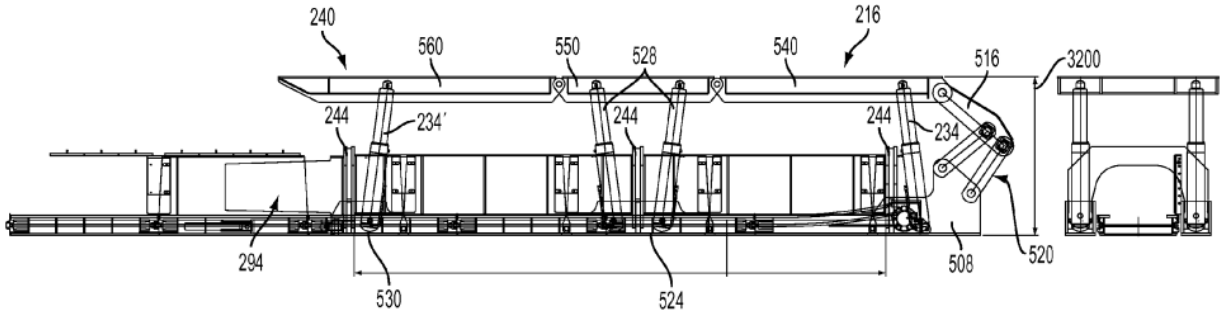


Рис. 1. Чертежи бокового и переднего видов крепи сопряжения из патентного семейства EP2452046

Наиболее новым патентным семейством является CN113202532 (2021 года приоритета) «Жестко-гибкая шагающая крепь сопряжения» (рис. 2). В полном тексте заявки в части преимуществ заявляются: высокая автоматизация, простота конструкции, удобство эксплуатации, высокая эффективность поддержки кровли, стабильность работы, устойчивость, гибкость поворота и маневренность [9]. При этом конструктивные особенности заявляемой крепи в значительной степени похожи на шагающую крепь, разработанную в Институте Угля ФИЦ УУХ СО РАН (пат. на полезную модель RU193398, 2019 год приоритета) [10]. Так, на рис. 2 можно увидеть сравнение конструкций крепей шагающего типа из этих патентных семейств. Обе крепи характеризуются наличием двух секций (передовой и отстающей), каждая из которых обладает гидравлическими стойками, домкратами передвижки, балками перекрытия и траверсами. Принципиальным отличием заявляемой китайской крепи шагающего типа от разработанной и запатентованной в России является отсутствие боковых ограждений.

Несмотря на это, факт адаптации китайскими учеными конструкции механизированной шагающей крепи под нужды крепления сопряжений может являться предвестником зарождающейся тенденции на активное внедрение новой конструкции.

Модернизация существующих и создание новых конструкций механизированных крепей сопряжения должны учитывать ряд требований, предъявляемых к этим крепям. Конструктивные требования к механизированным крепям сопряжения включают следующие аспекты [11-14].

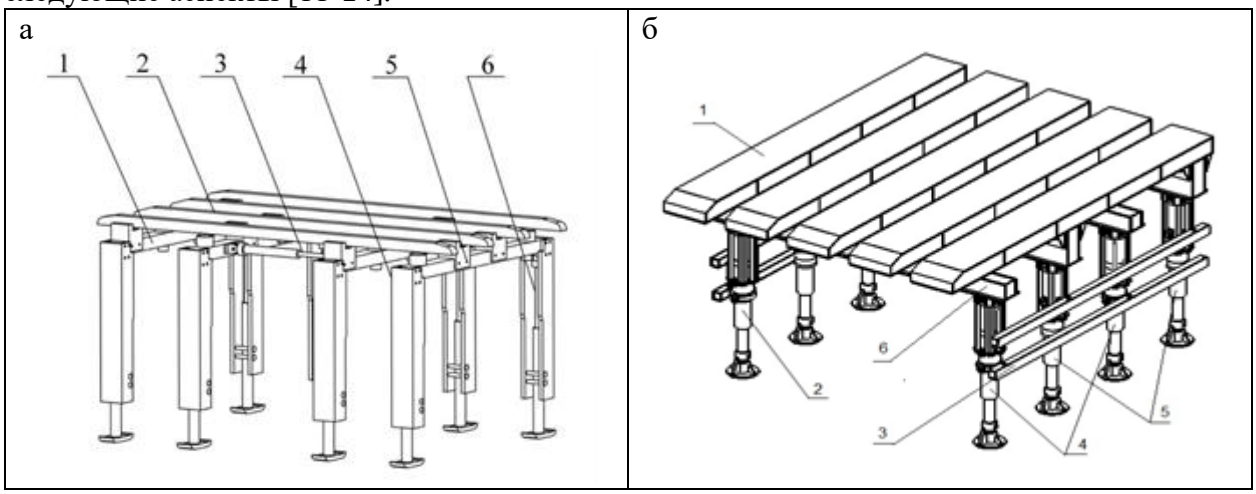


Рис. 2. Конструкции крепей шагающего типа из заявки на патенты: а – CN113202532; б – RU193398

Прочность и надежность: механизированные крепи сопряжения должны обеспечивать достаточную прочность и надежность для поддержания кровли и предотвращения обрушений.

Герметичность и устойчивость к агрессивным средам: механизированные крепи сопряжения и отдельные их узлы и элементы должны быть устойчивы к воздействию влаги, химически активных веществ и других агрессивных сред, чтобы обеспечить их надежность, долговечность и эффективность.

Легкость монтажа и обслуживания: механизированные крепи сопряжения должны быть легкими в монтаже и обслуживании, чтобы минимизировать время и затраты на эксплуатацию. Кроме того, как и ко всему горношахтному оборудованию, к составляющим механизированных крепей сопряжения предъявляется требование к габаритам, определяющим возможность их спуска под землю для дальнейшего монтажа.

Совместимость с другими технологиями: механизированные крепи сопряжения должны быть совместимы с секциями механизированной крепи, в частности, с концевыми крепями, располагающимися между секциями крепей сопряжения и линейными секциями.

Безопасность: механизированные крепи сопряжения должны соответствовать стандартам безопасности и обеспечивать защиту работников от факторов внешней среды.

Экономическая эффективность: механизированные крепи сопряжения в целом, так и их отдельные элементы, должны быть экономически эффективными, обеспечивая оптимальное соотношение цены и качества.

Удовлетворение этих требований позволяет создавать механизированные крепи сопряжения, которые обеспечивают высокую степень безопасности, надежности и эффективности в условиях горных работ.

По результатам проведенного анализа патентных и непатентных источников, а также с учетом требований, предъявляемых к крепям сопряжения и факторам внешней среды, усугубляющимся при углублении в земную толщу, можно выделить следующие тенденции и перспективные направления для развития механизированных крепей сопряжения в ближайшем будущем:

Использование новых материалов: применение современных композитных материалов и сплавов для создания более надежных, долговечных, легких и дешевых составных элементов крепей.

Технологические инновации: внедрение автоматизированных систем мониторинга, диагностики и управления для обеспечения более безопасных и эффективных условий для их эксплуатации.

Улучшенные конструкции: разработка новых и адаптация уже существующих конструкций, учитывающих тенденции к увеличению глубины добычи полезных ископаемых и предъявляемых требований для показателя сопротивления крепи. В частности, наиболее близким к массовому применению технологическим решением является конструкция механизированной шагающей крепи, которая обладает большим потенциалом для ее применения в качестве механизированной крепи сопряжения.

Геоинженерные решения: актуальной исследовательской задачей в сфере геотехнологий является разработка методики расчета нагрузки, оказываемой как на механизированные крепи в целом, так и на механизированные крепи сопряжения, в частности. Кроме того, наиболее актуальной составляющей этой проблемы является расчет нагрузки на крепи не только в статике, но и в движении.

Улучшенная безопасность и эргономика: Разработка крепежных систем, учитывающих требования безопасности и комфорта для работников, способствует улучшению условий труда и снижению рисков производственных травм.

Выводы. Изученные авторами технологические требования при создании новых и совершенствовании применяемых механизированных крепей сопряжения с учетом особенностей условий их эксплуатации при разработке угольных месторождений, а также изменяющихся условий внешней среды позволяют сделать вывод, что методы и средства повышения эксплуатационных характеристик и надежности крепей сопряжения как горных

машин, в том числе обоснование рациональных режимов их функционирования, требуют дальнейшего исследования.

Выявленные авторами конструктивные решения и тенденции развития крепей сопряжения требуют также дополнительного изучения способов управления состоянием подрабатываемых породных массивов, исключающие критические деформации земной поверхности и опасные проявления горного давления при разработке угольных месторождений, в том числе с использованием крепей различных конструкций.

Список литературы

1. Королев М.К. Геотехнологические вызовы как фактор формирования закономерностей создания новых горных машин // Развитие – 2022: материалы ежегодной конференции молодых ученых, г. Кемерово, 11–13 мая 2022 г. – Кемерово: ФИЦ УУХ СО РАН; 2022. – С. 9–16. – https://doi.org/10.53650/9785902305668_9.

2. Крепи сопряжений: состояние и тенденции развития / М.К. Королев, Ю.В. Малахов, С.М. Никитенко, И. Вайс // Горная промышленность. – 2023. – № S2. – С. 95-100. – DOI 10.30686/1609-9192-2023-S2-95-100.

3. Кириенко Ю.А. Обоснование конструкции крепи сопряжения шахтного ствола, пройденного в солях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 6. – С. 20-34. – DOI 10.25018/0236_1493_2022_6_0_20.

4. Данилкин М.С. Подходы к расчету геометрических параметров сопряжений горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 9. – С. 234-236.

5. Вильнер М.А. Геомеханический прогноз нагрузок на крепь сопряжений выработок в структурно-нарушенных массивах горных пород: автореф. дис. канд. техн. наук. – СПб., 2022. – 24 с.

6. Chen K.-H., Peng F.-L. An improved method to calculate the vertical earth pressure for deep shield tunnel in Shanghai soil layers // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2018. – 75. – P. 43–66. – https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.01.027

7. Королев М.К., Никитенко С.М., Гоосен Е.В. Выявление потенциальных производственных цепочек переработки угля на основе патентной аналитики // Химия в интересах устойчивого развития. – 2023. – Т. 31. – № 5. – С. 616-622.

8. Патент № 2544345 C2 Российская Федерация, МПК E21D 23/04, E21D 19/02, E21C 27/20. Кровельные опоры для сплошной выемки: № 2012101713/03: заявл. 09.07.2010: опубл. 20.03.2015 / Д. Холм; заявитель Джой ММ Делавэр, Инк.

9. Заявка на патент CN113202532 Китай, МПК E21D 23/00, E21D 23/04, E21D 23/08, E21D 23/18. Rigid-flexible coupling support stepping walking device. CN113202532 A заявл. 08.03.2021: опубл. 27.04.2021 / Deng Haishun, Jia Zhijun, Zhu Pengkun [et al.]; заявитель Anhui university of science & technology.

10. Патент на полезную модель № 193398 U1 Российская Федерация, МПК E21D 23/00. Секция крепи механизированная шагающая: № 2019114283: заявл. 07.05.2019: опубл. 28.10.2019 / В.И. Клишин, Ю.В. Малахов, М.С. Никитенко, С.А. Кизилов; заявитель ООО «Инновационные технологии и горные машины» (ООО «ИНТЕХГОРМАШ»).

11. Сысоев Н.И., Турук Ю.В. Обоснование структуры и основных конструктивных параметров крепи сопряжения струговых очистных забоев с примыкающими выработками // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2014. – № 1(176). – С. 100-104.

12. Выбор формы армирующих вставок для тангенциальных поворотных резцов горных машин / П.Д. Крестовоздвиженский, В.И. Клишин, С.М. Никитенко [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 6. – С. 107-115.

13. Никитенко С.М., Патракова Л.П., Гоосен Е.В. Реализация совместных инновационных проектов бизнеса и местной власти как фактор устойчивого экономического развития муниципального образования // Региональная экономика: теория и практика. – 2009. – № 24.– С. 17-26.

14. Никитенко С.М. Оптимальные сценарии создания научно-образовательными учреждениями хозяйственных обществ (в рамках №217-ФЗ) // Инновации. – 2010. – № 6 (140). – С. 15-21.

УДК 553.94; 579.851

О КОМБИНИРОВАННЫХ СПОСОБАХ ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНОГО МАССИВА

[1,2]д.э.н. Никитенко С.М., [2]к.б.н. Игнатова А.Ю., [3]к.х.н. Овсянникова В.С.
1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия
2 – Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия
3 – Института химии нефти СО РАН, г. Томск, Россия

Аннотация. В статье приводится обзор научно-технической информации по состоянию и перспективам использования различных технологий дегазации угольных пластов, в том числе микробиологического.

Ключевые слова: метан, газовыделение, концентрация, угольный пласт, технологии дегазации, метаноокисляющие бактерии, биогеотехнологии.

В недрах осваиваемых и перспективных угольных бассейнов сосредоточена значительная часть мировых ресурсов углей, а также их спутника – метана, масштабы ресурсов которого соизмеримы с ресурсами газа традиционных месторождений мира. В процессе дегазации ключевую роль играет техногенное воздействие на углепородный массив с целью развития его трещиноватости, что способствует выходу из угольного вещества связанного метана. Разработкой методов извлечения метана в угольных пластах до ведения очистных и подготовительных работ занимаются как в России [1-2], так и за рубежом [3-6].

Газообразный метан является одним из основных продуктов переработки ископаемого растительного материала в каменный уголь, и поэтому он практически всегда присутствует в угленосных отложениях. Условия образования и последующая геологическая история угольных пластов определяют природную газоносность каменного угля, которая изменяется в широких пределах – от единиц до сотен кубических метров метана на тонну угля. Газообильность угольных шахт, измеряемая в кубометрах метана на тонну добытого угля, зависит как от природной газоносности, так и от системы разработки угольных пластов, в частности комплекса мероприятий по предварительному снижению газоносности [1]. С увеличением глубины освоения месторождения просматривается устойчивая закономерность нарастания метаноносности пластов и миграции метана в выработки, а также вероятность возникновения внезапных выбросов угля и газа. По мнению экспертов, эмиссия метана из угольных пластов оценивается до 30 млрд. м^3 (что соизмеримо с объемом утилизации ПНГ нефтяных месторождений России), в том числе выбросы шахтного метана при добыче угля подземным способом составляют около 25,5 млрд. м^3. Перерабатывается ежегодно не более 5% газа [2].

Для дегазации угольных пластов через скважины разрабатываются методы и средства извлечения метана как с земной поверхности, так и из подземных выработок.

Бурение скважин с поверхности требует специального оборудования, способ трудоемкий и высокозатратный. В то же время было установлено, что дебит горизонтальных скважин может в 10 раз превышать объемы, получаемые из вертикальных скважин, а из веера горизонтальных скважин дебит увеличивается в разы. Практика ведения таких работ в США показывает, что горизонтальное бурение по эффективности дегазации выработок в семь раз превосходит бурение типовых вертикальных скважин на участке такой же площади.

Именно по этой причине практически с самого начала освоения дегазации угольных пластов через скважины, пробуренные с поверхности (заблаговременная дегазация), стал применятся гидроразрыв (гидрорасчленение) массива на полях действующих шахт.

Для интенсификации процессов дегазации из подготовительных выработок через дегазационные скважины большинство технических решений направлено на создание дополнительных площадей обнажения за счет создания трещин разрыва вдоль скважины по слоистости или вкрест простирания, а также создания трещин поперек скважин.

Последнее позволяет увеличить количество создаваемых трещин и, главное, исключает их выход на поверхность подготовительной выработки, из которых производят разрывы. Возможность выхода трещины на поверхность выработки опасна с точки зрения возможного подсоса воздуха, что вызывает опасность взрыва метана.

Следует отметить, что многие учёные проводят аналогию способа добычи природного газа или нефти с применением гидроразрыва горного массива с извлечением метана в угленосной толще. Такой подход, по мнению авторов, не корректен по той причине, что на нефтяных и газовых месторождениях имеется сформированный природный проницаемый коллектор, а гидроразрыв применяется для увеличения раскрытия уже имеющихся трещин или увеличения активной пористой площади фильтрации.

Чувствительность угольного пласта на образование новых трещин резко отличается от характеристик нефтяных и газовых месторождений из-за наличия в угольном массиве естественных трещин – кливажа. Формы их, как правило, распределяется случайным образом. Мягкость угля препятствует развитию трещин. Кливаж способствует развитию сложных сетей трещин. Даже при высоких давлениях гидроразрыва в таком пласте образуются трещины лишь ограниченной длины. Традиционные жидкости гидроразрыва и большой объём закачиваемой жидкости могут изменить смачиваемость угольной матрицы и тем самым отрицательно воздействовать на процесс обезвоживания.

Таким образом, основной проблемой при выполнении работ по гидроразрыву является оптимальное формирование геометрии и ориентации трещины. Значительное влияние оказывает напряженно-деформированное состояние массива горных пород и их свойства, скорость закачки рабочей жидкости и ее свойства и т.д. Главную роль играет направление развития трещины гидроразрыва: создание поперечных относительно оси скважины трещин дает максимальный результат. Это связано также с тем, что дегазационная скважина в соответствии с нормативными документами зачастую бурится параллельно очистному забою и в этом случае трещина гидроразрыва будет направлена навстречу ему [7]. При приближении очистного забоя происходит дополнительное раскрытие трещины и происходит выход оставшегося метана.

В соответствии с действующими рекомендациями по дегазации угольных шахт предварительный гидроразрыв пластов рекомендуется применять с целью повышения ее эффективности и сокращения сроков дегазации [8]. При этом, подземные скважины гидроразрыва рекомендуется бурить по двум основным схемам: из полевых выработок - при полевой подготовке, и по разрабатываемому пласту - при пластовой подготовке.

На пластах с высокой газоносностью, когда одной схемой дегазации не удается снизить газообильность, рекомендуется применять сочетание (комбинация) нескольких схем дегазации.

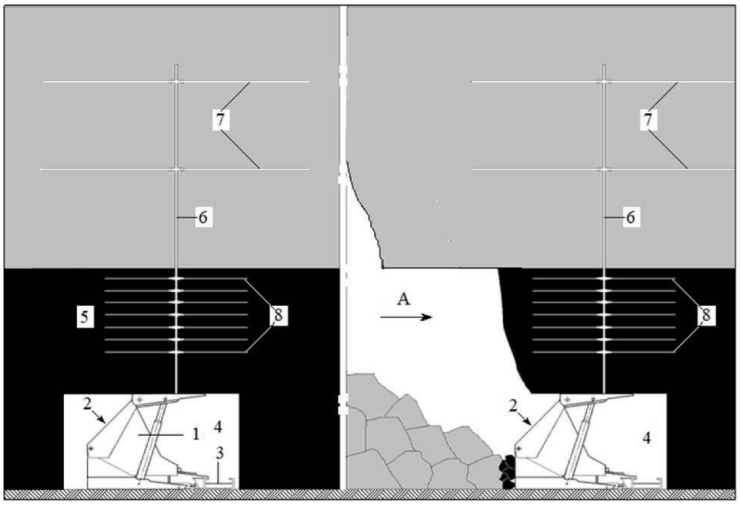
По результатам проведённого анализа способов и направлений повышения эффективности дегазации углеметановых пластов установлено [9]:

– традиционные способы и средства дегазации, регламентированные действующими нормативными документами, обеспечивают достижение коэффициента дегазации в пределах: 0,03–0,44, в среднем по Кузбассу не более 0,28; при комбинированных способах дегазации с одновременным газоотсосом и пластовой дегазацией – до 0,55; из пробуренных с земной поверхности скважин коэффициент дегазации достигает 0,85;

– перспективным направлением повышения эффективности дегазации углеметановых пластов является развитие теории и практики комбинированной поэтапной дезинтеграции угольной матрицы с целью создания условий перехода метана из гидратного в газообразное состояние посредством снижения механических напряжений в массиве горных пород.

Таким образом, можно сделать вывод, что перспективным направлением повышения интенсивности освобождения метана из угля является создание и реализация активных комбинированных способов дегазации.

Один из таких способов, разработанный авторами [10], включает управление горным давлением полным обрушением кровли и подготовку угольного массива подкровельной толщи к выпуску методом гидроразрыва. При этом используются одни и те же углепородные скважины: из каждой сначала осуществляют два-три направленных гидроразрыва пород кровли в последовательности от периферии к слою у почвы пласта, расстояние между которыми принимают не меньше максимального размера выпускного окна секции механизированной крепи. Затем несколько поинтервальных гидроразрывов в угольном массиве подкровельной толщи в той же последовательности, количество которых принимают в зависимости от мощности массива подкровельной толщи, а расстояние между ними – от требуемой крупности кусков выпускаемого угля, но не более минимального размера выпускного окна (рис. 1).



Фиг. 1

1 – секции механизированной крепи; 2 – устройство принудительного выпуска угля; 3 – забойный скребковый конвейер; 4 – линия очистного забоя; 5 – массив подкровельной толщи в нетронутом состоянии, 6 – углепородные скважины, 7 – искусственные трещины в породе, 8 – искусственные трещины в угольном массиве

Рис. 1. Подготовка угольного массива подкровельной толщи к выпуску методом гидроразрыва

Разработке перспективных технологий подготовки и отработки углеметаноносных пластов посвящены работы многих учёных, однако до сих пор не решены многие

актуальные задачи практического применения теоретических исследований в виде средств их реализации.

Авторами проведен анализ патентной документации и проанализирована изобретательская активность по практике создания устройства для осуществления гидроразрыва горных пород и его компонентов.

В России самую большую активность в области патентования решений, относящихся к мониторингу строительных объектов, проявляет Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, на его долю приходится 18% найденных охранных документов. На втором месте, с 14% охранных документов, находится Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук».

Данный факт не является неожиданным, т.к. данные институты стоят у истоков создания технологии ГПР.

Патентная активность в России за исследуемый период представлена на рис. 2.

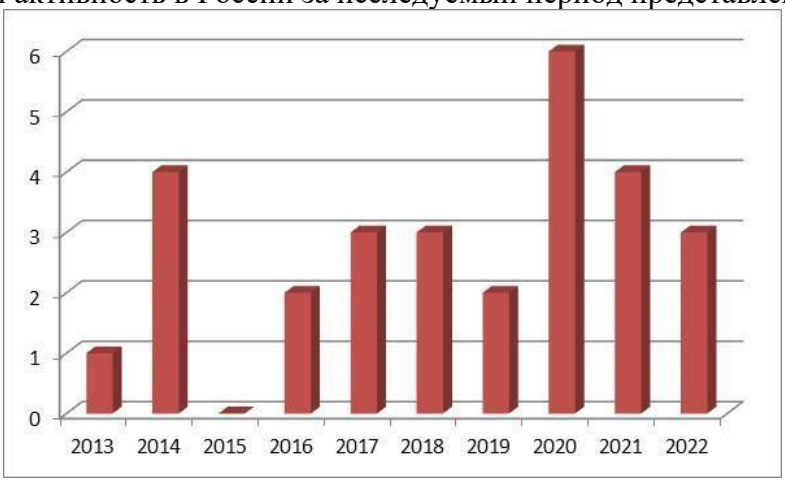


Рис. 2. Количество полученных охранных документов в России

Как видно из диаграммы на рис. 2 с 2014 года, патентная активность находится примерно на одном уровне, не показывая падения, что говорит об устойчивом интересе к объекту исследования в России.

В Китае явным лидером по количеству охранных документов является Китайский горно-технологический университет (China University of Mining and Technology), на его долю приходится 17% найденных документов. Данный факт не является чем-то не обычным, т.к. этот университет является ключевым профильным научным заведением по горной тематике в Китае.

На втором месте с 7% найденных документов находится Хэнаньский политехнический университет (Henan Polytechnic University), что можно объяснить тем, данный университет является первым созданным горным университетом в истории Китая. Остальные, отобранные для анализа, охранные документы принадлежат большому количеству различных научных заведений и коммерческих предприятий, но в количествах не превышающих 2-3% от общего объема.

Патентная активность в Китае за исследуемый период представлена на рис. 3.

Как видно из диаграммы с 2017 года, патентная активность резко возрастает и растет по настоящее время, что говорит о растущем интересе к объекту исследования.

Таким образом, можно констатировать факт о том, что наибольший интерес, причем постоянно возрастающий, к объекту исследования проявляют заявители Китая и России. Эти данные подтверждаются и информацией, полученной при анализе непатентных источников.

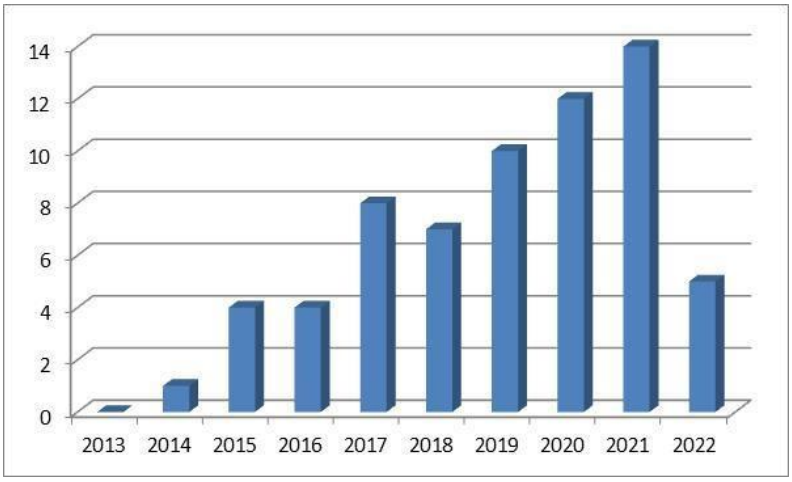


Рис. 3. Количество полученных охранных документов в Китае

Активность по объекту исследования по непатентным источникам отображена на рис. 4.

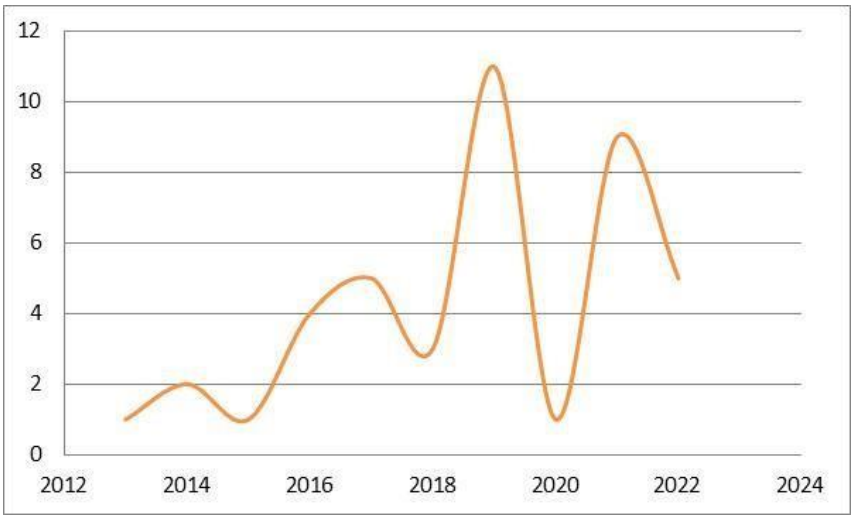


Рис. 4. Количество непатентных источников

Как видно из диаграммы на рис. 4, за исключением провала в 2020 году, количество непатентных источников, посвященных объекту исследования, растет, показывая интерес к нему. При этом 93% отобранных для анализа непатентных источника, принадлежат авторам из России и Китая.

О микробиологическом способе дегазации угольных пластов. Известно, что метан относится к группе «парниковых» газов, вызывающих изменение климата на планете. На сегодняшний день проблема утилизации метана обострилась, поскольку в мире введены ограничения на выбросы CO_2.

Также известно, что метан является перспективным сырьем для биотехнологий. Микроорганизмы – аэробные метанотрофы – перспективные объекты «зеленой» биотехнологии. Микроорганизмы-метанотрофы способны использовать в качестве источников углерода различные продукты, в т.ч. метан, т.е. питаться метаном. В процессе жизнедеятельности бактерии используют углерод из метана для синтеза органических веществ и наращивания своей биомассы. Микроорганизмы широко распространены в природе, обитают в разных экосистемах, в почвах, болотах, на дне рек и морей. Метанотрофы известны уже более 100 лет [11]. В систематическом отношении аэробные метанотрофы относятся к 10 родам бактерий. Метилобактерии используют окисленные (замещённые) производные метана, а метилотрофные дрожжи – метанол (рис. 5) [12].

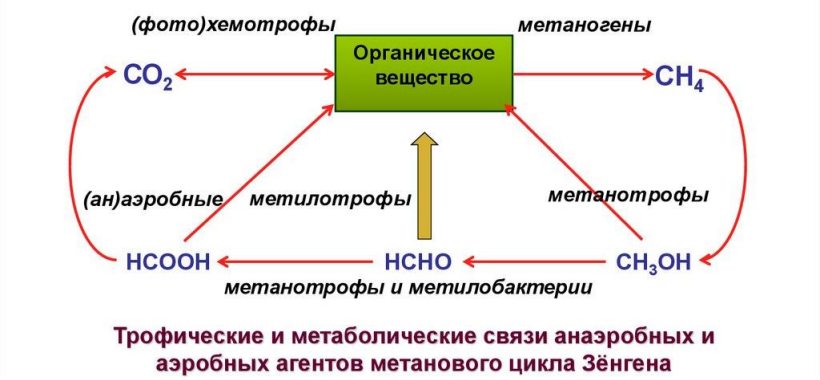


Рис. 5. Планетарная роль аэробных метанотрофов и метилотрофов в глобальных биосферных циклах метана и метанола

Способность использовать метан метанотрофами в качестве субстрата для роста обусловлена выработкой ими ферментов – метанмонооксигеназ. Процесс идет при температуре и давлении окружающей среды. Именно эта метаболическая особенность метанотрофов позволяет применять их в биотехнологических способах производства микробного белка и ряда целевых продуктов с добавленной стоимостью.

Аэробные метано- и метилотрофы используются в промышленности в различных биопроцессах для производства кормового белка для сельскохозяйственных животных, биоразлагаемых полимеров, пигментов, полисахаридов, ферментов, аминокислот [12]. Причем, такая белковая добавка сопоставима с рыбной и соевой мукой, поскольку в состав биомассы аэробных метанотрофов входят незаменимые аминокислоты. Указанная идея была реализована в промышленных масштабах [13].

Окисление метана происходит в несколько стадий, каждая из которых катализируется определенным ферментом (рис. 6). Углерод фиксируется на стадии углекислого газа или формальдегида.

Учёные-биотехнологи предлагают использовать для этой цели метанотрофные бактерии. В научной литературе описаны различные способы применения метанотрофов. Часть методов основана на предварительной дегазации угольного пласта путем закачки в него суспензии метанотрофов и создания условий для их жизнедеятельности. Другой вариант – обработка выработанного пространства угольного пласта суспензией метанотрофов непосредственно в процессе добычи угля. При этом создается бактериальный фильтр на пути метана, дифундирующего из близлежащих угольных пластов в результате сброса угольного давления [14].

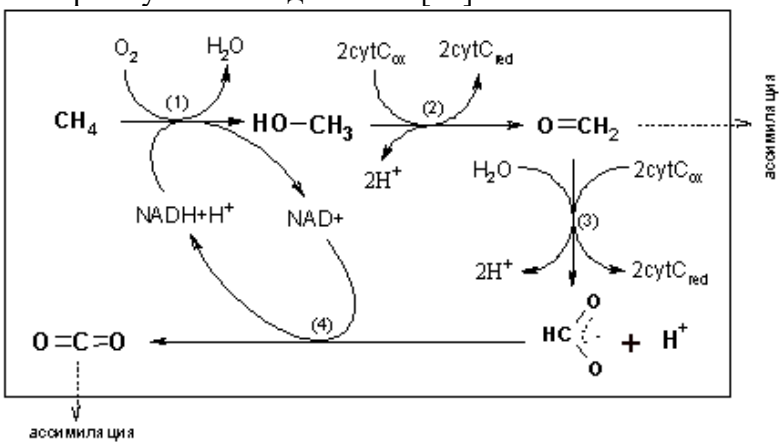


Рис. 6. Окисление метана

Для снижения концентрации метана в атмосфере угольных шахт представляется особенно перспективным использование именно бактерий-метанотрофов [16].

Особенностью метода является пневматическая обработка угольного пласта воздухом после нагнетания суспензии метанотрофов и орошение суспензией метанотрофов сопутствующих пород выработанного пространства. При этом происходит интенсивное потребление метана бактериями, что приводит к снижению на 30-70% содержания метана в угольном пласте или атмосфере шахты [15].

Метанотрофы – микроорганизмы, структурно и функционально специализированные на использовании метана и некоторых его производных. Группа включает в себя бактерий и архей, как аэробов, так и анаэробов; на данный момент известно 23 рода культивируемых аэробных метанотрофных бактерий, а общее число открытых видов около шести десятков.

Способность к окислению метана обусловлена наличием у этих бактерий уникального фермента – метанмонооксигеназы, которая существует в двух формах – мембранной, локализованной во внутрицитоплазматических мембранах и выявляемых на ультратонких срезах клеток подавляющего большинства известных метанотрофов, и растворимой, присутствующей лишь у некоторых метанотрофов и локализованной в цитоплазме. Метаболизм метана начинается с его окисления кислородом с помощью метанмонооксигеназы до метанола с образованием одной молекулы воды, а затем до формальдегида и формиата.

Несмотря на многочисленные исследования, специфика и многообразие биохимических путей метаболизма CH4 метанотрофами, а также сложности работы с ними долгое время сдерживали развитие метаболической инженерии метанотрофов. Последнее десятилетие продемонстрировало быстрое развитие генетических инструментов и их адаптацию для применения в работе с метанотрофными бактериями [17].

По мнению авторов биотехнологические методы снижения концентрации метана в угольных пластах могут иметь два направления: метанотрофные биотехнологии на действующих шахтах и метанотрофные биотехнологии разведанных, готовящихся к эксплуатации месторождений. На первом направлении считаются эффективными методы обработки угольных пластов и выработок путем закачивания и распыления в них суспензии метанотрофных бактерий, а также биосинтез гаприна на каптированной метано-воздушной смеси. Второе направление может включать в себя биосинтез гаприна на каптированной метано-воздушной смеси и биотехнологию «метанотрофной гидропромывки угольных пластов», которая представляет собой природоподобную биотехнологию, по сути – подземный, пластовый биореактор хемостатного биосинтеза гаприна [18].

Выводы. Основная идея создания активных комбинированных способов и средств многостадийной дегазации углеметановых пластов состоит в использовании выявленных закономерностей взаимодействия технологических, газодинамических, геомеханических и микробиологических процессов в углепородном массиве для обеспечения перехода метана в свободное состояние с учётом реальных горнотехнических условий шахт [8].

В силу имеющихся объективных причин, в том числе научного характера, бактерии-метанотрофы для снижения концентрации метана в угольных пластах пока активно не применяются, хотя, по мнению многих экспертов, это направление представляется особенно перспективным в комбинации с другими способами дегазации [17-18].

Список литературы

1. Пучков Л.А., Сластунов С.В., Коликов К.С. Проблемы реализации концепции метанобезопасности на угольных шахтах России // Уголь. – 2009. – №1. – С.28-30.

2. Трубецкой К.Н., Рубан А.Д., Забурдяев В.С. Методология обоснования способов и параметров дегазации угольных шахт // ФТПРПИ. – 2011. – № 1.

3. Directional hydraulic fracturing to control hard-roof rockburst in coal mines / F. Jun, D. Linming, H. Hua [et al.] // International Journal of Mining Science and Technology. – 2015. – Volume 22. – Issue 2. – PP. 177–181.

4. 3D finite element modeling of directional hydraulic fracturing based on deformation reinforcement theory / J. Deng, Q. Yang, Y. Liu [et al.] // Computers and Geotechnics. – 2018. – Volume 94. – PP. 118–133.

5. Directional hydraulic fracturing to control hard-roof rockburst in coal mines / F. Jun, D. Linming, H. Hua [et al.] // International Journal of Mining Science and Technology. – 2015. – Volume 22. – Issue 2. – PP. 177–181.

6. Hossain M.M., Rahman M.K., Rahman S.S. Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2000. – Vol. 27, № 3 4. – P. 129–149.

7. Инструкция по дегазации угольных шахт. Серия 05. Выпуск 22. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2012. – 250 с.

8. Об утверждении руководства по безопасности «Рекомендации по дегазации угольных шахт»: приказ Ростехнадзора от 28.12.2023 № 498.

9. Ширяев С.Н. Оценка эффективности способов и средств дегазации углеметановых пластов // Горные науки и технологии. – 2019. – № 4(2). – С. 122-131. – DOI: 10.17073/2500-0632-2019-2- 122-131.

10. ФИПС. – URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet.

11. Bowman J. The methanotrophs – the families Methylococcaceae and Methylocystaceae Prokaryotes. – New York: Springer, 2006. – V. 5. – P. 266–289.

12. Троценко Ю.А., Торгонская М.Л. Аэробные метилотрофы – перспективные объекты современной биотехнологии // Journal of Siberian Federal University. Biology. – 2012. – № 5. – 243-279.

13. Bodrossy L., Kovacs K.L. Methane utilizing bacteria and their biotechnological applications // Indian J. Experim. Biol. – 1994. – P. 443-449.

14. Мякенький В.И., Кудриш И.К. Микробиологическое окисление метана угольных шахт. – Киев: Наукова думка, 1991.

15. Иванов М.Б. Микробиологические методы борьбы с метаном в угольных шахтах // Вестник АН СССР. – 1988. – № 3.

16. Гальченко В.Ф. Метанотрофные бактерии. – Москва: ГЕОС, 2001.

17. Редактирование геномов метанотрофных бактерий: возможные мишени и доступный инструментарий / В.Н. Хмеленина, С.Ю. Бута, О.Н. Розоваа [и др.] // Микробиология. – 2022. – Т. 91. – № 6. – С. 647–665.

18. Никитенко С.М., Глухих С.А. Дегазация угольных пластов: состояние и перспективы // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – № 6. – С. 370-373.

УДК 622.822.22

ОПЕРАТИВНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЗОН ЭНДОГЕННЫХ ПОЖАРОВ В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ПОРОДОУГОЛЬНЫХ МАССИВАХ

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

Аннотация. Эндогенные пожары на объектах горной промышленности являются распространённым и одним из самых сложных видов аварий в горнодобывающей индустрии. В работе описывается текущая ситуация по инцидентам возникновения эндогенных пожаров на объектах горной промышленности Кузбасса. Описаны косвенные геофизические методы, применяющиеся для обнаружения, локации очагов пожара и границ зоны возгорания.

Ключевые слова: эндогенные пожары, самовозгорание угля, геофизический мониторинг, электрическое зондирование, потенциал электрического поля, георадиолокационное зондирование.

На угольных предприятиях зоны с потенциальной опасностью возникновения эндогенного пожара включают различные типы горнодобывающих и горно-перерабатывающих объектов (рис. 1).

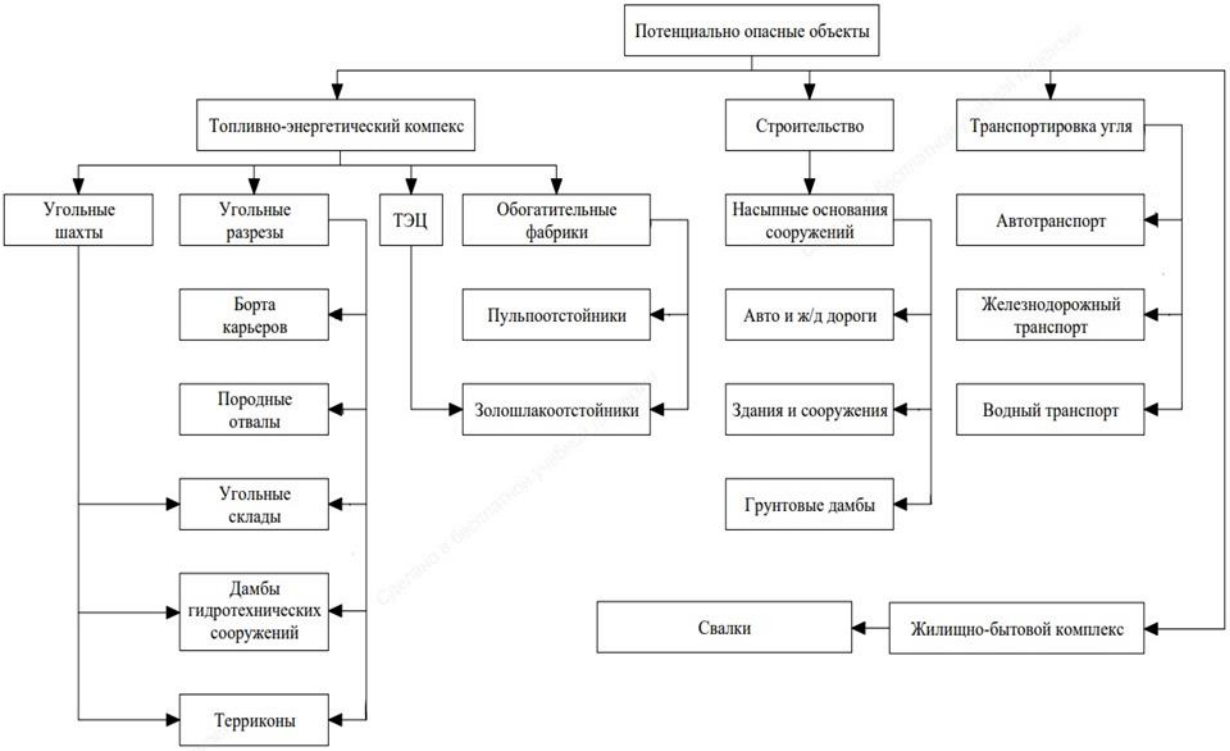


Рис. 1. Промышленные и гражданские объекты, опасные потенциальным образованием эндогенных пожаров

На территории Кузбасса находится более чем 60% предприятий России, работающих в сфере добычи и переработки угля, необходимого для нужд страны, в связи с этим экономика во многом зависит от бесперебойной работы предприятий угольной отрасли [1]. Проблема самовозгорания угля крайне актуальна для Кузбасса, на долю которого приходится более 70 % пожаров и 80 % взрывов, регистрируемых на угольных предприятиях России [2]. По данным статистики аварийности [3], на шахтах Кузбасса в период с 1992 по 2021 гг. случилось 312 аварий типа «Пожар», в том числе 220 эндогенного происхождения.

По информации с официального сайта Министерства угольной промышленности Кузбасса, на дату 01.09.2023 г. в Кузбассе работает 152 угледобывающих и перерабатывающих предприятий: 38 шахт, 57 разрезов, 57 обогатительных фабрик и установок.

Структура горной промышленности России изменяется в сторону повышения объемов добычи угля открытым способом [4]. В 2022 году уголь добывали на 244 разрезах, а 61 разрез находился в стадиях ликвидации, консервации или приостановки деятельности. Подземную добычу угля вели 59 шахт, а в 33 шахтах добыча не велась из-за консервации, ликвидации и приостановки работ. Соответственно, в 2021 г. добыча открытым способом составила 335,4 млн тонн, а шахтами – только 113 млн тонн.

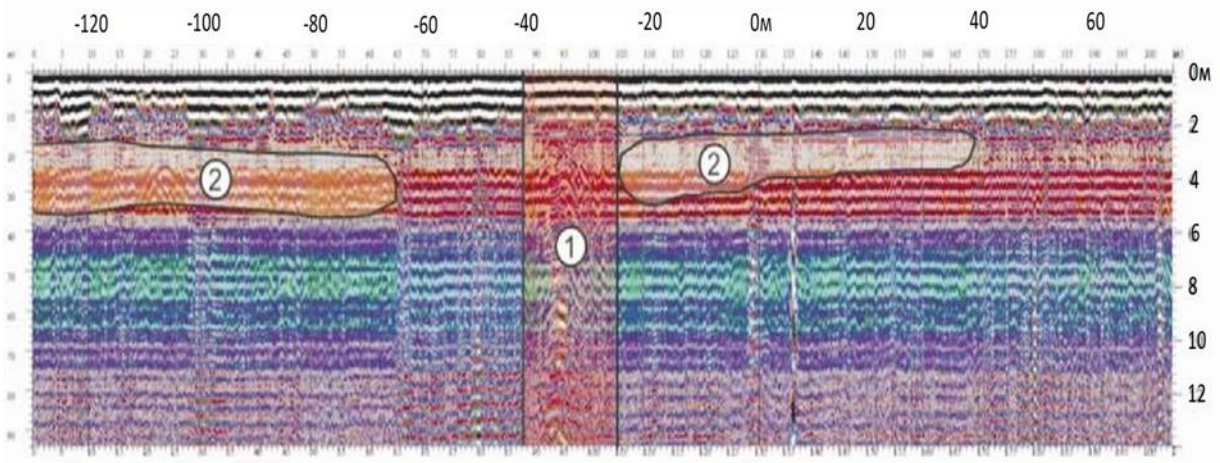
Исследования показывают [5], что, даже после выполнения специальных противопожарных мероприятий, эндогенные пожары могут оставаться на угледобывающих предприятиях несколько лет или даже десятилетий. К примеру, на ликвидированной шахте

«Центральная» в г. Прокопьевске за время ведения очистных работ зафиксировано 105 эндогенных пожаров, включая рецидивы, причем на момент ликвидации на шахте имелось три действующих подземных пожара.

Для оперативного обнаружения и локации очагов подземных и открытых эндогенных пожаров активно применяют визуальные и термометрические методы. В настоящее время при ведении подземных горных работ применяются методы контроля эндогенной пожароопасности на основе газоаналитического анализа проб рудничной атмосферы, подпочвенной радоновой съемки и изменения влажности внутренних утечек воздуха [6]. Учитывая низкую эффективность газоаналитического метода обнаружения ранней стадии процесса самовозгорания угля в шахтах, необходимо применять и другие способы идентификации очагов возгорания [7].

Перспективно применение геофизических методов прогноза и контроля развития очагов самонагревания в породоугольных массивах [8]: георадиолокации, электрического зондирования и геоэлектрический. Наибольшую эффективность в исследовании показывает применение данных методов в комплексе, учитывая текущую стадию эндогенного пожара, но и индивидуальное применение методов обеспечивает большую информативность диагностирования границ зоны пожара и локации его очага.

Георадиолокационное зондирование проводится георадаром. Интерпретация данных георадиолокационной съемки осуществляется по анализу формы осей синфазности на полученной радарограмме. Участки, на которых оси синфазности теряют корреляцию, считаются аномальными, данные аномалии связаны с разуплотнением углепородного массива вследствие его выгорания и испарения влаги из порового пространства. Зоны минимальной влажности характеризуются минимальными значениями диэлектрической проницаемости (ε = 3–6), что приводит к нарушению синхронности (корреляции осей синфазности) на соответствующем интервале глубин (замене на радарограммах линий синфазности в форме малопериодных гармонических колебаний на нерегулярные). Метод георадиолокации позволяет уверенно диагностировать зоны очагов пожара по глубине и в плане (рис. 2).



1 – зона эндогенного пожара; 2 – зона обрушения

Рис. 2. Радарограмма, полученная на участке породоугольного массива угольного разреза «Бачатский»

Метод электрического зондирования обладает высокой разрешающей способностью. Электрическое зондирование по схемам вертикального зондирования (ВЭЗ) и электропрофилирования (ЭП) проводится комплектом аппаратуры, включающем стержневые стальные электроды и каротажный прибор в режиме измерения электросопротивления. Величина удельного электросопротивления (УЭС) пород в очаге самонагревания и самовозгорания полностью определяется влажностью пород. За счет фильтрации жидкости от центра очага к обнажению и выпаривания влаги УЭС пород может

возрастать более чем на 5 порядков (рис. 3). Максимум эффективного УЭС массива при профилировании с поверхности соответствует расположению центра очага пожара. Величина УЭС в максимуме зависит от радиуса очага, его глубины и соотношения УЭС сред. По координатам экстремумов на графике распределения УЭС можно приближенно оценить эффективный радиус и глубину расположения очага.

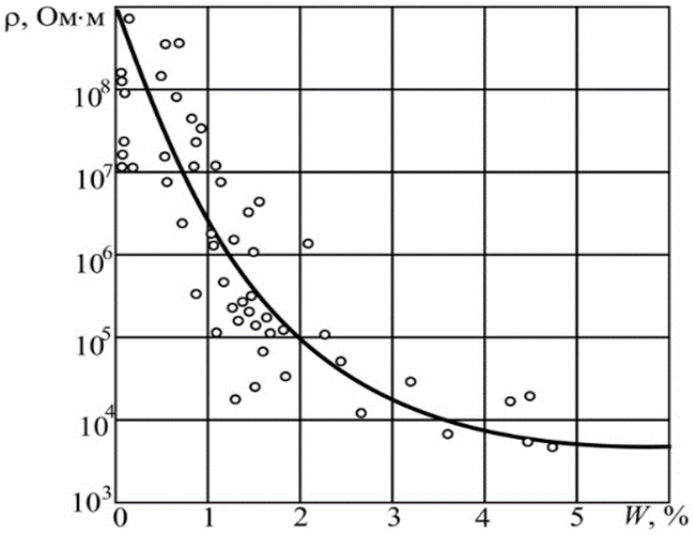
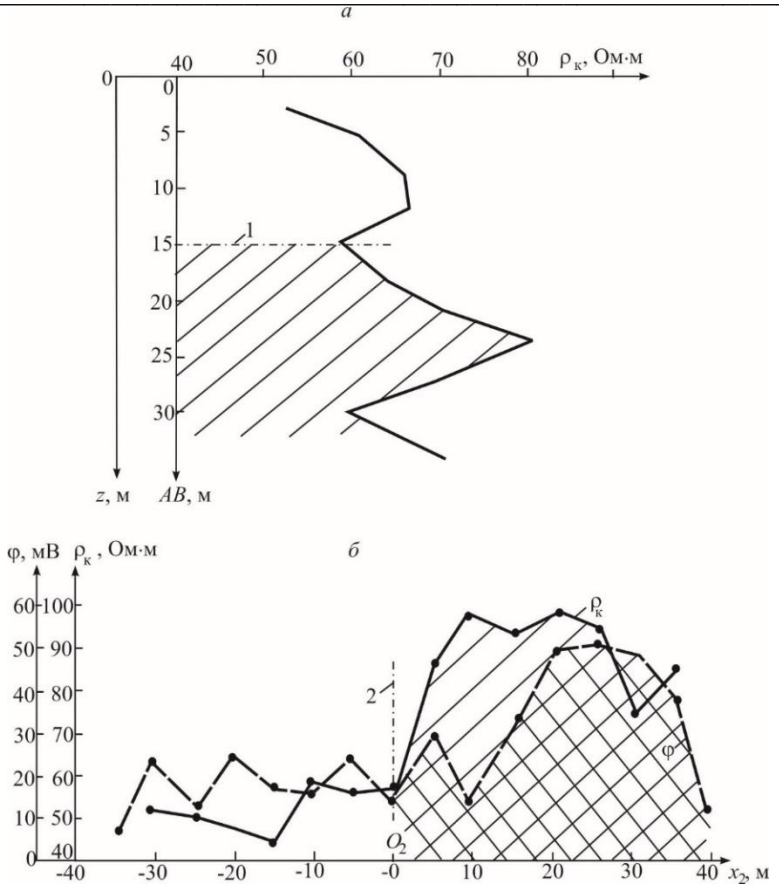


Рис. 3. Зависимость удельного электросопротивления образцов каменных углей от влажности

Метод электрических зондирований может эффективно применяться для обнаружения и локализации очагов эндогенных пожаров в породоугольных массивах на всех стадиях их развития. На стадии самонагревания, когда очаг пожара может быть аппроксимирован сферой, амплитуда положительной аномалии УЭС над очагом увеличивается с ростом его эффективного радиуса и уменьшением расстояния до земной поверхности. На этой стадии геометрические параметры аномалии можно оценить по результатам электропрофилирования. При развитии очага пожара в борту карьера его распространение происходит в основном в продольном и поперечном направлениях в плане и незначительно по глубине. В этих условиях границы запожаренной зоны в плане целесообразно определять по границам аномальной зоны УЭС на графиках продольного и поперечного профилирования, а глубину – по графикам зондирования. Перспективно применение для этих целей многоэлектродных установок (электротомографии). На рис. 4 представлены результаты электрических зондирований и результаты измерений геоэлектрических потенциалов по итогам комплексных геофизических исследований на территории угольного разреза «Бачатский» в зоне расположения очага эндогенного пожара.

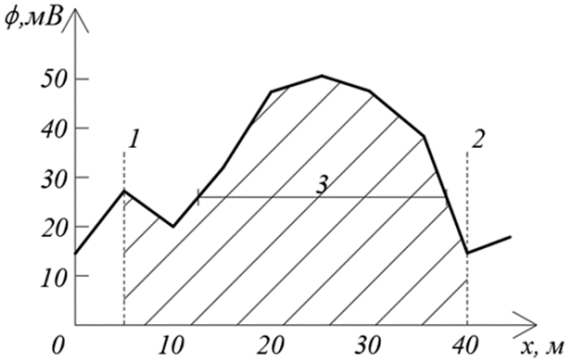
Геоэлектрический метод основан на анализе изменения геопотенциала в зоне распространения естественного геоэлектрического поля, образуемого вокруг очага самонагревания вследствие происходящих фильтрационных и окислительно–восстановительных процессов. Максимальная величина скачка потенциала на границе зоны неоднородности составляет 100–200 мВ. Экстремум геопотенциала на поверхности массива соответствует расположению центра очага. Величина потенциала в экстремуме зависит от эффективного радиуса очага, глубины его расположения и соотношения электросопротивлений сред. Для измерения потенциалов естественного геоэлектрического поля применяются медные неполяризующиеся электроды. Производят сравнение измеренных величин с фоновым значением потенциала, характерного для данного участка, при этом участки, для которых значения потенциала естественного стационарного электрического поля превышают фоновое значение, относят к области самонагревания угля.



1 – прогнозная глубина зоны возгорания; 2 – прогнозная граница зоны возгорания в плане

Рис. 4. Результаты электрических зондирований на участке №2 (эндогенный пожар № 223р по схемам ВЭЗ (а) и ЭП (АВ = 24 м) и методом естественного электрического поля φ (б)

Экспериментальная проверка изложенных выше теоретических положений проводилась на угольном разрезе «Бачатский» в районе эндогенного пожара №223р [8]. На рис. 5 представлен график изменения геоэлектрического потенциала по продольному профилю *x* над эпицентром запожаренной зоны. Из графика следует, что аномалия имеет протяженность Δx = 35м, с максимальной амплитудой φ_{max} = 53мВ.



1, 2 – соответственно, левая и правая границы запожаренного участка; 3 – глубина $\Delta x_{0,5}$ по уровню потенциала

Рис. 5. Результаты измерений методом геопотенциалов на участке эндогенного пожара в борту угольного разреза «Бачатский»

Метод естественного электрического поля может эффективно применяться на начальных стадиях развития эндогенных пожаров, поскольку вследствие фильтрационных и окислительно-восстановительных процессов очаг самонагревания представляет собой поляризованное тело, форма которого аппроксимируется сферой или вытянутым

сфероидом, что обеспечивает формирование аномалии геоэлектрического потенциала на земной поверхности с амплитудой до 80мВ, позволяет методами электроразведки определить эффективный радиус и глубину расположения зарождающегося очага эндогенного пожара. При развитии эндогенного пожара до стадии горения, когда запожаренная зона имеет значительные размеры в плане (десятки метров) и ограниченный диапазон по глубине (2 м – 6 м), геоэлектрический метод целесообразно применять для диагностирования границ аномальной зоны в плане по результатам профильных или площадных измерений.

Геофизические методы имеют различную физическую основу, частотный диапазон, базу измерений, глубинность и разрешающую способность. Каждый из трех геофизических методов может использоваться самостоятельно или в комплексе для локации очагов эндогенных пожаров и определения границ запожаренных зон в плане и по глубине.

Достоинства и недостатки испытанных геофизических методов отражены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение достоинств и недостатков геофизических методов

Метод	Достоинства	Недостатки
1.Георадиолокационный (ГР)	Наибольшая оперативность (при протяженности профиля L = 60 м время измерения t = 0,1–0,2 ч) Неограниченная детальность, разрешающая способность менее 0,5 м	Высокая стоимость аппаратуры Влияние помех от металлических элементов и ЛЭП Отсутствие количественных критериев
2.Электрических зондирований (ЭЗ)	Доступность аппаратуры Помехоустойчивость	Наименее оперативный (при L = 60 м t = 1–2 ч) Детальность 2–5 м
3.Геоэлектрический (ГЭ)	Доступность аппаратуры Оперативность (при L = 60 м t = 0,2–0,5 ч) Наибольшая чувствительность на начальном этапе пожара	Затрудненность прогноза по глубине Детальность 1–3 м

Выводы. Вследствие конфиденциальности информации привести официальную статистику по зафиксированным пожарам на угольных предприятиях не представляется возможным, но количество потенциально опасных объектов, расположенных по всей стране и в особенности по Кузбассу, и регулярные исследования, сопровождающиеся научными публикациями, дают представление о реальном количество инцидентов и актуальности вопроса контроля самовозгорания угля.

В рамках данной проблемы особенно важно развивать методы, позволяющие четко и оперативно принимать меры по тушению и дальнейшему контролю повторного возгорания угольного массива. Такой методикой является комплексный геофизический метод в сочетании с прямыми методами локации зоны возгорания, который представляет собой способ оперативного определения стадии эндогенного пожара путем применения наиболее информативного метода, позволяет локализовать зону возгорания и вести контроль за развитием пожара, используя в комплексе прямые и косвенные методы, тем самым дает максимально подробную информацию о происходящем инциденте.

Список литературы

1. Профилактика нарушений обязательных требований в области пожарной безопасности на предприятиях угольной промышленности при возникновении

чрезвычайной ситуации в мирное и военное время / А.И. Фомин, Д..А. Бесперстов, А.А. Моисеев [и др.] // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2021. – № 2. – С. 41-46.

2. Завиркина Т.В. Анализ статистики эндогенных пожаров на угольных шахтах России // Горные науки и технологии. – 2014. – № 1. – С. 30-36.

3. Эндогенная пожаробезопасность на угольных предприятиях Кузбасса / Шлапаков П.А., А.Ю. Ерастов, С.А. Хаймин [и др.] // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2019. – № 1. – С. 14-21.

4. Портола В.А., Черских О.И., Протасов С.И. Оценка эффективности водных составов для охлаждения очагов самовозгорания бурого угля на разрезах // Горная промышленность. – 2023. – № 4. – С. 89-94.

5. Применение температурной и газовых съемок для обнаружения и локации очагов эндогенных пожаров на выходах пластов ликвидированной шахты / В.А. Портола, А.А. Бобровникова, С.В. Ковалев [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2023. – № 3 (157). – С. 79-90.

6. Инструкция по предупреждению и тушению подземных эндогенных пожаров в шахтах Кузбасса. – Кемерово, 2007. – 66 с.

7. Портола В.А., Дружинин А.А., Храмцов В.И. Способы обнаружения и локации очагов подземных пожаров // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. – №1. – С. 103-108.

8. Комплексный геофизический мониторинг для локации очагов эндогенных пожаров в борту угольного разреза / Калайгорода В.В., С.М. Простов, Е.А. Шабанов [и др.] // Известия вузов. Горный журнал. – 2023. – № 4. – С. 120–131.

УДК 622.271(73):550.814

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УГЛЯ В АВСТРАЛИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ

[1]д.т.н. Зеньков И.В., [2]к.т.н. Черепанов Е.В., [3]Мулюшкина А.А., [4]к.т.н. Нефедов Б.Н.

1 – ООО «Сибирский научно-исследовательский институт горного и маркшейдерского дела», г. Красноярск, Россия

2 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия

4 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты исследования работ по восстановительной экологии при разработке месторождений угля открытым способом. В ходе дистанционного мониторинга выявлены основные направления работ по восстановительной экологии в области водных и земельных ресурсов. Отмечена высокая экологическая эффективность проведенных природоохранных мероприятий.

Ключевые слова: Австралия, карьеры по добыче угля, восстановительная экология, рекультивация нарушенных земель, водные и земельные ресурсы, охрана окружающей среды, дистанционное зондирование Земли из космоса.

Введение. В последние три десятилетия объем добычи угля в Австралии увеличился в несколько раз. На материке предпочтение отдано открытому способу разработки угольных месторождений. Открытая разработка месторождений любых твердых полезных

ископаемых, безусловно, наносит ущерб окружающей природной среде. Вместе с тем в Австралии ежегодно открытым способом добывают не менее 500 млн. т угля в год, поэтому масштабы разрушения природных ландшафтов здесь определяются как весьма значительные. Как известно над проблемами экологии угольной промышленности, занимающей лидирующее положение в мировом недропользовании в плане нанесения ущерба природной среде, работают профессиональные коллективы ученых-практиков на всех материках. Поэтому, оценка работ в области восстановления экологического баланса, выполняемых угледобывающими предприятиями на этом материке, на наш взгляд, считается актуальной. Исследовательскую часть было решено выполнить с привлечением данных дистанционного мониторинга, как инструментария, позволяющего эффективно решать задачи на значительных по площади территориях. С появлением технологий дистанционного зондирования Земли из космоса спектр исследований значительно расширился, о чем свидетельствуют работы российских и зарубежных исследователей [1-9].

Исследования результатов работ по восстановительной экологии и охране окружающей среды при ведении открытых горных работ на месторождениях угля. Открытые горные работы в Австралии наиболее масштабно производят в двух штатах Квинсленд и Новый Южный Уэльс. Здесь работает 91 карьер с различной производственной мощностью по горной массе. В штатах Виктория и Западная Австралия уголь добывают в двух и трех карьерах соответственно. В штате Южная Австралия открытые горные работы в 2016 г. завершены на трех разобщенных угленасыщенных участках с параллельным закрытием трех тепловых электростанций, работающих на сжигании угля [10].

По данным дистанционного мониторинга выявлены основные направления работ по восстановлению экологического баланса и охране окружающей среды на территориях с открытой добычей угля.

На стадии строительства капитальных горных выработок угледобывающие предприятия прокладывают новые русла ручьев, рек, протекающих в границах будущих горных отводов. Наиболее масштабным примером является перенос русла реки протяженностью 8,1 км вдоль западного фланга отработанного карьера в штате Южная Австралия. Кроме того, откосы породных отвалов, отсыпанных при работе этого же карьера, были выположены бульдозером до углов 16-18° на заключительном этапе горных работ [10].

На территории горнопромышленных ландшафтов, сформированных при работе карьеров в штате Квинсленд, отмечено бережливое отношение к ручьям и рекам, протекающих на поверхности месторождений угля. Здесь вдоль фронта горных работ оставляют нетронутыми породные призмы шириной до 200 м поверху, верхняя плоскость которых земная поверхность, по которой протекает ручей или река. Так, например, в границах карьера Saraji протяженностью 50,1 км оставлено пять таких призм с протекающими на их поверхности ручьями и реками [10].

В период производства горных работ в карьерах отсыпают внутрикарьерные породные перемычки для движения по их поверхности карьерных автосамосвалов. Перемычки, широко используемые в карьерах штата Квинсленд, создают как драглайнами, так и путем отсыпки вскрышных пород с борта автосамосвала. Формирование перемычек в глобальном понимании позволяет существенно (в 2–3 раза) сократить расстояние транспортировки вскрышных пород на отвалы, что автоматически приводит к сокращению объема потребляемого дизельного топлива, и как следствие этого к уменьшению эмиссии вредных веществ в атмосферу при работе технологического автотранспорта.

Во всех штатах при разработке открытым способом месторождений угля по данным космического мониторинга Земли прослеживается тенденция размещения вскрышных пород в появляющемся по мере ведения горных работ выработанном пространстве

карьеров. С позиции сокращения показателя землеемкости, определяемого отношением площади нарушаемых земель к объему угля, добытого в контурах этих земель, эффективным технологическим решением является обоснование порядка разработки угольных пластов.

Ярким примером этого является порядок ведения горных работ в карьере с координатами 32° 26′ 36″ю. и 151° 04′ 56″в., где в период с 2007 по 2022 г. два раза изменено направление подвигания борта карьера (юго-восточное, юго-западное, северо-западное). В результате в выработанное пространство карьера на место отработанного угольного пласта был уложен максимально возможный объем вскрышных пород. Горнопромышленный ландшафт, сформированный при разработке этого месторождения, площадью 600 га состоит из породного отвала 425 га, на котором проведена высокоэффективная рекультивация, и остаточной карьерной выемки, в которой в ближайшие годы будет сформирован техногенный водоем. Кроме этого, при ведении горных работ широко применяется блочный способ отработки карьерных полей. В этом случае вскрышные породы из опережающего блока размещают в выработанном пространстве отстающего блока [10]. Основные мероприятия, направленные на улучшение экологического состояния в районах с открытой угледобычей, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Перечень работ экологической направленности в угледобывающей промышленности Австралии

Название штата	Работы и технологические решения по охране окружающей среды и восстановительной экологии
Западная Австралия	выполаживание и обратная засыпка вскрышными породами откосов добычных уступов, полный цикл горнотехнической и биологической рекультивации породных отвалов
Квинсленд	оформление целиков под ручьями и реками в контурах карьеров и отвалов, отсыпка внутрикарьерных породных перемычек, выполаживание и обратная засыпка вскрышными породами откосов добычных уступов в карьерах, полный цикл горнотехнической и биологической рекультивации породных отвалов
Новый Южный Уэльс	оформление целиков под ручьями и реками в контурах карьеров и отвалов, порядок разработки угленасыщенных участки отсыпки породных отвалов с целью снижения землеемкости горных работ, выполаживание и обратная засыпка вскрышными породами откосов добычных уступов, полный цикл горнотехнической и биологической рекультивации породных отвалов
Виктория	орошение поверхности отработанных пластов угля, полный цикл горнотехнической и биологической рекультивации породных отвалов
Южная Австралия	перенос русла реки за контуры горного отвода карьера

Как известно, в мировом недропользовании в результате открытой разработки месторождений твердых полезных ископаемых формируется горнопромышленный ландшафт из остаточных карьерных выработок и породных отвалов. В Австралии, как установлено по данным спутниковой съемки в длительном периоде, на породных отвалах угледобывающие предприятия систематически проводят работы по горнотехнической и биологической рекультивации. В результате породные отвалы принимают вид естественных ландшафтов с одним отличием – на отвалах отчетливо просматриваются

автомобильные дороги, проложенные на горизонтальных межярусных площадках. Автодороги на отвалах служат для проезда колесной и гусеничной техники при поддержании в стабильном состоянии поверхности и геометрической формы отвалов, а также в уходе за созданным растительным покровом.

В остаточных карьерных выработках проводят следующий комплекс работ. Мощными бульдозерами производят выполаживание бортов карьеров с целью перекрытия угольных пластов от контакта с водой в тот период, когда в карьере будет сформирован техногенный водоем. Борта угольных карьеров небольшой глубины выполаживают при движении бульдозеров с земной поверхности в направлении дна карьера. В тех случаях, когда глубина карьера значительная засыпке подлежат пласты угля. При недостаточном объеме вскрышных пород их завозят в автосамосвалах либо с отвалов, либо с локальных карьеров на близлежащих территориях, которые впоследствии также рекультивируют. Отметим, что в штате Виктория на поверхности отработанного угольного пласта, не перекрытого вскрышными породами, монтируют водопроводную сеть, из которой орошают поверхности участков с остатками пласта, склонных к самовозгоранию [10].

Выводы. Использование информации, полученной по данным спутниковой съемки, позволил изучить основные направления восстановительной экологии, охраны окружающей природной среды, а также выявить масштабы производства этих работ на территории многочисленных горнопромышленных ландшафтов, формируемых в ходе открытой разработки месторождений угля на территории Австралии.

По данным дистанционного мониторинга Земли из космоса выявлена высокая социальная и экологическая ответственность собственников угледобывающих предприятий на территориях их присутствия. Кроме того, была установлена высокая эффективность проводимых природоохранных мероприятий и комплекса работ по восстановительной экологии.

Список литературы

1. Озарян Ю.А., Бубнова М.Б., Усиков В.И. Методика дистанционного мониторинга природно-технических систем (в условиях горнопромышленных территорий юга Дальнего Востока России) // Горный журнал. – 2020. – № 2. – С 84–87.

2. Крамаров С.О., Митясова О.Ю., Храмов В.В. Спутниковая идентификация объектов земной поверхности с использованием неортогонального описания исходных данных // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 4. – С. 154–166.

3. Разработка системы анализа состояния окружающей среды в зонах расположения крупных промышленных объектов, хвостохранилищ и отвалов / Е.А. Лупян, А.М. Константинова, И.В. Балашов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – № 7. – С. 243–261.

4. Особенности разработки регионального водного индекса для мониторинга воздействия изливов кислых шахтных вод на речные системы / Д.М. Ермаков, А.Д. Деменев, О.Ю. Мещерякова [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – № 6. – С. 222–237.

5. Исследование результатов работ по лесовосстановительной экологии на породных отвалах угольных карьеров в регионах Ангаро-Енисейской Сибири / И.В. Зеньков, Чинь Ле Хунг, Ю.А. Анищенко [и др.] // Экология и промышленность России. – 2022. – № 10. – С. 45-51.

6. Mainstreaming remotely sensed ecosystem functioning in ecological niche models / A. Regos, J. Gonçalves, S. Arenas-Castro [et al.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2022. – V. 8. – I. 4. – PP. 431–447.

7. Detecting gold mining impacts on insect biodiversity in a tropical mining frontier with SmallSat imagery / E. Stoll, A. Roopsind, G. Maharaj [et al.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2022. – V. 8. – I. 3. – PP. 379–390.

8. Regional evaluation of satellite-based methods for identifying end of vegetation growing season / R. Shen, H. Lu, W. Yuan [et al.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2022. – V. 8. – I. 3. – PP. 685–699.

9. Discrimination of Rock Units in Karst Terrains Using Sentinel-2A Imagery / N. Gizdavec, M. Gašparović, S. Miko [et al.] // Remote Sens. – 2022. – No. 14. – P. 5169.

10. https://www.google.com.earth.

УДК 622.33

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ НА ЭКОЛОГИЮ КУЗБАССА

Чижик Ю.И., к.т.н. Риб С.В., к.т.н. Никитина А.М.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье обозначено, что в угледобывающей промышленности количество отходов намного превышает объемы конечной продукции и это оказывает губительное воздействие на всю природную систему. Увеличение выбросов метана в свою очередь зависит от газоносности и глубины отрабатываемых угольных пластов на угольных предприятиях региона, осуществляющих добычу подземным способом. Рекомендовано использовать программное обеспечение, разработанное на кафедре геотехнологии СибГИУ, для мониторинга, позволяющего своевременно обнаружить признаки, предшествующие возникновению катастрофических ситуаций.

Ключевые слова: угледобыча, метан, экология, атмосфера, горный массив, шахта.

После завершения выемки угля газоотдача из горного массива, находящегося под влиянием очистных работ, постепенно сокращается, но остается довольно высокой в течение нескольких десятилетий.

Прекращение проветривания, засыпка стволов и затопление выработок способствуют повышению давления газа в замкнутых объемах и стремлению его найти выход на поверхность, где он может скапливаться в подвалах, других помещениях, что неоднократно было причиной пожаров, взрывов и травмирования людей. Особую опасность при ликвидации шахт и их затоплении представляет метан, вытесняемый к земной поверхности водой.

Интенсивность и объемы извлечения метана из выработанных пространств закрытых шахт настолько велики, что использование его в качестве источника энергии экономически оправдано. В угледобывающей промышленности количество отходов намного превышает объемы конечной продукции и это оказывает губительное воздействие на всю природную систему. Увеличение выбросов метана в свою очередь зависит от газоносности и глубины отрабатываемых угольных пластов на угольных предприятиях региона, осуществляющих добычу подземным способом.

Проблема выделения метана в атмосферу возникла не только из-за «парникового эффекта», но и вследствие плохого состояния здоровья такой профессиональной группы, как шахтеры и всего населения угольных регионов, что подтверждается статистическими данными. Демографическая ситуация в Кемеровской области менее благополучна, чем в Российской Федерации.

По основным показателям загрязнения атмосферы Министерством природных ресурсов и экологии Кузбасса было проведено ранжирование территорий и определены территории «риска». Загрязнение атмосферного воздуха исследовались на содержание аммиака, бенз(а)пирена, взвешенных веществ, водорода хлористого, водорода цианистого, диоксида и оксида азота, диоксида серы, металлов, оксида углерода, углерода (сажи), фенола и формальдегида, рис. 1. В результате мониторинга выяснилось, что уровень

загрязнения в Кемеровском и Прокопьевском городских округах не изменился, в Новокузнецком городском округе – увеличился до очень высокого [1, 3].

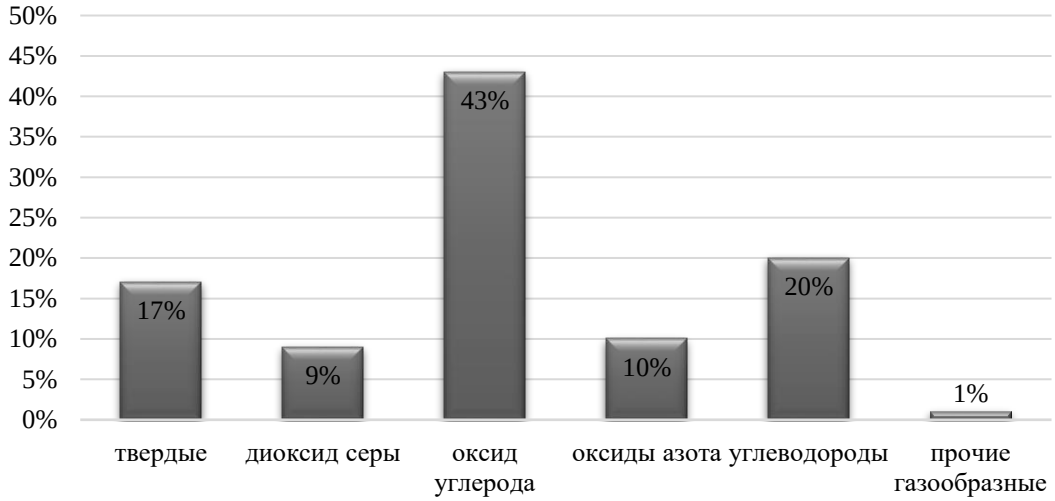


Рис. 1. Структура выбросов загрязняющих веществ в атмосферу Кемеровской области

Антропогенные выбросы таких парниковых газов, как метан, заметно увеличивает естественное его содержание в атмосфере. Механизм поведения метана в атмосфере и процессы его взаимодействия с окружающей средой очень сложны и до конца не изучены, но то, что он в значительной степени воздействует на потепление климата, здоровье людей, образование смога в городах и косвенно влияет на озоновый слой, считается достаточно достоверным.

Не выявлена связь широко распространенных заболеваний с длительным воздействием небольших концентраций метана в повседневной жизни, встречаемых в угольных шахтах и близлежащих населенных пунктах. Возможно, причиняемый метаном ущерб населению угольных регионов трудно обнаружить, учитывая, что вредные воздействия от загрязнителей в небольших концентрациях проявляются спустя десятилетия. Масштабы происходящих неблагоприятных изменений атмосферы в угольных регионах в настоящее время намного превосходят возможности по их устранению, последствия деградации среды сказываются на всем социально-экономическом развитии региона и общественном здоровье населения [2].

Представляет интерес экологическая ситуация в угледобывающем Китае. Процесс добычи каменного угля в Китае является крупнейшим в мире поставщиком в воздушный бассейн парникового газа – биогенного метана, выделяющегося из угольных шахт. В стране осознают всю серьезность проблемы загрязнения атмосферного воздуха. В Китае по данным Государственного управления по защите окружающей среды реализуется программа по борьбе с загрязнением атмосферы. Во многих угольных провинциях осуществляется сбор шахтного метана и его утилизация для производства электроэнергии. Хотя, некоторые считают, что скорость развития экономики некоторых стран (в частности, Китая) опередила реализацию компенсационных мер мирового сообщества по снижению уровня техногенного воздействия на биосферу [4].

Большинство из ликвидированных шахт имеет связь по горным выработкам или тектоническим нарушениям со старыми, закрытыми раньше шахтами. Поэтому негативные последствия выделения опасных газов могут проявляться далеко за пределами горных отводов шахт. На территориях шахтерских городов и поселков имеет место проникновение их в заглубленные объекты жилого сектора.

Согласно стратегии социально-экономического развития Кузбасса по одному из сценариев к 2035 году в регионе целевой показатель добычи составит 370 млн. тонн угля. Кузбасс по праву считается лидером в части развития угольных производств [5]. В

соответствии с необходимостью развития подземной геотехнологии Кузбасса профилактика рисков возникновения опасных ситуаций после закрытия шахт имеет важное значение.

Вывод. В качестве одной из мер, можно рекомендовать организацию правильного мониторинга, позволяющего своевременно обнаружить признаки, предшествующие возникновению необратимых процессов (скопление метана, очаги самовозгорания угля и др). Для этого рекомендуется использовать программное обеспечение, разработанное на кафедре геотехнологии СибГИУ [6], позволяющее прогнозировать процессы фильтрации газов в подработанном горном массиве.

Список литературы

1. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области – Кузбасса в 2021 году. – Кемерово, 2022. – URL: https://ecokem.ru/wp-content/uploads/2022/04/doclad_2021.pdf. дата обращения (25.04.2024г).

2. Попов А.А., Хорошилова Л.С. Влияние негативных факторов на экосистему Кузбасса // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2011. – № 1. – С. 162-169.

3. Хорошилова Л.С., Табакаева Л.М., Трофимова И.В. Влияние экологической ситуации на заболеваемость и демографические показатели Кузбасса // СибСкрипт. – 2010. – № 2(42). – С. 50-154.

4. Чернышева В.В. Состояние природной среды, Техносфера и экологическая политика Китая // Известия Дальневосточного федерального университета. Экономика и управление. – 2008. – № 2. – С. 60-77.

5. Состояние и перспективы развития подземной геотехнологии на угольных шахтах Кузбасса / С.В. Риб, В.Н. Фрянов, А.М. Никитина [и др.] // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2022. – № 2(40). – С. 57-63.

6. Чижик Ю.И. Комплексная математическая модель термодинамических процессов угольных шахт // Вестник СибГИУ. – 2019. – № 2(28). — С. 19-21.

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 21.05.2024 г.
Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 20,80 Уч.-изд. л. 22,09 Тираж 1000 экз. Заказ 97

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.
Издательский центр СибГИУ