

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

№ 9 - 2023

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 Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов : науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2023. - № 9. – 390 с.

Рассмотрены аспекты развития инновационных наукоемких 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 «Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов», проводимой в рамках специализированной выставки технологий горных разработок «Уголь России и Майнинг» (Новокузнецк, 6-9 июня 2023 г.).

Основан в 2015 г.
Выходит 1 раз в год

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

УДК 622.2
ББК 33.1

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----------|
| ГЕОТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР | 11 |
| ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДЕГАЗАЦИИ МЕТОДОМ ПОИНТЕРВАЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА | 13 |
| ¹ член-корр. РАН Клишин В.И., ¹ к.т.н. Опрук Г.Ю., ¹ Связев С.И., ² Выщан С.С. | 13 |
| 1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия..... | 13 |
| 2 – Филиал ПАО «Южный Кузбасс» Шахта Сибиргинская, г. Мыски, Россия | 13 |
| РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ВЫЕМКИ УГЛЯ ОЧИСТНЫМ КОМБАЙНОМ | 18 |
| ^{1,2} чл.-корр. РАН Клишин В.И., ^{1,2} к.т.н. Стародубов А.Н., ^{1,2} Кадочигова А.Н., ^{1,2} Каплун А.В. | 18 |
| 1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия..... | 18 |
| 2 – Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия | 18 |
| О НЕЛИНЕЙНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ С ГЛУБИНОЙ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД | 24 |
| ^{1,2} д.т.н. Ордин А.А..... | 24 |
| 1 – Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия..... | 24 |
| 2 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Россия | 24 |
| ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ДОБЫЧИ УГЛЯ В КУЗБАССЕ..... | 31 |
| ^{1,3} д.т.н. Ордин А.А., ^{1,2} д.т.н. Федорин В.А., ¹ д.т.н. Никольский А.М. | 31 |
| 1 – Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия..... | 31 |
| 2 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия | 31 |
| 3 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Россия | 31 |
| ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ВЫСОКОТОЧНОГО НАВИГАЦИОННОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БУРОВЫХ СТАНКОВ | 39 |
| Федченко Д.В., Королев М.К., д.э.н. Никитенко С.М. | 39 |
| Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия | 39 |
| ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНАЯ ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН..... | 45 |
| к.т.н. Абрамов И.Л. | 45 |
| Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия | 45 |
| О НАЛОГООБЛОЖЕНИИ ДОБЫЧИ УГЛЯ..... | 48 |
| Писаренко М.В., Шаклеин С.В. | 48 |
| Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия | 48 |
| МЕТОДИКА ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ШИХТЫ И ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕЙ | 52 |
| ¹ д.т.н. Удовицкий В.И., ² Кандинский В.А., ¹ Костенюк А.И. | 52 |
| 1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия..... | 52 |
| 2 – ООО «БРЕНТ», г. Кемерово, Россия..... | 52 |
| ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ УКРЕПЛЕННОЙ РЫХЛОЙ ПОРОДЫ ПРИ РАЗЛИЧНОМ РАСХОДЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ПОЛИМЕРНОГО СОСТАВА | 55 |
| к.т.н. Шилова Т.В., Сердюк И.М. | 55 |
| Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия..... | 55 |

| | |
|--|-----|
| О ВОСТАНОВЛЕНИИ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ПОДРАБОТАННОЙ ТОЛЩЕ ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ В СВИТЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ | 59 |
| д.т.н. Серяков В.М. | 59 |
| Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия | 59 |
| ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ПРОВЕДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ | 64 |
| Максимов А.А., д.т.н. Фрянов В.Н. | 64 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия | 64 |
| ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЛИКВИДАЦИИ ПРОВАЛА НА УЧАСТКЕ «НОВЫЙ ШЕРЕГЕШ» ШЕРЕГЕШЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ | 70 |
| д.т.н. Лобанова Т.В., Трофимова О.Л., Ижболдина С.В., Лобанов С.А. | 70 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия | 70 |
| ЭТАПЫ ПОДГОТОВКИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ..... | 77 |
| к.т.н. Исаченко А.А. | 77 |
| Филиал «Шахта «Ерунаковская-VIII» АО «ОУК «Южкузбассуголь», г. Новокузнецк, Россия..... | 77 |
| ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К БЕЗОПАСНОЙ ОТРАБОТКЕ ВЫСОКОГАЗОНОСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ НА ГЛУБОКИХ ШАХТАХ КУЗБАССА..... | 83 |
| ¹ к.т.н. Волошин В.А., ¹ к.т.н. Риб С.В., ² Черняк М.Г., ² Рахимкулов И.Р., ³ Фомин В.В. | 83 |
| 1 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия. | 83 |
| 2 – ООО «ДМТехнологии», г. Новокузнецк, Россия..... | 83 |
| 3 – ООО «Метанэнергоресурс», г. Кемерово, Россия | 83 |
| АНАЛИЗ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ЗОНЫ ПРИ ОТРАБОТКЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ УГОЛЬНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ ПО БЛОКОВОЙ СИСТЕМЕ..... | 90 |
| Герасимов А.В. | 90 |
| Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия | 90 |
| КИЗЕЛОВСКИЙ УГОЛЬНЫЙ БАССЕЙН: ПРОШЛОЕ И БУДУЩЕЕ | 96 |
| д.т.н. Земсков А.Н. | 96 |
| ООО «Проекты и Технологии – Уральский Регион», г. Североуральск, Россия | 96 |
| УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЯМИ ОТКРЫТОЙ УГЛЕДОБЫЧИ НА ОСТРОВЕ ЮЖНАЯ СУМАТРА..... | 100 |
| ^{1,2} д.т.н. Зеньков И.В., ³ Мулюшкина А.А. | 100 |
| 1 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия | 100 |
| 2 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия..... | 100 |
| 3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия | 100 |
| РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ В УГОЛЬНЫХ КАРЬЕРАХ НА ОСТРОВЕ КАЛИМАНТАН | 104 |
| ^{1,2} д.т.н. Зеньков И. В., ³ Мулюшкина А.А. | 104 |
| 1 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия | 104 |
| 2 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия..... | 104 |
| 3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия | 104 |
| ОРГАНИЗАЦИЯ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ В УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ТАИЛАНДА | 107 |
| ^{1,2} д.т.н. Зеньков И. В., ³ Мулюшкина А.А. | 107 |

| | |
|--|------------|
| 1 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия..... | 107 |
| 2 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия | 107 |
| 3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия | 107 |
| АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИИ ОТРАБОТКИ | |
| ВЫСОКОГАЗОНОСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ | 110 |
| Крестьянинов А.В., Шмаков И.К..... | 110 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия | 110 |
| АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ УГЛЕДОБЫЧИ НА КАЧЕСТВО | |
| УГОЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ | 113 |
| Мишин С.А., Горбунова А.Р. | 113 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия | 113 |
| ГОРНЫЕ МАШИНЫ И ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ | |
| ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ..... | 119 |
| РАСПОЗНАВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕДУКТОРОВ | |
| ГОРНОШАХТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ ЭМИССИОННО- | |
| СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА МАСЛА | 121 |
| ^{1,2} д.т.н. Герике Б.Л., ³ к.т.н. Кузин Е.Г., ¹ к.т.н. Герике П.Б. | 121 |
| 1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия | 121 |
| 2 – Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия..... | 121 |
| 3 – Филиал Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева, г. Прокопьевск, Россия..... | 121 |
| ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ ГОРНЫХ МАШИН | |
| | 127 |
| д.т.н Герике Б.Л., Мокрушев А.А. | 127 |
| Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия | 127 |
| МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ПОСТОЯННОГО АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО | |
| МОНИТОРИНГА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ КАРЬЕРНЫХ | |
| АВТОСАМОСВАЛОВ | 130 |
| Швыдкий С.А., д.т.н. Герике Б.Л..... | 130 |
| Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия | 130 |
| СРЕДНЕСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ДИСБАЛАНСА НА | |
| ГЕНЕРАТОРНЫХ ГРУППАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ... 134 | 134 |
| д.т.н. Герике Б.Л., к.т.н. Герике П.Б. | 134 |
| Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия | 134 |
| ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЭКСКАВАТОРНО- АВТОМОБИЛЬНЫХ | |
| КОМПЛЕКСОВ С ИНТЕРАКТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ГОРНЫМИ МАШИНАМИ. 139 | 139 |
| ^{1,2} к.т.н., Кузнецов И.С., ^{1,2} к.т.н., Зиновьев В.В., ^{1,2} к.т.н., Николаев П.И., ^{1,2} к.т.н., Стародубов А. Н. | 139 |
| 1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия | 139 |
| 2 – Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия | 139 |
| КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА МОТОРНОГО МАСЛА КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ НА | |
| ОСНОВЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ОБРАБОТКИ ПРОБ..... | 145 |
| Худоногов Д.Ю., Ефременкова М.В., к.т.н. Никитенко М.С., Кизилев С.А..... | 145 |

| | |
|--|-----|
| Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия | 145 |
| | 145 |
| ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ИЗ КОНСТРУКЦИОННОЙ И ТЕПЛОУСТОЙЧИВОЙ СТАЛИ | 150 |
| ^{1,2} Абабков Н.В., ² Смирнов А.Н., ^{1,2} Пимонов М.В. | 150 |
| 1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия..... | 150 |
| 2 – ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, Россия..... | 150 |
| ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАБОЧИХ КОЛЕС ОСЕВЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ИНЕРЦИОННО-МАССОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК | 159 |
| к.т.н. Панова Н.В. | 159 |
| Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия..... | 159 |
| РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КРИВИЗНЫ УПРУГОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА ВИБРОПИТАТЕЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ ЕГО КОЛЕБАНИЙ | 162 |
| ^{1,2} к.т.н. Куликова Е.Г. | 162 |
| 1 – Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия | 162 |
| | 162 |
| 2 – Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия | 162 |
| ВОССТАНОВЛЕНИЕ И РЕИНЖИНИРИНГ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ | 169 |
| д.т.н. Чинахов Д.А., к.т.н. Чернухин Р.В., Алимов А.А., Филиппов В.В. | 169 |
| Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия..... | 169 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ОРГАНА ЩЕЛЕОБРАЗОВАТЕЛЯ | 173 |
| Новик А.В. | 173 |
| ООО «Автостройкомплект», г. Новосибирск, Россия..... | 173 |
| АППАРАТ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ РЕЗКИ ПОРОД И РАСШИРЕНИЯ СКВАЖИН В ГОРНОМ МАССИВЕ | 176 |
| Альвинский Я.А., Григорьев А.А., Мананников С.Д., Никитина А.М. | 176 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия..... | 176 |
| ПРИМЕНЕНИЕ ИННОВАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ШАХТНОГО НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН | 181 |
| ¹ к.т.н. Волошин В.А., ¹ к.т.н. Риб С.В., ² Рахимкулов И.Р., ² Гончаров Р.С., ² Черняк М.Г., ³ Галимов Р.Н. | 181 |
| 1 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия | 181 |
| 2 – ООО «ДМТехнологии», г. Новокузнецк, Россия..... | 181 |
| 3 – ПАО «Распадская», г. Междуреченск, Россия | 181 |
| ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГОРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ | 189 |
| ¹ Дадынский Р.А., ² к.т.н. Никитина А.М., ² к.т.н. Риб С.В. | 189 |
| 1 – ООО «УМГШО», г. Новокузнецк, Россия..... | 189 |
| 2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия | 189 |
| ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЫ, РАБОТАЮЩЕЙ НА СДВИГ | 192 |
| д.т.н. Никитин А.Г., Демина Е.И., Курочкин Н.М. | 192 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия | 192 |
| РОБОТИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА | 197 |
| УПРАВЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТЬЮ СЛОИСТЫХ ПОРОД КРОВЛИ В ОКРЕСТНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ | 199 |

| | |
|--|------------|
| д.т.н. Павлова, д.т.н. Фрянов..... | 199 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия | 199 |
| АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ДИСПЕТЧЕРСКОГО КОНТРОЛЯ БУРОУГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА «АНГРЕНСКИЙ» | 206 |
| ¹ к.т.н. Якубов С.И., ² Нигматуллин Ш.Н., ³ д.т.н. Прошунин Ю.Е. | 206 |
| 1 – Институт общей и неорганической химии Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан | 206 |
| 2 – АО «Узбекуголь, г. Ташкент, Узбекистан | 206 |
| 3 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия | 206 |
| ЗАДАЧИ РАЗРАБОТКИ, ВНЕДРЕНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ..... | 212 |
| ¹ д.т.н. Мышляев Л.П., ² к.э.н. Ивушкин К.А., ^{1,3} к.т.н. Макаров Г.В., ^{1,3} к.т.н. Грачев В.В. | 212 |
| 1 – ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия | 212 |
| 2 – ООО «Объединенная компании «Сибшахтострой», г. Новокузнецк, Россия..... | 212 |
| 3 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия | 212 |
| ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ «УБИНСКАЯ»..... | 215 |
| ^{1,2} к.т.н. Грачев В.В., ¹ д.т.н. Мышляев Л.П., ^{1,2} Коровин Д.Е., ^{1,2} к.т.н. Макаров Г.В..... | 215 |
| 1 – ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк, Россия | 215 |
| 2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия | 215 |
| ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ ОБЪЕМА ГОРНОЙ МАССЫ ЛАЗЕРНЫМ ДАЛЬНОМЕРОМ В ПРОЦЕССЕ ВЫПУСКА УГЛЯ НА ЗАБОЙНЫЙ КОНВЕЙЕР..... | 221 |
| ^{1,2} Черкасов П.В., ^{1,2} к.т.н. Никитенко М.С., ^{1,2} Кизилев С.А., ¹ Худоногов Д.Ю..... | 221 |
| 1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия | 221 |
| 2 – Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия | 221 |
| ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ СТЕНДОМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ СВОЙСТВ УГЛЯ И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД..... | 228 |
| Баловнев Е.А., Худоногов Д.Ю., Попинако Я.В., Кизилев С.А., Каменная А.В..... | 228 |
| Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия | 228 |
| РАСПОЗНАВАНИЕ ПРЕПЯТСТВИЙ МАШИНЫМ ЗРЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ИСКАЖЕНИЯ СЕТКИ СВЕТОВЫХ МАРКЕРОВ | 233 |
| Верховцев Д.О., Попинако Я.В., к.т.н. Никитенко М.С., Худоногов Д.Ю., Кизилев С.А. | 233 |
| Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия | 233 |
| АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ РЕШЕНИЕ МАРКШЕЙДЕРСКИХ ЗАДАЧ В ГОРНО- ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ MICROMINE | 238 |
| Кряжевских А.Е., Тур К.А..... | 238 |
| Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия | 238 |
| ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЛЯЦИОННОЙ СУБД ДЛЯ СОЗДАНИЯ БАЗЫ ДАННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК УГЛЕЙ..... | 245 |
| Павлова Л.Д., Корнева А.В., Корнев Е.С..... | 245 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк..... | 245 |

| | |
|--|-----|
| РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМЫ 1С: ДОКУМЕНТООБОРОТ И СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ЗАЯВОК NAUMEN SERVICE DESK..... | 253 |
| Матюшкин Г.В., д.т.н. Кулаков С.М..... | 253 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия..... | 253 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПИРОЛИЗА И ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА T-ENERGY | 258 |
| к.т.н. Сеченов П.А., д.т.н. Рыбенко И.А. | 258 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия..... | 258 |
| МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ СКИПОВОГО ПОДЪЕМА ЦР6х3,2/0,75 АБАКАНСКОГО РУДНИКА | 261 |
| д.т.н. Островляничик В.Ю., к.т.н. Кубарев В.А., Маршев Д.А., к.т.н. Поползин И.Ю..... | 261 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия..... | 261 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ С АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ И ДВУХЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ..... | 267 |
| д.т.н. Островляничик В.Ю., к.т.н. Кубарев В.А, Маршев Д.А., к.т.н. Поползин И.Ю..... | 267 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия..... | 267 |
| ИЗМЕРЕНИЕ ДВИЖУЩЕГО МОМЕНТА И МАССЫ ГРУЗА В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ДВУХСКИПОВОЙ ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ... | 272 |
| к.т.н. Поползин И.Ю..... | 272 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия..... | 272 |
| О ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЕЛИЧИНАМ ПРИВОДА С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КАНАТАХ | 276 |
| к.т.н. Кипервассер М.В., к. ф.-м.н., Хаимзон Б.Б., к.т.н. Симаков В.П. | 276 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия..... | 276 |
| РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MATHLAB/SIMULINK ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ | 280 |
| Стищенко К.П., к.т.н. Кипервассер М.В. | 280 |
| Сибирский государственный индустриальный университет. г. Новокузнецк, Россия..... | 280 |
| ПРОБЛЕМЫ ВЛИЯНИЯ МОЩНОЙ РЕГУЛИРУЕМОЙ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТЯХ 0,4 кВ..... | 286 |
| Бедарев М.А., Коновалов О.В., Мамонтов Д.Н., к.т.н. Кипервассер М.В..... | 286 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия..... | 286 |
| РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В ОБЕСПЕЧЕНИИ УГОЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СТРАНАХ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ..... | 291 |
| ^{1,2} д.т.н. Зеньков И. В., ³ Мулюшкина А.А. | 291 |
| 1 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия | 291 |
| 2 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия..... | 291 |
| 3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия | 291 |
| МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА | 294 |
| к.т.н. Кузнецова Е.С., Усова Э.А., Комарова О.В., Качурин А.С. | 294 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк..... | 294 |
| ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ..... | 298 |
| ¹ к.т.н. Кузнецова Е.С., ² Кузьмина С.Ю., ³ Кузьмин С.А..... | 298 |

| | |
|--|------------|
| 1 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия | 298 |
| 2 – ООО «Горэлектросеть», г. Новокузнецк, Россия | 298 |
| 3 – ООО «Фаза», г. Новокузнецк, Россия | 298 |
| ПРОМЫШЛЕННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ГОРНЫХ | |
| ПРЕДПРИЯТИЙ | 301 |
| ВЕРОЯТНОСТЬ САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ В ЗОНЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО | |
| НАРУШЕНИЯ | 303 |
| д.т.н. Греков С.П., к.т.н. Головченко Е.А., Карасёва В.В. | 303 |
| НИИ «Респиратор» МЧС ДНР, г. Донецк, Донецкая народная республика, Россия | 303 |
| РАСЧЁТ ИЗОЛИНИЙ ТЕМПЕРАТУР И КОНЦЕНТРАЦИЙ ВРЕДНЫХ ГАЗОВ НА | |
| ПОРОДНОМ ОТВАЛЕ | 306 |
| Пашковский О.П., к.т.н. Головченко Е.А. | 306 |
| НИИ «Респиратор» МЧС ДНР, г. Донецк, Донецкая народная республика, Россия | 306 |
| МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В | |
| ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ШАХТ ПРИ ПОЖАРАХ | 309 |
| д.т.н. Агеев В.Г., к.т.н. Агарков А.В., Мавроди А.В. | 309 |
| НИИ «Респиратор» МЧС ДНР, г. Донецк, Донецкая народная республика, Россия | 309 |
| ПОТЕРИ РАСХОДА АЗОТА ПРИ ИЗОЛЯЦИИ И ТУШЕНИИ ПОДЗЕМНЫХ | |
| ПОЖАРОВ | 313 |
| Коврижкин О.И. | 313 |
| Оперативный военизированный горноспасательный отряд МЧС ДНР, г. Донецк, Донецкая народная республика, Россия | 313 |
| СПОСОБ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ УВЛАЖЕНИЯ ПЛАСТА НА ИЗМЕНЕНИЯ | |
| ГАЗОКИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИРОДНОГО УГЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ | |
| ИННОВАЦИОННОГО ГОРНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДА | 317 |
| к.т.н. Плаксин М.С., Родин Р.И., Рябцев А.А., Альков В.И. | 317 |
| Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты СО РАН, г. Кемерово, Россия | 317 |
| МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УДАРНОЙ | |
| ВОЗДУШНОЙ ВОЛНЫ ПО ВЫРАБОТКАМ И ЕЁ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С | |
| ИНЖЕНЕРНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ | 322 |
| ¹ к.т.н. Говорухин Ю.М., ^{1,2} д.т.н. Домрачев А.Н., ¹ к.т.н. Криволапов В.Г., ^{1,3} д.т.н. Палеев Д.Ю. | 322 |
| 1 – Национальный горноспасательный центр, г. Новокузнецк, Россия | 322 |
| 2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия | 322 |
| 3 – Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия | 322 |
| МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТОЛЩИНЫ ИЗОЛИРУЮЩИХ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВЫХ | |
| ПЕРЕМЫЧЕК | 333 |
| ¹ к.т.н. Говорухин Ю.М., ^{1,2} д.т.н. Домрачев А.Н., ¹ к.т.н. Криволапов В.Г., ^{1,3} д.т.н. Палеев Д.Ю. | 333 |
| 1 – Национальный горноспасательный центр, г. Новокузнецк, Россия | 333 |
| 2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия | 333 |
| 3 – Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия | 333 |
| КОНТРОЛЬ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ ЕСТЕСТВЕННОГО | |
| ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ | 336 |
| Мальшков С.Ю., к.т.н. Гордеев В.Ф., Поливач В.И. | 336 |
| Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия | 336 |
| ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ РАЗРЕЗА «АНГРЕНСКИЙ», КАК ОБЪЕКТЫ | |
| ПРОМЫШЛЕННО-ОХРАННОГО ЗНАЧЕНИЯ | 341 |

| | |
|--|-----|
| ¹ к.т.н. Якубов С.И., ² д.т.н. Прошунин Ю.Е., ³ к.т.н. Юнусова Ф.Р., ³ Фирлина Г.Л., ³ Фаёз Омонуллахонов Фаррух угли, ³ Атоев Ақобир Авар угли..... | 341 |
| 1 – Институт общей и неорганической химии Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан | 341 |
| 2 – Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия..... | 341 |
| 3 – НИУ Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства, г. Ташкент, Узбекистан..... | 341 |
| ИНИЦИАТИВЫ РОССИЙСКИХ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ КОМПАНИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ | 348 |
| Нагайцев И.А., д.э.н. Петрова Т.В..... | 348 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия..... | 348 |
| К ВОПРОСУ О ПЕРСПЕКТИВАХ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ КАМЕННЫХ И БУРЫХ УГЛЕЙ..... | 354 |
| д.т.н. Прошунин Ю.Е., д.т.н. Мурко В.И..... | 354 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия..... | 354 |
| К ВОПРОСУ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ НА ВЕЛИЧИНУ КОЭФФИЦИЕНТА ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ УГЛЕСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ..... | 361 |
| д.т.н. Прошунин Ю.Е., Гельгенберг И.О. | 361 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия..... | 361 |
| УПРАВЛЕНИЕ ГОРНЫМИ РАБОТАМИ И ПРОЦЕССАМИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ЭКОЛОГИИ НА УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗАХ ВЬЕТНАМА | 364 |
| ^{1,2} д.т.н. Зеньков И.В., ³ Мулюшкина А.А. | 364 |
| 1 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия | 364 |
| 2 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия..... | 364 |
| 3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия | 364 |
| ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТНЫХ ОТМЕТОК МЕСТНОСТИ ПРИ АНАЛИЗЕ ТЕХНОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ РЕЛЬЕФА | 367 |
| д.г.-м.н. Гутак Я.М., Андропова В.С..... | 367 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия | 367 |
| РЕТРОСПЕКТИВНАЯ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЭК КУЗБАССА..... | 372 |
| к.э.н. Новоселов С.В., г. Кемерово, Россия | 372 |
| ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ АСПЕКТ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ РОССИИ И КУЗБАССА..... | 378 |
| к.э.н. Новоселов С.В., г. Кемерово, Россия | 378 |
| КОНЦЕПЦИЯ СТРАТЕГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО ТЭК КУЗБАССА КАК ИНТЕГРАЦИОННОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ РАДИКАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ | 382 |
| к.э.н. Новоселов С.В., г. Кемерово, Россия | 382 |
| ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЙ СТАЦИОНАРНЫХ И ПЕРЕДВИЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ НА ПРИМЕРЕ ПРЕДПРИЯТИЯ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ | 386 |
| Киприянов Д.А., к.т.н. Поползин И.Ю., Дробышев В.К..... | 386 |
| Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия..... | 386 |

ГЕОТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР

**ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДЕГАЗАЦИИ
МЕТОДОМ ПОИНТЕРВАЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА**¹член-корр. РАН Клишин В.И., ¹к.т.н. Опрук Г.Ю., ¹Связев С.И., ²Вылцан С.С.**1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
г. Кемерово, Россия****2 – Филиал ПАО «Южный Кузбасс» Шахта Сибиргинская, г. Мыски, Россия**

Аннотация. Рассмотрен метод поинтервального гидроразрыва (ПГР) угольного пласта и средства его реализации из подготовительных выработок угольных шахт для повышения коэффициента предварительной дегазации. Выполнены геофизические исследования до и после поинтервального гидроразрыва. Разработаны технологические схемы и проведены шахтные мероприятия по интенсификации дегазации в выемочном столбе.

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

Введение. Развитие угледобывающей отрасли сопровождается созданием высокопроизводительных и эффективных технологий для повышения добычи угля, включая высокопроизводительное оборудование и модернизацию всего угольного производства. Это в свою очередь приводит к повышению опасного производственного фактора, воздействие которого на работающего может привести к острому отравлению, внезапному ухудшению здоровья, травме или смерти.

Отмечается, что средняя метанообильность шахт Кузбасса оценивается в 25 м³ на 1 т добываемого угля, достигая на ряде шахт 60-80 м³/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. Вследствие малого объема дегазационных работ и недостаточной их эффективности на многих газообильных шахтах России сохраняется газовый барьер, препятствующий дальнейшему наращиванию скоростей проведения выработок и больших нагрузок на очистные забои. По данной причине в угледобывающей промышленности сформировалась ситуация, когда технические возможности очистных комплексов на пологих пластах во много раз превышают допустимую нагрузку на лаву по газовому фактору.

Основным и опасным спутником добычи угля является угольный метан, который бесцветен, не имеет запаха и, главное, он с воздухом образует взрывоопасные смеси. Метан, содержащийся в угольных пластах, был и остается главной опасностью для горняков, его внезапные неконтролируемые выбросы и взрывы при ведении подземных горных работ являются наиболее опасными и крупномасштабными авариями во всем мире [1].

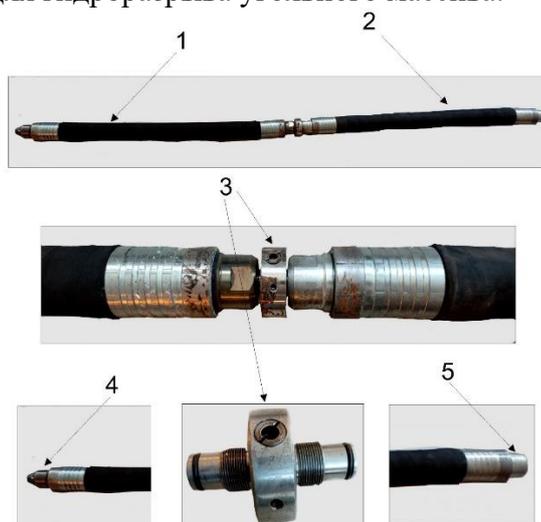
К проблемам, вызванных большим содержанием метана и высокой напряженностью массива в зонах повышенного горного давления (ПГД) при выемке угля в очистных забоях, относятся внезапные выбросы угля (породы) и газа. Этим также объясняется низкая производительность труда и высокая степень травматизма при ведении подземных работ. Развитие угледобывающей промышленности замедляется не только объективной трудоемкостью горных работ, но и разработкой месторождений с сложными горно-геологическими и горнотехническими факторами, что приводит к повышению травматизма [2-6].

Основной раздел. 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 [7-8].

Увеличение проницаемости обработанной зоны угольного пласта, при использовании поинтервального гидроразрыва, происходит за счет образования новых трещин и раскрытия имеющихся естественных трещин. Данная технология обеспечивает быстрое проникновение жидкости в массив, что в свою очередь позволяет снизить время проведения гидроразрыва на пласт. Как показывает практический опыт, трещины, образовавшиеся в процессе поинтервального гидроразрыва пласта, достигают в длину от 5 до 10 метров, и, соединяясь со скважинами барьерной или пластовой дегазации значительно увеличивают проницаемость угольного пласта. С механической точки зрения направленный поинтервальный гидроразрыв приводит к образованию дренажных каналов с высокой проводимостью и протяженностью за счет раскрытия естественных нарушений. Данный способ позволяет продлить срок службы скважины, повысить объемы каптируемого метана, тем самым увеличив общий коэффициент предварительной дегазации выемочного столба [9-11].

Устройство разрывное предназначено для поинтервального разрыва угольного массива с целью увеличения интенсивности выделения газа метана при дегазации угольных пластов.

Устройство разрывное (рис. 1) включает в себя два упруго расширяющихся рукава 1, 2 диаметром 76 мм, между которыми установлен распределитель давления 3, предназначенный для регулирования давления рабочей жидкости в гидросистеме разрывного устройства. Распределитель давления служит для своевременного пакерования скважины в зоне между упруго расширяющимися рукавами и дальнейшего повышения давления в этой зоне до величины, достаточной для гидроразрыва угольного массива.



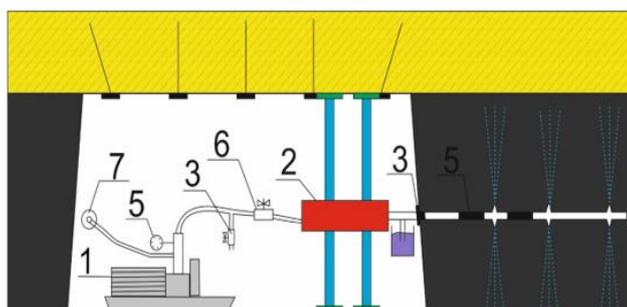
1, 2 – упруго расширяющиеся рукава; 3 – межпакерный клапан; 4 – наконечник запорный; 5 – муфта соединительная

Рис. 1. Разрывное устройство

Работы по поинтервальному гидроразрыву пласта в условиях «Шахты Сибиргинская» из конвейерного штрека 3-1-11 проводились в необсаженных скважинах пластовой дегазации глубиной 110 м и 130 м, пробуренных в угольный пласт с разворотом от оси выработки на 90° с интервалами заблаговременно отбуренных контрольных скважин для скважины НГР № 1 – 38,4 м, № 2 – 25,6 м и № 3 – 12,8 м, расстояние между 8 интервалами нагнетания жидкости составляет 10 м. Первый интервал выполнялся в 100 м от устья скважины. Технологические схемы и места заложения скважин для осуществления ПГР представлены на рис. 2, 3.

Для оценки эффективности проведенных работ по поинтервальному гидродинамическому воздействию на угольный пласт III в выемочном столбе № 3-1-11-3 выполнены геофизические исследования до и после гидроразрыва и измерения изменения давления в

трех скважинах при нагнетании рабочей жидкости. Воздействие на пласт через скважины выполнялось на 8 и 9 интервалах с шагом 10 м (рис. 4).



1 – насос; 2 – буровой станок; 3 – уплотнитель устья; 4 – разрывное устройство; 5 – манометр; 6 – вентиль высоконапорный; 7 – противопожарный трубопровод

Рис. 2. Технологическая схема ПГР

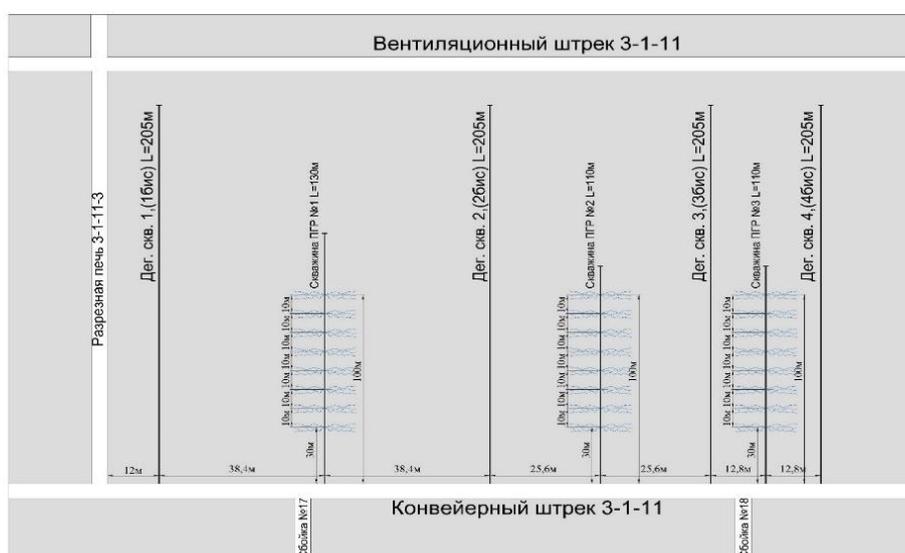


Рис. 3. Технологическая схема расположения скважин для реализации метода поинтервального гидроразрыва в лаве 3-1-11-3 из конвейерного штрека 3-1-11

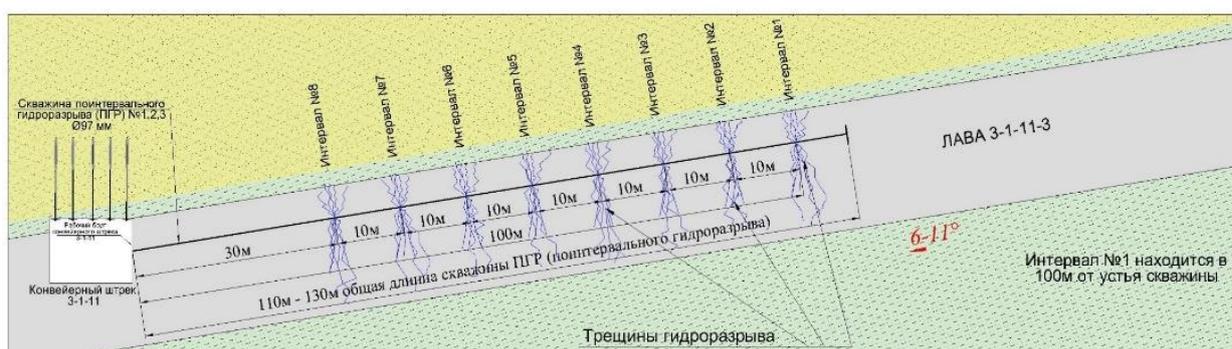


Рис. 4. Вертикальная схема расположения скважины поинтервального гидроразрыва в лаве 3-1-11-3 из конвейерного штрека 3-1-11

Регистрация сейсморазведочных данных проведена на исследуемом участке выемочного столба в 2 этапа:

- до гидроразрыва через скважины ГРП №1 – №3;
- после гидроразрыва через скважину ГРП №1 – №3.

Данный порядок проведения измерений позволяет путем прямого сравнения наглядно оценить уровень изменения характеристик сейсмического сигнала в результате

изменения геомеханического состояния углепородного массива [12]. В качестве источника информации использованы скоростные томографические разрезы исследованного участка выемочного столба № 3-1-11-3 по угольному пласту. Все результаты, приведенные в настоящей статье, характеризуют состояние исследованного участка выемочного столба № 3-1-11-3 на момент проведения измерений (июнь 2022 г.).

По результатам сейсмических измерений в пределах горизонта залегания угольного пласта также зафиксировано изменение его геомеханического состояния, выраженное снижением фиксируемого скоростного фона, увеличением площади зон снижения скоростных характеристик, уменьшением площади зон увеличения скоростей распространения сейсмических волн. На сейсмотомографическом разрезе, отражающем степень разгрузки угольного пласта, определенную по отношению разницы скоростей, зафиксированных в измерениях до и после гидроразрыва к диапазону их возможного изменения, отмечено его максимальное разупрочнение (5-24%), выраженное наличием протяженной области, распространяющейся практически по всей площади исследованного участка (рис. 5). Разгрузка до 5% относительно диапазона изменения регистрируемых скоростных характеристик в пределах исследованной области проявляется практически повсеместно.

Изменения, фиксируемые по результатам сейсмотомографических измерений, обусловлены, по всей вероятности, разупрочнением углепородного массива, вызванным совокупностью естественных и техногенных причин: влиянием горных работ, бурением скважин и последующим гидроразрывом на угольный пласт, временным фактором.

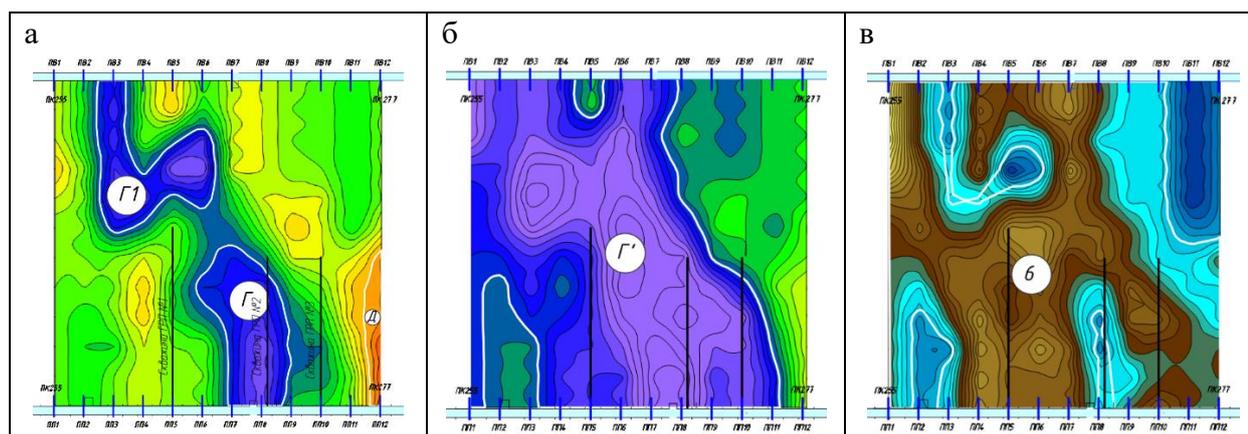


Рис. 5. Результаты сейсмического просвечивания угольного пласта: а – до гидроразрыва; б – после гидроразрыва; в – степень разупрочнения

Исходя из мониторинга скважин поинтервального гидроразрыва №1-№3 и контрольных скважин № 1, № 1бис, № 2, № 2бис, № 3, № 3бис, № 4, № 4бис до и после поинтервального гидроразрыва (рис. 6), был получен результат в увеличении дебита метана (приняты средние значения):

- в скважине ПГР (поинтервального гидроразрыва) № 1 увеличение дебита метана с 0,043 м³/мин до 0,311 м³/мин;
- в скважине ПГР (поинтервального гидроразрыва) № 2 увеличение дебита метана с 0,029 м³/мин до 0,110 м³/мин;
- в дегазационной скважине №3 увеличение дебита метана с 0,032 м³/мин до 0,125 м³/мин;
- в дегазационной скважине №3бис увеличение дебита метана с 0,046 м³/мин до 0,112 м³/мин.

При поинтервальном гидроразрыве пласта в скважине ПГР №3 был обнаружен выход воды в дегазационных скважинах №3 и №3бис, что свидетельствует о раскрытии новых и естественных трещин в угольном массиве и соединении скважины ПГР №3 с дегазационными скважинами №3, 3бис

| Дата замера | Номер замерной станции (скважины) | Глинет | Концентрация метана, % | Расход метаногазифицированной смеси, л3/мин | Дебит метана, л3/мин | Дата замера | Номер замерной станции (скважины) | Глинет | Концентрация метана, % | Расход метаногазифицированной смеси, л3/мин | Дебит метана, л3/мин | Дата замера | Номер замерной станции (скважины) | Глинет | Концентрация метана, % | Расход метаногазифицированной смеси, л3/мин | Дебит метана, л3/мин |
|-------------|-----------------------------------|--------|------------------------|---|----------------------|-------------|-----------------------------------|--------|------------------------|---|----------------------|-------------|-----------------------------------|--------|------------------------|---|----------------------|
| 04.07.2022 | скв 1 бис | 258+11 | 12,0 | 0,400 | 0,048 | 04.07.2022 | скв 2 бис | 266+8 | 8,0 | 0,537 | 0,043 | 26.05.2022 | скв 3 | 272 | 22,0 | 0,185 | 0,041 |
| 08.07.2022 | скв 1 бис | 258+11 | 10,0 | 0,347 | 0,035 | 08.07.2022 | скв 2 бис | 266+8 | 16,0 | 0,119 | 0,019 | 02.06.2022 | скв 3 | 272 | 20,0 | 0,139 | 0,028 |
| 14.07.2022 | скв 1 бис | 258+11 | 11,0 | 0,265 | 0,029 | 14.07.2022 | скв 2 бис | 266+8 | 15,0 | 0,182 | 0,027 | 03.06.2022 | скв 3 | 272 | 20,0 | 0,139 | 0,028 |
| 19.07.2022 | скв 1 бис | 258+11 | 7,5 | 0,400 | 0,03 | 19.07.2022 | скв 2 бис | 266+8 | 10,0 | 0,326 | 0,033 | 09.06.2022 | скв 3 | 272 | 20,0 | 0,156 | 0,031 |
| | | | | | | | | | | | | 16.06.2022 | скв 3 | 272 | 44,0 | 0,245 | 0,108 |
| 26.05.2022 | Г-1 | 263 | 24,0 | 0,198 | 0,048 | 26.05.2022 | Г-2 | 269+4 | 20,0 | 0,155 | 0,031 | 09.06.2022 | скв 3 | 272 | 40,0 | 0,389 | 0,156 |
| 02.06.2022 | Г-1 | 263 | 26,0 | 0,158 | 0,041 | 02.06.2022 | Г-2 | 269+4 | 18,0 | 0,169 | 0,030 | 08.07.2022 | скв 3 | 272 | 38,0 | 0,301 | 0,114 |
| 03.06.2022 | Г-1 | 263 | 22,0 | 0,209 | 0,046 | 03.06.2022 | Г-2 | 269+4 | 21,0 | 0,156 | 0,033 | 14.07.2022 | скв 3 | 272 | 42,0 | 0,354 | 0,149 |
| 09.06.2022 | Г-1 | 263 | 24,0 | 0,158 | 0,038 | 09.06.2022 | Г-2 | 269+4 | 19,0 | 0,121 | 0,023 | 19.07.2022 | скв 3 | 272 | 41,0 | 0,244 | 0,100 |
| 16.06.2022 | Г-1 разрыв | 263 | 90,0 | 0,469 | 0,422 | 16.06.2022 | Г-2 | 269+4 | 14,0 | 0,217 | 0,030 | | | | | | |
| 04.07.2022 | Г-1 | 263 | 67,0 | 0,436 | 0,292 | 23.06.2022 | Г-2 разрыв | 269+4 | | | | 26.05.2022 | скв 3 бис | 272 | 30,0 | 0,174 | 0,052 |
| 08.07.2022 | Г-1 | 263 | 75,0 | 0,306 | 0,229 | 04.07.2022 | Г-2 | 269+4 | 28,0 | 0,493 | 0,138 | 02.06.2022 | скв 3 бис | 272 | 28,0 | 0,159 | 0,044 |
| 14.07.2022 | Г-1 | 263 | 63,0 | 0,334 | 0,21 | 08.07.2022 | Г-2 | 269+4 | 32,0 | 0,352 | 0,113 | 03.06.2022 | скв 3 бис | 272 | 30,0 | 0,143 | 0,043 |
| 19.07.2022 | Г-1 | 263 | 80,0 | 0,506 | 0,405 | 14.07.2022 | Г-2 | 269+4 | 38,0 | 0,283 | 0,108 | 09.06.2022 | скв 3 бис | 272 | 25,0 | 0,187 | 0,047 |
| | | | | | | 19.07.2022 | Г-2 | 269+4 | 27,0 | 0,310 | 0,084 | 16.06.2022 | скв 3 бис | 272 | 56,0 | 0,203 | 0,113 |

Рис. 6. Данные замеров контрольных скважин и скважин поинтервального гидроразрыва в конвейерном штреке 3-1-11 до и после гидроразрыва пласта

Выводы. Для повышения эффективности дегазационных работ и снижения газообильности угольных шахт при высоких скоростях проведения подготовительных выработок и нагрузок на очистные забои предложен метод интенсификации газоотдачи угольного пласта из необсаженных дегазационных скважин, пробуренных из подготовительных выработок. Экспериментально доказана эффективность метода поинтервального гидроразрыва в целях повышения коэффициента дегазации выемочного столба, что в свою очередь позволяет повысить нагрузку на очистной забой и снизить влияние газового фактора при отработке выемочного столба.

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. Клишин В.И. Обоснование параметров устройства для поинтервального гидроразрыва при пластовой дегазации угля. – 2018. – 134 с.
2. 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.
3. Ножкин Н.В. Заблаговременная дегазация угольных месторождений. – М.: Недра, 1979. – 271 с.
4. Метан в угольных шахтах и рудниках России: прогноз, извлечение и использование / А.Д. Рубан, В.С. Забурдяев, Г.С. Забурдяев, Н.Г. Матвиенко. – М.: ИПКОН РАН, 2006. – 312 с.
5. Управление газовой выделением 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. 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. – P. 012019.

8. Development of device for interval-by-interval hydraulic fracture / V.I. Klishin, G. Opruk, D.I. Kokoulin, A.L. Tatsienko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2019. – Volume 262. – Issue 1. – P. 012028.

9. 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

10. 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. – P. 177–181.

11. 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. – P. 118–133.

12. Геофизические методы исследования скважин при разведке и добыче метана из угольных пластов: монография / В.А. Шумилов, С.М. Аксельрод, А.В. Шумилов // Перм. гос. нац. исслед. универси-тет. – 2014. – 138 с.

УДК 004.942; 622.3

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ВЫЕМКИ УГЛЯ ОЧИСТНЫМ КОМБАЙНОМ

^{1,2}чл.-корр. РАН Клишин В.И., ^{1,2}к.т.н. Стародубов А.Н., ^{1,2}Кадочигова А.Н.,
^{1,2}Каплун А.В.

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

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

Аннотация. В статье описывается разработка цифровой модели технологии длинностолбовой отработки угольного пласта очистным комбайном в среде имитационного моделирования Rocky DEM. Также в ходе исследования определена методика калибровки влажности материала с помощью проведения теста на угол естественного откоса (УЕО).

Ключевые слова: имитационное моделирование, очистные работы, угольный пласт, угол естественного откоса, модель разрушения, метод дискретных элементов, калибровка материала, адгезия.

Стремительное развитие методов компьютерного моделирования предоставляет широкие возможности для исследований в различных отраслях промышленности. Например, в горном деле активное использование имитационного моделирования обусловлено повышенной конкуренцией между горнодобывающими предприятиями, так как использование правильно спроектированной виртуальной модели позволяет значительно сократить экспериментальные расходы, в силу возможности проведения многовариантных исследований в численном виде и прогнозирования различных параметров технологических процессов.

Использование имитационного моделирования является эффективным инструментом для анализа объектов и результатов исследования в горнодобывающей отрасли. Оно позволяет выявить преимущества и недостатки различных технологических вариантов добычи полезных ископаемых в специфических геологических условиях [1-6]. Данное исследование сосредоточено на моделировании процесса выемки угля очистным комбайном, включая взаимодействие режущего органа - шнека с угольным пластом и транспортировку отбитой горной массы по конвейеру из лавы. Основными элементами и процессами, которые необходимо учесть в имитационной модели, являются:

- угольный пласт, а также физико-механические свойства, относящиеся к углю и материалу очистного оборудования;
- рабочие механизмы комбайна, непосредственно взаимодействующие с пластом;
- скребковый конвейер;
- разрушение угольного пласта под воздействием резцов очистного комбайна.

Для реализации имитационной модели было выбрано программное обеспечение Rocky DEM [7]. Данная программа позволяет работать с гранулированной средой благодаря методу дискретных элементов (DEM – Discrete element method). Он предназначен для вычисления движения и взаимодействия большого количества частиц (моделирование динамики частиц). Основным преимуществом Rocky DEM по сравнению со своими аналогами (PFC3D, EDEM, ELFEN, ThreeParticle/CAE, MUSEN) [8-12] является возможность моделирования разрушения частиц произвольной формы без потери массы и объема под воздействием внешних факторов, что подходит для описания механики горных пород. Рассматриваемое ПО позволяет задавать точную траекторию движения элементов модели, например, колебания и вращения, или осуществлять свободное перемещение с учетом внешних сил.

Среда имитационного моделирования Rocky DEM не предполагает внутреннего функционала CAD-программ, в связи с этим все элементы модели строились с помощью сторонних программ и экспортировались в проект Rocky DEM в формате *.stl, представляющем собой список треугольных граней, которые описывают поверхность объекта, и их нормалей.

Средствами САПР T-Flex CAD были построены следующие модели: скребковый конвейер модели «Анжера-30», очистной комбайна модели Eickhoff SL 750 и его шнековый исполнительный орган. Также в T-Flex CAD была спроектирована и построена вспомогательная конструкция, необходимая для поддержания блоков угля, составляющих угольный массив, в имитационной модели выемки угля.

Технические характеристики забойного скребкового конвейера «Анжера-30» (рис. 1) приведены в табл. 1.



Рис. 1. Изображение шахтного скребкового конвейера модели «Анжера»

Таблица 1

| Технические характеристики скребкового конвейера «Анжера-30» | |
|--|-----------|
| Наименование | Значение |
| Длина конвейера, м | до 350 |
| Производительность, т/час | до 1500 |
| Расстояние между скребками, мм | 1080 |
| Скорость движения, м/с | 0,92÷1,52 |
| Ширина по внутреннему каналу, мм | 690; 800 |
| Высота профиля, мм | 245 |

На рис. 2 представлены созданные 3D-элементы забойного скребкового конвейера (рештак, скребок) и общий вид в 3D-сборке.



Рис. 2. Упрощенная 3D-модель скребкового конвейера «Анжера-30»

На рис. 3 приведен скриншот 3D-модели комбайна Eickhoff SL 750, технические характеристики которого приведены в табл. 2.



Рис. 3. Общий вид 3D-модели очистного комбайна Eickhoff SL 750 и составных элементов

Таблица 2

Технические характеристики очистного забойного комбайна Eickhoff SL 750

| Наименование | Значение |
|---------------------------------------|---------------|
| Вынимаемая мощность, м | 1,8 – 4.8 |
| Число оборотов режущего шнека, об/мин | 32 – 50 |
| Максимальная скорость подачи, м/мин | 51 |
| Длина, мм | 13900 - 14900 |
| Ширина, мм | 2700 - 3400 |
| Высота, мм | 1250 - 2050 |

Для удобства работы в САПР T-Flex CAD очистной комбайн собирался из отдельных элементов с добавлением их взаимного сопряжения, что позволяет опускать и поднимать оба рабочих органа комбайна и защитное перекрытие.

В отличие от корпуса комбайна, модель которого разработана только с сохранением габаритных размеров, модель шнека, непосредственно участвующего в разрушении угля и его погрузке на конвейер, создана с соблюдением геометрического подобия. Шнек представляет собой трубу, называемую ступицей, на которую навинчены лопасти, имеющие на внешних краях резцы, которые и осуществляют отбойку горной массы (рис. 4).

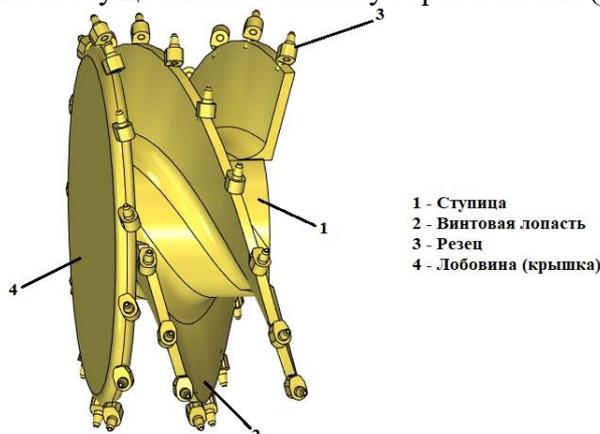


Рис. 4. 3D-модель левого шнекового исполнительного органа

Параметры, на основе которых строилась 3D-модель левого и правого шнеков, указаны в табл. 3 [13].

Таблица 3

Параметры исполнительного шнекового органа очистного комбайна

| Наименование | Значение |
|----------------------------|----------------|
| Тип конструкции | Лопастной |
| Число лопастей | 3-заходный |
| Тип резцов | Тангенциальный |
| Количество резцедержателей | 37 |
| Направление погрузки угля | Левый и правый |
| Ширина захвата, мм | 800 |
| Диаметр по резцам, мм | 2000 |

Для поддержания блоков, составляющих угольный массив, экспериментальным путем была разработана ячеистая конструкция (рис. 5). Ячейки в данной конструкции предназначены для блоков, имитирующих уголь и составляющих угольный массив.

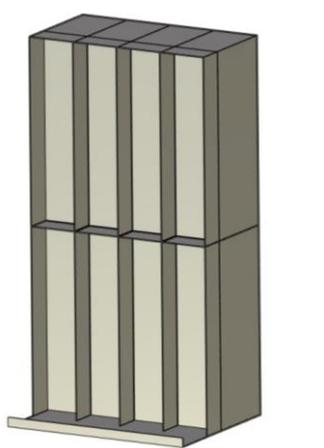


Рис. 5. 3D-модель вспомогательной конструкции для поддержания угольного массива в имитационной модели

Представленная конструкция спроектирована таким образом, чтобы блоки в имитационной модели не сдвигались и не рушились при давлении, до того пока шнек не начнет непосредственно контактировать с конкретным блоком. При этом фрагменты, образующиеся в ходе разрушения, могут беспрепятственно упасть на конвейер при работе шнека или прилипнуть к нему и двигаться по круговой траектории. Также данная конструкция может быть размножена в длину в зависимости от необходимого количества блоков для моделирования.

Данная конструкция была дополнена специальными перекрытиями, выполняющих функцию стен, кровли и почвы очистного забоя, также имеющих свойства углепородного массива.

В имитационной модели выемки угля также необходимо учесть конструкцию крепи. В данном случае нет необходимости добавлять саму модель механизированной крепи, достаточно будет добавить на необходимую высоту объект, который будет имитировать козырек. Благодаря ему, отбитые от массива фрагменты не будут разлетаться по всему пространству модели. Также для избежания перелета фрагментов за конвейер, в модель была добавлена дополнительная перегородка, представляющая собой ограждающий экран (рис. 6).

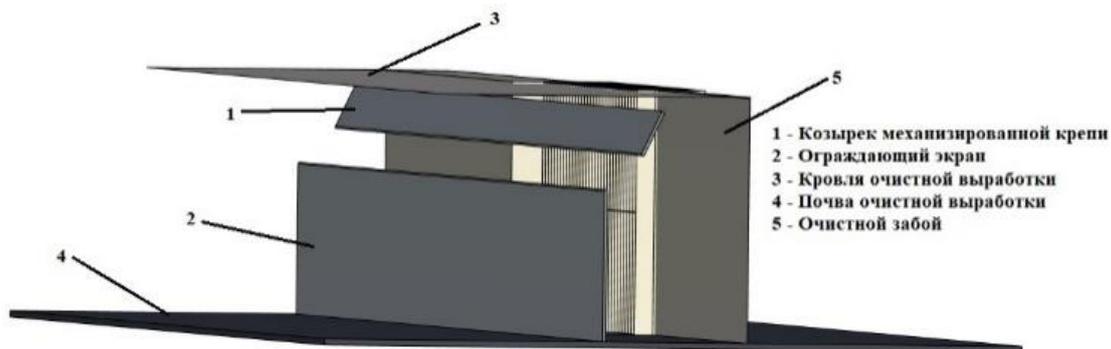


Рис. 6. 3D-модель вспомогательных конструкций, имитирующих козырек механизированной крепи и ограждающий экран

Конечный вид 3D-модели очистной выработки с горным оборудованием для имитационной модели выемки представлен на рис. 7.

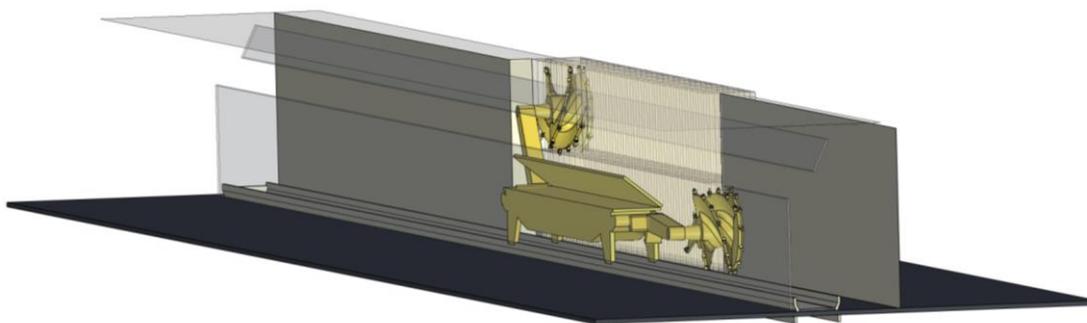


Рис. 7. 3D-модель очистной выработки

В качестве параметра оценки соответствия модели реальным условиям была выбрана адгезия – сцепление между раздробленными частицами угля. Поскольку при очистных работах используются системы пылеподавления, имитационная модель должна правильно отражать процессы отбойки угля и ссыпания его на скребковый конвейер.

Для определения параметров сцепления была проведена калибровка, состоящая из серии тестов на угол естественного откоса (УЕО). Угол естественного откоса зависит в основном от силы сцепления и силы трения, определяющихся шероховатостью частиц, степенью их увлажнения, формой и гранулометрическим составом [14].

Суть данного теста заключается в том, что вертикально расположенный полый цилиндр заполняют изучаемым материалом, а затем медленно поднимают его, после чего под цилиндром образуется насыпь, на свободной поверхности которой частицы испытывают состояние предельного равновесия. После достижения устойчивого состояния частиц в насыпе измеряют угол между горизонтальной плоскостью и образовавшейся свободной поверхностью насыпи.

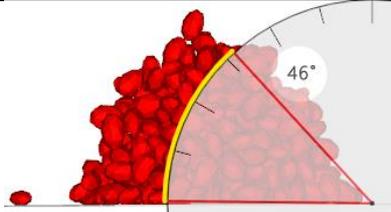
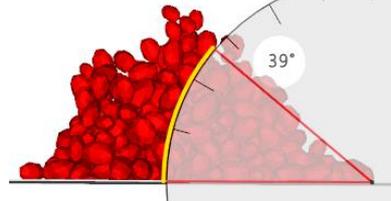
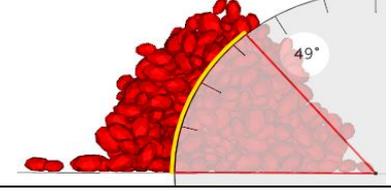
В табл. 4 приведен фрагмент результатов калибровочных тестов с линейной адгезией. Известно, что для сухого каменного угля УЕО составляет 30-45 градусов [15]. Для влажного угля показатель будет выше. Для обеспечения адекватности при моделировании условий реальной шахты требуется провести эмпирические исследования УЕО и, после его определения, выбрать необходимые параметры для моделирования.

Выводы. В результате проведенного исследования разработана модель, являющаяся составным элементом разрабатываемой системы моделирования технологий добычи угля в сложных горно-геологических условиях. Модель выемки угля очистным комбайном позволяет проводить имитационные эксперименты с различными параметрами оборудования; визуализировать процесс выемки угля на экране компьютера; оценивать технологию по 3D-

анимации; определять пути повышения эффективности технологии. Разработанный массив входных параметров модели при получении экспериментальных данных позволит проводить исследования для условий действующих и проектируемых угольных шахт.

Таблица 4

Результаты калибровочных тестов с линейной адгезией (фрагмент)

| Линейная адгезия | | | | | | |
|------------------|---------------------------|----------------|---|-----------------------|------------------------------|---|
| № | Адгезионное расстояние, м | Доля жесткости | Коэффициент статического/динамического трения | Сопротивление качению | Угол естественного откоса, ° | Результат |
| 1 | 0,00001 | 0,01 | 0,7 | 0,2 | 45,99 |  |
| 2 | 0,000001 | 0,05 | 0,7 | 0,2 | 39,02 |  |
| 3 | 0,00001 | 0,015 | 0,7 | 0,2 | 48,65 |  |

Благодарности. Исследование выполнено в рамках гранта (постановление Правительства Кемеровской области – Кузбасса от 19.09.2022 № 632) по прикладному научному исследованию «Разработка программно-методического обеспечения для цифровизации процессов проектирования горнотехнических систем для открытых и подземных горных работ», соглашение от 22.11.2022 г. №1.

Список литературы

1. Мустафин М. Г. Моделирование разрушения массива горных пород в процессе продвижения очистного забоя с разной скоростью // Записки Горного института. – 2007. – Т. 171. – С. 130-133. – URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/7677/5602>
2. Klishin S.V., Klishin V.I., Opruk G.Y. Modeling Coal Discharge in Mechanized Steep and Thick Coal Mining // Journal of Mining Science. – 2013 – Vol. 49 (6). – P. 932-940.
3. Технология разработки запасов мощных пологих пластов с выпуском угля / В.И. Клишин, И.А. Шундулиди, А.Ю. Ермаков, А.С. Соловьев. – Новосибирск: Наука, 2013. – 248 с.
4. Система имитационного моделирования горнопроходческих работ / А.Н. Стародубов, В.В. Зиновьев, М.В. Береснев, А.Е. Майоров // Ежемесячный научно-технический и производственно-экономический журнал «Уголь». – 2016. – № 2. – С. 20-24.

5. Клишин В.И., Клишин С.В. Состояние и направление развития технологии разработки мощных угольных пластов механизированными крепями с выпуском // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2019. – Вып. 1 – С. 162-174.

6. Применение имитационного моделирования для исследования режимов выпуска угля подкровельной толщи / А.Н. Стародубов, В.В. Зиновьев, В.И. Клишин, В.А. Крамаренко // Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2019) : тр. девятой всерос. науч.-практ. конф., 16–18 октября 2019 г. – Екатеринбург: Урал. гос. пед. ун-т., 2019. – С. 540-547.

7. О продукте. Функциональность // Rocky DEM. – URL: <https://www.rockydem.ru/software/features/>

8. PFC. Version 7.0 // ITASCA, Consulting Group. – URL: <https://www.itascacg.com/software/pfc/>

9. EDEM (DEM Solutions Ltd.) // Altair Engineering Inc. – URL: <https://www.altair.com/edem/>

10. Software // Rockfield Global. – URL: <https://www.rockfieldglobal.com/software/>

11. Becker 3D. Simulation Software. – URL: <https://www.becker3d.com/>

12. MUSEN - Open-Source DEM Simulation System // MSolids Integrated Multiscale Simulation Platform. – URL: <https://msolids.net/musen/>

13. Инструкция по эксплуатации очистного комбайна Eickhoff SL 300 // Studmed. – URL: https://www.studmed.ru/view/instrukciya-po-ekspluatatsii-ochistnogo-kombayna-eickhoff-sl-300_eb1fc57a3e4.html?page=6

14. Землянский В.Н., Загер И.Ю., Яшинькина А.А. Инженерная геология. Определение угла естественного откоса песчаных грунтов : метод. указ. – Ухта: УГТУ, 2011. – 6 с.

15. Наибольшие углы наклона ленточных конвейеров при транспортировании сыпучих грузов на подъем // Pozhproekt.ru. О пожарной безопасности. – URL: https://pzhproekt.ru/nsis/Snip/Pril/2-05-07-91_06pr.htm

УДК 539.3

О НЕЛИНЕЙНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ С ГЛУБИНОЙ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

^{1,2}д.т.н. Ордин А.А.

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

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

Аннотация. Поставлена задача расчета напряжений в массиве горных пород в зависимости от глубины с учетом реакций связи с боковыми породами. Установлены нелинейные зависимости от глубины нормальных и касательных напряжений в массиве пород. Показано, что использования в геомеханических моделях гидростатического давления от веса вышележащих пород приводит к значительному завышению напряжений в массиве пород.

Ключевые слова: массив горных пород, статически неопределимая система, глубина, нормальные и касательные напряжения, силовое равновесие, деформация, предел прочности.

Многочисленные работы по геомеханике основаны на предположении, что нормальное напряжение, действующее в вертикальной плоскости в массиве горных пород на глубине (H), создается только весом вышележащих пород и поэтому определяется как произведение их плотности (γ) на глубину ($\sigma = \gamma H$) [1-10]. «В соответствии с законами

гравитации одно из главных напряжений действует в массиве вертикально и на глубине (H) определяется весом вышележащей толщи ($\sigma = \gamma H$)» [2].

Такое напряженное состояние (γH) свойственно для жидкости и называется гидростатическим давлением [11]. В отличие от жидкости твердое тело имеет кристаллическую решетку с прочными межатомными связями, которые необходимо учитывать при расчете напряженного состояния в массиве горных пород.

В технических дисциплинах и расчетах, как правило, изучаются не внутренние, межатомные связи, а каким образом изменяются, добавляются и перераспределяются внутренние силы и напряжения под воздействием внешних нагрузок. В нашей постановке задачи следует рассмотреть, как изменяются внутренние силы под действием внутренних же сил, в частности, под действием собственного веса пород.

В задачах сопротивления материалов основным является метод сечений [12]. Этот метод позволяет мысленно разрезать твердое тело на отдельные фрагменты и тем самым перевести внутренние силы этих частей тела во внешние, что позволяет применить правила теоретической механики для составления уравнений силового равновесия [13]. Применим этот метод для определения напряжения в массиве горных пород.

Покажем, что расчет напряжения на глубине (H) в массиве пород при отсутствии влияния горных работ, принципиально отличается от расчета гидростатического давления в жидкости.

В однородном массиве горных пород мысленно выделим вертикальный цилиндр с радиусом основания (r) и высотой (H), соответствующей глубине, на которой определяется нормальное напряжение. Верхнее основание цилиндра выходит на земную поверхность и свободно от нагрузки, а нижнее основание опирается на породный слой.

Цилиндр связан с породами своей боковой поверхностью и нижним основанием и под действием собственного веса подвергается деформациям одноосного сжатия и сдвига.

Если такой цилиндр вырезать и поместить на земную поверхность (рис. 1 а), то под действием собственного веса ($P = \gamma \pi r^2 H$) в основании цилиндра возникает реакция связи (R_0), равная весу цилиндра ($R_0 = P$) и образец находится в силовом равновесии. Соответственно в нижней части образца возникает нормальное напряжение ($\sigma = \gamma H$). Однако в массиве пород цилиндр жестко связан прочной кристаллической решеткой с породами своей боковой поверхностью и нижним основанием. В сопроаме такая связь называется «жесткой заделкой» (с жесткими связями), обладающей неизвестными реакциями связи и реактивными моментами. Системы с жесткими связями являются статически неопределимыми [12].

Аналогом поставленной задачи может служить вертикальный цилиндр высотой (H), поставленный на земную поверхность и жестко закрепленный верхним и нижним основаниями (рис. 1 б). Такой цилиндр под действием собственного веса подвергается одновременно одноосному растяжению (в верхней части) и сжатию (в нижней части). Эта система имеет степень неопределимости, равную единице, так как для нее можно составить только одно уравнение силового равновесия, а неизвестных реакций связи две:

$$R_1 + R_0 - P = 0. \quad (1)$$

Второе необходимое уравнение составляется исходя из закона Р. Гука и равенства нулю суммы деформаций цилиндра при растяжении и сжатии, так как его общая длина цилиндра не меняется [12]:

$$\Delta L_p - \Delta L_c = \frac{R_1 H}{E_p A} - \frac{R_0 H}{E_c A} = 0, \quad (2)$$

где E_p , E_c – модули Юнга или упругости 1-го рода соответственно при растяжении и сжатии; A – площадь основания цилиндра. Деформация растяжения берется со знаком «+», а деформация сжатия – со знаком «-» [12].

Учтем, что все породы легче разрушаются при растяжении, чем при сжатии. Так, для песчаника пределы прочности соответственно составляют при растяжении 16,3 МПа,

а при сжатии 56 МПа [12, 14]. Соответственно модуль Юнга пород при растяжении составляет 0,25 модуля упругости при сжатии ($E_p = 0,25E_{сж}$) [15]. Отсюда, учитывая (1), реакции нижнего и верхнего оснований цилиндра соответственно равны:

$$R_0 = R_1 \frac{E_c}{E_p} = 4R_1; R_1 = 0,2P; R_0 = 0,8P, \quad (3)$$

Из (3) следует, что напряжения в нижнем и верхнем основании цилиндра при растяжении и сжатии соответственно составляют:

$$\sigma_p = 0,2\gamma H; \sigma_c = 0,8\gamma H \quad (4)$$

Таким образом, при жестком закреплении верхнего и нижнего основания нормальное напряжение в нижнем основании цилиндра составляет только 0,8 части гидростатического давления ($\sigma_c = 0,8\gamma H$). Соответственно распределению напряжений в верхней части цилиндра на расстоянии 0,2H от верхней жесткой заделки происходит растяжение, а сжатие происходит в нижней части по длине 0,8H, и на расстоянии 0,2H от верхней заделки.

При определении напряжения в однородном, изотропном массиве горных пород на глубине (H) цилиндр связан с боковыми породами своей кристаллической решеткой (рис. 1 в), в которой под действием собственного веса возникают дополнительные касательные и нормальные напряжения в межзатомных связях. В соответствии с правилами теоретической механики [13] для составления условий силового равновесия отбрасываем от цилиндра все связи с боковыми породами, а их действие заменяем реакциями связей. Если бы этих связей не было, то цилиндр под действием собственного веса перемещался бы вертикально вниз с ускорением свободного падения. Отсюда следует, что реакции связей имеют противоположное направление, то есть направлены вертикально вверх. На нижнее основание действует реакция (R_p) со стороны почвы. На боковую поверхность цилиндра действуют касательные напряжения сдвига (τ), приводящие к возникновению результирующей силы сопротивления (R_b) боковых пород, направленной вертикально вверх и равной по модулю: $R_b = 2\pi r\tau H$ (при параллельном переносе сил, действующих на боковой поверхности цилиндра, к его оси возникают противоположно направленные и равные по модулю вращающие моменты, которые нейтрализуют друг друга и поэтому не учитываются). В горизонтальной плоскости нормальными напряжениями пренебрегаем ($\lambda=0$).

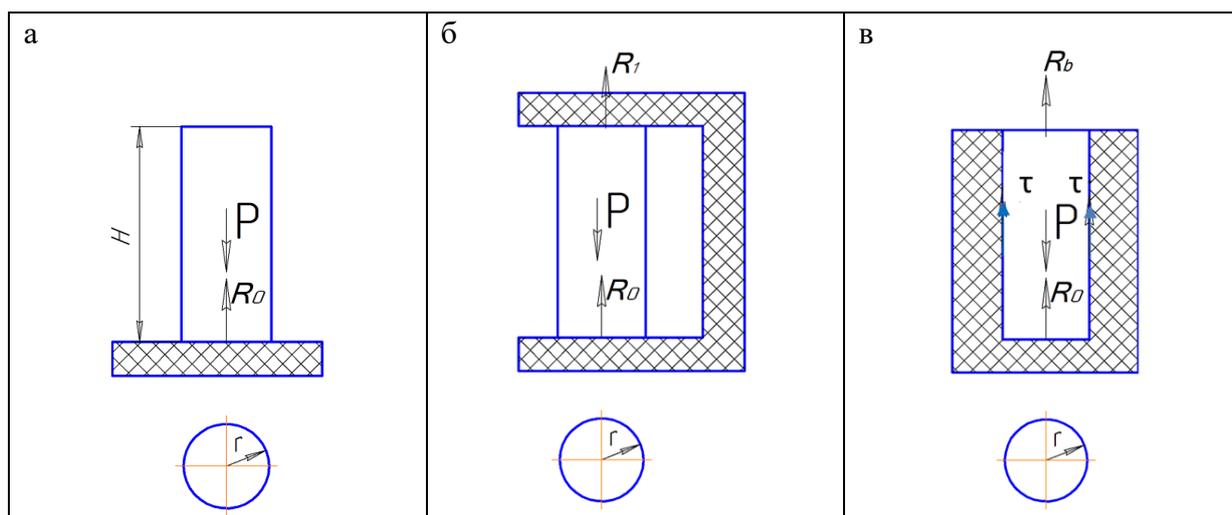


Рис. 1. Цилиндр, вырезанный из массива пород и жестко закрепленный:
а) в нижнем основании, б) в нижнем и верхнем основаниях, в) боковой поверхностью с массивом пород

Цилиндр, закрепленный кристаллической решеткой с боковыми породами, под действием собственного веса испытывает деформацию одноосного сжатия и сдвига (рис.

1 в). Система сил и реакций связи, действующие на цилиндр, является статически неопределимой. Учтем, что так как цилиндр находится в равновесии, то относительная деформация сдвига боковой поверхности соответствует относительной деформации сжатия нижнего основания.

Для определения реакций связи потребуется составить два уравнения:

$$R_o + R_b - P = 0; \quad (5)$$

$$\Delta L_o - \Delta L_b = \frac{R_o H}{E_c A_o} - \frac{R_b H}{G A_b} = 0, \quad (6)$$

где R_o , R_b – суммарные реакции связей соответственно основания и боковой поверхности цилиндра с почвой и боковыми породами, $A_b = 2\pi r H$ – площадь боковой поверхности цилиндра, G – модуль сдвига, определяемый по формуле [12]:

$$G = \frac{E_c}{2(1+\mu)}, \quad (7)$$

где $\mu < 0,5$ – коэффициент Пуассона.

Подставляя (7) в (6), получаем:

$$\Delta L_o - \Delta L_b = \frac{R_o H}{E_c \pi r^2} - \frac{(1+\mu)R_b}{E_c \pi r} = \frac{R_o H}{r} - (1+\mu)R_b = 0, \quad (8)$$

Решая совместно уравнения (5), (8), и учитывая вес цилиндра, получаем реакцию нижнего основания:

$$R_o = \frac{(1+\mu)P}{\frac{H}{r} + (1+\mu)} = \frac{\gamma \pi r^2 H}{1 + \frac{H}{r(1+\mu)}} = \frac{\gamma \pi r^2}{\frac{1}{H} + \frac{1}{r(1+\mu)}}. \quad (9)$$

Разделив (9) на площадь основания, получаем нелинейную зависимость от глубины нормального напряжения, действующего в основании цилиндра:

$$\sigma(H) = \frac{\gamma}{\frac{1}{H} + \frac{1}{r(1+\mu)}}. \quad (10)$$

Как видно, нормальное напряжение в массиве пород нелинейно, по гиперболической зависимости увеличивается с ростом глубины (H) и в пределе равняется гидростатическому давлению только при радиусе цилиндра равном бесконечности, то есть, когда отсутствуют связи с боковыми породами:

$$\sigma = \gamma H n p u r \rightarrow \infty. \quad (11)$$

В частном случае, при равенстве радиуса цилиндра глубине ($r=H$), из (10), получается зависимость нормального напряжения в виде:

$$\sigma = \frac{\gamma H(1+\mu)}{(2+\mu)}. \quad (12)$$

Как видно из (10) и (12), нормальное напряжение в массиве пород, не подверженного влиянию горных работ, всегда меньше гидростатического давления, что и требовалось доказать.

Из (6) и (7) также следует:

$$\sigma = 2(1+\mu)\tau, \quad (13)$$

откуда касательные напряжения равны:

$$\tau(H) = \frac{\sigma(H)}{2(1+\mu)} = \frac{0,5\gamma}{\frac{(1+\mu)}{H} + \frac{1}{r}}. \quad (14)$$

Таким образом, теоретически доказано, что нормальные и касательные напряжения в нетронутым массиве горных пород являются нелинейными, гиперболическими функциональными зависимостями от глубины.

В табл. 1 приведены расчетные значения нормальных и касательных напряжений в зависимости от глубины для порфирита с плотностью 2520 кг/м^3 [15]. Для сравнения здесь же приведены значения гидростатического давления. Как видно, расчетные теоретические значения нормальных и касательных напряжений во много раз меньше гидростатического давления, которое на глубине 5000 м превосходит предел прочности порфирита на сжатие (рис. 2).

Расчетные значения напряжений в массиве горных пород

| Глубина, м | 0 | 500 | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 | 3500 | 4000 | 4500 | 5000 |
|---|---|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Нормальное напряжение $\sigma(H)$, рассчитанное по (10), МПа | 0 | 7,12 | 9,93 | 11,43 | 12,36 | 13,00 | 13,46 | 13,81 | 14,09 | 14,31 | 14,50 |
| Касательное напряжение $\tau(H)$, рассчитанное по (14), МПа | 0 | 2,74 | 3,82 | 4,40 | 4,75 | 5,00 | 5,18 | 5,31 | 5,42 | 5,50 | 5,58 |
| Гидростатическое давление, $\sigma = \gamma H$, МПа | 0 | 12,6 | 25,2 | 37,8 | 50,4 | 63 | 75,6 | 88,2 | 100,8 | 113,4 | 126 |

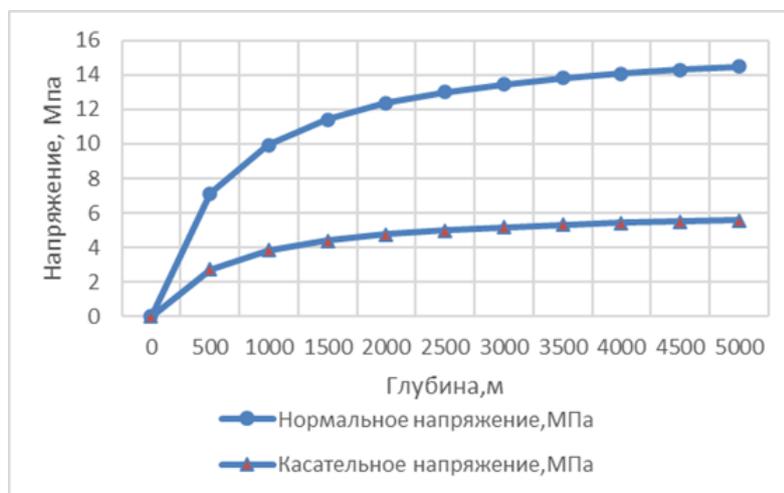


Рис. 2. Гиперболические зависимости от глубины нормальных и касательных напряжений в массиве пород

С ростом глубины расхождение между линейной зависимостью гидростатическим давлением и гиперболической зависимостью нормального напряжения в массиве пород существенно возрастает (рис. 3).

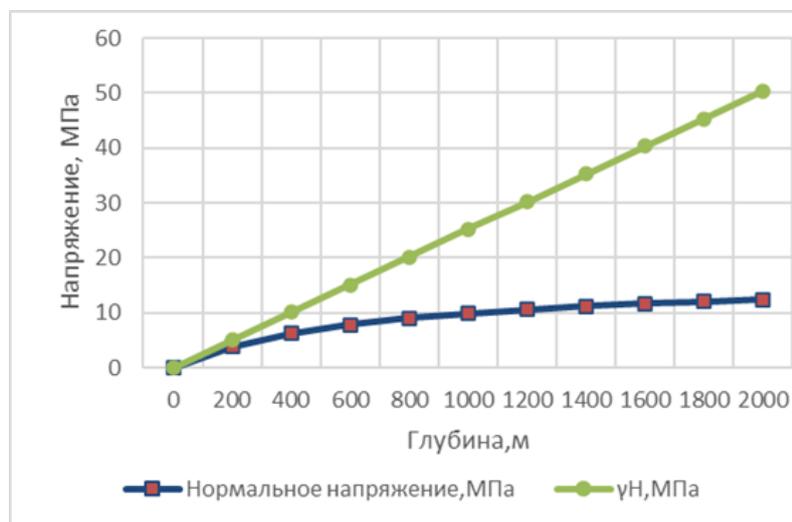


Рис. 3. Линейная и гиперболическая зависимости напряжений в массиве пород от глубины

Из (10) также видно, что нормальное напряжение в массиве пород стремится к гидростатическому (γH) только в пределе при радиусе основания цилиндра, стремящемся к бесконечности ($r \rightarrow \infty$) (рис. 4). В этом случае связь боковой поверхности цилиндра с породами отсутствует ввиду отсутствия самих боковых пород, опорой цилиндра является только нижнее основание, то есть мы приходим в этом случае к нормальному напряжению ($\sigma = \gamma H$), как и в рассмотренном ранее случае, когда цилиндр находится на земной поверхности.

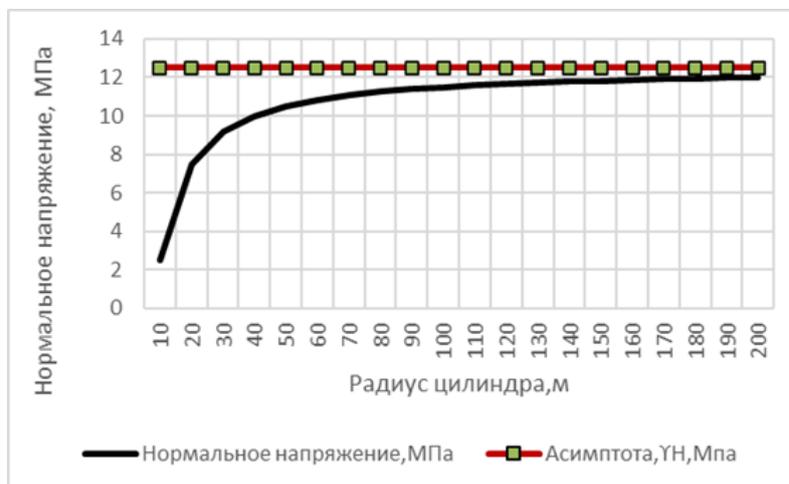


Рис. 4. Асимптотическая зависимость от размера цилиндра нормального напряжения в массиве пород на глубине 500 м в естественном состоянии

Однако, фактически, площадь, на которой измеряется напряжение в горных породах, всегда имеет конечные размеры, сопоставимые с размерами выработок. Поэтому радиус цилиндра в (10) ограничен, например, шириной штрека, в котором проводятся измерения.

Напряжение между слоями цилиндра, вызванное весом вышележащих слоев, распределено неравномерно – от нулевого значения в верхнем основании, выходящим на земную поверхность, до максимального значения в нижнем основании на глубине (H). Так как цилиндр находится в равновесии, то точно так же неравномерно распределены касательные напряжения и реакция связи с боковыми породами.

Литологический состав земной коры неоднороден. Верхние геологические слои, в которых залегают угольные месторождения, представляют собой пласты осадочных пород (алевролиты, аргиллиты, песчаники и др.) с различными физико-механическими свойствами. Представление о неоднородности метаморфических и магматических пород в Таштагольском месторождении железных руд по [15] дает табл. 2.

Гидростатическое давление в неоднородном массиве горных пород на глубине (H) определяется теперь по формуле:

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i, \quad (15)$$

где γ_i , h_i – соответственно плотность и мощность i -го слоя горных пород; n – количество слоев пород с различными механическими свойствами.

Система уравнений (5), (6) силового равновесия и относительных деформаций сжатия и сдвига неоднородного цилиндра пород выглядит так:

$$\begin{aligned} R_o + R_b - A_o \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i &= 0; \\ \sum_{i=1}^n \Delta L_{oi} - \sum_{i=1}^n \Delta L_{bi} &= \frac{R_o}{A_o} \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{E_{ci}} - \frac{R_b}{A_b} \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{G_i} = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Решение этой системы уравнений приводит в итоге к зависимости нормального напряжения от глубины H , аналогичной формуле (10):

$$\sigma(H) = \frac{\frac{1}{H} \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i}{\left(\frac{1}{H} + \frac{1}{r(1+\mu)}\right)} = \frac{\gamma_{cp}}{\left(\frac{1}{H} + \frac{1}{r(1+\mu)}\right)}, \quad (17)$$

а касательные напряжения определяются по зависимости от глубины, аналогичной (14):

$$\tau(H) = \frac{\sigma(H)}{2(1+\mu)} = \frac{0,5\gamma_{cp}}{\left(\frac{1+\mu}{H} + \frac{1}{r}\right)}, \quad (18)$$

где γ_{cp} - средневзвешенная по слоям плотность горных пород.

Таблица 2

Геологические данные стратиграфической колонки скважины № 603
Таштагольского месторождения по [16]

| Глубина, м | Тип горной породы | Предел прочности на сжатие, МПа | Предел прочности на растяжение, МПа |
|------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| 430 | Туф трахитового порфира | 164 | 3,8 |
| 510 | Андезитовый порфирит | 162 | 3,9 |
| 603 | Диоритовый порфирит | 152 | 5,2 |
| 750 | Туф трахитового порфира | 109 | 3,4 |
| 800 | Туф трахитового порфира | 188 | 2,6 |
| 900 | Туф трахитового порфира | 188 | 2,6 |
| 1001 | Порфирит | 173 | 4,2 |

Выводы. В отличие от жидкости все горные породы являются твердыми телами и связаны между собой прочной кристаллической решеткой, что необходимо учитывать в геомеханических моделях. Это является причиной существенного отличия напряженно-деформированного состояния массива горных пород под действием собственного веса от применяемых в гидравлике методов расчета гидростатического давления, в основе которых лежит оценка веса столба жидкости при отсутствии в расчетах молекулярных или атомных связей между отдельными слоями жидкости, которые, практически, не оказывают влияния на гидростатическое давление.

Учет связей с боковыми породами позволил теоретически доказать нелинейность изменения с глубиной нормальных и касательных напряжений в массиве горных пород, не подверженных влиянию горных работ. Доказано, что нормальное напряжение в массиве пород нелинейно, по гиперболической зависимости увеличивается с ростом глубины и в пределе равняется гидростатическому давлению только при отсутствии связи с боковыми породами. Таким образом, использование гидростатического давления для задания исходного поля напряжений в массиве пород приводит в дальнейших расчетах к завышенным значениям нормальных и касательных напряжений.

Список литературы

1. Васильев Л.М., Васильев Л.Л. Теоретическое обоснование формирования горизонтальных нормальных напряжений в массиве горных пород // ФТПРПИ. – 2013. – № 2. – С. 81–90.
2. Леонтьев А.В., Макаров А.Б., Тарасов А.Ю. Оценка природного напряженного состояния породного массива на подземном руднике «Нурказган» // ФТПРПИ. – 2013. – № 4. – С. 40–48.
3. Миренков В.Е., Красновский А.А. К вопросу учета линейного изменения поля напряжений нетронутого массива с глубиной в задачах геомеханики // ФТПРПИ. – 2014. – № 3. – С. 26–32.

4. Салганик Р.Л., Мищенко А.А., Федотов А.А. Напряженное состояние в окрестности выработки, пройденной в глубоководном горизонтальном пласте // ФТПРПИ. – 2015. – № 2. – С. 24–35.
5. Серяков В.М. О методе расчета напряженного состояния горных пород с учетом особенностей их контактного взаимодействия с крепью выработок // ФТПРПИ. – 2016. – № 5. – С. 23–29.
6. О геомеханическом состоянии очистного забоя при отработке угольных пластов на шахте «Полысаевская» в Кузбассе / М. Ройтер, М. Крах, У. Киселинг, Ю. Векслер // ФТПРПИ. – 2017. – №1. – С. 47–52.
7. Градиентная модель локальной дезинтеграции массива пород вокруг выработок глубокого залегания / Ч. Кви, К. Ли, Д. Бай [и др.] // ФТПРПИ. – 2017. – № 1. – С. 25–37.
8. Миреалимов В.М. Максимальная прочность выработки в горном массиве, ослабленном трещинами // ФТПРПИ. – 2019. – № 1. – С. 12–22.
9. Миренков В.Е. Деформирование пород в окрестности выработки на большой глубине пород // ФТПРПИ. – 2021. – № 3. – С. 24–30.
10. Миренков В.Е. Оценка влияния поля напряжений массива и смещений кровли выработки на подготовку разрушения при очистных работах // ФТПРПИ. – 2020. – № 2. – С. 51–58.
11. Чугаев Р.Р. Гидравлика. Техническая механика жидкости. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672с.
12. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 2000. – 559 с.
13. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. – М.: Высшая школа, 1998. – 415 с.
14. Породы горные. Метод определения предела прочности пород при объемном сжатии. ГОСТ 21153.8-88. – М., 1989. – 28 с.
15. Оника С.Г., Кузьмич А.К. Комплексный метод построения паспорта прочности горной породы // Горная механика и машиностроение. – № 2. – 2017. – С. 19-25.
16. Синкевич Н.И. Закономерности изменения предела прочности пород от глубины в зонах влияния горных выработок при отработке рудных месторождений полезных ископаемых на участках неактивных и динамически активных магматических массивов // ГИАБ. – 2009. – С 39-42.

УДК 622.33.013.3

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ДОБЫЧИ УГЛЯ В КУЗБАССЕ

^{1,3}д.т.н. **Ордин А.А.**, ^{1,2}д.т.н. **Федорин В.А.**, ¹д.т.н. **Никольский А.М.**

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

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

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

Аннотация. Приведены статистические данные об объемах добычи угля в Кузбассе подземным и открытым способами в период с 1990 по 2022 гг. Изложены основные проблемы и перспективы развития добычи угля в Кузбассе подземным и открытым способами. Приведены результаты прогнозирования добычи угля в Кузбассе подземным и открытым способами до 2030 г.

Ключевые слова: запасы угля, шахта, разрез, добыча угля, технология, статистика, прогнозирование, тренд.

В мире ведется интенсивная разработка угольных месторождений. В период с 2000 по 2010 год добыча каменного угля в мире выросла более, чем в 1,5 раза и составила в 2010 г. 7,3 млрд. т [1]. Однако, в период с 2010 по 2020 г. темпы роста добычи каменного угля замедляются. В 2020 г. в мире добыто 7,7 млрд т каменного угля, из которых 3,9 млрд. т (50,4%) добывает Китай. На втором месте в мире по добыче каменного угля в 2020 г. находится Индия – 756 млн т (9,8%), Индонезия – 562,5 млн т, США – 484,7 млн т, Австралия – 476,7 млн т, Россия – 401,6 млн т. В 2021 г. в России добыто 438,4 млн т каменного угля [2].

Распоряжением Правительства РФ № 1144р от 11.05.2022 предусматривается «...разработка передовых, инновационных технологий добычи угля подземным и открытым способами, обеспечивающих высокую эффективность и безопасность горных работ, снижающих экологическую нагрузку и риски для жизни населения» [3].

Кузбасс является крупнейшим угольным бассейном в России по разведанным запасам коксующихся и энергетических углей.

Разведанные геологические и балансовые запасы угля в Кузбассе. Прогнозные ресурсы угля категории (P₁+P₂) в Кузбассе, разведанные до глубины 1800 м, оцениваются в 305 млрд. т [4, 5]. Суммарные балансовые запасы каменного угля категории (A+B+C₁+C₂) в Кузбассе на 01.01.2018 г. составляют 66,8 млрд. т, в том числе по степени разведанности категории A+B+C₁ – 51,44 млрд. т и 15,36 млрд. т категории C₂ [4]. Половина общих балансовых запасов угля – 32,4 млрд. т (48,5%), относится к коксующимся маркам, из них особо ценных марок углей (ГЖ, Ж, КЖ, К и ОС) – 14 млрд. т.

Балансовые запасы угля для открытой отработки составляют 17,8 млрд. т (26,6%), для подземной отработки – 49 млрд. т (73,4%) [4] (рис. 1). Распределенный фонд недр – 13,2 млрд. т, в том числе: действующие предприятия – 10,9 млрд. т; строящиеся предприятия – 2,3 млрд. т, нераспределенный фонд – 53,6 млрд.



Рис. 1. Прогнозные и балансовые запасы угля в Кузбассе

Общие балансовые запасы горных отводов действующих предприятий оцениваются в 10,9 млрд. т, в том числе запасы по разрезам 3 млрд. т (27%) и по шахтам – 7,9 млрд. т (73%) [4]. Половина балансовых запасов (56 %) действующих предприятий (6,1 млрд. т) относится к коксующимся маркам, в том числе среди них количество особо ценных марок углей (ГЖ, Ж, КЖ, К и ОС) составляет 2,7 млрд. т.

Балансовые запасы коксующихся углей по действующим шахтам составляют 4,8 млрд. т (60,6%), в том числе особо ценные марки 2,6 млрд. т (33%). Балансовые запасы коксующихся углей по действующим разрезам составляют 1,1 млрд. т. (35%), в том числе особо ценные марки – 0,1 млрд. т (3%).

Следует заметить, что за всю историю развития угольной промышленности, с 1928 по 2021 г., в Кузбассе добыто 9,7 млрд. т угля (рис. 1). При сохранении современного уровня добычи угля в 2022 г. – на шахтах 71,9 млн. т, на разрезах – 151,7 млн. т балансовых запасов угля только на действующих предприятиях хватит на 110 лет при подземном способе и на 20 лет при открытом способе добычи угля.

Из общего количества балансовых запасов 66,8 млрд. т около 80% сосредоточено в пяти угленосных районах: Ерунаковском, Ленинском, Томь-Усинском, Кондомском и Мрасском.

В Кузнецком бассейне на 01.01.2022 года работают 152 угледобывающих и перерабатывающих предприятий, из них 39 шахт, 57 разрезов и 56 обогатительных фабрик и установок [5]. Коксующийся уголь добывают 21 шахта и 8 разрезов, энергетический уголь добывают 18 шахт и 39 разрезов [6].

Динамика изменения объемов добычи угля в Кузбассе подземным и открытым способами с 1990 по 2021 г. приведена на рис. 2. В 2022 г. в Кузбассе добыто 223,6 млн. т угля, в том числе открытым способом 151,7 млн т и подземным способом 71,9 млн т. Начиная с 1997 г. и по 2021 г. объемы добычи угля открытым и подземным способами ежегодно увеличиваются со средними темпами прироста в этот период: открытым способом 2,991 млн. т/год, подземным способом 0,135 млн. т/год. Суммарный ежегодный прирост добычи угля в Кузбассе на шахтах и разрезах, в среднем, оставляет 3,127 млн. т/год.

Исключением является 2020 г., в котором произошло резкое падение добычи угля по сравнению с 2019 г.: открытым способом со 164,402 до 138,987 млн. т, подземным способом – с 86,668 млн. т до 81,74 млн. т. В целом, объем добычи угля в этот год снизился с 250,07 млн. т до 220,7 млн. т (рис. 2). Снижение добычи угля в Кузбассе также произошло в 2022 г. до 222 млн. т, в том числе подземным способом до 71,9 млн. т и открытым способом до 150,18 млн. т. Снижение добычи угля в Кузбассе в последние годы вызвано, в основном, экономическими причинами, в частности, снижением рыночных цен на уголь, падением спроса на уголь за рубежом и вводом санкций в западных странах, препятствующих развитию экономики РФ.

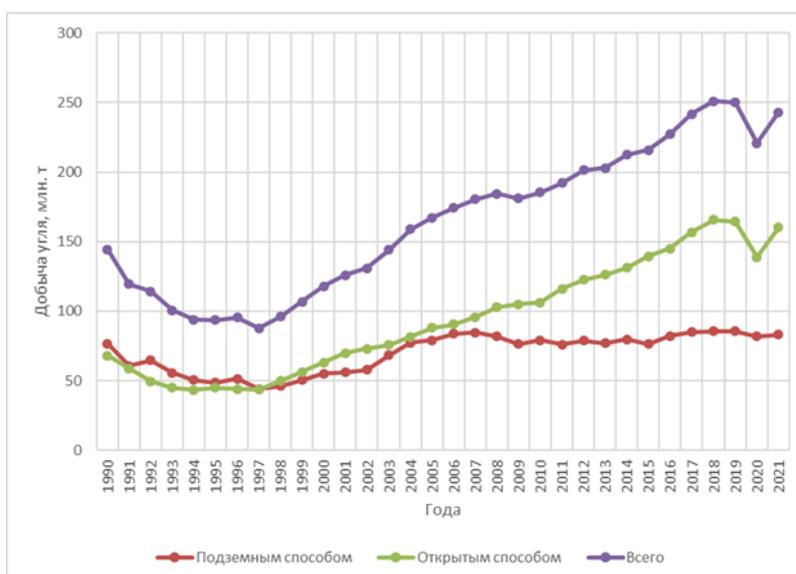


Рис. 2. Динамика добычи угля в Кузбассе открытым и подземным способами

Средняя производственная мощность шахты и разреза в Кузбассе в 2021 г. составила соответственно 2,13 млн. т/год и 2,8 млн. и/год.

На шахтах в Кузбассе разрабатываются, в основном, мощные пологие пласты с углами падения до 18° и вынимаемой мощностью от 1,8 до 3,5 м. Крутопадающие пласты не разрабатываются, все шахты в Прокопьевско-Киселевском районе закрыты. Не разрабатываются тонкие пласты с мощностью до 1,2 м. Для выемки угля применяется, главным образом, длинностолбовая система разработки с обрушением кровли при использовании высокопроизводительных импортных механизированных комплексов.

Наиболее сложными проблемами, которые необходимо решить для дальнейшего развития подземного способа добычи угля в Кузбассе, на наш взгляд, являются:

- высокая природная метаноносность угля и низкая эффективность существующей предварительной и текущей дегазации пластов;
- опасность возникновения взрывов метана и эндогенных пожаров;
- негативные последствия от выборочной отработки наиболее ценных угольных пластов;

- переизмельчение угля при работе шнекового комбайна и, как следствие, увеличение дебита метана из отбитого угля в очистном забое, низкая скорость проведения подготовительных выработок на шахтах.

В Кузбассе в настоящее время эксплуатируются 39 шахт, из которых 22 свержкатегорные шахты с природной метаноносностью пластов более $15 \text{ м}^3/\text{т}$, в том числе 15 шахт, опасных по внезапным выбросам угля и газа. Следует заметить, что на первом месте в мире по безопасности шахт находится Австралия, где законодательством предусмотрен запрет эксплуатации угольных шахт с метаноносностью пластов более $9 \text{ м}^3/\text{т}$ без предварительной дегазации.

В настоящее время в Кузбассе повсеместно практикуется выборочная отработка наиболее благоприятно залегающих пластов, обеспечивающих максимальную рентабельность горных работ. Так, в 2004 г. на шахтах Кузбасса средняя вынимаемая мощность пласта составила 3,3 м, при этом минимальная мощность пласта составила 1,9 м, а максимальная – 8,3 м. До 40% шахт разрабатывали при этом по одному шахтопласту при среднем количестве шахтопластов 2,4.

Выборочная отработка благоприятно залегающих ценных пластов, оправдывая себя на первых порах и создавая владельцам шахт и разрезов сверхприбыли в начальный период эксплуатации, в дальнейшем приводит к негативным последствиям:

- подработке вышележащих пластов и пластов-спутников;
- преждевременной реконструкцией и углубкой шахты на нижние горизонты со всеми ухудшающими показателями (трудностью проветривания, необходимостью проходки дополнительных вскрывающих выработок, увеличение транспортных затрат и т.д.),

Особенно опасной по своим последствиям является подработка на шахтах вышележащих сближенных пластов, по разным причинам отнесенных к некондиционным. При подработке эти пласты полностью или частично разрушаются. Воздух из очистного забоя по трещинам в породах кровли попадает в вышележащие пласты, что приводит к самовозгоранию угля. Отсюда следует, что в нарушенном подработанном пласте при наличии воздушно-метановой смеси появляются все предпосылки для накопления метана до взрывоопасной концентрации и последующего за этим взрыва метана от самовозгорания разрушенного угля.

Происходившие в Кузбассе случаи массового смертельного травматизма шахтеров от взрывов метана свидетельствуют о существовании системных, нерешаемых проблемах в обеспечении безопасности работы на угольных шахтах. В период с 1997 по 2021 гг. на шахтах Кузбасса периодически происходили взрывы метана, в результате которых погибло более 400 шахтеров (рис. 3). Несмотря на принятые меры обеспечения безопасности шахтеров взрывы метана в шахтах продолжают продолжаться. Существующие правила эксплуатации шахт и законодательные акты об охране недр не позволяют избежать техногенных шахтных катастроф. Статистика показывает, что на шахтах РФ, в среднем, каждые три года происходят крупные аварии со смертельным исходом, вызванные взрывами метановоздушной смеси. Так, если в период с 2013 по 2015 гг. существовала успокаивающая тенденция снижения количества смертельных случаев на шахтах с 57 до 11, то уже в 1-ом квартале 2016 г. это количество выросло до 36 (шахта «Северная», г. Воркута). Соответственно в этот период по количеству смертельных случаев на 1 млн. т добычи угля (1,44) Россия сравнялась с Китаем (1,5 в 2010 г.), занимающим 1-е место в мире по аварийности шахт. В этом ряду последнее место по аварийности занимает Австралия 0,03 смертельных случая на 1 млн т угля. На шахтах Кузбасса количество смертельных случаев на 1 млн. т добычи угля за последние 30

лет, в среднем, составляет 0,35, что более чем в 10 раз превышает аварийность на шахтах Австралии (рис. 3, 4).

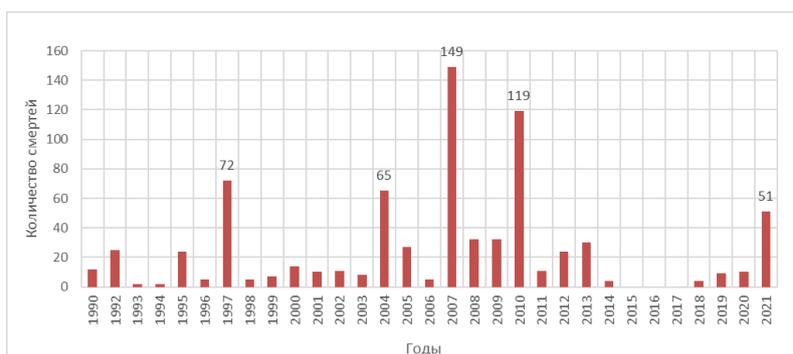


Рис. 3. Статистика смертельных случаев на шахтах в Кузбассе

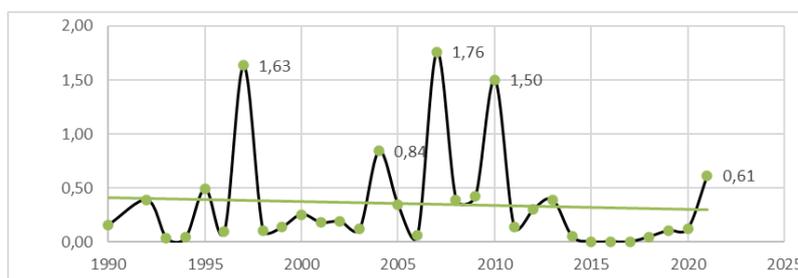


Рис 4. Динамика смертельных случаев на 1 млн т добычи угля на шахтах Кузбасса

Основными причинами возникновения взрывов метана в шахтах, на наш взгляд, являются:

- выборочная отработка наиболее благоприятных пластов в свите с последующим обрушением вышележащих пластов в свите;
- эксплуатация сверхкатегорных шахт с метаноносностью более 15 м³/т без предварительной дегазации;
- отсутствие предварительной и низкая эффективность текущей дегазации метаносных угольных пластов через дегазационные скважины без применения гидроразрыва.

Использование импортных высокопроизводительных шнековых комбайнов типа SL-900. SL-1000 с мощностями электродвигателей более 2500 кВт приводит к переизмельчению отбитого угля и, как следствие, к резкому увеличению дебита метана в очистном забое.

По [4] на многих шахтах РФ выход штыба (0-6 мм) из очистных забоев составляет от 32 до 60%, а доля крупных фракций (более 13 мм) не превышает 40%. Так, например, по данным ситового анализа угля из очистного забоя шахты «Заречная» фракция от 0 до 25 мм составляет 63,9% (с выходом штыба 23,1) и 36,1% составляет выход крупных фракций от 25 до 150 мм.

Длина трехлопастных шнеков или ширина захвата современных очистных комбайнов составляет 0,8 - 1,2 м, количество тангенциальных резцов на одном шнеке составляет до 50, частота вращения шнеков достигает 60 мин⁻¹. Все это в сочетании с применением лемеха для погрузки угольной массы, представляет собой мельницу по дроблению и измельчению угля до мельчайших фракций, вызывая одновременно интенсивное метановыделение и пылеобразование. Почти все шахты РФ являются опасными по взрывчатости угольной пыли, что увеличивает опасность возникновения взрывов пылегазовой смеси в выработках шахты [4].

Открытый способ добычи угля интенсивно развивается в Кузбассе и с 1998 г., объем угля, добытого открытым способом, начинает превышать добычу угля подземным способом (рис. 2). Так, в 2021 г. объем добычи угля на шахтах составил 83 млн т, а на разрезах – 160 млн т.

Достоинствами открытого способа добычи угля являются:

- небольшие капиталовложения на вскрытие угольного месторождения и быстрый ввод разреза в эксплуатацию;
- высокая производительность труда и низкая себестоимость добычи угля;
- низкая аварийность горных работ;
- отсутствие проблем с метановыделением в очистном забое, так как при отработке метаноносных угольных пластов при открытом способе добычи весь метан выделяется в атмосферу.

Однако, открытый способ добычи угля имеет и недостатки, а именно:

- возникают экологические проблемы: уничтожение на больших площадях почвенных земель и водных источников (малых рек и ручьев), самовозгорание угольно-породной массы в отвалах, выделение метана в атмосферу;
- отсутствие полной рекультивации при закрытии разреза, отвалы вскрышных пород не перемещаются в выработанное пространство разреза;
- при достижении предельной глубины, при которой вскрышные работы становятся весьма дорогостоящими, разрез вынужден прекратить свою работу, а оставшиеся запасы угля приходится дорабатывать открыто-подземным или подземным способами.

При открытом способе разработки угольных месторождений тонкие вышележащие пласты с мощностями до 1,5 м в Кузбассе обычно не разрабатываются, а вместе с вскрышными породами попадают в отвалы, где происходит самовозгорание угля со всеми последствиями загрязнения окружающей среды. Так, например, средняя мощность разрабатываемых пластов на разрезах Кузбасса составляет 7,3 м при минимальной мощности 2,7 м.

Для прогнозирования добычи угля в Кузбассе до 2030 г. подземным и открытым способами нами использован регрессионный анализ фактической добычи угля на шахтах и разрезах в период с 1997 по 2022 г.

Оптимистический сценарий. Оптимистический сценарий предусматривает рост спроса на кузнецкие угля в России и за рубежом и соответствующее увеличение инвестиций в строительство новых угледобывающих предприятий, ввод новых мощностей и соответствующий рост добычи угля подземным и открытым способами. Этому сценарию соответствуют степенные тренды развития добычи угля (рис. 5). По этому сценарию добыча угля в Кузбассе в 2030 г. по прогнозу составит $264,5 \pm 5,3$ млн. т, в том числе подземным способом $92,7 \pm 4,23$ млн т и открытым способом $171,7 \pm 4,18$ млн. т.

Стабильный сценарий. При стабильном сценарии увеличение добычи угля в Кузбассе подземным и открытым способами предусматривается умеренными темпами, по логарифмическим зависимостям (рис. 6). По стабильному сценарию добыча угля в Кузбассе в 2030 г. по прогнозу составит $246,4 \pm 5,3$ млн т, в том числе подземным способом $89,3 \pm 4,23$ млн. т и открытым способом $157 \pm 4,18$ млн. т.

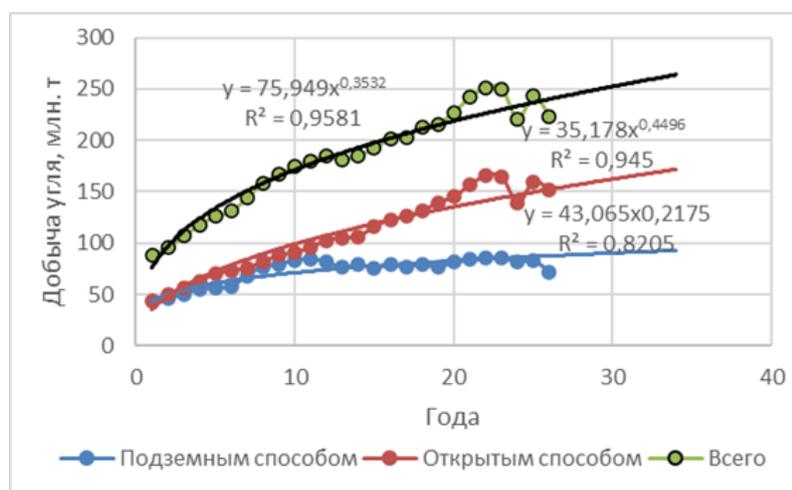


Рис. 5. Оптимистический прогноз развития добычи угля

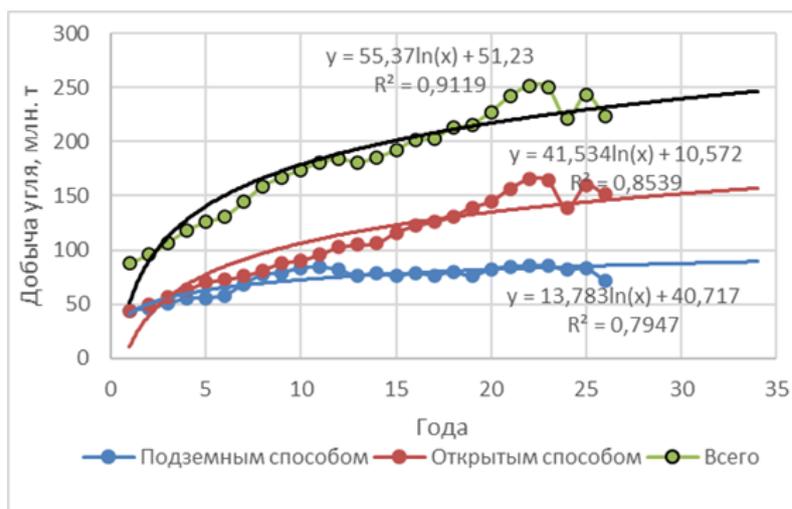


Рис. 6. Стабильный прогноз развития добычи угля

Пессимистический сценарий. Пессимистический сценарий развития добычи угля в Кузбассе связан с негативными тенденциями последних лет, в частности, снижением добычи угля подземным и открытым способами в 2020 и 2022 г., вызванным рядом объективных причин: снижение спроса угля за рубежом и соответствующее уменьшение инвестиций в строительство новых шахт и разрезов, введение санкций в Европе, транспортные и экологические проблемы и др.

На рис. 7 приведены полученные параболические тренды с коэффициентами аппроксимации (от 0,85 до 0,96), которые послужили для прогноза добычи угля до 2030 г.

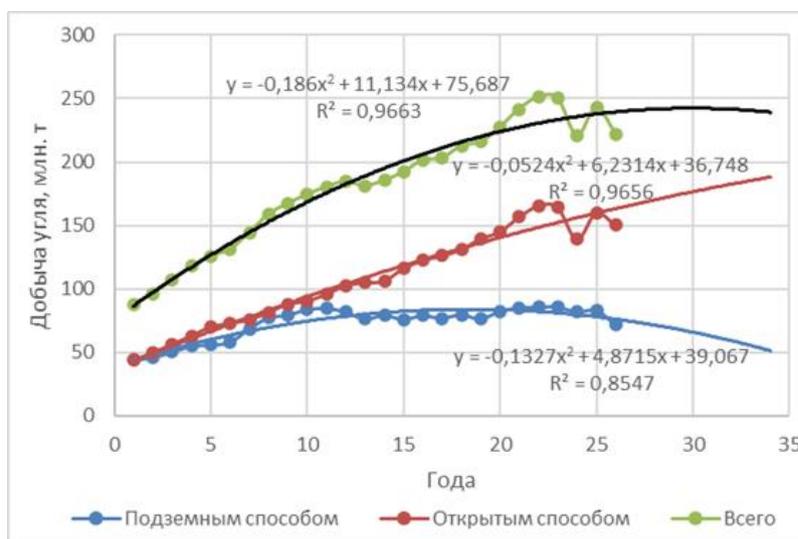


Рис. 7. Пессимистический прогноз развития добычи угля

По этому сценарию добыча угля в Кузбассе в 2030 г. по прогнозу составит $240,5 \pm 5,3$ млн. т, в том числе подземным способом $51,3 \pm 4,23$ млн. т и открытым способом $189,2 \pm 4,18$ млн. т (табл. 1).

Выводы. Основные результаты прогнозирования развития добычи угля в Кузбассе заключаются в следующем. При оптимистическом сценарии (увеличении спроса на кузнецкие угли и инвестиций на строительство новых шахт и разрезов) в 2030 г. объем добычи в Кузбассе составит $264,5 \pm 5,3$ млн. т, в том числе подземным способом $92,7 \pm 4,23$ млн. т и открытым способом $171,7 \pm 4,18$ млн. т, при стабильном сценарии (умеренном увеличении добычи угля, основанном на существующей экономической ситуации) объем добычи угля

в Кузбассе составит 246,4±5,3 млн. т, в том числе подземным способом 89,3±4,23 млн. т и открытым способом 157±4,18 млн. т.

Таблица 1

Прогноз развития добычи угля в Кузбассе

| Годы | Оптимистический прогноз | | | Стабильный прогноз | | | Пессимистический прогноз | | |
|------|--------------------------|-------------------------|---------------|--------------------------|-------------------------|---------------|--------------------------|-------------------------|---------------|
| | Подземный способ, млн. т | Открытый способ, млн. т | Всего, млн. т | Подземный способ, млн. т | Открытый способ, млн. т | Всего, млн. т | Подземный способ, млн. т | Открытый способ, млн. т | Всего, млн. т |
| 2023 | 88,0 | 154,81 | 243,01 | 86,14 | 147,46 | 233,60 | 73,86 | 167,31 | 241,17 |
| 2024 | 88,90 | 157,37 | 246,26 | 86,64 | 148,97 | 235,62 | 71,43 | 170,74 | 242,17 |
| 2025 | 89,58 | 159,87 | 249,45 | 87,13 | 150,43 | 237,56 | 68,74 | 174,06 | 242,80 |
| 2026 | 90,24 | 162,32 | 252,56 | 87,60 | 151,84 | 239,43 | 65,78 | 177,29 | 243,07 |
| 2027 | 90,89 | 164,74 | 255,62 | 88,05 | 153,20 | 241,25 | 62,56 | 180,41 | 242,97 |
| 2028 | 91,52 | 167,10 | 258,62 | 88,49 | 154,52 | 243,00 | 59,07 | 183,44 | 242,51 |
| 2029 | 92,13 | 169,43 | 261,56 | 88,91 | 155,80 | 244,71 | 55,32 | 186,36 | 241,68 |
| 2030 | 92,73 | 171,72 | 264,45 | 89,32 | 157,04 | 246,36 | 51,30 | 189,19 | 240,49 |

При пессимистическом сценарии (ухудшении экономической ситуации, снижением спроса и инвестиций) объем добычи угля в Кузбассе составит 240,5±5,3 млн. т, в том числе подземным способом 51,3±4,23 млн. т и открытым способом 189,2±4,18 млн. т.

Список литературы

1. Плакиткина А.С. Анализ и перспективы развития угольной промышленности основных стран мира, бывшего СССР и России в период до 2030 г. – М., 2013. – 415 с.
2. Петренко И.Е. Итоги работы угольной промышленности России за 2021 г. // Уголь. – № 3. – 2022. – С. 9-23.
3. Распоряжение правительства РФ № 1144р от 11.05.2022 «Об утверждении комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создании новых продуктов глубокой переработки угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения». – М., 2022. – 37 с.
4. Рожков А.А., Писаренко М.В., Шаклейн С.В. Анализ состояния шахтного фонда с учетом риск-факторов, влияющих на промышленную безопасность // Минеральный ресурсы России, экономика и управление. – № 2. – 2022. – С. 41-46.
5. Шаклейн С.В., Писаренко М.В. Состояние сырьевой базы угольной промышленности Кузбасса // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2019. – Вып. 4.– С. 177-186.
6. Угольная отрасль. Министерство угольной промышленности Кузбасса. – URL: <https://murk42.ru/2022//>.
7. Анфёров Б. А., Кузнецова Л. В. Проблемы и перспективы комплексного освоения угольных месторождений Кузбасса. – Кемерово, 2009.
8. Методические рекомендации о порядке дегазации угольных шахт, РД -15-09-2006: приказ Ростехнадзора от 21.08.2006, № 797.
9. Обеспечение метанобезопасности шахт на основе глубокой дегазации угольных пластов при их подготовке к интенсивной разработке / С.В. Сластунов, Е.П. Ютяев, Е.В. Мазаник, А.П. Садов // Уголь. – № 7. – 2019. – С. 42–48.

10. Трубецкой К.Н., Рубан А.Д., Забурдяев В.С. Особенности метановыделения в высокопроизводительных угольных шахтах // ФТПРПИ. – 2011. – № 4. – С. 76-85.
11. Рубан А.Д., Забурдяев В.С. Оценка эффективности дегазации разрабатываемых угольных пластов / Уголь. – № 8. – 2010. – С. 8-10.
12. Ордин А.А., Никольский А.М. О необходимости изменения горного законодательства и нормативных актов для предотвращения взрывов метана на угольных шахтах России // Уголь. – № 6. – 2016. – С. 38-41.

УДК 622.271; 622.233; 622.235

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ВЫСОКОТОЧНОГО НАВИГАЦИОННОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БУРОВЫХ СТАНКОВ

Федченко Д.В., Королев М.К., д.э.н. Никитенко С.М.

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

Аннотация. Горнодобывающие предприятия в настоящее время испытывают большой прирост объемов добычи, в связи с чем повышается необходимость в увеличении количества буровзрывных работ. Данная статья освещает вопрос использования новых технических и технологических решений в отечественной и зарубежной практике, позволяющих снизить затраты на ведение буровзрывных работ за счет применения систем высокоточного навигационного позиционирования буровых станков. Авторами проведен анализ технического и технологического оснащения современных систем, а также анализ патентных семейств, относящихся к системам и способам позиционирования при бурении скважин.

Ключевые слова: буровзрывные работы, открытые горные работы, буровые станки, навигационное оборудование, высокоточное позиционирование, параметры буровзрывных работ, патентная аналитика.

В настоящее время горнодобывающие предприятия испытывают большой прирост производственных объемов. Буровзрывные работы (БВР) – это одна из главных частей технологического процесса добычи полезных ископаемых, особенно при открытом способе. Доля затрат на БВР в себестоимости добычи полезных ископаемых для некоторых горнодобывающих компаний достигает 30% и более [1].

Производимые буровые работы, как начальный этап БВР, оказывают колоссальное влияние на количественные, качественные и стоимостные показатели добытого сырья, являясь фундаментальным процессом для экономической стабильности любого предприятия. БВР также оказывают большой эффект на постоянно увеличивающийся фактор сейсмической активности, провоцируя появление все большего количества сейсмособытий [2 – 5].

Одним из путей быстрого повышения эффективности и безопасности современного горного производства является внедрение новейших технологий высокоточного позиционирования буровых станков. В данной статье рассмотрены как отечественные, так и зарубежные передовые технологии высокоточного позиционирования, выделены основные различия и даны оценки эффективности.

Не секрет, что используемые в настоящее время в отечественных горнодобывающих компаниях технологии ведения БВР характеризуются большой трудоемкостью. Это обусловлено необходимостью получения и выдачи больших объемов оперативной информации для процессов проектирования и выполнения БВР. Эта информация имеет разнородный характер и требует постоянного взаимодействия различных производственных служб: маркшейдерской (координаты следов взрывных скважин вышележащих блоков, геометрии

предохранительных валов и неподобренных развалов породы от предыдущих взрывов, данные о фактическом местоположении бровок уступов, высотных отметках площадок и т.д.), геологической (данные о пластах рудных тел и свойствах горных пород), производственной (последовательность и направления развития горных работ, местоположение объектов горного оборудования и инфраструктуры).

В настоящее время в России системы точного позиционирования и управления карьерными буровыми станками в основном представлены продукцией компаний: ProVision® Drill компании Modular Mining Systems, Inc. (США), КОБУС® компании Blast Maker (Кыргызстан), mineAPS® Drill компании Wenco Mining Systems (Канада), Open Pit – Drill Management System компании Rockma (Швеция). Из отечественных аналогов отметим широко применяемая система VG Drill от группы компаний Цифра, и набирающую популярность систему DrillManager от компании RIT automation.

Все из вышеперечисленных высокоточных систем ставят перед собой схожие по формулировке задачи. Установленная система высокоточного позиционирования позволяет машинисту бурового станка с точностью определить местонахождение проектной скважины (погрешность до 10 см), произвести бурение в полном соответствии с проектом на буровые работы. Кроме того, проектная и фактическая глубина бурения отображается как в навигационном приемном оборудовании в кабине машиниста бурового станка, так и через специальную программу в мониторе инженера по буровзрывным работам. Это дает возможность в любое время суток дистанционно по сети «Wi-Fi» получать информацию по фактическим параметрам бурения в режиме реального времени [6].

При производстве буровых работ критическим моментом является расхождение фактически забуренных скважин с принятым в работу проектом на бурение. Впоследствии, даже незначительные, на первый взгляд, расхождения могут крупно влиять на увеличение негативных последствий проведения буровзрывных работ, в свою очередь влияющих на увеличение техногенной сейсмичности в горном массиве [7].

Рассмотренные в статье системы высокоточного позиционирования обязуются минимизировать данные расхождения, за счет максимального упрощения позиционирования отдельных скважин на площадке, принятой под бурения, а также автоматизации отдельных производственных процессов бурения.

Система VG Drill от группы компаний «Цифра» состоит из телеметрических датчиков, бортового компьютера, монитора, программного обеспечения, базы данных, дополнительного оборудования. Программа применяет вывод маркшейдерской съемки ситуационного плана предприятия в реальном времени, с постоянной возможностью обновления и актуализации данных. Это помогает хорошо ориентироваться на плане горных работ (рис. 1).

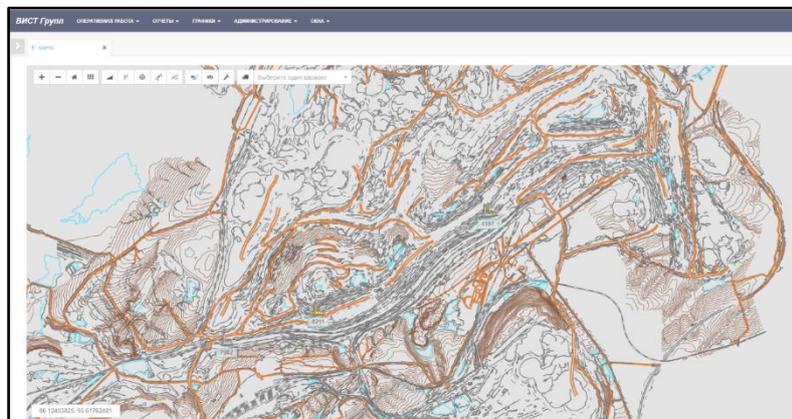


Рис. 1. Рабочая область с фактическим отображением станка

Также данная система оснащена выводом графика телеметрии буримых пород. Сущность телеметрии заключается в преобразовании измеряемой величины (или величин) в

информационный сигнал, пригодный для передачи по каналу связи, передачи и приёма информации, декодирования, преобразования и регистрации на приёмной стороне телеметрической информации с объекта. Таким образом, при разработке проекта на массовый взрыв мы имеем полное представление о качестве и крепости обуриваемых пород, с точностью до 1 погонного метра каждой скважины. Однако при интерпретации данных графиков в более удобный и визуально понятный вид трехмерной модели, зачастую приходится использовать сторонние программы, что неизменно замедляет процесс (рис. 2, 3). В данном случае цветовые индикации показывают крепость пород при бурении, на каждой отдельной скважине.

Для исключения возможности выхода негабаритных кусков горной массы необходимо принять меры по увеличению зарядов по данному блоку, либо изменению параметров бурения.

Выгрузка данных за большой период времени демонстрирует все скважины, забуренные станком за необходимый период (рис. 4).

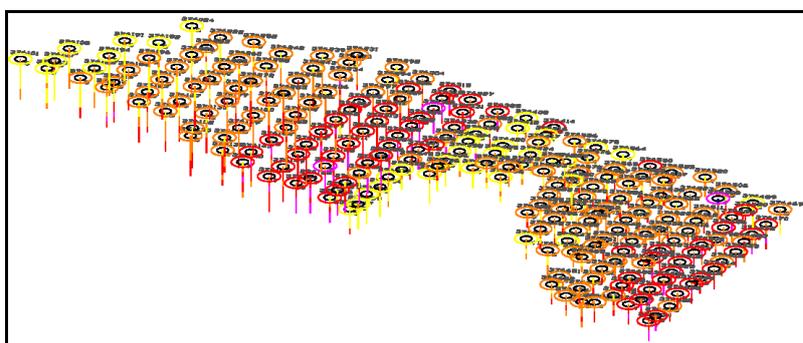


Рис. 2. Трехмерная модель, полученных данных телеметрии: обуриваемый блок содержит как мягкие (желтый), так и крепкие породы (синий).

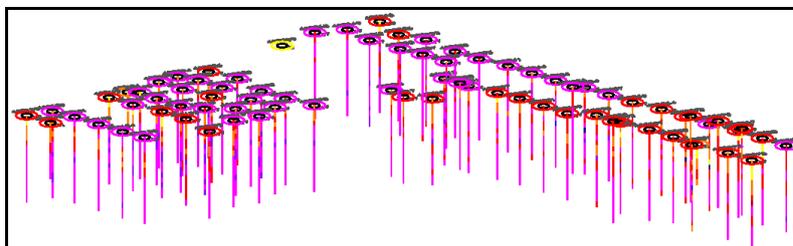


Рис. 3. Трехмерная модель полученных данных телеметрии: обуриваемый блок содержит породы повышенной крепости (фиолетовый)

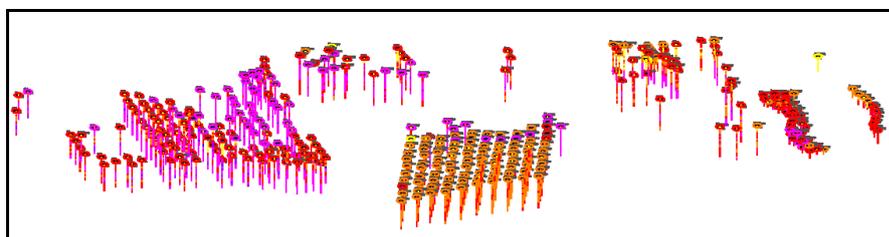


Рис. 4. Выгрузка данных за большой период времени

Система DrillManager также состоит из телеметрических датчиков, бортового компьютера, монитора, программного обеспечения, базы данных, дополнительного оборудования.

Принцип работы. Специалист отдела БВР составляет проект обуривания уступа. После чего через систему связи на карьере план попадает в бортовой компьютер и выводится на монитор оператора бурового станка.

На дисплее оператор видит электронный план обустройства с заданной сеткой скважин, точное местоположение бурового станка относительно скважин и других станков на блоке. Используя фактическое отображение бурового инструмента относительно координат проектной скважины, оператор легко позиционирует шарошку над устьем будущей скважины.

При бурении скважины на дисплее оператора отображаются и передаются в базу данных следующие параметры бурения скважины: проектные и фактические азимут и угол наклона скважины, плановая и фактическая глубина скважины, скорость вращения бурового инструмента, давление на забой, момент вращения, давление воздуха в скважине, а также плановое и фактическое время бурения.

Различие данной системы от системы VG Drill группы компаний Цифра заключается в графическом выводе online карт, на которые накладываются загруженные проекты на бурение скважин, а также в режиме реального времени показывается процесс бурения каждого отдельного блока и каждого станка (рис. 5, 6).

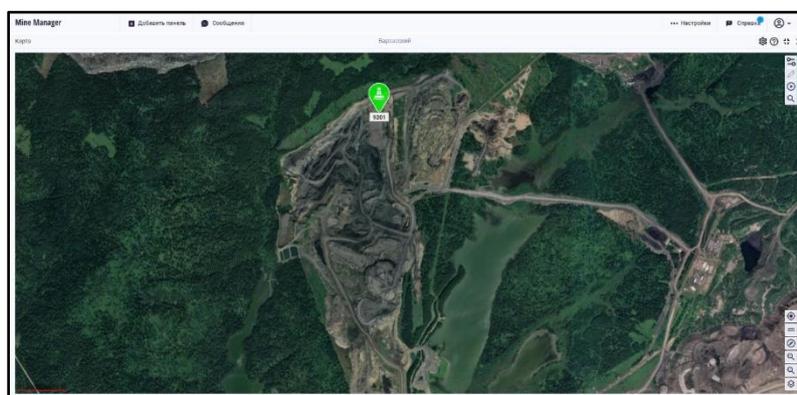


Рис. 5. Рабочая область с фактическим отображением станка



Рис. 6. Информация, получаемая с буровой установки

Данная система также оснащена выводом графика телеметрии буримых пород. Однако проблема с быстрой и точной интерпретацией данных графиков в более удобный и визуально понятный вид трехмерной модели также, как и в программе VG Drill, остается нерешенной.

С целью выявления тенденций развития систем позиционирования буровых установок была проведена патентная аналитика данной области, основанная на анализе патентных семейств, относящихся к системам и способам позиционирования при бурении скважин, появившихся за последние 20 лет. Сбор патентной информации был проведен в аналитической системе Orbit Intelligence, анализируемая патентная коллекция, состоящая из 228 патентных семейств, актуальна на 01.01.2023г.

Линия «Технологии», основанная на динамике появления патентных семейств по датам их первых приоритетов, имеет тенденцию роста за исследуемый период, ускорившийся начиная с 2018 года (рис. 7).

Линия «Патенты» основана на количестве патентов, полученных за исследуемый период, по датам получения патентов. Линия «Публикации» отображает общее количество публикаций (в виде заявок на патенты и полученных патентов) за отчетный период. Значительная разница между количеством появившихся технологий и числом публикаций за отчетный период свидетельствует об активной патентной активности, направленной на экспорт технологий. При этом разница между количеством публикаций и количеством полученных патентов свидетельствует о трудностях, возникающих при патентовании за рубежом новых технологий в сфере систем позиционирования буровых установок.

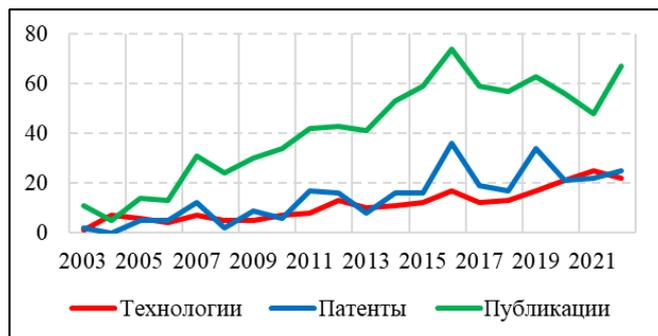


Рис. 7. Динамика патентной активности

Исходя из структуры правовых статусов патентных семейств, можно отметить, что 70% патентных семейств являются «живыми», т.е. обладающие как минимум 1 действующим патентом или заявкой, находящейся на рассмотрении (рис. 8 а). Это означает, что создаваемые и патентуемые технологии в анализируемой области являются актуальными с коммерческой точки зрения и, в совокупности с анализом динамики, можно утверждать о перспективности проведения разработок и инвестирования в системы позиционирования буровых установок. Прекратившие свое действие патентные семейства относятся к замещаемым более современными аналогами технологиям, а их доля, учитывая динамику развития области, является несущественной.

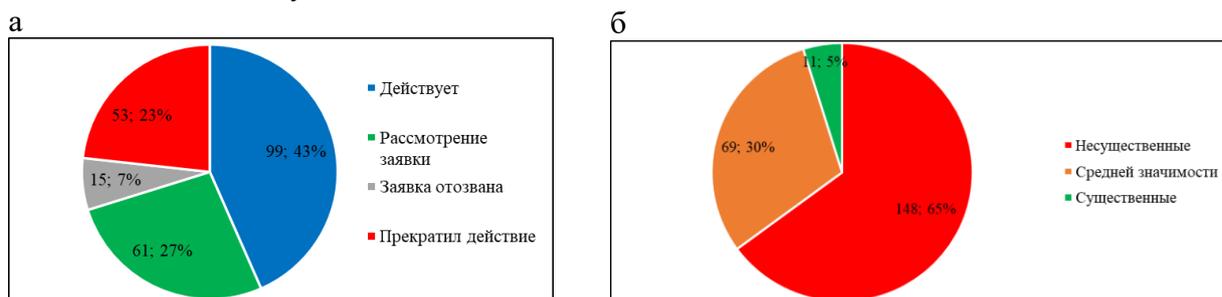


Рис. 8. Структура патентной коллекции: а – по правовому статусу патентных семейств; б – по силе патента

Структура патентной коллекции по силе патента (показатели, рассчитываемого в патентно-информационной системе Orbit Intelligence), отображает структуру технологий исследуемой области по их существенности (рис. 8 б). К группе «Несущественные» отнесены патентные семейства с силой патента от 0 до 2; к группе «Средней значимости» - от 2 до 4; к группе «Существенные» - от 4 и выше. Примерно две трети от всех технологий, вошедших в патентную коллекцию, обладают низким показателем силы патента. К этой группе относятся китайские технологии, охраняемые исключительно на внутреннем рынке, прекратившие действие патентные семейства и технологии, находящиеся на этапе рассмотрения

первой заявки. Права собственности на большинство существенных технологий принадлежат компании Sandvik.

Из представленной тепловой карты патентования можно выделить китайский подход к патентованию, где большинство технологий получает правовую охрану исключительно на китайском рынке (рис. 9). Японские и Западные правообладатели активно экспортируют свои технологии, что видно на тепловой карте. Наиболее существенным игроком на рынке систем позиционирования является шведская компания Sandvik, технологии которой получили широкое распространение по всему миру, в т.ч. и на российском рынке, где доминируют исключительно зарубежные правообладатели.

| min = 1 max = 8 | | Страны патентования | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|--|---------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | CN | US | CA | EP | AU | NO | MX | BR | DE | GB | JP | RU | SE | ZA | CL | FI | FR | CH | TR | IE |
| Правообладатели | China Railway | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | SANDVIK | 4 | 3 | 5 | 5 | 6 | 4 | 0 | 0 | 2 | 0 | 4 | 2 | 4 | 2 | 1 | 4 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| | SCHLUMBERGER | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Baker Hughes | 0 | 4 | 1 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | NATIONAL UNIVERSITY OF DEFENSE TECHNOLOGY | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | CHINA PETROLEUM & CHEMICAL | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | CHINA UNIVERSITY OF MINING & TECHNOLOGY | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Epiroc | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| | NATIONAL OILWELL VARCO | 0 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | SHANDONG UNIVERSITY | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 63653 FORCES PLA | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ATLAS COPCO ROCK DRILLS | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | BEIJING XINNENGZHENGYUAN INTELLIGENT EQUIPME | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | CCTEG | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | CHINA NATIONAL PETROLEUM | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM EAST CHINA | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | CNOOC - CHINA NATIONAL OFFSHORE OIL | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | China National Petroleum Corporation | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | GUANGZHOU MARINE GEOLOGICAL SURVEY | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | LANDMARK GRAPHICS | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | NOBLE DRILLING | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | REELWELL | 0 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 0 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Рис. 9. Тепловая карта патентования по странам

Выводы. Таким образом, системы позиционирования буровых установок являются активно развивающимся и перспективным технологическим направлением. Доминирующим на рынке участником является шведская компания Sandvik, обладающая правами интеллектуальной собственности на большинство самых востребованных технологий.

Основываясь на техническом и технологическом анализе современных систем высокоточного позиционирования, а также ввиду проведенного патентного анализа можно выделить общие позитивные черты систем высокоточного навигационного позиционирования:

- повышение точности бурения по сравнению с ручной разметкой за счет высокоточного наведения на скважину;
- сокращение издержек БВР благодаря снижению объемов повторного бурения;
- увеличение отказоустойчивости оборудования за счет контроля технических параметров;
- повышение производительности буровых станков за счет контроля простоев и параметров бурения в реальном времени;
- повышение эффективности работы экскаваторов и дробильных станций за счет более качественной фрагментации развала.

В качестве рекомендаций предлагается внедрение дополнительных функций интерпретации данных отчетов по телеметрии в более удобном и быстром формате, а также оснащение станков дополнительными датчиками вращения и температуры для дополнительного контроля при бурении скважин вблизи зон эндогенных пожаров.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (Соглашение № 22–28–20513).

Список литературы

1. Мачулов В.Н. Системы точного управления и позиционирования буровых станков – решение для повышения производительности и эффективности ведения буровзрывных работ на карьерах // Горная Промышленность. – 2014. – №6 (118). – С. 66.

2. Яковлев Д.В., Лазаревич Т.И., Цирель С.В. Природно-техногенная сейсмоактивность Кузбасса. – Л.: РАН Сибирское отделение, 2013.
3. Лазаревич Т.И., Поляков А.Н. Результаты исследования техногенной сейсмичности Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – №1. – С.151-153.
4. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В. Бачатское техногенное землетрясение 18 июня 2013 г. с $M_L=6.1$, $I_0=7$ (Кузбасс) // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – №1. – Т.2. – С 48-61.
5. Клабуков И.В., Тур К.А. Землетрясения в Кузбассе и их причины // Россия молодая : материалы X всерос. науч. - практ. конф. молодых ученых, 24-27 апреля, 2018г. – Кемерово, 2018.
6. Инновационные экологические и безопасные технологии ведения взрывных работ на предприятиях с открытой добычей угля холдинговой компании «СДС-Уголь» / Л.В. Рыбак, В.И. Ефимов, Т.В. Корчагина, А.Н. Леонов // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2019. – № 1. – С. 30-42.
7. Федченко Д.В., Еременко А.А. Техногенная сейсмичность при массовых взрывах в условиях угольных разрезов // Современная геодинамика и проблемы сейсмичности Дальнего Востока и Восточной Сибири. – 2021. – № 1. – С. 58.

УДК 622.233

ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНАЯ ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН

к.т.н. **Абрамов И.Л.**

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

Аннотация. Описан опыт применения технологии проходки вертикальных выработок с электроимпульсным разрушением горных пород и промывкой раствором на углеводородной основе и рассмотрены перспективы ее развития.

Ключевые слова: электроимпульсная технология разрушения горных пород, шахтный ствол, буровая установка, раствор на углеводородной основе.

Электроимпульсная технология разрушения горных пород предложена авторским коллективом под руководством проф. Воробьева А.А. [1]. Практическое применение способа направлено на создание технологий и технических средств для проходки шахтных стволов и бурения скважин, резания горных пород, поверхностной обработки камня, дробления и измельчения руд, утилизации бетонных и железобетонных изделий [2-4].

Актуальность применения технологии в горном деле определяется необходимостью совершенствования традиционных методов механического бурения. Электроимпульсный (ЭИ) способ бурения скважин основан на разрушении горных пород при их электрическом импульсном пробое. Достоинства ЭИ разрушения горных пород определяются следующими особенностями способа: электрическая энергия непосредственно подводится к забою без промежуточных преобразований; эффективность разрушения определяется электрофизическими свойствами горных пород; разрушение породы происходит под действием динамических усилий растяжения; разрушающим горную породу рабочим органом является электрический разряд в твердом теле; отсутствие вращения снаряда; возможность концентрации больших мощностей на забое скважины; высокие скорости бурения; возможности автоматизации процесса бурения; создание безлюдной технологии проходки шахтных стволов.

Параметром, определяющим эффективность разрушения горных пород при электроимпульсной проходке шахтных стволов и бурении скважин большого диаметра, является величина расстояния между электродами бурового наконечника. С этим параметром связаны основные характеристики ЭИ проходки: энергия импульса, производительность отбойки, гранулометрический состав отбитой горной породы и др. С увеличением межэлектродного расстояния снижается энергоемкость отбойки, повышается производительность, возрастает скорость проходки, что определяет перспективность использования субметровых (0,5...0,8 м) межэлектродных промежутков в ЭИ технологиях.

Идея использования субметровых межэлектродных промежутков в ЭИ технологии шахтного строительства реализована на практике совместно Институтом угля СО РАН и проектно - шахтопроходческим объединением «Спецшахтобурение» (г. Донецк). Выполнены работы по проектированию, разработке, научному сопровождению и испытаниям полупромышленной установки для проходки вертикальных выработок «Комплекс ЭИ 2.08» [6, 7]. Технические характеристики комплекса: диаметр выработки в проходке – 2,08; глубина проходки – 350 м; установленная мощность – 1178 кВт; расстояние между электродами – 0,53 м; амплитуда напряжения – 790 кВ; энергия импульса – 60 кДж; частота импульсов – 2 с^{-1} ; масса основного оборудования – 406 т; крепость пород – 8-12; машинная скорость проходки – 8,6 м/час; энергоемкость проходки – 30 кВт ч/м^3 (с промывкой эрлифтом); проходка на буровой наконечник – 1000 м.

Эксперимент по проходке вентиляционного шахтного ствола электроимпульсным способом проведен на шахте «Объединенная» ПО «Торезантрацит» [5]. Комплекс ЭИ 2.08 смонтирован на базе буровой установки Уралмаш 4Э-76 с электрическим приводом и грузоподъемностью до 200 т. На РМЗ шахтопроходческого объединения «Спецшахтобурение» изготовлено оригинальное оборудование комплекса: проходческий снаряд с телескопическим пульпопроводом, системой жидкой изоляции и буровым наконечником; растворный пункт для подготовки диэлектрического бурового раствора на углеводородной основе; система промывки с грохотами для очистки промывочной жидкости от горной породы и дегазации бурового раствора. Генератор импульсов высокого напряжения разработан и смонтирован специалистами ИУ СО РАН.

При испытаниях Комплекса ЭИ 2,08 использовалась промывочная жидкость на углеводородной основе - РУО разработанная с использованием известково-битумного раствора (ИБР) с удельным электросопротивлением $8,6 \cdot 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, диэлектрической проницаемостью 3,01, пробивная напряженность электрического поля при фронте импульса $0,22 \text{ мкс} - 145,8 \text{ кВ/см}$. Плотность раствора 1015 кг/м^3 . Раствор представляет собой многокомпонентную дисперсную систему, состоящую из дисперсионной среды (дизельное топливо) и дисперсной фазы (высокоокисленный битум и негашеная молотая известь с содержанием активных СаО, MgO), воды (в связанном состоянии) и поверхностно-активных веществ. По агрегативному состоянию и механическим свойствам РУО является связнодисперсной системой и имеет сплошную пространственную структуру, обладающую структурно-механическими свойствами: вязкостью, пластичностью и прочностью. При механическом воздействии (перемешивании) пространственная структура разрушается. В состоянии покоя структура восстанавливается. Раствор приготовлен на рабочей площадке комплекса методом встречных струй в режиме кавитации с использованием двух углесосов 12У10А и Н-900/90 производительностью по $900 \text{ м}^3/\text{час}$ каждый. Производительность приготовления раствора достигала $30...40 \text{ м}^3$ за 12 часов. Планируемые объемы промывочной жидкости в системе промывки: от 500 до 2000 м^3 при длине пульпопровода 100 - 350 м. Породы забоя при проведении испытаний представлены алевролитовым сланцем крепостью VII по СУСН-V-84. Коэффициент крепости по Протодяконову – 6,5. Электросопротивление (удельное) пород, измеренное в процессе испытаний, составило $8,2 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

После монтажа, отладки оборудования, приготовления промывочной жидкости и получения разрешительной документации были проведены испытания. Испытания комплекса ЭИ 2,08 проводились в интервале глубин 34-35 м.

Всего за время испытаний на забой было подано 83800 импульсов. Это соответствует пятидесяти часам непрерывной работы импульсного генератора. Частота срабатывания генератора задавалась в диапазоне от 4...5 импульсов в минуту до 90...100 импульсов в минуту. Максимальная разность потенциалов (разность амплитуд контраполярных импульсов) на выходе генератора при отключенном проходческом снаряде составляла 900...950 кВ. Энергия в импульсе - 60 кДж.

Установлена избирательная эффективность срабатывания отдельных импульсов. В результате работы этих импульсов системой промывки подняты на поверхность куски отбитой породы, линейные размеры которых соизмеримы с расстоянием в свету между электродами наконечника.

В рамках эксперимента проведены исследования процессов ЭИ разрушения горных пород, установлены закономерности ЭИ разрушения, исследованы реологические и электрофизические свойства промывочных растворов на углеводородной основе, разработана технология их приготовления, разработана технология и созданы технические средства проходки шахтных стволов с электроимпульсным разрушением горных пород на субметровых электродных промежутках.

На основе анализа результатов эксперимента получено подтверждение технической и технологической возможности электроимпульсной проходки вертикальных горных выработок, ЭИ отбойка осуществлялась крупным сколом, крупность отдельных кусков достигала 350 мм.

Доказана эффективность работы эрлифта при промывке скважины высокоструктурированным раствором на углеводородной основе и работоспособность систем комплекса. Установлена возможность применения углеводородной суспензии в эрлифтной системе промывки и определены параметры, обеспечивающие устойчивую работу установки: расход сжатого воздуха, количество компрессоров, оптимальный режим работы.

Исследована возможность применения электроимпульсной технологии для проходки шахтных стволов и определены пути ее совершенствования и развития: развитие схемы размещения генератора импульсных напряжений на поверхности с передачей энергии на забой и разработка технологий комбайновой проходки с размещением генератора разрушающих импульсов непосредственно на забое.

Развитие технологии ЭИ проходки необходимо направить на совершенствование методик расчета параметров разрушения и характеристик высоковольтного электрооборудования, разработку и расчёт бурового наконечника, определение параметров системы промывки, конструкторскую проработку деталей и узлов, расчет и испытание изоляции тоководов [8].

Выводы. В процессе подготовки и проведения эксперимента получены ценные научные результаты, отработаны и подтвердили свою эффективность отдельные технические узлы и элементы технологии. Вместе с тем, был выявлен ряд серьезных проблем, требующих проведения дополнительных научных исследований и конструктивной доработки.

Список литературы

1. А.с. 237073 СССР Е21С. Способ бурения электроимпульсными разрядами в породе / А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев, Т.Ю. Могилевская, А.Т. Чепиков (СССР), 1959.
2. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. – СПб.: Наука, 1993. – 276 с.
3. Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2002. – 324 с.
4. Важов В. Ф., Зиновьев Н.Т., Ушаков В.Я. Электроразрядная технология бурения скважин и разрушения железобетонных изделий. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – 311 с.

5. Абрамов И.Л. Электроимпульсная технология разрушения горных пород // Опыт и перспективы наукоемких технологий в угольной промышленности Кузбасса : сб. тр. науч.- техн. конф. – Кемерово: ИУУ СО РАН, 1998. – С. 295-299.

6. Авторский надзор и техническое сопровождение работ с исследованием системы промывки и гидротранспорта отбитой породы при ЭИ проходке ствола экспериментальным комплексом оборудования: отчет о НИР (закл.) / Институт угля СО РАН; рук. Н.Е. Коваленко; исполн. И.Л. Абрамов, В.Н. Кочетков [и др.]. – Кемерово, 1992. – № ГР 01890129272. – Инв. № 02.9.50004351.

7. Техничко-экономическое обоснование на работу «Создание технических средств и технологии электроимпульсной проходки шахтных стволов»: Отчет о НИР/ Институт угля СО АН СССР; рук. Н.Е. Коваленко. – Кемерово, 1989. – № ГР 01890089258. – Инв. № 0295000274040.

8. Абрамов И.Л. Разрушение горных пород электроимпульсным способом в технологиях шахтного строительства // Вестник НЦ ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2018. – № 1. – С. 54-62.

УДК 336.2:622.33

О НАЛОГООБЛОЖЕНИИ ДОБЫЧИ УГЛЯ

Писаренко М.В., Шаклеин С.В.

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

Аннотация. Выполнен критический анализ действующих схем налоговых отчислений за право добычи угля. Отмечено, что налоговые поступления в пересчете на 1 т добычи постоянно отстают от роста цен на угольную продукцию и являются заниженными. Действующие ставки НДС не зависят от условий разработки месторождений, способов добычи и ценности угольной продукции. Увеличение фискальной нагрузки в рамках действующей схемы налогообложения и соблюдение консенсуса между государством и недропользователем предполагает дифференциацию ставки НДС. Для чего предложено ставку налога НДС привязать к цене технологической марки угля (без учета затрат на транспорт до потребителя), перейти на прогрессивную шкалу в зависимости технологической и энергетической ценности углей и способа добычи.

Ключевые слова: НДС, схема налогообложения, уголь, технологическая ценность угля, энергетическая ценность угля, способ добычи, недропользование.

Сырьевой комплекс России оказывает существенное влияние на экономику страны и вносит значимый вклад в формирование консолидированного бюджета страны в виде налоговых поступлений и сборов. Разработка эффективной схемы налогообложения сырьевого сектора является приоритетной задачей, цель которой максимальное изъятие в пользу государства горной ренты, образующейся в результате добычи минерального сырья, и сохранение инвестиционной привлекательности сектора добычи полезных ископаемых.

В основе налогообложения полезных ископаемых лежит теория горной ренты, а совокупность налогов, сборов и платежей, по сути, является формой изъятия рентного дохода, генерируемого в сфере недропользования. Образование горной ренты связано с различием горно-геологических, горнотехнических, климатических и других условий добычи полезных ископаемых и качества сырья, а разница между стоимостью продукции и расходами на добычу и определяет ренту.

Система налогообложения сырьевого сектора в России введена в 1992 году и включала, применительно к углю: разовые платежи при лицензировании, отчисления на

воспроизводство минерально-сырьевой базы и регулярные платежи за право добычи. Регулярные платежи взимались по дифференцированным ставкам, минимальные и максимальные значения которых закреплялись в лицензионных соглашениях и устанавливались с учетом рентообразующих факторов для каждого месторождения индивидуально на основе экспертных оценок в диапазоне от 1 до 3% [2]. Экспертный подход имел ряд негативных факторов, состоящих главным образом в отсутствии методологии определения дифференцированной ставки в зависимости от рентообразующих факторов, субъективности в определении платежей за право добычи.

В 2002 году вводится новая схема налогообложения, которой отменяются отчисления на воспроизводство минерально-сырьевой базы, а вместо дифференцированных платежей за право на добычу, вводится плоский налог, закрепленный в налоговом кодексе гл.26 «Налог на добычу полезных ископаемых (НДПИ)».

С ведением фиксированной ставки НДПИ теряется смысл рентных отношений [3], но унифицируется система налогообложения и упрощается его администрирование. НДПИ считается по адвалорной ставке по углю равной 4%, а объектом налогообложения становится стоимость реализованной товарной продукции.

Практика работы этой схемы налогообложения показала, что несовершенство в законодательстве не исключало реализацию механизмов «оптимизации» налоговых платежей. В частности, использование трансфертных цен на товарную продукцию значимо ниже фактической стоимости их реализации, существенно снижало налоговую базу. Ретроспективный анализ налоговых отчислений свидетельствует о том, что в 2002 г. поступления НДПИ, исчисляемые по адвалорной ставке, сократились на 37,5 % (табл. 1) и в последующие годы постоянно отставали от темпов роста цен на угольную продукцию [4-5].

Таблица 1

Добыча, средняя цена и НДПИ по угледобывающим предприятиям Кузбассу за 2001-2021 г.

| Показатель | 2001 | 2002 | 2008 | 2010 | 2011 | 2017 | 2019 | 2020 | 2021 |
|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| Добыча, млн. т | 127,2 | 131,5 | 183,9 | 185,2 | 192,2 | 247,2 | 251,3 | 221,1 | 243,1 |
| НДПИ, млрд. руб. (руб. на 1 т) [4, 6] | 2,2 (17) | 1,4 (11) | 6,9 (37) | 6,8 (37) | 5,3 (27) | 9,8 (40) | 11,6 (42) | 6,8 (31) | 9,1 (38) |
| Средняя цена угля, руб./т | 281 | 292 | 1291 | 1714 | 1943 | 3220 | 4458 | 3552 | н.д |
| Доля НДПИ в средней цене на уголь, % | 6 | 3,8 | 2,8 | 2,0 | 1,4 | 1,2 | 1,0 | 0,9 | н.д |

С целью совершенствования налогообложения сырьевого сектора с 1 января 2011г. вводится новая схема налогообложения, в которой исчисления налога производятся по фиксированной ставке (руб./т), а налоговой базой является количество добытого полезного ископаемого по чистым угольным пачкам. Налоговая база определяется налогоплательщиком самостоятельно прямым (посредством применения измерительных средств и устройств) или косвенным (расчетно, по данным о содержании добытого полезного ископаемого в извлекаемом из недр минеральном сырье) методами.

Фиксированные базовые налоговые ставки дифференцируются по видам угля: антрацит (47 руб./т), уголь коксующийся (54 руб./т), уголь бурый (11 руб./т) и прочие угли (24 руб./т) (ст.242 НК п.12-15). Для учета волатильности цены угольной продукции, ставка

корректируется на коэффициент-дефлятор, устанавливаемый по каждому виду угля ежеквартально на каждый следующий квартал и публикуемый на сайте Минэкономразвития.

Колебание налоговых ставок за 2010–2022 гг., за счет волатильности угольного рынка, составило: для антрацита 29,0-118,9 руб./т; коксующегося угля – 29,8-105,8 руб./т; прочего – 15-45,6 руб./т.; бурого угля – 10,4-37 руб./т. Наиболее существенные снижения налоговых ставок по всем видам углей наблюдались в последнем квартале 2022 года.

Представленные в таблице данные поступления НДС по угледобывающим предприятиям Кузбасса за 2001-2019 г демонстрирует тенденцию снижения поступлений вплоть до 2017 г. и постоянное их отставание от темпа роста цены угля в пересчете на 1 тонну добычи. Так увеличение НДС в абсолютном выражении в 2017 относительно 2010 г. составил 51%, а относительно 2001 г. – в 2,35 раза. При этом рост цен на товарную продукцию за аналогичный период составил соответственно 1,9 и 11,5 раз, что более чем в четыре раза превышает темп роста поступлений НДС. И как результат доля НДС к средней цене угольной продукции снизилась с 6% в 2001 году до 0,9 % в 2021 году.

В 2022 г. вводятся изменения в определении ставки НДС на коксующийся уголь. Налоговая ставка составляет 15 % от мировой цены на коксующийся австралийский уголь премиум-класса в рублевом эквиваленте. Следует отметить, что австралийский коксующийся уголь премиум-класса является самым дорогим и характеризуется высоким качеством, несколько отличающимся от требований внутреннего рынка, на долю которого приходится около 70% добываемого коксующегося угля. Привязка ставки НДС к мировой цене делает ее зависимой от конъюнктуры мирового рынка и курса доллара и в отдельные периоды становится неоправданно завышенной, что и наблюдалось в марте 2022 года, когда ставка НДС составила 927 руб./т, а в 4 квартале 2022 г. снизилась до 260 руб./т.

Достоинством действующей схемы налогообложения на добычу является простота администрирования и собираемость налога, а недостатком – плоская шкала (налог исчисляется по одной ставке для низкорентабельных и высокорентабельных предприятий); привязка ставки НДС по коксующимся углям к мировой цене самого дорогого угля. При этом, как показал ретроспективный анализ, в целом по отрасли отмечается постоянное отставание поступлений НДС от темпов роста цены угольной продукции и занижение ставки НДС.

Существенным недостатком действующей налоговой схемы является слабая дифференциация налоговых ставок от технологической и стоимостной ценности продукции. В НК ставка НДС зависит от вида углей и выделено четыре вида углей. При этом на два вида углей – коксующиеся и «прочие...» – приходится основной объем добычи (88% от общей добычи по РФ) и 15 технологических марок (ГОСТ 25543-2013). К виду коксующихся углей постановлением Правительства РФ от 20.06.2011 № 486 отнесены марки ГЖО, ГЖ, КЖ, К, КО, КС и ОС, которые представляют различную технологическую ценность для коксовой промышленности и имеют значимо разную цену. Так в среднем разница в цене на внутреннем рынке на концентрат наиболее ценной для коксохимической промышленности коксовой (К) и менее ценной слабоспекающихся (КС) углей составляет более 40%.

Аналогичная картина наблюдается и по виду «прочие...» угли, к которому в НК отнесены следующие технологические марки: Д, ДГ, Г, КСН, ТС, СС, Т, характеризующиеся существенными различиями в качестве и цене. Так разница в цене длиннопламенного (Д) угля и наиболее востребованного слабоспекающегося (СС) угля составляет более 50%. К этому же виду, согласно НК, относится окисленный уголь, которой характеризуется низкой калорийностью и ценой по сравнению с марочными углями. Таким образом, угледобывающие предприятия поставлены в неравные условия: выигрывает то предприятие, которое добывает более ценные марки углей.

Увеличение ставки НДС на добычу угля (предполагается на 380 руб./т) без дифференциации приведет к закрытию ряда предприятий, работающих на пределе прибыльности. Поддержание объемов добычи и сохранение инвестиционной привлекательного

горного бизнеса предполагает совершенствование схемы налогообложения добычи угля с ориентацией на рентный поход.

В рамках действующей налоговой схемы предлагается дифференцировать налоговые отчисления в зависимости от технологической ценности угля, для этого привязать ставку НДС к средней по предыдущему кварталу цене угля на условиях ФАС (без учета затрат на транспортировку до потребителя) по данным ФАС России или «Метал-Экспресс». Учитывая накопленный мировой и отечественный опыт, предлагается использовать прогрессивную шкалу [7] при определении ставки НДС в зависимости от технологической и энергетической ценности угольной продукции [8].

В действующей налоговой схеме отказались от дифференциации налоговых платежей в зависимости способов добычи (открытая и подземная), горно-геологических условий (величины запасов, геологических условий, глубины залегания и т.д.) [4]. Однако затраты на добычу угля открытым способом ниже, чем при подземном способе, поэтому предлагается дифференцировать налоговую ставку в зависимости от способа добычи, увеличив значение ставки для открытого способа добычи на коэффициент, который в первом приближении можно определить по соотношению средней по отрасли себестоимости добычи подземного к открытому способу. Данное соотношение по итогам работы угледобывающих предприятий за 2019 г. составляет 1,17.

Выводы. Ретроспективный анализ налога на добычу угля, показал отставание поступлений НДС от темпа роста цен на угольную продукцию и их значительное снижение в средней цене на 1 т товарной продукции. Действующая налоговая схема не учитывает различия в условиях добычи угля, технологической ценности добываемой продукции и способах добычи.

Увеличение фискальной нагрузки на угледобывающие предприятия и сохранение инвестиционной привлекательности угольной отрасли предполагает совершенствование налоговой схемы исчисления НДС и дифференциацию налоговых отчислений в зависимости от рентаобразующих факторов.

В рамках действующей налоговой схемы предлагается привязать ставки НДС к средней квартальной цене угля на условиях ФАС. При исчислении налога на добычу перейти на прогрессивную шкалу ставки НДС в зависимости от технологической и энергетической ценности товарной продукции [8], а также способа добычи (для открытого способа ставка НДС увеличивается на 17%).

Список литературы

1. Маршавина Л.Я., Анищенко В.А. Актуальные проблемы налогообложения нефтедобывающей отрасли Российской Федерации // Изв. Рос. экон. ун-та им. Г. В. Плеханова. – 2012. – № 3(8). – С. 36–43.
2. Станкус В.М., Шаклеин С.В. Определение размеров ставки регулярных платежей за право пользования недрами при добыче угля // Горная промышленность. – 1999. – № 6. – С. 12-14.
3. Кимельман С.А. Государственное регулирование недропользования и воспроизводство минерально-сырьевой базы // Записки Горного института. – 2011. – Т 19. – С.35-40.
4. Юмаев М.М. Горная рента: распределение налоговой нагрузки между добычей и переработкой // Академия бюджета и казначейства Минфина России. Финансовый журнал. – 2011. – № 2. – С.65-76.
5. Юмаев М.М. Совершенствование налогообложения добычи угля // Уголь. – 2011. – № 1. – С. 23-27.
6. Сводные отчеты в целом по Российской Федерации и в разрезе субъектов Российской Федерации: офиц. интернет-портал Федеральной налоговой службы. – URL: https://www.nalog.gov.ru/rn77/related_activities/statistics_and_analyt^orms/

7. Бруэн К.Д., Бержевен Ж., Маккалох Б.Р. Подходы правительства к политике налогообложения в горнодобывающей промышленности // Минеральные ресурсы. Экономика и управление. – 2002. – № 2. – С. 28-35.

8. Писаренко М.В., Шаклеин С.В. О налоге на добычу угля // Минеральные ресурсы. Экономика и управление. – 2023. – № 1. – С.35-38.

УДК 622.2; 622.7

МЕТОДИКА ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ШИХТЫ И ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕЙ

¹д.т.н. Удовицкий В.И., ²Кандинский В.А., ¹Костенюк А.И.

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

2 – ООО «БРЕНТ», г. Кемерово, Россия

Аннотация. В статье представлена методика информационного и программного обеспечения методами компьютерного моделирования процессов формирования шихты и переработки углей в зависимости от технологии выемки пластов, показателя обогатимости, разубоженности горной массы и технологической эффективности разделения минеральных комплексов в гравитационных и флотационных аппаратах при проведении предпроектных исследований.

Ключевые слова: шихта, угольная смесь, обогатимость, разубоживание, переработка, выход и зольность концентрата, извлечение горючей массы.

Валовая выемка пластов снижает потери горючей массы по сравнению с селективной при разработке угольных месторождений.

Добыча и переработка углей довольно объемные и сложные технологические процессы, которые тесно взаимосвязаны.

Разубоженный уголь, поступающий на обогатительную фабрику, снижает качество получаемого концентрата и увеличивает потери с отходами переработки.

Актуальность темы состоит в том, что цифровизация горных предприятий позволяет с большей скоростью и точностью, с меньшими затратами определить оптимальные технологии разработки месторождений и переработки углей.

Цель работы: создание и применение методов имитационного моделирования на ЭВМ угольной шихты, технологий гравитационного и физико-химического разделения полезных ископаемых с использованием автоматизированных баз данных для управления качеством продукции горного предприятия и повышения полноты извлечения запасов недр.

Рассмотрено информационное и программное обеспечение технологий переработки углей в тяжелосредних аппаратах, отсадочных машинах, крутонаклонных сепараторах и флотационных машинах при проведении предпроектных исследований обогатимости углей методами компьютерного моделирования.

Для решения практических задач, стоящих перед добычей и переработкой углей, предварительно выполняется системный анализ предметной области; существующих схем переработки аналогичного сырья; программных продуктов, моделирующих процессы выемки, формирования шихты и переработки углей.

Информационное обеспечение физических моделей технологий переработки и обогащения углей базируется на алгоритмах, представленных в следующих основных публикациях [1-5].

Изучены также технологии передовых предприятий по переработке:

– схемы цепи аппаратов и качественные показатели по технологическим процессам ОФ «Антоновская» и ОФ «Северная» (основной процесс гравитационного обогащения – отсадка в машине *Allmineral*); обогатительные фабрики ш. им. С.М. Кирова и «Листвяжная» (ширококласифицированная отсадка в машине *Batac*); «Кузнецкая», «Абашевская» (машины *МО*); «Беловская» и «Березовская» (*Batac*);

– особенности тяжелосреднего обогащения крупных классов углей на фабриках «Барзасская», «Матюшинская» (сепараторы *Wemco*, *СКВИ*); «Березовская», «Беловская», «Сибирь», «Кузбасская», «Распадская» (сепараторы *СКВИ*);

– качественно-количественная схема обогащения ОФ ООО «Шахтоуправление Карагайлинское» производительностью по одной секции 2.4 млн. т/год;

– опыт эксплуатации обезвоживающего оборудования на ОФ «Барзасская» и результаты обезвоживания концентратов различной крупности;

– современные технологии тяжелосреднего обогащения, флотации и обезвоживания углей марок КС, ОС на ОАО «ОФ Междуреченская»;

– опыт внедрения на ОФ «Распадская» пластинчатого сгустителя и камерного фильтр-пресса (вместо ленточного) для снижения влажности шлама до 23 %; результаты промышленных испытаний пилотной флотационной машины *Pneufлот*;

– опыт внедрения и эксплуатации на ОФ «Анжерская» флотационной машины *Pneufлот* и особенности ее компоновки на фабриках старшего поколения; коммерческое предложение компании МВЕ на термическую сушилку «*Tornesh*» производительностью 100 т/ч для углей марки «Ж» с выходом летучих более 35 %;

– многовариантная оптимизация технологий обогащения углей в гравитационных аппаратах на ОФ «ш. Увальная» для выбора процессов переработки и максимальной производительности по одной секции;

– опыт применения крутонаклонных сепараторов КНС на обогатительных фабриках разрезов «Виноградский» и «Бачатский» для механизированного удаления породы из разубоженных углей.

Программное обеспечение поддержки принятия решений при определении рациональной технологии обогащения углей включает в себя:

1. Создание и применение автоматизированных баз данных для хранения и обработки результатов гранулометрического и фракционного составов углей [4].

2. Формирование состава шихты углей с использованием программы для ЭВМ. «Расчет фракционного состава и определение обогатимости каменных углей». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012613676.

3. Разработку вариантов схем обогащения с использованием разного типа оборудования в зависимости от марок и обогатимости углей.

4. Для каждого варианта создается либо новая программа расчета технологических показателей обогащения, либо формируется из подпрограмм, входящих в состав разработанных авторами данной публикации проблемно-ориентированных программных комплексов:

– программный комплекс расчета технологической схемы ОАО «ЦОФ Беловская» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013660591);

– программный комплекс многовариантной оптимизации технологии обогащения углей шахты «Увальная» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014614485);

– планирование факторного эксперимента и опытов крутого восхождения (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611796).

5. Для реализации в математических моделях теоремы Рейнгардта (достижение максимального выхода суммарного концентрата планируемой зольности) [1, 4], используются компьютерные программы, имеющие государственную регистрацию, позволяющие автоматизировать процесс построения кривых обогатимости:

- аппроксимация кривой элементарных фракций методом наименьших квадратов (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2012613674);
- применение полинома Лагранжа для построения кривых обогатимости (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2012613675);
- интерполяция кривых обогатимости кубическими сплайнами (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2012611251).

Результаты вычислительного эксперимента по расчету баланса продуктов обогащения и воды для оптимальных плотностей разделения 1,691, 1,665 и 1,649 г/см³ представлены в таблицах: «Баланс продуктов обогащения по схеме», «Потери воды по фабрике» и «Баланс оборотной воды» (рис. 1).

В таблицах показаны значения извлечения горючей массы (E, %) в продукты переработки. Величина этого показателя в отходах и кеке фильтр-прессов показывает потери горючей массы для тяжелой среды: 12,26 %, для отсадки: 12,69 %.

| Баланс продуктов обогащения по схеме (тяжелая среда), рассчитанный при плотностях разделения, г/см ³ : 1,691 1,665 1,649 | | | | | | |
|---|-------------------------------------|---------------|---------------|--------------------|---------------|----------------------|
| № | Наименование продукта | γ, % | Q, т/ч | A ^d , % | E, % | W, м ³ /ч |
| 7 | Концентрат > 13 мм | 25,85 | 107,71 | 8,87 | 30,50 | 9,37 |
| 20 | Обезвоженный концентрат 1-13 мм | 19,87 | 82,80 | 7,33 | 23,84 | 9,20 |
| 35 | Обезвоженный концентрат 0,5-1 мм | 6,49 | 27,05 | 6,97 | 7,82 | 4,04 |
| | Итого концентрата >0,5 мм | 52,21 | 217,55 | 8,04 | 62,16 | 22,61 |
| 46 | Обезвоженный флотоконцентрат | 21,52 | 89,69 | 8,20 | 25,58 | 26,79 |
| | Итого концентрата | 73,74 | 307,24 | 8,09 | 87,74 | 49,40 |
| 10 | Отходы > 13 мм | 9,45 | 39,39 | 64,22 | 4,38 | 2,51 |
| 22 | Отходы 1-13 мм | 9,12 | 37,99 | 64,39 | 4,20 | 6,18 |
| 37 | Отходы 0,5-1 мм | 1,20 | 5,02 | 56,86 | 0,67 | 1,50 |
| | Итого отходов | 19,77 | 82,39 | 63,85 | 9,25 | 10,20 |
| 51 | Кек фильтр-прессов | 4,05 | 16,89 | 64,43 | 1,87 | 7,95 |
| 56 | Кек фильтр-прессов | 2,44 | 10,15 | 64,03 | 1,13 | 4,78 |
| | Итого кека | 6,49 | 27,03 | 64,28 | 3,00 | 12,72 |
| | Итого отходы + кек | 26,26 | 109,43 | 63,96 | 12,26 | 22,92 |
| 1 | Всего: | 100,00 | 416,67 | 22,76 | 100,00 | 72,32 |

| Потери воды по фабрике | | |
|--------------------------|----------------------|---------------------|
| Поступает в процесс | W, м ³ /ч | Выходит из процесса |
| С радовым углем | 41,21 | С концентратом |
| Добавочная (свежая) вода | 31,11 | С отходами |
| | | С кеком |
| Всего: | 72,32 | Всего: |

| Баланс оборотной воды | | |
|--------------------------|----------------------|----------------------------|
| Поступает в процесс | W, м ³ /ч | Выходит из процесса |
| Осветленная вода | 1033,07 | На мокрую классификацию |
| Добавочная (свежая) вода | 31,11 | На отмывку-та |
| | | На отмывкуотх |
| | | На приготовление суспензии |
| | | На отмывку-та |
| | | На отмывкуотх |
| | | На приготовление суспензии |
| Всего: | 1064,18 | Всего: |

| Практический баланс продуктов обогащения по схеме (отсадка), рассчитанный при плотностях разделения, г/см ³ : 1,691 1,665 1,649 | | | | | | |
|--|-------------------------------------|---------------|---------------|--------------------|---------------|----------------------|
| № | Наименование продукта | γ, % | Q, т/ч | A ^d , % | E, % | W, м ³ /ч |
| 8 | Концентрат > 13 мм | 24,29 | 101,22 | 8,73 | 28,71 | 8,80 |
| 11 | Обезвоженный концентрат 1-13 мм | 21,83 | 90,97 | 9,21 | 25,66 | 10,11 |
| 23 | Обезвоженный концентрат 0,5-1 мм | 5,97 | 24,88 | 6,37 | 7,24 | 3,72 |
| | Итого концентрата >0,5 мм | 52,10 | 217,07 | 8,66 | 61,61 | 22,63 |
| 34 | Обезвоженный флотоконцентрат | 21,63 | 90,12 | 8,20 | 25,71 | 26,92 |
| | Всего концентрата | 73,73 | 307,19 | 8,53 | 87,31 | 49,55 |
| 13 | Отходы > 13 мм | 9,72 | 40,49 | 62,16 | 4,76 | 4,50 |
| 14 | Отходы 1-13 мм | 8,46 | 35,26 | 64,04 | 3,94 | 7,74 |
| 25 | Отходы винтовых сепараторов | 1,11 | 4,62 | 55,94 | 0,63 | 1,38 |
| | Итого отходов | 19,29 | 80,37 | 62,63 | 9,33 | 13,62 |
| 39 | Кек фильтр-прессов | 4,08 | 17,00 | 64,43 | 1,88 | 8,00 |
| 44 | Кек фильтр-прессов | 2,91 | 12,11 | 60,81 | 1,47 | 5,70 |
| | Итого кека | 6,99 | 29,10 | 62,92 | 3,35 | 13,70 |
| | Итого отходы + кек | 26,27 | 109,48 | 62,71 | 12,69 | 27,32 |
| 1 | Всего: | 100,00 | 416,67 | 22,76 | 100,00 | 76,86 |

| Потери воды по фабрике | | |
|--------------------------|----------------------|---------------------|
| Поступает в процесс | W, м ³ /ч | Выходит из процесса |
| С радовым углем | 41,21 | С концентратом |
| Добавочная (свежая) вода | 35,65 | С отходами |
| | | С кеком |
| Всего: | 76,86 | Всего: |

| Баланс оборотной воды | | |
|--------------------------|----------------------|-------------------------|
| Поступает в процесс | W, м ³ /ч | Выходит из процесса |
| Осветленная вода | 1369,47 | На мокрую классификацию |
| Добавочная (свежая) вода | 35,65 | На отсадку |
| Всего: | 1405,12 | Всего: |

Рис. 1. Расчетный баланс продуктов обогащения и воды для оптимальных плотностей разделения

В результате проведенных вычислительных экспериментов установлено, что при тяжелосреднем обогащении выход суммарного концентрата составляет 73,74 % зольностью 8,09 %, извлечение горючей массы 87,74 %.

Если использовать отсадочные машины, то выход концентрата, практически, одинаковый 73,73 %, зольность 8,53 %, извлечение 87,31 %.

Следует учесть, что при обогащении в тяжелых средах количество оборотной воды 1064,18 м³/ч, а при отсадке 1405,12 м³/ч.

Вывод. Для принятия решения необходимо выполнить технико-экономическое обоснование представленных вариантов с учетом схемы регенерации суспензии при тяжелосреднем обогащении.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0002 «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» (рег. № АААА-А21-121012290021-1).

Список литературы

1. Артюшин С.П. Проектирование углеобогащительных фабрик. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Недра, 1974. – 200 с.
2. Разумов К.А. Проектирование обогатительных фабрик. – М.: Недра, 1982. – 482 с.
3. Барский Л.А., Козин В.З. Системный анализ в обогащении полезных ископаемых. – М.: Недра, 1978. – 487 с.
4. Особенности открытой добычи и переработки углей сложноструктурных месторождений Кузбасса / И.А. Паначев, А.Г. Нецветаев, И.И. Цепилов, В.И. Удовицкий. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 1997. – 215 с.
5. Удовицкий В.И. Моделирование подготовительных и основных процессов переработки каменных углей. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 1998. – 500 с.

УДК 624.138.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ УКРЕПЛЕННОЙ РЫХЛОЙ ПОРОДЫ ПРИ РАЗЛИЧНОМ РАСХОДЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ПОЛИМЕРНОГО СОСТАВА

к.т.н. Шилова Т.В., Сердюк И.М.

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

Аннотация. В работе приведены результаты экспериментального исследования проницаемости мелкозернистого песка, укрепленного двухкомпонентной полиуретановой смолой при различном расходе состава. Установлено, что при увеличении объема отдельных компонентов смолы в четыре раза коэффициент проницаемости снижается более, чем на два порядка.

Ключевые слова: укрепление пород, двухкомпонентный состав, песчаная порода, проницаемость, всестороннее сжатие.

Синтетические полимерные смолы широко используются для укрепления горных пород и грунтов. Эффективность инъекционного армирования определяется радиусом/глубиной пропитки, физическими свойствами укрепляемого материала и пр. При закачке раствор смолы должен проникать через поры породы, распределяя однородную смесь по пустотному пространству [1-4]. Глубина пропитки рыхлой породы и распределение закачиваемого состава зависят от многих факторов, таких как тип, гидравлическая проводимость, плотность, гранулометрический состав, давление закачки, динамическая вязкость раствора смолы, температура смешиваемых компонентов, количество закачиваемой смолы и др. [5-7]. Лабораторные тесты широко используют для оптимизации и улучшения процедуры введения смолы, изучения физических свойств укрепленной породы. Раствор смолы закачивают в образец для измерения окончательной прочности и фильтрационных свойств

армированной породы [8-10]. В работе приведены результаты исследования влияния расхода закачиваемой полимерной смолы на приобретенную проницаемость укрепленного мелкозернистого песка при различных условиях напряжения.

Лабораторные испытания проводили с предварительно подготовленными образцами мелкозернистого песка. Подготовка включала определение гранулометрического состава, абсолютной и объемной плотности, пористости и т. д. Песок просеивали через набор сит и определяли гранулометрический состав. Основная фракция с размером частиц менее 0,4 мм составила около 85 масс. %. Значения абсолютной и насыпной плотности сухого песка в среднем составили 2,6 г/см³ и 1,66 г/см³ соответственно. Коэффициент пористости - 0,58. В экспериментах использовали двухкомпонентную медленно-реагирующую полиуретановую смолу, которая предназначена для консолидации и гидроизоляции грунтов, стабилизации водоносных горизонтов с напорными и безнапорными водами. Двухкомпонентная полиуретановая смола образуется путем смешивания двух компонентов (А и Б) в объемном соотношении 1:1 (рис. 1).

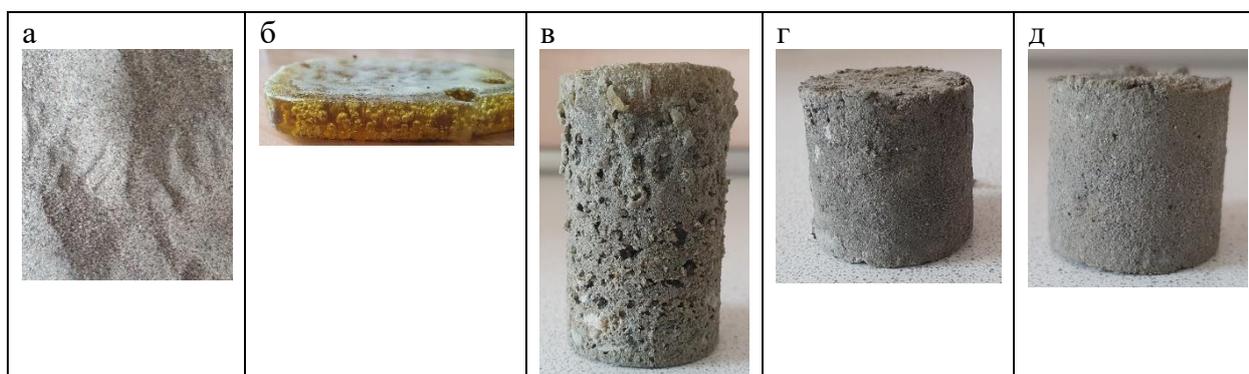


Рис. 1. Образцы: мелкозернистого песка (а), отвержденной двухкомпонентной полиуретановой смолой (б), укрепленного песка при начальном соотношении объема одной компоненты смолы к объему пор породы: 2:1 (в), 1:1 (г), 1:2 (д)

Укрепление песка осуществляли наиболее распространенным методом, который состоит в механическом перемешивании образца породы с раствором полимерной смолы. Подготавливали необходимое количество песка и раствора, для предотвращения взаимодействия раствора полимерной смолы с атмосферной влагой его сразу добавляли в породу и перемешивали до образования однородной смеси. Полученную смесь заливали целиком в цилиндрические формы. Образцы, изготовленные из этих форм после отверждения смолы, использовали для дальнейших фильтрационных тестов, определения коэффициента проницаемости укрепленной породы в условиях гидростатического сжатия образцов и пр. [9-11].

В экспериментах меняли количество раствора смолы по отношению к пористости породы. В первом случае объем одной компоненты был в 2 раза больше объема пор породы, во втором случае - равен объему пор, в третьем - в два раза меньше. В лабораторных экспериментах объем образца породы и отдельных компонентов смолы составлял 350 -500 см³ и 85 - 300 см³, соответственно.

Проницаемость укрепленного песка исследовали на лабораторной установке, предназначенной для фильтрации газа в породах при линейном стационарном характере течения [12]. Для этого изготавливали цилиндрические образцы диаметром 3 см, длиной 3-6 см. Эксперименты проводили при давлении всестороннего сжатия от 2 до 8 бар с шагом 2 бара, давлении азота внутри образцов без трещины - 0,05-0,15 бар (табл. 1). Коэффициент абсолютной газопроницаемости определяли по методике, описанной в ГОСТ 26450.2-85.

Экспериментальные исследования показали, что изменение расхода полиуретановой смолы, существенно влияет на фильтрационные свойства укрепленной рыхлой породы. При использовании отдельных компонентов полимерного состава в двукратном объеме пор

мелкозернистого песка, достигаются очень низкие значения коэффициента проницаемости, около 0,2 мД при всестороннем сжатии $P = 2$ бара. Такие значения характерны для плотных глин, аргиллитов, массивных горных пород. Коэффициент проницаемости снижается на три порядка (более чем в 1000 раз) по сравнению с не укрепленным песком (рис. 2).

Таблица 1

Условия фильтрационных экспериментов с образцами песка, укрепленного двухкомпонентной полиуретановой смолой

| Параметр | Песок, укрепленный при начальном соотношении объема одной компоненты смолы к объему пор породы 1:1 и 1:2 | Песок, укрепленный при начальном соотношении объема одной компоненты смолы к объему пор породы 2:1 |
|------------------------------------|--|--|
| Давление всестороннего сжатия, бар | 2, 4, 6, 8 | 2 |
| Давление газа в образце, бар | 0,05; 0,1; 0,15 | 1; 1,4; 1,8 |
| Температура, С | 26 – 27 | 24 - 25 |
| Газ | N_2 | N_2 |

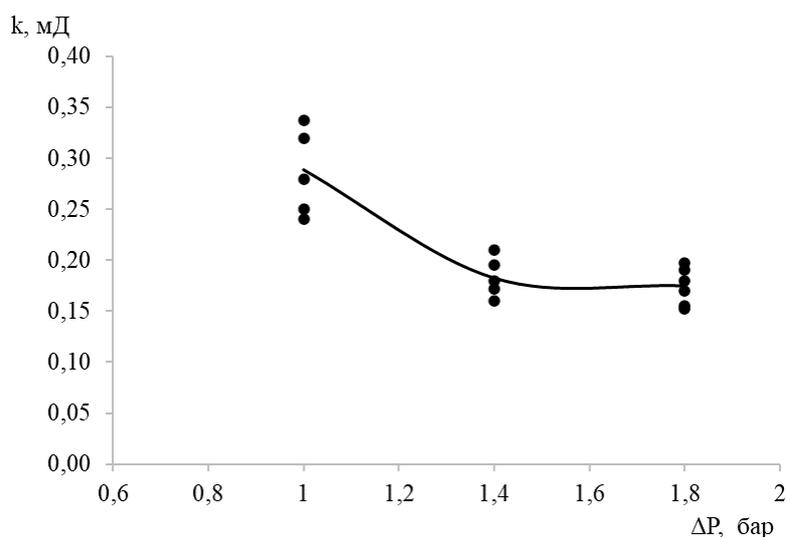


Рис. 2. Зависимость коэффициента газопроницаемости песка, укрепленного двухкомпонентной полиуретановой смолой при начальном соотношении объема одной компоненты смолы к объему пор породы 2:1, от перепада давления на концах образца (ΔP) при всестороннем сжатии $P = 2$ бар

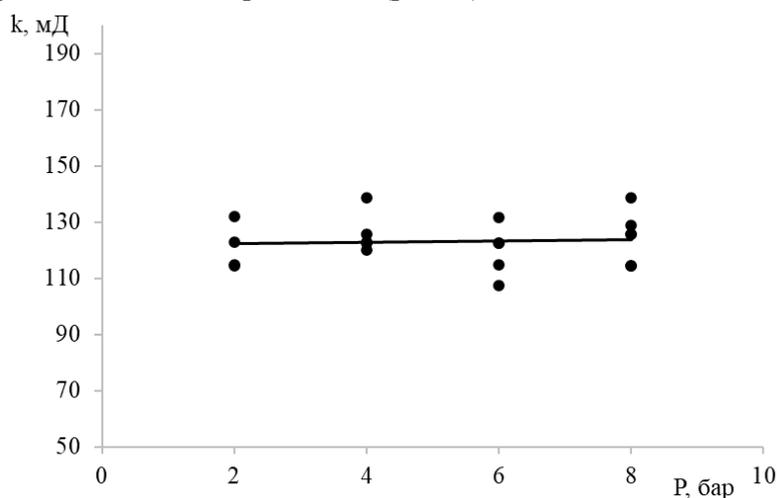
Отметим, что для образцов рыхлой породы, укрепленной двухкомпонентной полиуретановой смолой, газопроницаемость нелинейно зависит от перепада давления ΔP . При малых значениях ΔP она существенно выше (рис. 2). Это свидетельствует о наличии эффекта проскальзывания газа (эффект Клинкенберга) при малых поровых давлениях [13].

В случае уменьшения количества используемой смолы до объема отдельного компонента, равного объему пор породы, коэффициент проницаемости увеличивается на два порядка и составляет 100-110 мД при давлениях всестороннего сжатия образцов 2-8 бар. В случае последующего двукратного снижения количества отдельных компонентов закачиваемой смолы проницаемость укрепленного мелкозернистого песка увеличивалась до значений 120 – 130 мД и в среднем составляла 123,2 мД (табл. 2). Такие значения характерны для слабо-трещиноватых пород, песчаников с глинистым цементом и пр. Коэффициент проницаемости снижается на один порядок по сравнению с не укрепленным песком.

Средние значения коэффициентов газопроницаемости песка (k), укрепленного двухкомпонентной полиуретановой:

| Vk / Vn | k, мД |
|---------|-------|
| 0,5 | 0,21 |
| 1 | 101,9 |
| 2 | 123,2 |

Отметим, что при повышении давления всестороннего сжатия от 2 до 8 бар значения коэффициента проницаемости сохраняются (рис. 3).



Vk / Vn – начальное отношение объема одной компоненты полиуретановой смолы (Vk) к объему пор породы (Vn)

Рис. 3. Зависимость коэффициента газопроницаемости песка, укрепленного двухкомпонентной смолой при начальном соотношении объема одной компоненты смолы к объему пор породы 1:2, от давления всестороннего сжатия

Выводы. Изменение расхода двухкомпонентной полиуретановой смолы существенно влияет на приобретенные фильтрационные свойства укрепленной рыхлой породы. При увеличении начального объема отдельных компонентов в 4 раза коэффициент проницаемости снижается более чем на 2 порядка. Выявлено, что в диапазоне давления всестороннего сжатия 2 - 8 бар значения коэффициента проницаемости укрепленного песка сохраняются.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-20126, <https://rscf.ru/project/22-27-20126/>, и финансовой поддержки Правительства Новосибирской области.

Список литературы

1. Grouting mechanism of quick setting slurry in rock fissure with consideration of viscosity variation with space / Q. Zhang [et al.] // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2017. – Т. 70. – С. 262-273.
2. Productivity of rock reinforcement: methodology development / A. Gustafson [et al.] // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2016. – Т. 116. – № 12. – С. 1127-1134.
3. Improving the strength of weak soil using polyurethane grouts: A review / S. Saleh [et al.] // Construction and Building Materials. – 2019. – Т. 202. – С. 738-752.
4. Investigation of temperature effect on strength properties of polyurethane-treated sand / Z. Song [et al.] // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2021. – Т. 33. – № 3. – С. 04020482.

5. Experimental study on grouting reinforcement mechanism of heterogeneous fractured rock and soil mass / X. Lan [et al.] // Geotechnical and Geological Engineering. – 2020. – Т. 38. – № 5. – С. 4949-4967.
6. Chen Z., Zhu S.S. In-situ polymerization of dicyclopentadiene for rock reinforcement // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Т. 173. – С. 912-921.
7. Rock Reinforcement by Stepwise Injection of Two-Component Silicate Resin / T. Shilova [et al.] // Polymers. – 2022. – Т. 14. – № 23. – С. 5251.
8. Nowamooz H. Resin injection in clays with high plasticity // Comptes Rendus Mécanique. – 2016. – Т. 344. – № 11-12. – С. 797-806.
9. Study on engineering properties of sand strengthened by mixed fibers and polyurethane organic polymer / J. Liu [et al.] // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2020. – Т. 79. – С. 3049-3062.
10. Cyclic stress-strain characteristics of calcareous sand improved by polyurethane foam adhesive / Q. Chen [et al.] // Transportation Geotechnics. – 2021. – Т. 31. – С. 100640.
11. Anagnostopoulos C.A. Laboratory study of an injected granular soil with polymer grouts // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2005. – Т. 20. – № 6. – С. 525-533.
12. Сердюков С.В., Шилова Т.В., Дробчик А.Н. Лабораторная установка и методика определения газопроницаемости горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 5. – С. 172-180.
13. Песков А.В. Исследование проницаемости горных пород по газу и учёт эффекта Клинкенберга в теории стационарной фильтрации. – 2012. – URL: http://www.rusnauka.com/10_DN_2012/Tecnic/10_101792.doc.htm

УДК 622.831

О ВОСТАНОВЛЕНИИ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ПОДРАБОТАННОЙ ТОЛЩЕ ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ В СВИТЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

д.т.н. Серяков В.М.

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

Аннотация. Проведена модернизация алгоритма расчета методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния массива горных пород для условий отработки пластовых месторождений, позволяющая вести учет последовательности образования выработанных пространств. Установлены особенности восстановления горного давления в подработанной толще при последовательной отработке одиночного пласта и свиты угольных пластов. Показано, что зоны опорного давления, формирующиеся при последовательной отработке пласта, приводят в ходе дальнейшего ведения очистных работ к чередованию в подработанном массиве областей концентрации вертикальных напряжений.

Ключевые слова: пластовые месторождения, свита угольных пластов, последовательность отработки, напряжения, деформации, горное давление.

Введение. Важным фактором, влияющим на закономерности формирования напряженного состояния породного массива в районах ведения горных работ, является последовательность отработки месторождений [1-3]. Известно, что при математическом моделировании напряженного состояния массива в предположении упругого деформирования горных пород порядок образования выработок не влияет на окончательное распределение напряжений для данной конфигурации очистного пространства. Однако если при ведении горных работ выработки заполняются закладкой или обрушенными породами, то геомеханическое состояние окружающих пород будет зависеть от порядка отработки. Постановки

таких задач, методы их решения, позволяющие вести расчет напряженно-деформированного состояния массива для большого числа этапов обработки, изложены в работах [4, 5].

При обработке пластовых месторождений, в частности угольных, выбор последовательности обработки также имеет большое значение [6, 7]. Для возможности оценки последовательности ведения очистных работ на напряженное состояние массива необходимо рассмотреть механику деформирования кровли и почвы обрабатываемых пластов. Определяющим фактором при таком рассмотрении является контакт пород кровли и почвы обрабатываемого пласта. Взаимное смещение кровли и почвы не должно превышать мощности пласта. Один из возможных алгоритмов нахождения напряженно-деформированного состояния при выполнении условия непроникания границ кровли и почвы предложен в [5]. Результаты расчетов показали возможность получения в районе обработки сближенных пластов полей напряжений, отвечающим реально наблюдаемым данным. Вместе с тем для определения и последующего анализа геомеханического состояния вмещающих пород, отвечающих различным вариантам обработки угольных пластов, необходима дальнейшая доработка алгоритма и программного обеспечения.

Постановка задачи. Приведем основные особенности алгоритма расчета напряженного состояния массива в районе обработки пластовых месторождений с учетом контакта кровли и почвы обработанных пространств. Алгоритм основан на методе конечных элементов. Расчетная область задачи представляет собой неоднородный массив горных пород, отвечающий его конфигурации до начала ведения очистных работ. Для такой области формируется матрица жесткости, которая не изменяется в процессе расчета. Для моделирования выработанного пространства применяется алгоритм метода начальных напряжений, разработанный для решения нелинейных задач. Фактические напряжения в выработанном пространстве полагаются нулевыми, в этом случае компоненты начальных напряжений представляют собой величины напряжений, рассчитанные при использовании исходной матрицы жесткости. Условие ограничения взаимных смещений точек кровли и почвы выработки мощностью обрабатываемого пласта выполняется с помощью метода начальных деформаций. Для этого в конечных элементах выработанного пространства величина деформации, нормальной к плоскости пласта, ограничивается значением -1 . Напомним, что процедуры методов начальных напряжений и начальных деформаций основываются на использовании матрицы жесткости, неизменяющейся в ходе нахождения решения. Условия образования выработок и ограничение смещений кровли и почвы пласта его мощностью реализуются путем изменения правой части системы решаемых линейных уравнений, в которых неизвестными являются смещения узловых точек. Разработанный алгоритм позволяет проводить расчеты напряженно-деформированного состояния горных пород при задании механических свойств массива, его начального напряженного состояния и конфигурации обработанных участков угольных пластов.

Модернизация алгоритма для учета последовательности ведения горных работ. Для расчетов напряженно-деформированного состояния пластовых месторождений с учетом последовательности ведения очистных работ необходимо предусмотреть возможность моделирования перераспределения полей напряжений вследствие очередного этапа развития горных работ. Дополнительные напряжения, вызванные очередным этапом обработки, должны суммироваться с рассчитанным на этот момент полем напряжений. Расчет дополнительных напряжений осуществляется по тому же алгоритму, что был описан выше. В модернизированном алгоритме необходимо, во-первых, задать последовательность обработки, т.е. последовательность образования выработанных пространств. Во-вторых, необходимо учесть все детали нелинейного деформирования конечных элементов, расположенных в выработанном пространстве: значения векторов начальных напряжений, соответствующих условию обращения в ноль компонент тензора напряжений; значения векторов начальных деформаций в элементах, в которых произошел контакт кровли и почвы выработанного пространства.

Все эти условия к алгоритму, позволяющему вести учет последовательности горных работ при выемке пластовых месторождений, были выполнены в модернизированном программном комплексе, использованном при проведении обсуждаемых ниже вариантах расчетов.

Результаты расчетов. На рис. 1 представлен вертикальный разрез слоистого массива горных пород, вмещающих свиту угольных пластов. Расчет напряженно-деформированного состояния пород при выемке угольных пластов проведен для условий плоской деформации. Это предполагает неизменность строения массива и протяженности выработок в перпендикулярном относительно плоскости рисунка направлении.

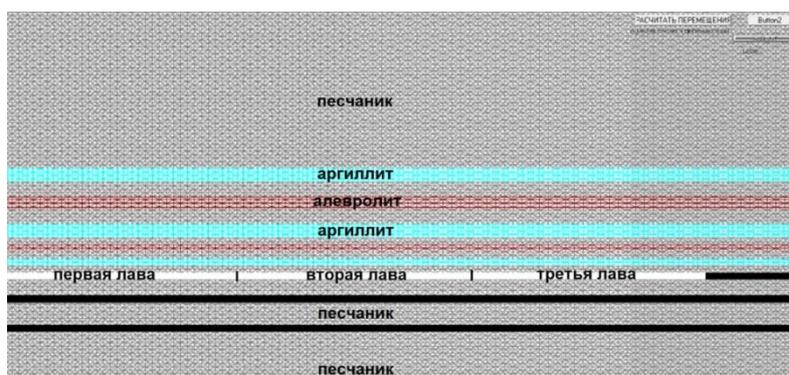


Рис. 1. Взаиморасположение вмещающих пород и угольных пластов в слоистом массиве при моделировании последовательности отработки месторождения

Глубина залегания верхнего угольного пласта 300 м. Мощности пластов одинаковы и равны 4 м. Исходное напряженное состояние обусловлено только весом пород: $\sigma_y^0 = -\rho H$; $\sigma_x^0 = -\nu \rho H / (1 - \nu)$; $\tau_{xy}^0 = 0$. Здесь ρ – объемный вес пород; H – расстояние до земной поверхности. Ось Ox направлена по горизонтали, Oy — по вертикали. Верхняя граница расчетной области свободна от действия внешней нагрузки. На нижней границе полагались нулевыми вертикальная компонента вектора смещений v и касательная компонента тензора напряжений τ_{xy} . Вмещающая породная толща представлена чередующимися слоями песчаников, аргиллитов и алевролитов. Их механические свойства приняты следующими: для песчаников – модуль Юнга $E = 2500$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$; для алевролитов $E = 1800$, $\nu = 0,3$; для аргиллитов $E = 2500$ МПа, $\nu = 0,28$. Для отработываемых пластов $E = 300$ МПа; $\nu = 0,35$. Объемный вес всех пород равен $0,03$ МН/м³.

Расчеты проведены для двух вариантов ведения очистных работ. В первом варианте моделируется последовательная отработка только верхнего угольного пласта. На первом этапе происходит образование лавы длиной 134 м (рис. 1). На втором этапе рядом с ней осуществляется выемка угля в следующей лаве такой же длины и на третьем этапе – выемка угля в очередной третьей лаве. Общая ширины отработки после трех этапов составляет 400 м.

Распределение вертикального напряжения после выемки угля в первой лаве показано на рис. 2. Все приведенные изобары даны в МПа.

Во многом, характер распределения напряжений аналогичен ранее установленным закономерностям [5]. Вместе с тем, учет контакта кровли и почвы приводит к новой особенности в распределении вертикальной компоненты над выработанным пространством. Область разгрузки, обычно распространяющаяся на значительное расстояние от кровли выработанного пространства, занимает существенно меньший объем и формируется непосредственно около забоя. В остальной части подработанной толщи за счет контакта возникают сжимающие вертикальные напряжения. Динамику их изменения можно видеть на рис. 3 и 4, где приведен характер распределения вертикальных напряжений после выемки угля во второй и третьей лавах в верхнем пласте.

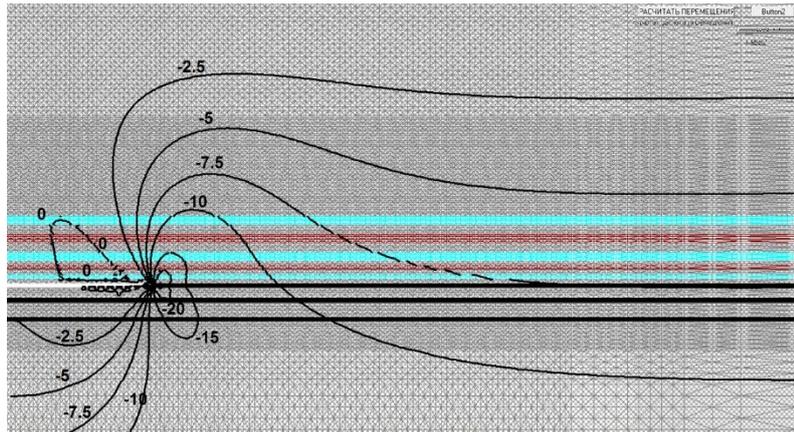


Рис.2. Распределение вертикальных напряжений в окрестности выработанного пространства после выемки угля в первой лаве

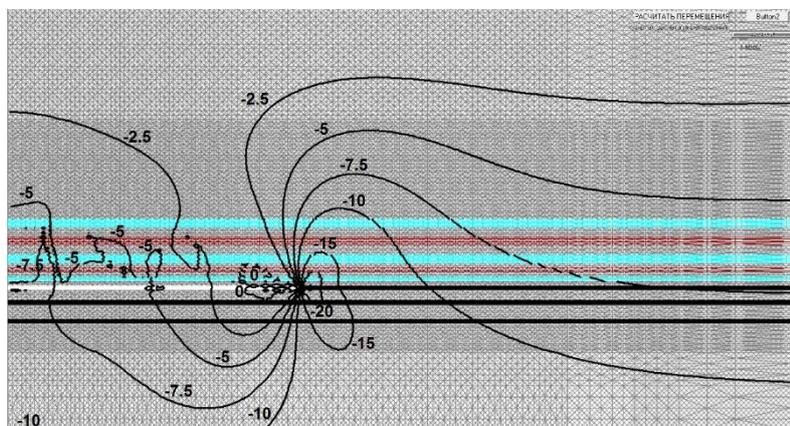


Рис. 3. Распределение вертикальных напряжений в окрестности выработанного пространства после выемки угля в двух лавах

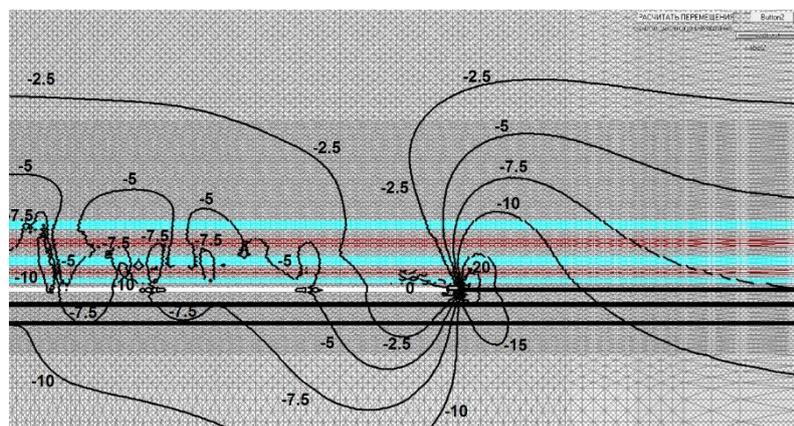


Рис. 4. Распределение вертикальных напряжений в окрестности выработанного пространства после проходки трех лав

Характер восстановления горного давления в подработанной и надработанной толще после выемки угля во второй лаве во многом определяется напряженным состоянием, сформировавшемся в массиве после первого этапа отработки. Зоны разгрузки и опорного давления, сформированные после выемки угля в первой лаве, приводят к сложному распределению вертикальных напряжений (изобары со значениями -5 и -7.5). В целом же в подработанном массиве реализуется процесс постепенного восстановления горного давления.

Отмеченные особенности распределения вертикальных напряжений более четко проявляются в ходе дальнейшей отработки пласта (рис. 4). Характер восстановления вертикальных напряжений в области подработки обусловлен влиянием учета последовательности выемки угля в лавах с формированием на предыдущих этапах отработки зон опорного давления.

В зонах опорного давления в краевых частях отработанных участков пласта сохраняется один и тот же уровень и близкая картина распределения вертикальных напряжений. Эта особенность вызвана учетом контакта кровли и почвы в отработанных пространствах [6].

Целью расчета второго варианта последовательности ведения очистных работ в свите пластов являлось установление характера восстановления горного давления в подработанном массиве. Рассмотрено три этапа отработки пластов в нисходящем порядке. Первый этап – отработка верхнего угольного пласта в лаве длиной 400 м. На втором этапе осуществляется выемка среднего угольного пласта в лаве такой же длины. Третий этап представляет собой отработку нижележащего пласта в лаве длиной 400 м.

На рис. 5 приведено распределение вертикальных напряжений после выемки первого пласта. В значительном объеме отработанного пространства происходит восстановление горного давления. В области опорного давления в краевой части лавы характер распределения напряжений и их значения полностью соответствуют, полученным ранее (рис. 4).

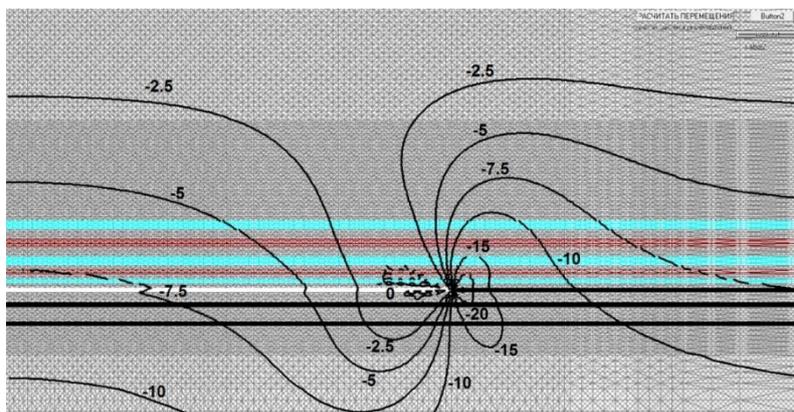


Рис. 5. Распределение вертикальных напряжений в окрестности выработанного пространства после отработки первого угольного пласта

Картина распределения вертикальных напряжений после трех этапов отработки показана на рис. 6.

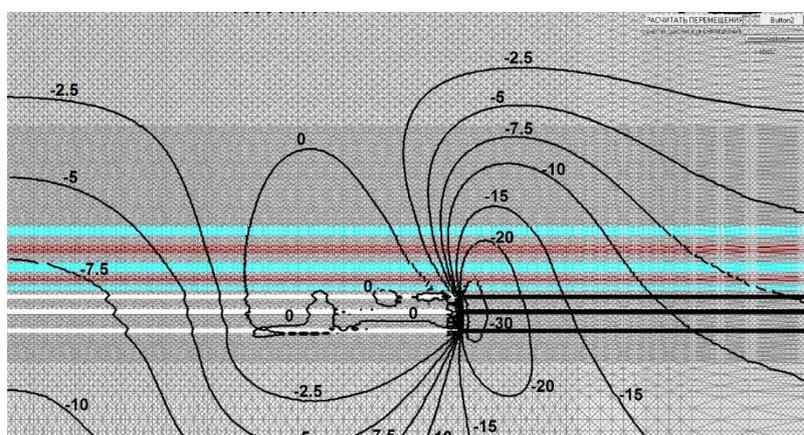


Рис. 6. Распределение вертикальных напряжений в окрестности выработанного пространства после отработки трех угольных пластов

К основным особенностям напряженного состояния массива, вносимым последовательной отработкой свиты пластов, можно отнести: уменьшение почти в два раза области восстановления горного давления в подработанной толще; значительное увеличение области разгрузки от вертикальных напряжений в подработанной толще вблизи краевой части лавы. В зоне опорного давления, сформированной в краевой части отработанных участков пластов, по мере отработки пластов происходит рост уровня напряжений и объема зоны концентрации вертикальных напряжений. Максимальное значение сжимающего напряжения при выемке трех угольных пластов увеличивается в 1,5 раза по сравнению с вариантом отработки только верхнего пласта.

Выводы. Модернизация алгоритма расчета напряженного состояния массива горных пород с целью учета последовательности образования выработанных пространств в условиях отработки пластовых месторождений позволяет проводить геомеханическую оценку различных вариантов ведения горных работ в свите угольных пластов.

Характер восстановления горного давления в подработанной толще пород при последовательной отработке пласта во многом определяется расположением зон опорного давления, формируемых на предыдущих этапах отработки.

При отработке свиты угольных пластов в нисходящем порядке горное давление в большей части подработанной толщи восстанавливается при отработке первого пласта. Последующая отработка пластов приводит к последовательному уменьшению размеров этой области и увеличению зоны разгрузки подработанной толщи от вертикальных напряжений вблизи краевых частей отработанных участков пластов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта НИР (№ гос. регистрации 121052500138-4).

Список литературы

1. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. – Л.: Недра, 1989. – 488 с.
2. Курлень М.В., Серяков В.М., Еременко А.А. Техногенные геомеханические поля напряжений. – Новосибирск: Наука, 2005. – 264 с.
3. Сенкус Вал.В., Фрянов В.Н. Разработка технологических решений отработки свиты угольных пластов подземным способом в приконтурной зоне разреза // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – №7. – С. 19-25.
4. Методология расчета горного давления / С.В. Кузнецов, В.Н. Одинцев, М.Э. Слоним, В.А. Трофимов. – М.: Наука, 1981. – 104 с.
5. Серяков В.М. Обоснование геомеханических параметров разработки свиты пологих пластов // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2017. – № 3 – С. 51-57.
6. Ютяев Е.П. Современные вызовы и перспективы развития технологии подземной отработки пологих газоносных угольных пластов // Уголь. – 2017. № 5. – С. 30-33.
7. Казанин О.И. О проектировании подземной отработки свит пологих газоносных угольных пластов // Записки Горного института. – 2015. – Т. 216. – С. 38-44.

УДК 622.261

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ПРОВЕДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Максимов А.А., д.т.н. Фрянов В.Н.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Предложены направления совершенствования технологий проведения подземных горных выработок, гарантирующие безопасность персонала в

подготовительном забое при интенсификации производственных процессов на горнопроходческих работах в сложных горно-геологических условиях угольных шахт.

Ключевые слова: забой подготовительной выработки, проходческий комбайн, коэффициент использования рабочего времени, технологические процессы, проходческий цикл, безопасное крепление, временная передвижная крепь.

Введение. Техническое перевооружение технологии проведения подземных выработок обеспечило в последние 10-15 лет снижение трудоёмкости выполняемых основных и вспомогательных производственных процессов и повышение безопасности ведения горнопроходческих работ за счет внедрения импортных высокопроизводительных комбайнов, пневматического бурового инструмента, телескопических ленточных конвейеров с самодвигающейся хвостовой частью, ленточных перегружателей, самоходных вагонов, дизелевозных локомотивов с гидравлическими подъемными устройствами на доставочных работах, анкером первого и второго уровней.

Однако, широко применяемые на шахтах технологические схемы, при которых операции проведения и крепления выработок выполняются последовательно, не позволяют существенно увеличить коэффициент использования рабочего времени проходческого комбайна со стреловидным или буровым исполнительным органом, а технические решения, позволяющие совместить процесс выемки и погрузки горной массы с работами по возведению постоянной крепи не гарантируют 100% защиту рабочих при проведении горных выработок в сложных горно-геологических условиях.

Актуальность проблемы. На сегодняшний день на шахтах России, при прочих равных условиях, скорость движения очистных забоев существенно опережает темпы ведения горнопроходческих работ, что подтверждает актуальность повышения скорости подвигания подготовительных забоев. Однако, увеличение коэффициента использования рабочего времени проходческого комбайна в условиях неоднородности и изменчивости свойств пород кровли по длине выработки, может привести к непрогнозируемым рискам аварий и инцидентов в зонах нахождения обслуживающего персонала.

Распоряжением от 11 мая 2022 года № 1144-р Правительство Российской Федерации утвердило комплексную научно-техническую программу полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых 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» (далее - комплексная программа).

Одной из актуальных задач комплексной программы является освоение технологий добычи угля без постоянного присутствия людей в очистных и подготовительных забоях на базе современной комплексной механизации; использование технологий, обеспечивающих повышение эффективности вентиляции и дегазации угольных шахт [16].

Целью исследования является выбор направлений совершенствования технологий горнопроходческих работ на угольных шахтах для обоснования наиболее безопасного и эффективного варианта технологической схемы скоростного проведения подготовительной выработки.

Для достижения цели решены следующие задачи:

- предложен максимально достижимый на сегодняшний день безопасный вариант установки анкерной крепи при проведении подготовительной выработки;
- обоснована минимально численность персонала при возведении постоянной анкерной крепи в подготовительном забое.

Объект и методика исследования. В качестве объекта исследования принята организация работ по возведению постоянной анкерной крепи в подготовительном забое, совмещенная во времени с процессами выемки и погрузки горной массы. Методика состоит в

анализе уровня механизации процесса безопасной установки анкерной крепи при совмещении во времени процессов выемки, погрузки горной массы и установки постоянной крепи.

К изучению приняты две технологические схемы, совмещающие процесс проведения и крепления подготовительных выработок, при внедрении которых достигнуты максимальные показатели.

Технологическая схема 1 без временной передвижной крепи с применением зарубежного высокопроизводительного комбайна «Bolter Miner» MB670 фирмы Sandvik с широкозахватным барабанным рабочим органом, навесными бурильными установками для крепления кровли и боков выработки. Операторы (проходчики) бурильных установок находятся под защитой временной крепи, конструктивно расположенной на комбайне в непосредственной близости от забоя [10-12]. В 2018 году на шахте «Листвяжная» в Кузбассе за один месяц таким комбайном пройдено 1650 м горной выработки.

На рис. 1, 2 представлены принципиальные конструктивные особенности проходческого комбайна и технологической схемы проведения выработки.



Рис. 1. Комбайн «Bolter Miner» MB670 фирмы Sandvik

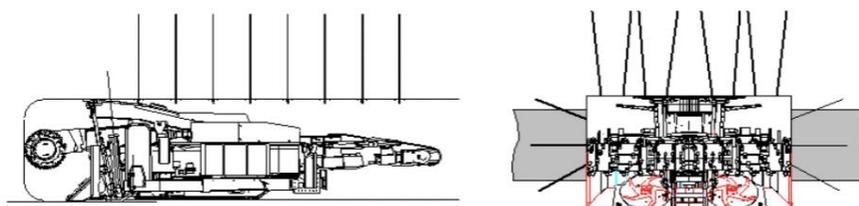


Рис. 2 Технологическая схема организации работ в забое по проведению выработки комбайном «Bolter Miner» MB670

Результаты оценки параметров технологической схемы проведения выработки комбайном «Bolter Miner» MB670 представлены в табл. 1.

Таблица 1

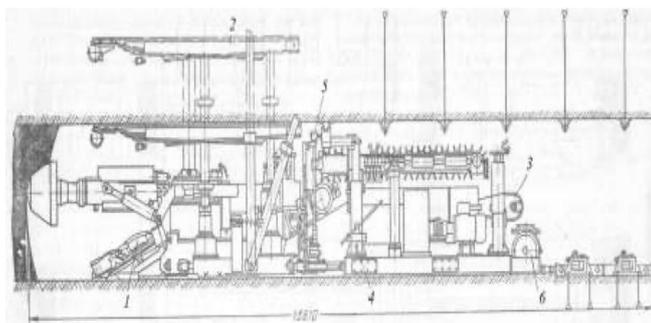
Элементы управления технологическими процессами проведения выработки комбайном «Bolter Miner» MB670

| Состав работ | Профессия | Количество рабочих, чел. | Возможность автоматизации процесса | Степень риска при нахождении людей в опасной зоне |
|---|-----------|--------------------------|--|---|
| Бурение шпуров в кровлю и бока выработки, замена бурового инструмента | Проходчик | 4 | да (при внедрении новой конструкции анкера) | максимально высокая |
| Доставка элементов крепи к месту производства работ | Проходчик | 2 - 4 | да | максимально высокая (периодическая) |

| Состав работ | Профессия | Количество рабочих, чел. | Возможность автоматизации процесса | Степень риска при нахождении людей в опасной зоне |
|--|-----------|---|---|---|
| Установка сетки на кровлю и бока выработки | Проходчик | 4 | да | максимально высокая |
| Подготовка и установка анкерной крепи в шпур | Проходчик | 4 | да (при внедрении новой конструкции анкера) | максимально высокая |
| Проведение выработки | МГВМ | 1 | да (дистанционное управление) | максимально высокая |
| Итого | | min - 7 max – 9 при автоматизации и процессов - 0 | Возможность механизации и автоматизации процесса проведения и крепления выработки | Степень риска максимально высокая. При полной автоматизации процессов - риски минимальные |

Технологическая схема 2 с применением передвижной временной крепи, разработанная ЦНИИподземмаш совместно с шахтой «Нагорная» объединения Южкузбассуголь [13]. При эксплуатации комплекса КН-5Н «Кузбасс», на шахте «Нагорная» достигнуты следующие скорости проведения: в одиночной наклонной выработке – 505 м/мес; в наклонных выработках при спаренных забоях – 2020 м/мес.

На рис. 3, 4 показаны принципиальные конструктивные особенности проходческого комплекса КН-5Н «Кузбасс» и технологической схемы проведения выработки.

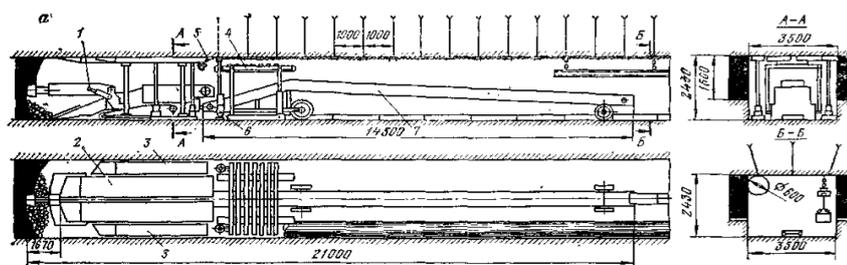


- 1 – проходческий комбайн; 2 – распорно-шагающая крепь; 3 – конвейер ленточный;
4 – крепильщик; 5 – оборудование для возведения анкерной крепи;
6 – электрооборудование

Рис. 3. Проходческо-нарезной проходческий комплекс КН-5Н «Кузбасс» [15]

Технологическая схема на рис. 4 разработана в СССР на базе очистной механизированной крепи 2М87. Оборудование на сегодняшний день является устаревшим. В данной работе рассматривается эта технологическая схема с учетом размещения в ней высокопроизводительного современного оборудования.

Структура и характеристики элементов технологической схемы проведению выработки комплексом КН-5 представлена в табл. 2.



- 1 – проходческий комбайн; 2 – левая и правая секция крепи; 3 – крепеукладчик;
 4 – бурильные установки для анкерования кровли (4 шт.) и боков (2 шт.) выработки;
 5 – верхняк; 6 – перегружатель; 7 – скребковый конвейер; 8 – монорельс

Рис. 4. Технологическая схема организации работ по проведению выработки комплексом КН-5

Таблица 2

Элементы управления технологическими процессами проведения выработки комплексом КН-5

| Состав работ | Профессия | Количество рабочих, чел. | Возможность автоматизации процесса | Степень риска при нахождении людей в опасной зоне |
|--|-----------|---|---|---|
| Бурение шпуров в кровлю и бока выработки, замена бурового инструмента. | Проходчик | 4 | да (при внедрении новой конструкции анкера) | высокая |
| Доставка элементов крепи к месту производства работ. | Проходчик | 2 | да | высокая |
| Контроль за укладкой сетки на кровлю и бока выработки. | Проходчик | 1 | - | высокая |
| Подготовка установка анкерной крепи в шпур | Проходчик | 4 | да (при внедрении новой конструкции анкера) | высокая |
| Проведение выработки | МГВМ | 1 | да (дистанционное управление) | высокая |
| Управление временной крепью | МГВМ | 1 | да (дистанционное управление) | высокая |
| Итого | | min - 8 при автоматизации процессов - 0 | Возможность механизации и автоматизации процесса проведения и крепления выработки | Степень риска высокая. При полной автоматизации процессов - риски минимальная |

Технологические решения. В технологической схеме 1 без использования временной передвижной крепи с применением зарубежного высокопроизводительного комбайна «Bolter Miner» MB670 фирмы Sandvik, с широкозахватным барабанным рабочим органом, навесными бурильными установками необходимо полностью автоматизировать процесс установки анкерной крепи. Такой вариант возможен при разработке конструкции анкера, который ввинчивается в кровлю и бока выработки по принципу самореза. При таком техническом решении необходимости нахождения персонала в опасной зоне при проведении и креплении выработки нет. Комбайн может управляться дистанционно, анкера устанавливаются в бурильную установку из кассет автоматически. Всем процессом управляет дистанционно с безопасного расстояния оператор, контролируя заданные параметры по монитору.

В технологической схеме 2 с применением передвижной временной крепи предлагается два направления модернизации и развития:

- автоматизировать процесс установки анкерной крепи за передвижной крепью;
- разработать комплект передвижных временных крепей, способных самостоятельно перемещаться и поддерживать выработку в рабочем состоянии для возможности установки анкерной крепи персоналом в безопасной зоне.

В каждом рассмотренном варианте технологической схемы управление процессами осуществляется оператором дистанционно.

Выводы. При разработке оборудования, конструкций крепей, технологических схем для проведения горных выработок, конструкторам и технологам необходимо учитывать, что рабочее место, где процесс возведения постоянной крепи в подготовительном забое, совмещается во времени с процессом выемки и погрузки горной массы в сложных горно-геологических условиях, является зоной повышенной опасности.

Единственная гарантированная защита работающего персонала – дистанционное управление процессом. На сегодняшний день всё забойное оборудование может включаться дистанционно, разработаны предложения по передвижным временным крепям, конструкциям винтовых анкеров, выпускаются видеокамеры и указатели направления во взрывобезопасном исполнении.

Необходимо разработать программное обеспечение для забойного оборудования и обучить персонал не выполнять, а дистанционно контролировать процесс проведения выработки. При таком подходе система не позволит вести горнопроходческие работы с нарушением техники безопасности, а специалисты шахты при составлении планов производства сведут к минимуму отклонения в них, связанные с «человеческим фактором».

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых 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», утверждённой распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022г. №1144-р (Соглашение № 075-15-2022-1190 от 27.09.2022г.) в рамках НИР по теме: «Разработка технологий эффективной отработки трудноизвлекаемых запасов пластовых угольных месторождений подземным способом и скоростной проходки горных выработок роботизированными модулями».

Список литературы

1. Механизация проведения подготовительных выработок / А.И. Петров, Г.Г. Штумпф, П.В. Егоров, Г.Н. Архипов. – М.: Недра, 1988. – 248 с.
2. Технология проведения и поддержания горных выработок большого сечения угольных шахт / А.Ю. Ермаков, П.В. Васильев, В.Н. Фрянов, В.В. Сенкус. – Новокузнецк: НФИ КемГУ, 2015. – 135 с.
3. Штумпф Г.Г. Исследование устойчивости породных обнажений в призабойной зоне проводимых горных выработок на шахтах Кузбасса // Взаимодействие крепи и пород

в сложных условиях : сб. науч. тр. Кузбасского политехнического института. – Кемерово, 1983. – С 43-57.

4. Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах» :утв. приказом Ростехнадзора от 19.11.2020г., № 448. – 167 с.

5. Машины и оборудование для проведения горизонтальных и наклонных горных выработок / Б.Ф. Братченко, Н.К. Гринько, Д.И. Малиованов [и др.]; под общ. ред. Б.Ф. Братченко. – Москва: Недра. – 1975. – 415 с.

6. Лапшин В.В. Механика и управление движением шагающих машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 199 с.

7. Баймухаметов С.К., Фоминых Е.И. Повышение безопасности и темпов проведения подготовительных выработок по выбросоопасным пластам // Уголь. – 1988. – № 8. – С. 29-31.

8. Баскаков В.П., Добровольский М.С. Опыт скоростного проведения подготовительных выработок с применением технологии поэтапного крепления // Уголь. – 2011. – № 10. – С. 5-8.

9. Бреннер В.А., Жабин А.Б., Щеголевский М.М. Щитовые проходческие комплексы. – М.: Издательство «Горная книга», 2009. – 447 с.

10. Ортнер П., Григорьев К.В. Проходческие комбайны типа «Bolter Miner» серии MB600 компании «Sandvik» – системное решение для скоростной и безопасной проходки выработок на угольных шахтах // Уголь. – 2008. – № 11(991). – С. 7-10.

11. Qiao S. Performance evaluation of different pick layouts on bolter miner cutting head / J. Min. Sci. – 2018. – No 54. – P. 969–978.

12. Bertignoll I.H. The Alpine Bolter Miner. Austrian technology for rapid roadway development / Min. Technol. – 1995. – No 77. – P. 163-165.

13. Коденцов А.Я. Гидротехнология на шахтах. – М.: Недра, 1984. – 320 с.

14. Yong W. Current Status and Technical Problems in Research of Coal Mine Rescue Robot // Coal Mine Machinery. – 2007. – Vol. 4. – P. 107–109.

15. Гетопанов В.Н., Гудилин Н.С., Чугреев Л.И. Горные и транспортные машины и комплексы. – М.: Недра, 1991. – 250 с.

16. Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 года : утв. распоряж. Правительства Российской Федерации от 24 января 2012 года, № 14-р.

УДК 622.83

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЛИКВИДАЦИИ ПРОВАЛА
НА УЧАСТКЕ «НОВЫЙ ШЕРЕГЕШ» ШЕРЕГЕШЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
д.т.н. Лобанова Т.В., Трофимова О.Л., Ижболдина С.В., Лобанов С.А.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия**

Аннотация. Приведены результаты исследования процесса сдвижения земной поверхности в районе провала и расчета устойчивости горных пород. Выполнена оценка состояния деформирования земной поверхности и устойчивости обнажений слепых рудных тел. Рекомендовано направление развития работ по ликвидации провала.

Ключевые слова: земная поверхность, провал, слепые рудные тела, сдвижения, деформации, устойчивость.

Актуальность геомеханического обоснования ликвидации провала на участке «Новый Шерегеш» возникла в связи с разработкой проектной документации «Технический проект. «Ликвидация горных выработок на уч. «Новый Шерегеш» Шерегешевского

месторождения». В качестве ликвидируемой горной выработки в разрабатываемой проектной документации рассматривается провал на месте восстающей горной выработки над выработанным пространством блока 9 в районе профильной линии XII – XII (рис. 1, 2). Провал искусственно создан в 1986 г. с целью предотвращения воздушных ударов в горные выработки. В настоящее время провал частично засыпан и подлежит ликвидации путем засыпки до полной отработки участка, до уровня земной поверхности.

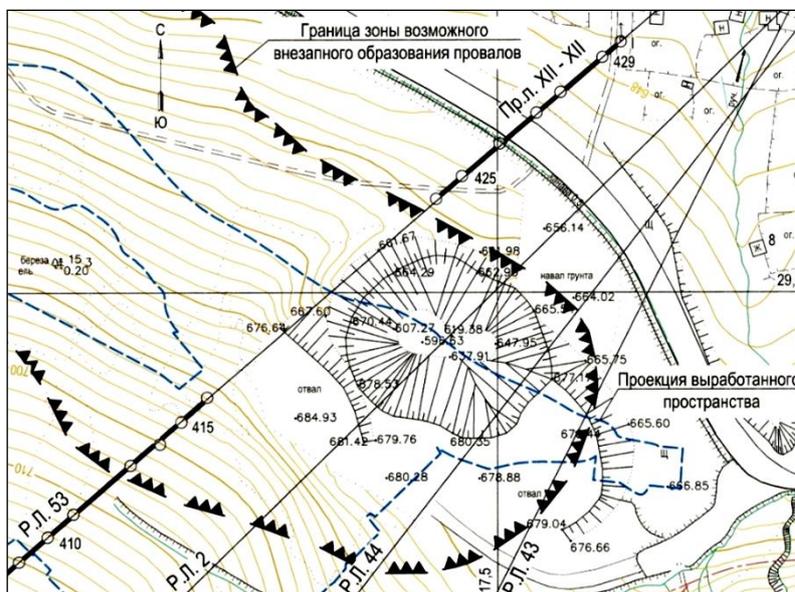


Рис. 1. План поверхности участка «Новый Шерегеш» в районе провала

Для обеспечения безопасного ведения работ по ликвидации провала выполним оценку состояния массива горных пород в районе провала по двум направлениям:

- 1) проанализируем развитие процессов сдвижения и деформирования земной поверхности, определим фактические параметры сдвижения;
- 2) проведем расчеты устойчивости обнажений слепых рудных тел и выполним оценку устойчивости налегающей толщи и боковых пород.

Горные работы на участке «Новый Шерегеш» ведутся в сложных геологических и геодинамических условиях, которые характеризуются высокими коэффициентами крепости и прочности пород, структурно-тектонической нарушенностью массива, слепым залеганием рудных тел, тектоническим полем напряжений, сейсмической активностью региона. Разработка слепых рудных тел участка начата в 1982 г. этажно-камерной системой разработки. В настоящее время высота выработанного пространства достигла 470 м, протяженность отработки по простиранию рудной зоны – 855 м. Параметры выработанного пространства в сочетании с геологическими и геодинамическими условиями определяют особенности развития геомеханических процессов участка.

Развитие процессов сдвижения и деформирования земной поверхности в районе провала рассмотрим по данным мониторинговых инструментальных наблюдений по профильной линии XII – XII, которые проводятся с 1981 г. по настоящее время в рамках выполняемых научно-исследовательских работ. За этот период установлены особенности и закономерности сдвижения и деформирования горных пород участка в различных условиях влияния горных разработок слепых рудных тел [1]. Контроль развития процессов сдвижения земной поверхности Шерегешевского месторождения осуществляется в соответствии с «Инструкцией по наблюдениям за сдвижением...» [2] и «Указаниями по охране сооружений...» [3].

Влияние горных разработок участка «Новый Шерегеш» проявляется в развитии процессов сдвижения и деформирования земной поверхности в мульде сдвижения, граница

которой определяется оседаниями 15 мм или деформациями растяжения и наклона 0,5 мм/м [2, 3]. Опасного влияния горных работ на земную поверхность не установлено, однако выявлены отдельные локальные участки концентрации деформаций, не превышающих критические значения для определения границы зоны опасных сдвижений: горизонтальные деформации растяжения 2 мм/м, наклоны 4 мм/м [2, 3].

Для оценки потенциальной опасности горных разработок и охраны объектов на земной поверхности определена граница зоны возможного внезапного образования провалов на земной поверхности участка (рис. 1), которая отстраивается под углами воронкообразования. Согласно «Указаниям по охране сооружений...» [3] углы воронкообразования в направлении вкрест простирания рудной зоны участка висячем и лежащем боках равны и составляют 80° , в направлении по простиранию – 85° . Построение границы зоны возможного внезапного образования провалов выполнено на основе анализа расчетов устойчивости, который показал, что при увеличении мощности налегающих пород над отработанными блоками на нижних горизонтах, в результате склонения рудного тела на юго-восток, устойчивость налегающей толщи и боковых пород повышается. Это обуславливает состояние устойчивости налегающих и боковых пород над блоками, уходящими под массив боковых пород ниже горизонта +255 м, и дает основание определять границу зоны возможного внезапного образования провалов от границ очистного пространства на горизонтах +325, +255 м (рис. 2).

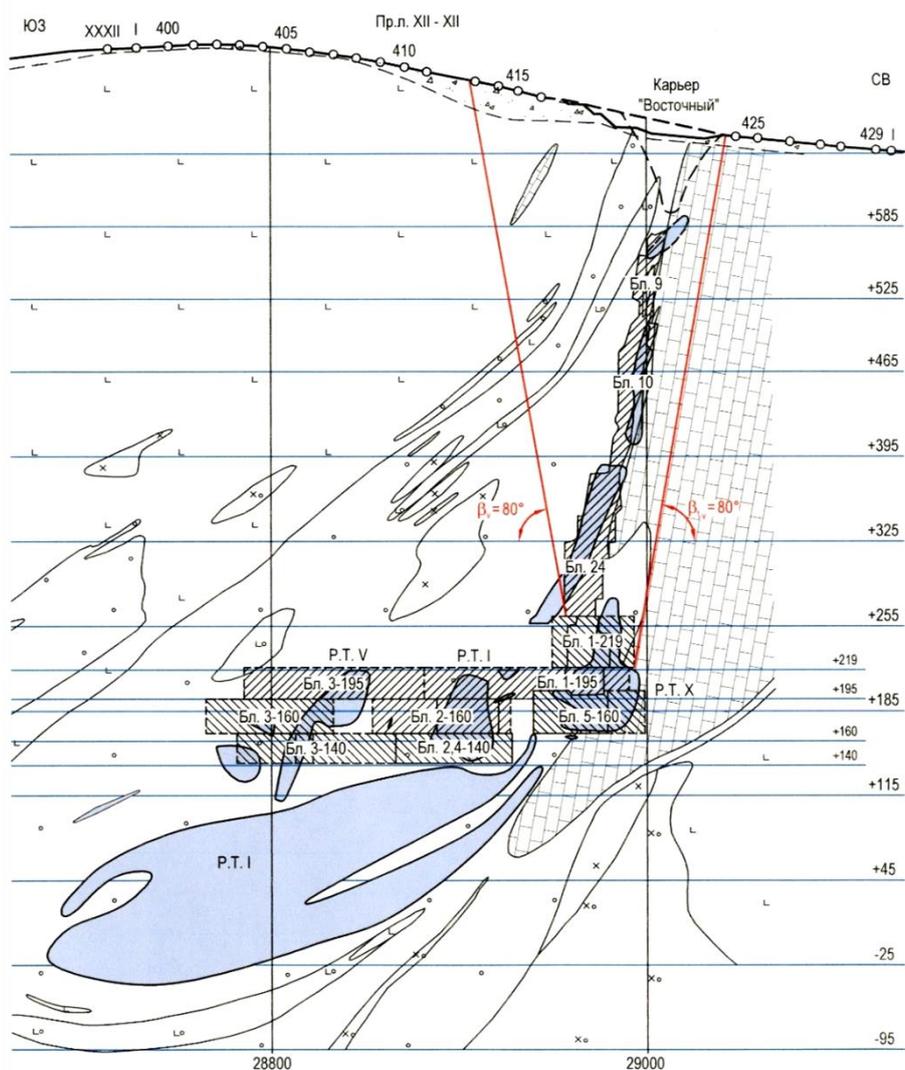


Рис. 2. Разрез вкрест простирания рудных тел по разведочной линии 53 (профильная линия XII)

Оседаний земной поверхности и прямых наклонов в сторону выработанного пространства не наблюдается, в лежачем боку (реперы 429 – 424 на рис. 1) не зафиксировано и деформаций растяжения горных пород. Наиболее представительные данные о параметрах сдвижения получены по профильной линии XII – XII в висячем боку рудных тел (рис. 3).

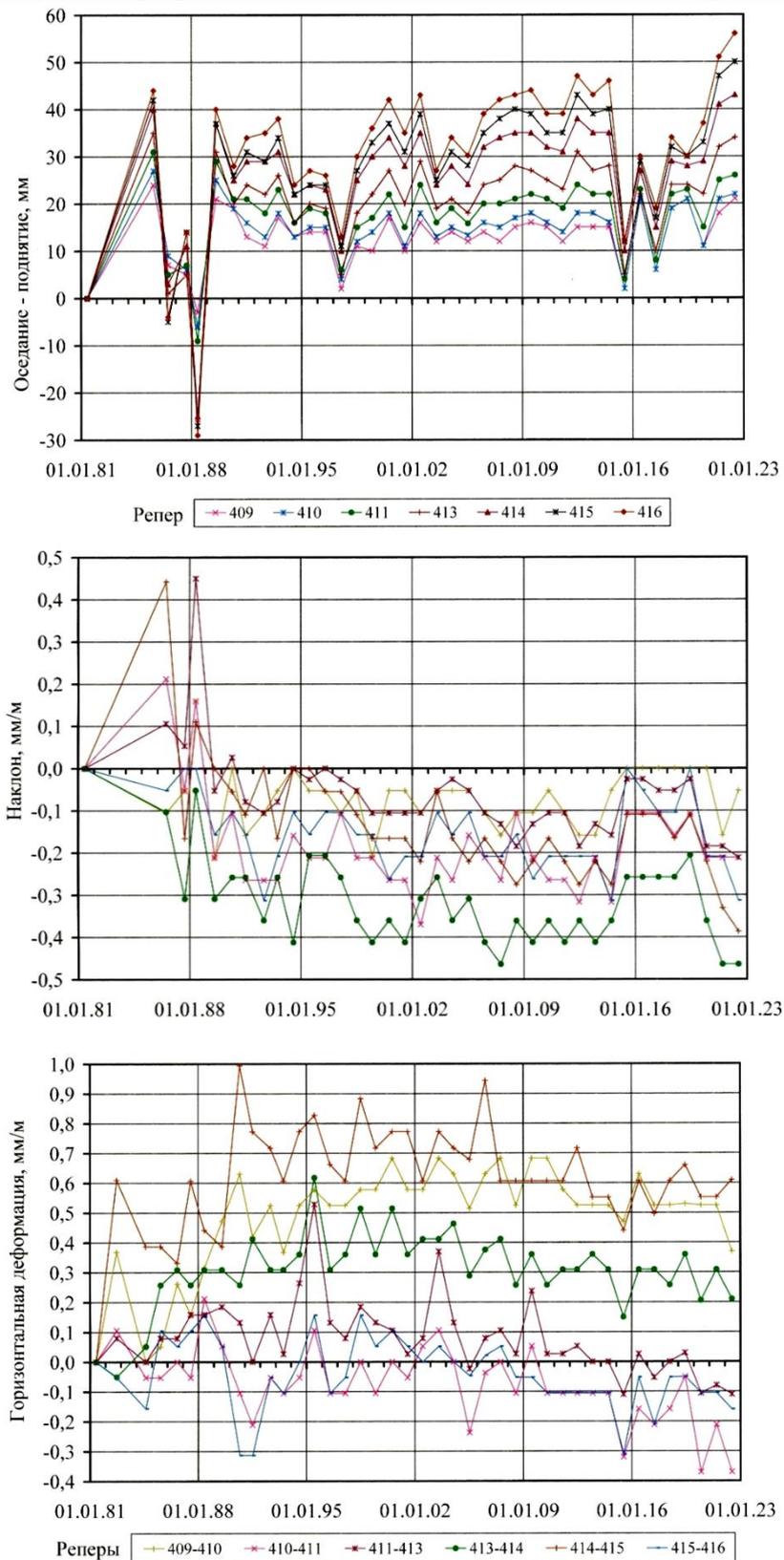


Рис. 3. Изменение во времени сдвижений и деформаций земной поверхности в висячем боку рудных тел по профильной линии XII – XII

Вблизи провала, в том числе и в зоне возможного внезапного образования провалов (рис. 3, реперы 413 – 416), развиваются поднятия земной поверхности, которые достигали 56 мм в 2022 г., и обратные наклоны от провала в направлении нетронутого массива, не превышающие 0,5 мм/м.

В горизонтальной плоскости зафиксировано чередование деформаций растяжения – сжатия, максимальные величины которых в основном не достигают 0,5 мм/м.

Фактические величины сдвижений и деформаций земной поверхности существенно меньше критериальных параметров (табл. 1), характеризующих возможность появления трещин и уступов при отработке слепых рудных тел.

Таблица 1

Предварительные критерии потери устойчивости налегающих пород при отработке слепых рудных тел Шерегешевского месторождения

| Условия образования | Оседание, мм | Горизонтальное сдвижение, мм | Наклон, мм/м | Растяжение, мм/м |
|----------------------------|--------------|------------------------------|--------------|------------------|
| При 4-х стороннем опирании | | | | |
| Трещин | 120 | 150 | 4,7 | 3,7 |
| Уступов | 270 | 230 | 13,0 | 4,7 |
| При 3-х стороннем опирании | | | | |
| Трещин | 200 | 250 | - | 5,5 |
| Уступов | 500 | 500 | - | 10,0 |
| Провалов | 1200 | 1200 | - | 10,0 |

Для оценки устойчивости налегающей толщи и боковых пород при отработке слепых рудных тел участка «Новый Шерегеш» в районе провала используем методику действующих нормативных документов [3, 4], основные положения которой заключаются в следующем.

При отработке слепых рудных тел в тех случаях, когда вслед за выемкой руды не происходит обрушение налегающих пород, не обрушившаяся толща пород может находиться в устойчивом, предельно устойчивом и неустойчивом состоянии.

Устойчивое состояние соответствует условиям плоского устойчивого состояния обнажений выработанного пространства, при котором крупные обрушения горного массива исключаются.

Предельно устойчивое состояние характеризуется процессами сводообразования, в результате которого возможны крупные самообрушения пород в пределах свода естественного равновесия. Неустойчивое состояние определяет самообрушение налегающих пород, одновременное с массовым обрушением блоков, с выходом провала на земную поверхность.

В скальных породах, с коэффициентом крепости по шкале М.М. Протодяконова $f \geq 8$, устойчивость массива в обнажениях зависит, в основном, от глубины залегания отработываемого рудного тела, размеров обнажения и напряженного состояния пород. Расчет устойчивости обнажений производится по методу эквивалентных пролетов, по критическим деформациям и по критическому напряжению.

Критерием устойчивости по методу эквивалентных пролетов является условие

$$l_{\text{ЭКВ}} \leq H_{\text{ЭКВ}}, \quad (1)$$

где $l_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентный по устойчивости пролет выработки неограниченной длины; $H_{\text{ЭКВ}}$ – приведенная к условиям монолитного массива глубина залегания.

Устойчивость подработанной толщи по критическим деформациям обеспечивается при соблюдении условия

$$q < q_c, \quad (2)$$

где q_z – относительная предельная (граничная) деформация, соответствующая устойчивому обнажению; q – относительная деформация подрабатываемой толщи, определяемая по формуле

$$q = \frac{1}{1 + \left(\frac{H_{\text{ЭКВ}}}{l_{\text{ЭКВ}}}\right)^f} \quad (3)$$

Состояние подработанного массива определяется следующими граничными условиями:

$q < 0,001$ – устойчивое обнажение;

$q = (0,001 - 0,04)$ – предельно устойчивое обнажение;

$q > 0,04$ – полное обрушение налегающей толщи.

Критерием устойчивости обнажений по критическим напряжениям является условие

$$K_n < K_z, \quad (4)$$

где K_z – коэффициент граничной несущей способности, $K_z = 0,66 \pm 0,08$.

При $K_n < 0,58$ – устойчивое состояние пород в обнажении;

$K_n = (0,58 - 0,74)$ – предельно устойчивое состояние обнажения;

$K_n > 0,74$ – неустойчивое состояние обнажения, произойдет обрушение.

Для определения степени прочности и устойчивости пород в обнажениях определяются коэффициент запаса прочности и коэффициент запаса устойчивости.

По результатам вычислений производится оценка устойчивости:

а) обнажения относятся к устойчивым, если соблюдаются условия (1), (2), (4) с коэффициентом запаса прочности пород не менее двух и коэффициентом запаса устойчивости не менее единицы;

б) обнажения относятся к предельно устойчивым, если:

– удовлетворяются условия (1), (2), (4) с запасом прочности менее двух и запасом устойчивости менее единицы;

– удовлетворяется условие (1) и хотя бы одно из условий (2), (4) определяет предельно устойчивое состояние;

в) обнажение рассматривается как неустойчивое, если хотя бы одно из условий (1), (2), (4) определяет неустойчивое состояние.

Условие отсутствия опасных деформаций на земной поверхности при разработке слепых изолированных рудных тел соответствует устойчивым обнажениям с четырёхсторонним опиранием.

Оценку устойчивости обнажений в районе провала выполним в разрезах по разведочным линиям 53, 2, 44, 43. Расчеты выполним последовательно по этапам (этажам, подэтажам) отработки рудных тел, что позволит оценить стадии и границы различного расчетного состояния обнажений от устойчивых до предельно устойчивых или неустойчивых. Все расчеты (табл. 2) содержат оценку устойчивости налегающих и боковых пород. Для боковых пород расчеты выполняются при условии неустойчивого или предельно устойчивого состояния налегающей толщи [3, 4].

Работы по ликвидации провала рекомендовано начать с торцевой, юго-западной части провала, где установлено фактическое и расчетное устойчивое состояние обнажений по разведочной линии 43.

По разведочным линиям 53, 2, 44 состояние фактического выработанного пространства по критериям эквивалентных пролетов и критических деформаций оценивается как неустойчивое при отработке рудных тел на всю глубину отработки, что обусловлено большим пролетом выработанного пространства вкост простирания (n) и длиной по падению при незначительной глубине залегания от земной поверхности (H_3) верхних блоков. За счет склонения рудных тел в юго-западном направлении и увеличения мощности налегающей толщи устойчивость обнажений повышается, а состояние устойчивости налегающих пород переходит в устойчивое.

Таблица 2

Результаты расчета устойчивости вмещающих пород участка «Новый Шерегеш»
в районе провала

| n, м | H _з , м | ℓ _{ЭКВ} | H _{ЭКВ} | Показатели устойчивости | | | Состояние устойчивости обнажения |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------|------------------|-------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| | | | | ℓ _{ЭКВ} ≤ H _{ЭКВ} | q < q _Г | K _П < K _Г | |
| Разведочная линия 53 | | | | | | | |
| Расчет устойчивости налегающей толщи | | | | | | | |
| 47 | 95 | 99,3 | 78,7 | 99,3>78,7 | 0,98>0,04 | 0,17<0,58 | неустойчивое |
| 85 | 95 | 206,9 | 78,7 | 206,9>78,7 | 1,0>0,04 | 0,17<0,58 | неустойчивое |
| 359 | 284 | 359 | 235,4 | 359>235,4 | 1,0>0,04 | 0,17<0,58 | неустойчивое |
| 92 | 284 | 107,6 | 235,4 | 107,6<235,4 | 3,7×10 ⁻⁶ <0,001 | 0,17<0,58 | устойчивое |
| 236 | 452 | 236 | 374,6 | 236<374,6 | 6,2×10 ⁻⁴ <0,001 | 0,17<0,58 | устойчивое |
| Расчет устойчивости боковых пород | | | | | | | |
| 47 | 183 | 99,3 | 151,7 | 99,3<151,7 | 1,1×10 ⁻³ >0,001 | 0,17<0,58 | предельно устойчивое |
| 85 | 243 | 206,9 | 201,4 | 206,9>201,4 | 0,61>0,04 | 0,17<0,58 | неустойчивое |
| 359 | 405 | 359 | 335,7 | 359>335,7 | 0,75>0,04 | 0,17<0,58 | неустойчивое |
| 252 | 491 | 252 | 406,9 | 252<406,9 | 4,7×10 ⁻⁴ <0,001 | 0,17<0,58 | устойчивое |
| Разведочная линия 2 | | | | | | | |
| Расчет устойчивости налегающей толщи | | | | | | | |
| 40 | 36 | 40 | 27,4 | 40>27,4 | 1,0>0,04 | 0,24<0,58 | неустойчивое |
| 266 | 332 | 268,8 | 252,3 | 268,8>252,3 | 0,74>0,04 | 0,24<0,58 | неустойчивое |
| 39 | 332 | 82,6 | 252,3 | 82,6<252,3 | 1,0×10 ⁻⁸ <0,001 | 0,24<0,58 | устойчивое |
| 114 | 424 | 114 | 322,2 | 114<322,2 | 3,6×10 ⁻⁸ <0,001 | 0,24<0,58 | устойчивое |
| 77 | 464 | 77 | 352,6 | 77<352,6 | 1,3×10 ⁻¹¹ <0,001 | 0,24<0,58 | устойчивое |
| Расчет устойчивости боковых пород | | | | | | | |
| 40 | 101 | 40 | 76,7 | 40<76,7 | 2,1×10 ⁻⁵ <0,001 | 0,24<0,58 | устойчивое |
| 266 | 425 | 268,8 | 322,9 | 268,8<322,9 | 0,046>0,04 | 0,24<0,58 | неустойчивое |
| 191 | 476 | 196,3 | 361,7 | 196,3<361,7 | 4,2×10 ⁻⁵ <0,001 | 0,24<0,58 | устойчивое |
| Разведочная линия 44 | | | | | | | |
| Расчет устойчивости налегающей толщи | | | | | | | |
| 40 | 84 | 83,3 | 58,1 | 83,3>58,1 | 1,0>0,04 | 0,31<0,58 | неустойчивое |
| 206 | 324 | 206 | 224,1 | 206<224,1 | 0,19>0,04 | 0,31<0,58 | неустойчивое |
| 40 | 324 | 83,1 | 224,1 | 83,1<224,1 | 4,7×10 ⁻⁸ <0,001 | 0,31<0,58 | устойчивое |
| 40 | 401 | 40 | 277,4 | 40<277,4 | 5,1×10 ⁻¹⁵ <0,001 | 0,31<0,58 | устойчивое |
| 121 | 456 | 121 | 315,4 | 121<315,4 | 8,4×10 ⁻⁸ <0,001 | 0,31<0,58 | устойчивое |
| Расчет устойчивости боковых пород | | | | | | | |
| 40 | 148 | 83,3 | 102,4 | 83,3<102,4 | 0,029>0,001 | 0,31<0,58 | предельно устойчивое |
| 206 | 408 | 206 | 282,2 | 206<282,2 | 4,7×10 ⁻³ >0,001 | 0,31<0,58 | предельно устойчивое |
| Разведочная линия 43 | | | | | | | |
| Расчет устойчивости налегающей толщи | | | | | | | |
| 69 | 271 | 69 | 185,6 | 69<185,6 | 1,3×10 ⁻⁷ <0,001 | 0,32<0,58 | устойчивое |
| 69 | 271 | 90,7 | 185,6 | 90,7<185,6 | 1,1×10 ⁻⁵ <0,001 | 0,32<0,58 | устойчивое |

Неустойчивое или предельно устойчивое состояние налегающей толщи сохраняется над блоками 9, 10 под искусственно созданным провалом (разведочная линия 53, 2, 44).

Однако возможное обрушение пород в этом случае не выйдет за пределы карьера (рис. 2), образованного при вскрыше наносов перед образованием провала. По разведочной линии 43 обнажение фактического выработанного пространства соответствует устойчивому состоянию.

Планируемые, согласно действующей проектной документации, очистные работы участка будут проводиться под выработанным пространством вышележащих этажей или под массивом боковых и налегающих пород. Поэтому они не окажут заметного влияния на устойчивость налегающей толщи. Наиболее вероятное развитие процессов сдвижения будет повторять периодичность оседаний – поднятий и прямых – обратных горизонтальных сдвижений, что наблюдается на земной поверхности участка уже на протяжении всего периода отработки запасов.

Выводы. Процессы сдвижения и деформирования горных пород и земной поверхности участка «Новый Шерегеш» в 1981 – 2022 гг. характеризуются периодическим развитием поднятий – оседаний и растяжений – сжатий, что отражает процессы перераспределения напряжений в налегающей толще над выработанным пространством.

Выявленные параметры, особенности и закономерности сдвижения горных пород при отработке слепых рудных тел участка «Новый Шерегеш» свидетельствуют о том, что в 2023 г. на земной поверхности в районе провала не ожидается опасного влияния горных разработок (формирования зоны трещин и зоны опасных сдвижений).

Список литературы

1. Лобанова Т.В. Обоснование безопасной эксплуатации охраняемых объектов при отработке запасов слепых рудных тел участка «Новый Шерегеш» Шерегешевского месторождения // Академический журнал Западной Сибири. – 2014. – № 4 (53). – Том 10. – С. 21 – 22.
2. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений : утв. М-вом цв. мет. СССР : введ. в действие с 03.07.1986. – М.: Недра, 1988. – 112 с.
3. Указания по охране сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на железорудных месторождениях ОАО «Евразруда» : согл. Управлениями по технологическому и экологическому надзору Ростехнадзора по Кемеровской обл. 09.10.2006 и по Республике Хакасия РФ 16.11.2006. – Новокузнецк, 2006. – 95 с.
4. Инструкция по условиям безопасной отработки слепых рудных залежей на железорудных месторождениях Горной Шории и Хакасии : согл. Управлениями по технологическому и экологическому надзору Ростехнадзора по Кемеровской обл. 09.10.2006 и по Республике Хакасия РФ 16.11.2006 . – Новокузнецк, 2006. – 58 с.

УДК 622.031; 622.272.6; 622.831.325

ЭТАПЫ ПОДГОТОВКИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ

к.т.н. Исаченко А.А.

Филиал «Шахта «Ерунаковская-VIII» АО «ОУК «Южкузбассуголь»,
г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены этапы разработки проектных решений при отработке сложноструктурных месторождений в условиях кластера угледобывающих предприятий Кузбасса на современном этапе развития. Приведены негативные факторы, оказывающие существенное влияние на безопасность горных работ. В рамках комплексного подхода к разработке технических решений по обеспечению безопасной эксплуатации

угледобывающего предприятия в условиях сложноструктурных угольных месторождений предложено использовать метод декомпозиции, который позволяет оценить влияние на геомеханическое, геодинамическое и сейсмическое состояние подземных горных работ характеристик геомассива, техногенного воздействия эксплуатируемого, а также смежных предприятий кластера. Описан предложенный метод разработки технических решений на основе декомпозиции исходных данных.

Ключевые слова: горнодобывающие предприятия, конвергенция, метод декомпозиции, сейсмичность, сложноструктурные месторождения, кластер.

Неравномерность расположения предприятий Кузбасса открытой и подземной угледобычи концентрируют на относительно небольшой площади техногенные объекты, оказывающие существенное влияние на геомеханическую, геодинамическую и сейсмическую ситуацию литосферы земли района ведения горных работ.

Несколько взаимовлияющих друг на друга предприятий создают кластер угледобывающих предприятий. В динамике развития угледобывающих районов Кузбасса наблюдается создание отдельных кластеров по видам горных работ (ликвидируемые, открытые, подземные, комбинированные, проектируемые) с концентрацией предприятий интенсивной угледобычи, которые продолжают изменять геотехническую и геодинамическую ситуацию в регионе.

Условно в Кузбассе кластеры делятся:

- на участки недр с ранее отработанными и в настоящее время ликвидированными или временно законсервированными угледобывающими предприятиями (Ажеро-Судженский, Прокопьевско-Киселевский, Кемеровский, Байдаевский районы и др.);

- районы с концентрацией предприятий преимущественно открытой угледобычи (Бочатский, Мрасский районы);

- районы подземной угледобычи (Ленинский район);

- районы с высокой концентрацией комплексного освоения недр (Томь-Усинский, Ускатский, Кондомский, Осинниковский, Ерунаковский). Это участки недр, освоение которых осуществляется одновременно двумя видами геотехнологии: открытой и подземной. Они оказывают взаимное влияние друг на друга.

- районы подземной геотехнологии с попутной заблаговременной дегазацией или добычей метана (Ерунаковский и Междуреченский).

Интенсивная индустриализация Кузбасса, в основе которой находится горнодобывающая промышленность, меняет параметры земной коры. Это влияет на напряженно-деформированное состояние недр и, как следствие, проявление геомеханических, геодинамических процессов, осложняющих ведение горных работ.

Современный уровень развития угольной промышленности сформировал несколько негативных факторов, ранее не свойственных для угольных шахт [17]:

- скоротечная конвергенция почвы и кровли горных выработок;

- ламинарная конвергенция боков горных выработок;

- повышенная сейсмичность в районе ведения горных работ;

- неравномерное проявление динамических явлений низкого и высокого энергетического класса;

- повышенное метановыделение из надрабатываемых угольных пластов-спутников и пр.

В настоящее время влияние скоротечных сейсмических и геодинамических событий на эффективность и безопасность горных работ оценивается по ретроспективной информации [10-13, 16]. Однако на практике необходимо создание методики прогнозирования проявлений сейсмической активности с изменением структуры отклика земной коры на увеличение интенсивности угледобычи группы шахт и разрезов в отдельных районах Кузнецкого угольного бассейна.

Безопасная эксплуатация угледобывающих предприятий в условиях комплекса негативных факторов, оказывающих существенное влияние на горных работы, в действующей нормативной документации не рассматривается.

Для поддержания приемлемого уровня безопасности на предприятиях, отрабатывающих сложноструктурные месторождения, осуществляется научное сопровождение специализированными организациями.

Обеспечение безопасных условий персонала предприятия подземной угледобычи, отрабатывающее сложноструктурное месторождение каменного угля, должно сопровождаться решением следующих задач (рис. 1):

- прогнозирование развития негативных сценариев развития геомеханической, геодинамической или сейсмической ситуаций в горных выработках на основе предвестников таких событий [14];

- разработка и реализация комплекса организационно-технических проектных решений (мероприятий), направленных на минимизацию возможных последствий проявлений негативных сценариев развития геомеханической, геодинамической или сейсмической ситуаций в горных выработках;

- одновременное выполнение обоих пунктов.

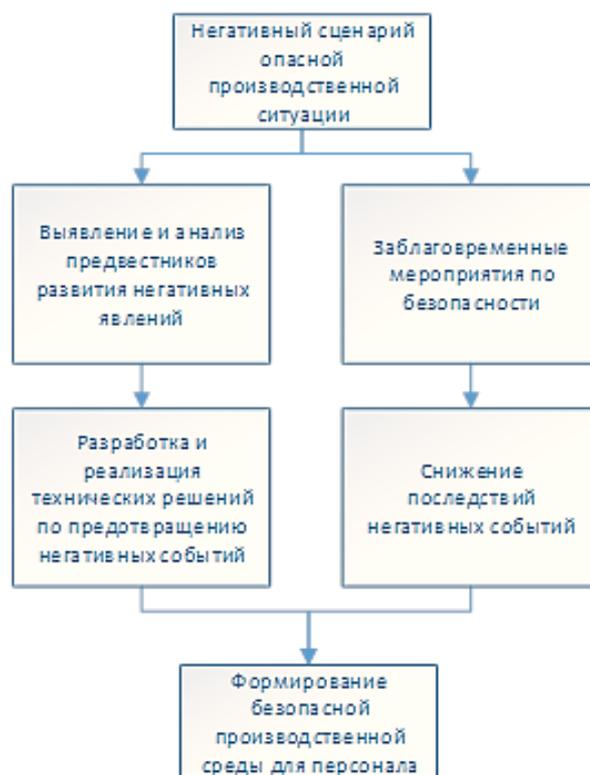


Рис. 1. Схема формирования безопасной производственной среды для предприятий угледобычи

В рамках комплексного подхода к разработке технических решений по обеспечению безопасной эксплуатации угледобывающего предприятия в условиях сложноструктурных угольных месторождений предлагается использование метода декомпозиции. Указанный метод позволяет оценить влияние на геомеханическое, геодинамическое и сейсмическое состояние подземных горных работ характеристик геомассива, техногенного воздействия эксплуатируемого, а также смежных предприятий кластера.

На рис. 2 представлена общая схема разработки технических решений кластера угледобывающих предприятий при отработке сложноструктурного месторождения. Согласно схеме, на угледобывающем предприятии принимается решение о проектировании (разработке технических решений) в виде подготовки технического задания.

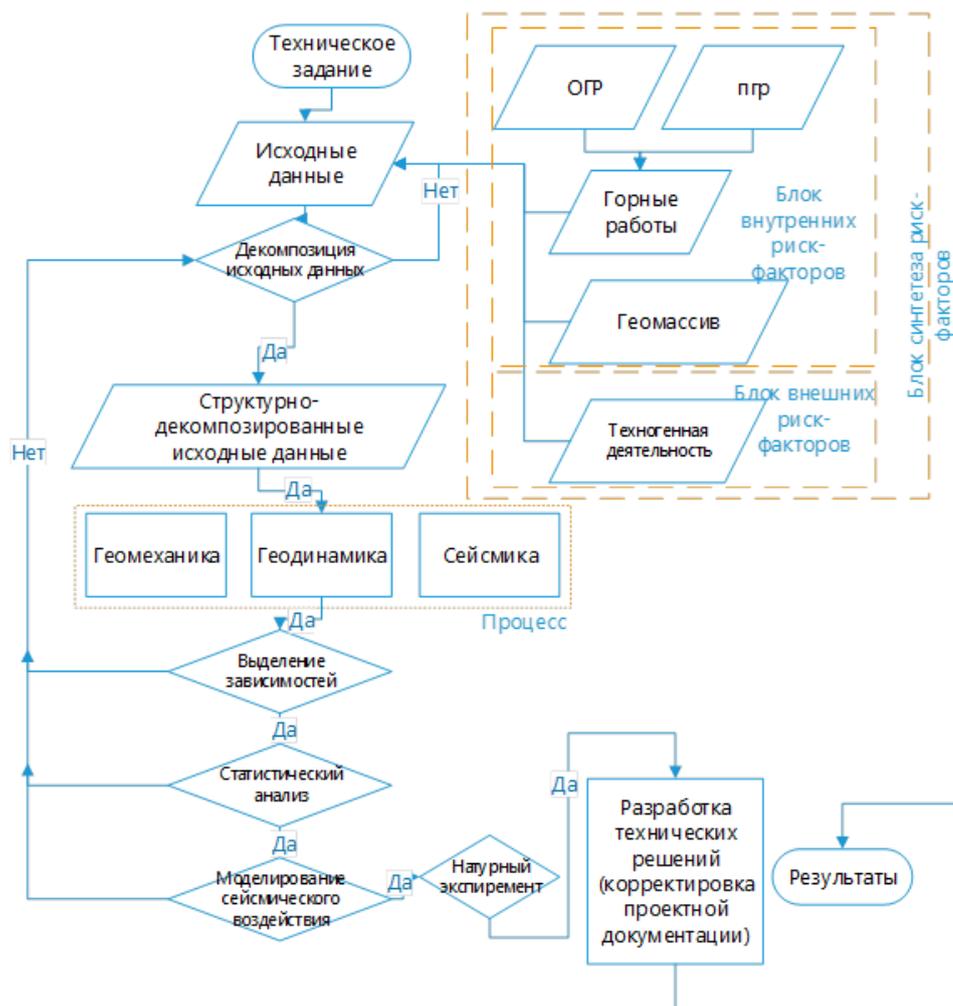


Рис. 2. Схема разработки технических решений на основе декомпозиции исходных данных при взаимном влиянии двух и более горнодобывающих предприятий

Далее подготавливаются исходные данные. К стандартным исходным данным для проектирования (планы горных работ, перспективный график подготовки и отработки запасов, геологическая информация, анализ ранее принятых проектных решений и пр.) добавляются массив данных риск-факторов. Это особое отличие от обычного проектирования или научного сопровождения. Блок риск факторов – комплекс (массив) геологических и технологических данных не только внутренних, но и внешних данных, способных оказывать влияние на геомеханическое, геодинамическое состояние горных выработок.

Блок риск-факторов подразделяется на внешний и внутренний.

К внутренним риск-факторам относятся: характеристика геомассива и горные работы эксплуатируемого и смежных предприятий кластера.

К характеристикам геомассива следует отнести параметры:

- геологического строения массива обрабатываемого месторождения;
- постоянные и переменные геологические структуры;
- геологические нарушения;
- рельеф поверхности;
- наличие на поверхности открытых горных выработок или породных отвалов;
- наличие водных объектов в районе ведения горных работ и пр.

К горным работам относятся элементы технологии эксплуатируемого предприятия, а также геомассив и элементы технологии смежных предприятий рассматриваемого кластера.

К параметрам смежных предприятий следует отнести параметры геомассива, отмеченные ранее, элементы технологии ведения горных работ, параметры подземных и открытых горных выработок, а также технологии ведения горных работ. Для открытых горных работ необходимо особо отметить открытые горные выработки и места образования породных отвалов.

К внешним факторам относится техногенная деятельность человека: измененная сейсмичность района проектирования [15], наличие гидросооружений, населенных пунктов, линейных объектов линий ЛЭП, железных и автомобильных дорог и т.п.

К исходным данным относятся все элементы геологических и техногенных структур, которые находятся в рассматриваемом кластере.

Полученные исходные данные декомпозируются, разделяются на составные части и структурируются по блокам (геомеханика, геодинамика и сейсмика). При разработке технических решений для разных горно-геологических условий и в зависимости от направления исследований возможно структурирование на большее количество блоков.

На основе полученных данных производится выделение взаимозависимостей элементов декомпозиции с последующей проверкой статистическими методами и при положительном результате проводится математическое моделирование условий эксплуатации подземных горных выработок при воздействии выявленных факторов [8, 9]. Результаты моделирования обсуждаются и проводится натурный эксперимент. При проведении натуральных исследований применяются визуальные, инструментальные или комбинированные методы.

Визуальные обследования состояния горных выработок осуществляются по заданному маршруту или пикетам на выкопировке из плана горных выработок с записью аномальных проявлений горного давления в полевом журнале или зарисовкой (фотографированием) характерных участков выработок.

Инструментальные наблюдения включают измерения смещений контурных или глубинных реперов с помощью рулетки или по показаниям датчиков, замеры форм и размеров разрушений горных пород и элементов крепи, снятие показаний системы азрогазовой защиты, GITS, оперативных сводок по данным сейсмического мониторинга, данных параметров давления гидравлических стоек секций механизированной крепи, камер видеонаблюдения и пр.

Комбинированными методами шахтных наблюдений [1-7] являются: проведение натуральных измерений, фотографирование или зарисовки характерных отклонений состояния реального объекта исследования от указанного в проектной документации. Анализ и обработка полученной информации в ходе натуральных исследований производится в виде таблиц, графиков, выводов и рекомендаций специализированных организаций.

По результатам натурного эксперимента принимается решение о достаточности натуральных исследований или необходимости их продолжения. При необходимости дополнительных исследований на основе выделенных зависимостей и статистического анализа, математическая модель корректируется. На основании результатов исследований принимается решение о разработке технических решений и корректировке проектной документации.

Выводы. Для обеспечения качественного геомеханического, геодинамического и сейсмического обеспечения горных работ при разработке сложноструктурных месторождений каменного угля в условиях кластеризации угледобывающих предприятий необходимо решить следующие актуальные задачи.

Разработать методологию идентификации горно-геологической информационной многофакторной системы сложноструктурных угольных месторождений как объекта геотехнологии.

Выявить по результатам комплексных натуральных экспериментов механизмы (закономерности) взаимодействия геомеханических, геодинамических, сейсмических и газодиффузионных процессов при подземной разработке сложноструктурных угольных месторождений.

Обосновать по результатам вычислительных и натуральных экспериментов зависимости основных геомеханических параметров подземной геотехнологии от комплекса геологического и технологического факторов.

Разработать технологические и технические решения для компенсации негативного влияния массива горных пород, сейсмичности и высокой метаноносности угольных пластов на эффективность и безопасность подземной геотехнологии.

Разработать методику прогнозирования параметров геомеханического, геодинамического и газодинамического состояний массива горных пород в сейсмоопасном регионе для выявления предвестников опасных производственных ситуаций и их профилактики при интенсивной добыче угля с целью создания безопасных условий труда персонала шахт.

Подтвердить опытным путем обоснованность геомеханических параметров подземной геотехнологии, технологических и технических решений для выбора рационального варианта разработки месторождений в сейсмически активных районах.

Список литературы

1. Волошин В.А. Геомеханический прогноз устойчивости подготовительных выработок в зонах геологических нарушений и повышенного горного давления: автореф. дис. на соиск. учён. степ. канд. техн. наук ; СибГИУ. – Новокузнецк, 2002. – 24 с.
2. Методы и средства решения задач горной геомеханики / Г.Н. Кузнецов, К.А. Ардашев, Н.А. Филатов [и др.]. – М.: Недра, 1987. – 248 с.
3. Ерофеев Л.М., Мирошникова Л.А. Повышение надёжности крепи горных выработок. – М.: Недра, 1988. – 245 с.
4. Оценка эффективности двухуровневого анкерного крепления сопряжений горных выработок угольных шахт / П.В. Гречишкин, А.С. Позолотин, Д.Ф. Зяятдинов, В.Н. Шаров // Горный журнал. – 2015. – № 8. – С. 48-52.
5. Григорьев В.Е. Оценка дизъюнктивной нарушенности выемочных полей для обоснования целесообразности их отработки // Труды Всесоюзного ордена Трудового Красного Знамени НИИ Горной геомеханики и маркшейдерского дела. – Л.: ЛГИ. – 1982. – С. 3-6.
6. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов (РД 03-418-01) – М.: ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2001. – URL: http://www.rosteplo.ru/Npb_files/npb_shablon.php?id=201.
7. Свойства горных пород и методы их определения / Е.И. Ильницкая, Р.И. Тедер, Е.С. Ватолин, М.Ф. Кунтыш. – Москва: Недра, 1969. – 392 с.
8. 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 интелект. собств.; Дата регистр. 30 июля 2020.
9. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике – М.: Недра, 1987. – 221 с.
10. Панин С.Ф. Особенности проявлений сейсмических активизаций на шахтах Кузбасса и организация сейсмического контроля за состоянием недр // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. статей. – Новокузнецк, СибГИУ, 2013. – С. 259–263.
11. Ванякин О.В. Обоснование параметров технологических схем отработки сближенных пологих угольных пластов: автореф. дис.на соиск. учён. степ. канд. техн. наук ; Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – СПб, 2016. – 20 с.
12. Лазаревич Т.И., Харкевич А.С., Власенко Ю.Н. Характеристика и анализ горно-технических условий проявления динамических явлений // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. – 2018. – № 4. – С. 458–460.
13. Управление рисками возникновения аварийных ситуаций при ведении подземной добычи в зонах влияния крупных геологических нарушений / Т.И. Лазаревич, А.С.

Харкевич, Ю.Н. Власенко, Е.А. Шубина // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2019. – № 5. – С. 418–426.

14. Факторы изменения сейсмического режима и локализации опасных зон при крупномасштабном техногенном воздействии / А.А. Козырев, И.Э. Семенова, С.А. Жукова, О.Г. Журавлева // Горная промышленность. – 2022. – № 6. – С. 95-102. – DOI 10.30686/1609-9192-2022-6-95-102.

15. Ляпин Р.Л., Косинова И.И. Техногенная сейсмичность при массовых взрывах при горнодобывающей деятельности // Закономерности трансформации экологических функций геосфер крупных горнопромышленных регионов : материалы междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 17–19 ноября 2020 года. – Воронеж: Истоки, 2020. – С. 173-176.

16. Адушкин В.В. Развитие техногенно-тектонической сейсмичности в Кузбассе // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. – № 5. – С. 709-724. – DOI 10.15372/GiG20180510.

17. Исаченко А.А., Петрова Т.В., Фрянов В.Н. Закономерности проявления динамических явлений при отработке свит угольных пластов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. – № 2. – С. 311-323.

18. Исаченко А.А., Петрова Т.В. Закономерности проявления динамических событий и распределения локальных коллекторов метана в структурно неоднородном геомассиве при отработке угольных пластов с применением заблаговременной дегазации // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2022. – № 3 (151). – С. 54-63. – DOI: 10.26730/1999-4125-2022-3-54-63

УДК 622.243.2

ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К БЕЗОПАСНОЙ ОТРАБОТКЕ ВЫСОКОГАЗОНОСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ НА ГЛУБОКИХ ШАХТАХ КУЗБАССА

¹к.т.н. Волошин В.А., ¹к.т.н. Риб С.В., ²Черняк М.Г., ²Рахимкулов И.Р., ³Фомин В.В.

1 – Сибирский государственный индустриальный университет,

г. Новокузнецк, Россия

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

3 – ООО «Метанэнергоресурс», г. Кемерово, Россия

Аннотация. Обозначены перспективы применения скважин направленного бурения для дегазации на угольных шахтах. Представлен инновационный подход к выбору основных технологических схем и параметров дегазации с учетом передовых технологий мирового уровня. Приведены технологии и оборудование направленного скважинного бурения для дегазации, применяемые на шахтах Китая.

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

Обеспечение метанобезопасности угольных шахт Кузбасса осуществляется на базе комплексных решений в технологии угледобычи, систем вентиляции, дегазации, утилизации и использования шахтного метана. Безаварийную работу шахт можно достичь за счет целевого управления газовыделением средствами вентиляции и дегазации, а также организационными методами, включающими мониторинг состояния шахтной атмосферы и массива горных пород, что имеет место в практике ведущих угледобывающих стран мира [1].

В период эксплуатации шахты проводится дегазация угольных пластов, что позволяет при выемке угля снизить опасный уровень содержания метана в рудничной атмосфере. При этом схема расположения и параметры заложения скважин, объединенные в единую

систему, определяются с учетом плана будущих горных работ. Эффективность подземной пластовой дегазации, как правило, составляет не более 10-20%, что при современном уровне механизации очистных работ недостаточно для обеспечения безопасной работы шахт [2, 3].

В связи с этим, в горной практике при ведении подготовительных и очистных работ на газовых угольных шахтах возникают проблемы. Анализ существующих нормативных документов [4-7] показал, что выполняемые мероприятия и рекомендации по снижению метановыделения не в полной мере соответствуют сложным условиям глубоких шахт.

Требуется инновационный подход к выбору основных технологических схем и параметров дегазации с учетом передовых технологий мирового уровня.

На сегодняшний день в Кузбассе накоплен богатый опыт проведения мероприятий по комплексной дегазации углепородного массива (разрабатываемых угольных пластов, выработанных пространств), но применяемые схемы дегазации при высокоинтенсивной отработке газоносных пластов не обеспечивают необходимый коэффициент дегазации. Низкая эффективность способов пластовой дегазации обусловлена объективным характером, связанным с тем, что до 95-98% метана угольных пластов находится в связанном (сорбированном) состоянии, и его десорбция требует существенных энергетических затрат, связанных с разрушением угольного пласта [8-10].

В работе [11] авторами предложена методика расчета максимально допустимых нагрузок на очистной забой в зависимости от остаточной после осуществления пластовой дегазации газоносности пласта «Болдыревский», Кузбасс (рис. 1).

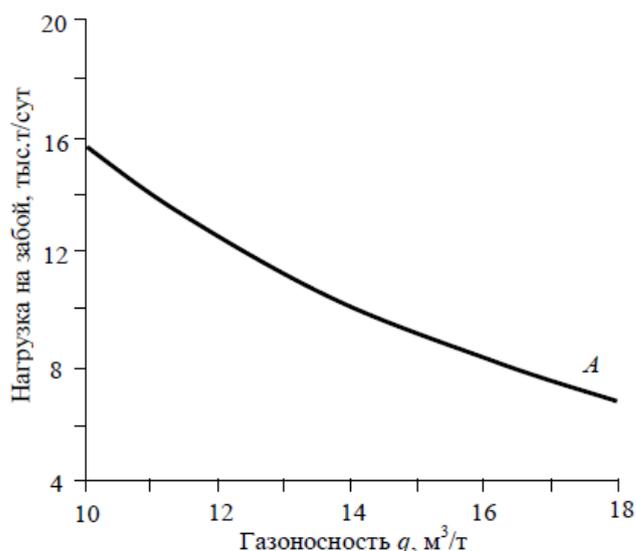
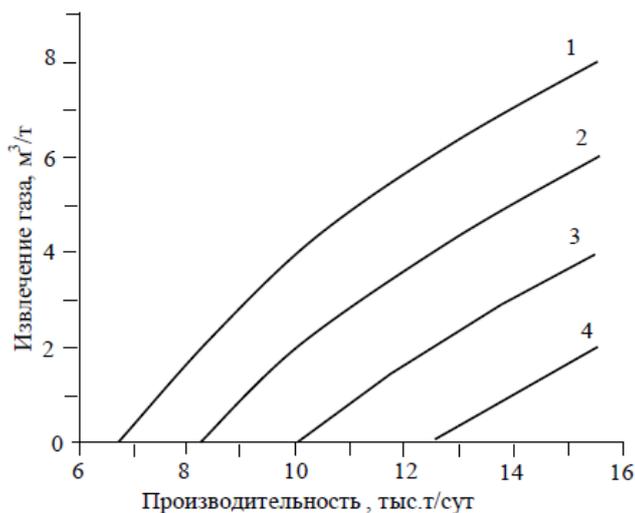


Рис. 1. Нагрузка на очистной забой в зависимости от газоносности пласта «Болдыревский», лава 24-58

Из рис. 1 очевидно, что при снижении газоносности пласта за счет комплексной дегазации до 11 м³/т, предельно допустимая нагрузка на очистной забой в лаве 24-58 возрастет до 14 тыс. т/сут. Номограмма для определения необходимого извлечения метана в процессе пластовой дегазации (рис. 2) позволяет делать достоверный выбор пластовой дегазации в зависимости от требуемой нагрузки на очистной забой.

Например, если фактическая газоносность пласта «Болдыревский» на выемочном участке составляет 16 м³/т и нагрузка планируется на уровне 14 000 т/сут, то необходимая глубина дегазации (необходимое извлечение метана из разрабатываемого пласта в процессе пластовой дегазации) составит 5 м³/т. Из известных данных о фактической достоверной эффективности различных схем пластовой дегазации в этом случае в качестве базовой схемы рекомендуется технология заблаговременной дегазации скважинами с поверхности с гидрорасчленением угольных пластов [11].



Начальная газоносность угольного пласта: 1 – 18 м³/т; 2 – 16 м³/т; 3 – 14 м³/т; 4 – 12 м³/т

Рис. 2. Необходимое извлечение метана для повышения производительности очистного забоя

При всех положительных моментах данной методики следует отметить, что применение заблаговременной дегазации скважинами с поверхности с гидрорасчленением угольных пластов требует значительных затрат и технически это не всегда возможно.

На шахтах Кузбасса и мира широкое применение получили способы бурения дегазационных скважин станками роторного действия (традиционное бурение). Станки просты в эксплуатации, довольно надежны и обеспечены требуемым количеством инвентарного оборудования, агрегатов и запасных частей. Инновационный, прогрессивный и относительно новый 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. Возможность проведения эксплуатационной доразведки на участках, где прогнозируются дизъюнктивные и пликвативные нарушения.

2. Бурение разнонаправленных скважин с одного места установки бурового станка.

3. Высокая точность определения положения скважины в пространстве.

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

5. Возможность проведения одной скважины по пласту, в почве и кровле выработки.

Буровая установка направленного бурения позволяет:

– бурить скважины по направленной траектории (трассе) в плоскости разрабатываемого пласта;

– обуривать дегазируемую часть угольного пласта как одиночными, так и веерными скважинами (рис. 3) из одной, двух или трех выработок;

– обуривать пласт угля на выемочном участке по специально разработанным схемам направленного бурения [12].

В результате технического прогресса созданы высокоэффективные средства и технологии проходки сложных полого-восстающих скважин, а также многоствольных скважин, поднявших уровень эффективности дегазации и извлечения метана угольных пластов. В настоящий момент предложены средства дистанционного формирования траектории скважин с контролем направления в режиме непрерывного мониторинга. И один из лидеров этих технологий является Китай.

На шахтах Китая широко распространена схема дегазации выемочного участка с извлечением метана из заблаговременно пробуренных скважин по обрабатываемому пласту,

а также проведение скважин по кровле и почве на удалении от пласта на расстоянии до 30 м.

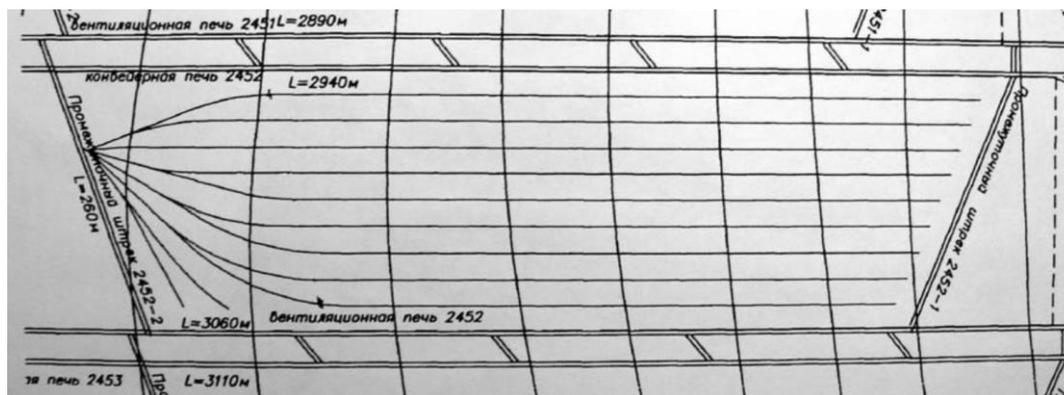


Рис. 3. Схема размещения в плоскости разрабатываемого пласта угля длинных направленной трассы скважин

Существенной проблемой проведения скважин являются трещиноватый мягкий уголь, в котором создается бесформенная полость, в результате чего буровой инструмент может заклинить. Это существенно снижает темпы строительства скважины. Кроме того, давление в угольном массиве приводит к преждевременному разрушению скважины. Решение данной задачи найдено на шахтах Китая. Специалистами Сианьского научно-исследовательского института предложена уникальная технология использования полимерных трубок, устанавливаемых сразу после бурения скважины (рис. 4).

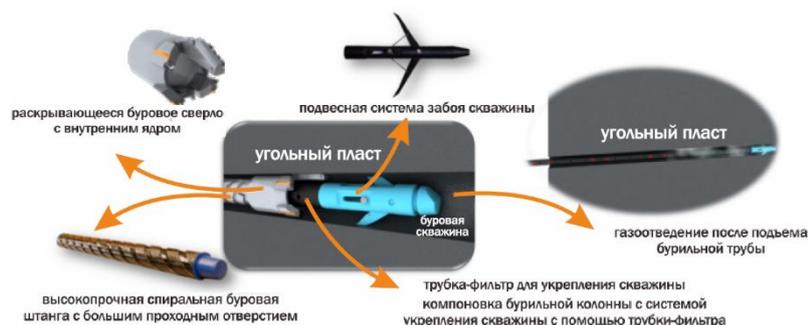


Рис. 4. Буровой инструмент для сохранения сечения скважины в слабых углях

Установка скважинных трубок после бурения скважины – эффективная технология укрепления газоотводных скважин в мягких угольных пластах. В конструкции используется буровое долото с механизмом открытия его центральной части. После бурения до заданной глубины буровой инструмент извлекается из скважины на длину одной штанги. Через центральное отверстие буровых штанг подается перфорированная пластмассовая трубка с якорным механизмом, который закрепляется в забое скважины, после чего из скважины извлекается буровой инструмент, а на его месте остается трубка в качестве канала газоотвода, чтобы обеспечить газотведение по всей глубине, до которой произведено бурение.

Цель состоит в том, чтобы обеспечить бесперебойное отведение газа и эффективно решить технические проблемы, такие как уменьшение отвода газа с увеличением глубины ввиду разрушения стенок скважины.

Сианьский научно-исследовательский институт занимает лидирующие позиции в Китае в наземной полностью цифровой трехмерной сейсморазведке высокой плотности, детальном зондировании посредством метода становления электромагнитного поля, методе постоянного тока, геофизической разведке посредством бурения и других направлениях. Институт обладает уникальными особенностями в производство «умного» оборудования

для разведки бурением, производство приборов для комплексной геофизической разведки, разработка и изготовления оборудования для буровой разведки, благодаря чему решает сложные инженерно-технические задачи.

Специалистами института предлагается целый ряд дегазационных мероприятий, имеющий практическую ценность и на шахтах Кузбасса в условиях газоносных угольных пластов на больших глубинах [13]. Эффективность схем дегазации, предложенных специалистами Сианьского института, доказана производственным опытом шахт Китая, где процентное содержание метана во всех выработках, оконтуривающих выемочный участок не превышает 0,5% при допустимых значениях до 1%. Месячная добыча угля из одного очистного забоя составляет более 1 млн. тонн.

С учетом положительного опыта использования направленного бурения на шахтах Китая в различных условиях были сформированы две системы направленного бурения: с гидравлического направленного бурения и пневматического – для мягкого угля.

Гидравлическая система направленного бурения включает установки направленного бурения, буровые насосы, системы измерения параметров бурения, гидравлические инструменты для направленного винтового бурения, опорные бурильные трубы и т.д. Средой для подачи энергии и извлечения буровой мелочи является вода, которая в основном используется для направленного бурения по горным породам и более твердым угольным пластам.

Система пневматического направленного бурения включает установку направленного бурения, воздушный компрессор (или генератор азота), систему измерения параметров бурения, пневматический инструмент для направленного винтового бурения, поддерживающую бурильную трубу и т.д. Средой для подачи энергии и извлечения буровой мелочи является шахтный воздух или азот, который в основном используется для направленного бурения по мягким угольным пластам.

Новая технология гидравлического направленного бурения (рис. 5) позволяет обеспечить точное управление траекторией бурения, наладить эффективное удлинение буровой скважины заданного залегания, осуществлять бурение на большие расстояния, а также выполнять многоотводное бурение скважин, которое широко применяется при отведении газа, разведке и ликвидации просачивания воды, точной цементации, зондировании геологического строения и др.

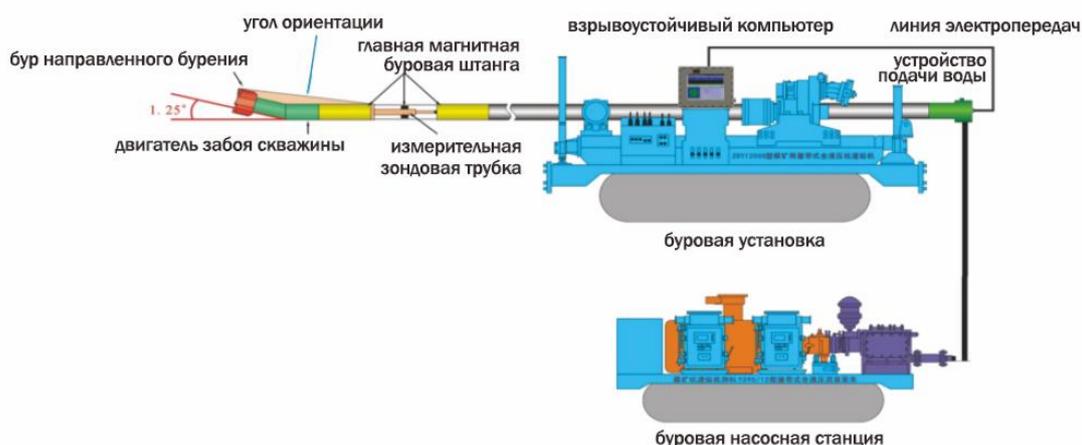


Рис. 5. Технологии и оборудование направленного скважинного бурения

Направленное бурение в породах кровли пласта для дегазации очистных работ.

Данный способ дегазации относится к устройству направленных длинных скважин большого диаметра, заложенных (пробуренных) в зоне разрушения пород кровли в направлении движения очистного забоя. Он используется для дегазации и снижения давления газа в пласте, а также в прилегающих выработках во время работы очистного забоя, где происходит большое выделение газа (рис. 6).

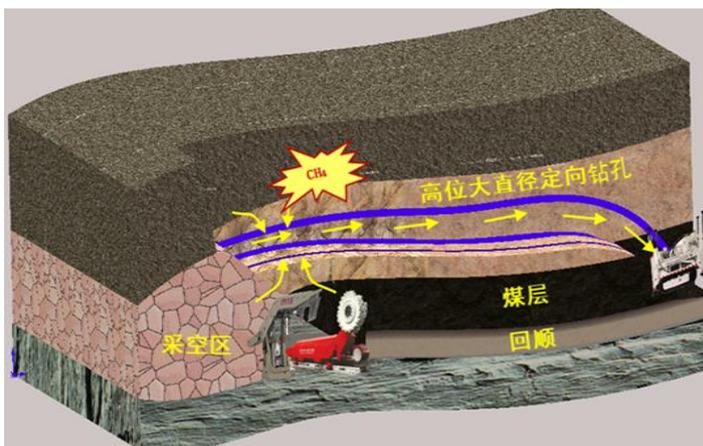


Рис. 6. Принципиальная схема расположения протяжённых скважин высокого заложения в кровле пласта, пробуренных навстречу движения очистного забоя

Схема проходки скважин для предварительной дегазации пласта. С одного места ведётся проходка ряда наклонно-направленных скважин, пройденных по восстанию пласта. Основная скважина проходится по почве пласта, а ответвления от неё заходят в угольный пласт. Это позволяет сохранить основную скважину на период подготовки и отработки выемочного столба, что обеспечивает эффективное газоотведение для ограждающей дегазации и предупреждения выбросов угля и газа в горные выработки (рис. 7).



Рис. 7. Предварительная дегазация пласта

Данный способ направленного бурения скважин позволяет вести предварительную откачку газа и контроль за изменением дебита скважин и состоянием массива (прогноза).

Для обнаружения сложных целевых геологических объектов, таких как скрытые водосодержащие (водопродимые) геологические структуры в массиве, в окрестности угольных забоев и т.д. применяется технология мгновенного электромагнитного зондирования и технология трехмерного зондирования с высокой плотностью постоянного тока, позволяющие выполнить комбинированную инверсию и интерпретацию многочисленных электрических параметров геологических тел в средних и поверхностных слоях (рис. 8).

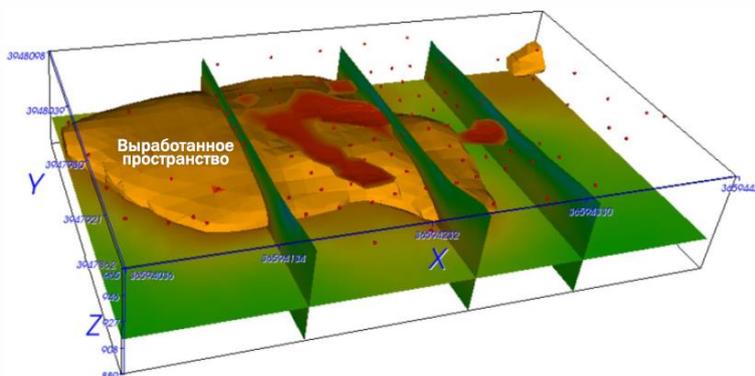


Рис. 8. Результат зондирования электрического поля участка выработанного пространства трехмерным методом постоянного тока высокой плотности

Разнообразная приборная база позволяет вести непрерывный контроль содержания метана не только в выработках, но и в скважинах, с автоматической передачей результатов замера на стойку диспетчера.

Выводы. Таким образом, использование положительного опыта из Китая и решение вопроса внедрения инновационных технологических схем строительства дегазационной сети в условиях газоносных пластов шахт Кузбасса предлагается в несколько этапов.

1. Анализ существующих методик расчета эффективности дегазационных мероприятий с адаптацией в лабораторных условиях.
2. Анализ нормативной базы проектирования и дегазации угольных шахт с учетом текущего уровня развития техники и технологии
3. Создание математической модели для сравнения эффективности разных предложенных схем дегазации и способов бурения.
4. Анализ вариантов схем дегазации на выбранный участок с учетом рекомендаций и использования практического передового опыта отечественных и зарубежных стран.
5. Разработка проекта дегазации на выемочный участок с получением заключения экспертизы промышленной безопасности.
6. Обучить персонал работе на высокопроизводительном станке направленного бурения; определить нормативы основных и вспомогательных процессов, объем работ и численность бригады буровиков для непрерывной работы по суткам.
7. Обеспечить инструментальный мониторинг фактического состояния газовой обстановки в границах выемочного участка с использованием существующей приборной базы.

Список литературы

1. Коликов К.С. Состояние метанобезопасности угольных шахт России // Уголь. – 2022. – № 7 (1156). – С. 5-6.
2. Сластунов С.В., Ермак Г.П., Ютяев Е.П. Дегазационная подготовка угольных пластов к интенсивной отработке как основа системного решения проблемы метанобезопасности угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № S1. – С. 107-119.
3. Разработка и совершенствование технологий пластовой дегазации для эффективной и безопасной отработки угольных пластов / С.В. Сластунов, Е.П. Ютяев, Е.В. Мазаник, А.П. Садов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 11 (49). – С. 13-22.
4. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Инструкция по аэрологической безопасности угольных шахт : утв. приказом Ростехнадзора от 8 декабря 2020, № 506.
5. РД-15-09-2006. Методические рекомендации о порядке дегазации угольных шахт. – М.: ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность», 2007.
6. Инструкция по дегазации угольных шахт : документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в угольной промышленности. – Москва: ЗАО НТЦ ПБ, 2012. – Вып. 22. – Серия 05.
7. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Правила безопасности в угольных шахтах : утв. приказом Ростехнадзора от 08.12.2020, № 507.
8. Baisheng Nie, Xianfeng Liu, Shaofei Yuan, Boqing Ge, Wenjie Jia et al. Sorption characteristics of methane among various rank coals: impact of moisture // Adsorption, 2016. Vol. 22.No. 3. P. 315–325.
9. Experimental study on the effect of moisture on low-rank coal adsorption characteristics / Haijun Guo, Yuanping Cheng, Liang Wang [et al.] // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2015. – Vol. 24. – P. 245–251.
10. Найданова А.В., Риб С.В., Никитина А.М. Повышение эффективности дегазации путем увеличения газоотдачи угольного пласта // Наука и молодежь : проблемы, поиски,

решения : тр. всерос. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 13–15 мая 2014 года / Под общей редакцией профессора М.В. Темлянцева. – Новокузнецк: Сиб. гос. индустр. ун-т, 2014. – Том II. – С. 18-21.

11. Сластунов С.В., Ютяев Е.П. Обоснованный выбор технологии пластовой дегазации для обеспечения безопасности подземных горных работ при интенсивной добыче угля // Записки Горного института. – 2017. – Вып. 223. – С. 125-130.

12. 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.

13. Каталог продукции / ООО «Сианьский научно-исследовательский институт при Китайской угольной инженерно-технологической корпорации (ССТЕГ)», 2022. – 62 с.

УДК 622.271

АНАЛИЗ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ЗОНЫ ПРИ ОТРАБОТКЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ УГОЛЬНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ ПО БЛОКОВОЙ СИСТЕМЕ

Герасимов А.В.

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

Аннотация. Предложена систематизация проведения горно-геометрического анализа приповерхностной зоны угольных залежей в отношении блоковой системы разработки. Выявлена закономерность изменения мощности рыхлых отложений при различных формах рельефа, а также оценена взаимосвязь формы угольной залежи и рельефа поверхности.

Ключевые слова: горно-геометрический анализ, блоковый способ, форма залежи, рельеф поверхности, мощность рыхлых отложений.

Блоковый способ отработки карьерных полей [1] по своей сущности применяется к залежам с крутым или наклонным залеганием полезного ископаемого. Возможность применения блокового способа обусловлена рядом горно-геологических факторов, влияющих на эффективность отработки залежей полезного ископаемого. Без учета вида применяемого горнотранспортного оборудования, с увеличением глубины отработки прослеживается динамика увеличения затрат как на разработку месторождения, так и на последующую рекультивацию нарушенных при ведении горных работ земель. В условиях рыночной конкуренции необходимо снижать затраты на разработку месторождения.

Условия залегания месторождений оказывают значительное влияние на технологию и эффективность извлечения полезных ископаемых. Важным условием снижения затрат при разработке месторождения является уменьшение извлекаемых вскрышных пород на единицу добытого полезного ископаемого, так как вскрышные породы являются производной составляющей от основной деятельности предприятия – добычи полезного ископаемого и, как следствие, снижение затрат на их транспортировку.

Основным инструментом оценки эффективной отработки месторождения блоковым способом является горно-геометрический анализ месторождений, который позволяет установить экономически выгодный контур выемки с минимизацией разработки вскрышных пород, наиболее рационального способа формирования внешних и внутренних отвалов.

Одну из составляющих технической возможности применения блокового порядка отработки месторождений определяют следующие показатели:

форма выходов пластов под наносы и протяженность залежи – определяют техническую возможность применения блокового порядка разработки, а также размеры карьерного поля, масштабы производства и эффективность;

рельеф поверхности – определяет техническую возможность применения системы разработки, влияет на глубину отработки, величину среднего коэффициента вскрыши и схему вскрытия;

мощность рыхлых отложений – определяет экономическую целесообразность применения системы разработки, объём горно-строительных работ, размер капиталовложений и величину среднего коэффициента вскрыши.

Влияние данных факторов на технико-экономические показатели разработки перспективных участков оценено на примере участков Кемеровской области и других регионов РФ. Для качественной и количественной оценки условий залегания свит пластов по перечисленным факторам на основе анализа обширного материала выбраны характерные планы выходов пластов под наносы, а также геологические разрезы и профили по перспективным и разрабатываемым месторождениям Кузнецкого бассейна и других регионов РФ по материалам «Кузбассуглеразведки», ряда разрабатываемых проектных документаций и ТЭО разработки месторождений. Параметры систематизации приповерхностной зоны представлены в табл. 1.

Таблица 1

Систематизация приповерхностной зоны угольных залежей применительно к блоковой системе разработки

| Признаки | Виды | Характеристика, условия |
|------------------------------|---------------------------------------|---|
| Рельеф | Равнинный | Уклон поверхности 0- 2° |
| | Наклонный | Уклон поверхности 2- 10° |
| | Увалисто-долинный (холмистый) | Уклон нескольких участков поверхности от 0-2° до 5-10° |
| | Сопочно-гористый (резко пересечённый) | Уклон нескольких участков поверхности от 0-5° до 10-20° |
| Мощность рыхлых отложений | Малая | до 4-6м |
| | Средняя | 7-15м |
| | Большая | Более 15м |
| Форма и протяженность залежи | Округлая | $B < L < 1,4 B$ |
| | Удлиненная | $1,4 B < L < 4 B$ |
| | Вытянутая | $4 B < L < 40 B$ |

Примечание: L – длина залежи; B – ширина залежи

Примеры формы залежей месторождений, совмещенных с выходом пластов под наносы приведены на рис. 1.

На основании произведенного анализа получены результаты оценки формы и параметров залежей в плане на перспективных участках, приведенные в табл. 2.

График распределения участков по результатам оценки формы и параметров залежей в плане представлен на рис. 2.

По результатам оценки формы и параметров залежей в плане на перспективных участках выявлено, что в Кузнецком бассейне карьерные поля имеют преимущественно удлиненную форму с длиной по простиранию от 1,9 км до 9,3 км. Меньше участков округлой и вытянутой формы. При этом ввиду того, что в настоящее время геологическое изучение месторождения производится в рамках лицензионных участков, а не месторождения в целом, можно сделать вывод, что удлиненные участки в какой-то мере можно сравнить с вытянутыми месторождениями.

Параметры рассмотренных перспективных участков позволяют применять блоковый порядок отработки, однако при округлой форме залежи необходимо при проведении

горно-геометрического анализа делать проверку на возможность размещения внутреннего отвала в контурах залежи первоначального блока [2].

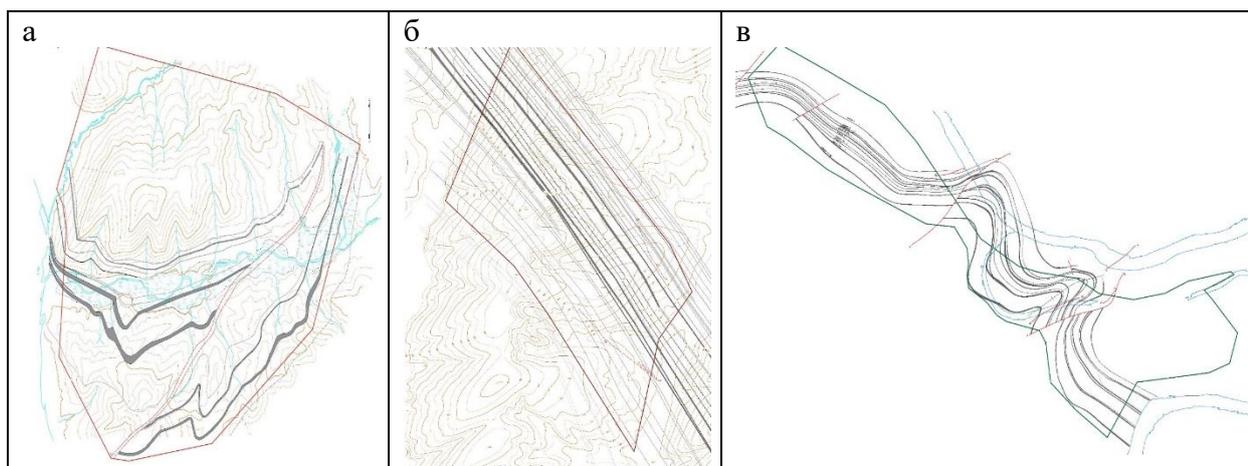


Рис. 1. Примеры формы залежей, совмещенных с выходом пластов под наносы: а – округлые (Кумзасское); б – удлиненные (Караканское); в – вытянутые (Карачиякское)

Таблица 2

Результаты оценки формы и параметров залежей в плане

| Наименование участка | Параметры | | Округлые $B < L < 1,4 B$ | Удлиненные $1,4B < L < 4B$ | Вытянутые $4B < L < 40B$ |
|-----------------------|-----------|-------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| | L, км | B, км | | | |
| Нижнетыхтинский | 2,5 | 1,3 | - | $1,8 < 2,5 < 5,2$ | - |
| Листвяничный | 2,4 | 1,4 | - | $2 < 2,4 < 5,6$ | - |
| Верхнетыхтинский | 3,4 | 1,2 | - | $1,7 < 3,4 < 4,8$ | - |
| Карачиякский | 5,5 | 0,3 | - | - | $1,2 < 5,5 < 12$ |
| Кумзасский | 3,4 | 3,1 | $3,1 < 3,4 < 4,3$ | - | - |
| Урегольский | 4,6 | 2,0 | - | $2,8 < 4,6 < 8$ | - |
| Сосновский | 9,3 | 0,5 | - | - | $2 < 9,3 < 20$ |
| Сырадасайский | 4,0 | 1,2 | - | $1,7 < 4 < 4,8$ | - |
| Чуазасский | 3,8 | 1,5 | - | $2,1 < 3,8 < 6$ | - |
| Бунгурский | 1,9 | 0,6 | - | $0,8 < 1,9 < 2,4$ | - |
| Инской | 9,2 | 3,5 | - | $4,9 < 9,2 \leq 14$ | - |
| Караканский 1-2 | 6,0 | 4,7 | $4,7 < 6 < 6,6$ | - | - |
| Караканский Восточный | 8,0 | 2,95 | - | $4,13 < 8 \leq 11,8$ | - |
| Караканский Южный | 4,9 | 4,0 | $4 < 4,9 \leq 5,6$ | - | - |
| Талдинский Северный | 2,8 | 2,0 | $2 < 2,8 \leq 2,8$ | - | - |
| Уропский 1 | 4,0 | 1,8 | - | $2,5 < 4 \leq 7,2$ | - |
| Уропский 2 | 4,6 | 2,8 | - | $3,9 < 4,6 \leq 11,2$ | - |
| Уропский 3 | 7,0 | 2,1 | - | $2,9 < 7 \leq 8,4$ | - |
| Уропский Северный | 7,0 | 2,1 | - | $2,9 < 7 \leq 8,4$ | - |
| Корчакольский | 2,0 | 0,4 | - | - | $1,6 < 2 < 16$ |

Поскольку рельеф поверхности должен быть учтён при горно-геометрическом анализе залежи, то для расчётов предлагается упрощенная форма описания поверхности и характеристики ее представления приведены в табл. 1.

Для анализа рельефа поверхности залежей и мощности рыхлых отложений использовались геологические разрезы по материалам разрабатываемой проектной документации, представленные на рисунках по принятому в работе разделению залежей на группы по углу падения: наклонные, крутонаклонные, крутые, сложного залегания.

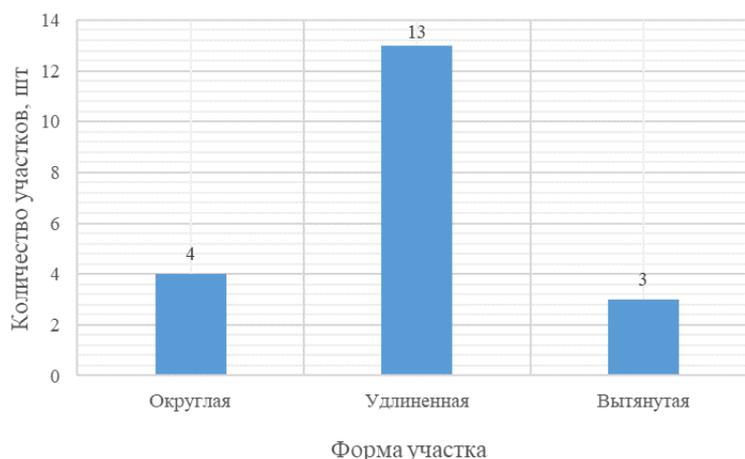


Рис. 2. График распределения участков по результатам оценки формы и параметров залежей

Наиболее характерные геологические разрезы с общим видом рельефа поверхности по перспективным участкам представлены на рис. 3.

Равнинный вид представлен на рис. 3 а. Данный рельеф поверхности залежи характеризуется одним отрезком и имеет общий или локальный слабопологий уклон в пределах 0-2°.

Наклонный вид представлен на рис. 3 б. Поверхность залежи имеет общий или преимущественный значительный наклон в пределах до 10°.

Увалисто-долинный (холмистый) характерен наличием ряда горизонтальных, слабонаклонных и наклонных участков. Углы наклона этих поверхностей в пределах 2-10°. Увалисто-долинный вид представлен на рис. 3 в.

Сопочно-гористый (резко пересечённый) рельеф поверхности характерен чередованием участков поверхности со значительными углами наклона в пределах от 5° до 20°. Сопочно-гористый вид представлен на рис. 3 г.

График распределения участков по результатам оценки рельефа поверхности на перспективных участках представлен на рис. 4.

По результатам оценки рельефа поверхности на перспективных участках выявлено, что в Кузнецком бассейне карьерные поля имеют преимущественно холмистый рельеф, имеющий ряд горизонтальных, слабонаклонных и наклонных участков. Меньше участков, имеющих сопочно-гористую поверхность, при этом распространенную в южной части Кузбасса, в отличие от равнинной, наклонной и холмистой – распространённых преимущественно в центральной части Кузбасса.

Анализ перспективных участков произведен на основании геологических данных, границ участков, определенных уполномоченным органом РФ. По результатам анализа выявлено, что форма залежи и рельеф поверхности участка не оказывают явного влияния друг на друга, однако округлые формы залежи преимущественно распространены на участках, имеющих более сложный рельеф такие как холмистый и сопочно-гористый. При этом на рассматриваемых перспективных участках 75% округлых залежей приурочено к холмистому рельефу поверхности и 25% к сопочно-гористому. Соответственно значительной части участков приурочен холмистый рельеф поверхности, которому характерны все виды форм залежей, меньшей части сопочно-гористый. При этом наклонный и равнинный рельеф приурочен удлиненным формам рельефа.

Рыхлые отложения присутствуют на всех месторождениях повсеместно, причём их мощность на различных месторождениях колеблется в широких пределах – от 0,5 м до 60 м. При этом имеются участки с малой мощностью рыхлых отложений в пределах от 0,5 м до 4-7 м, со средней мощностью 8-15 м и с большой мощностью рыхлых отложений от 16 м до 40 м и более.

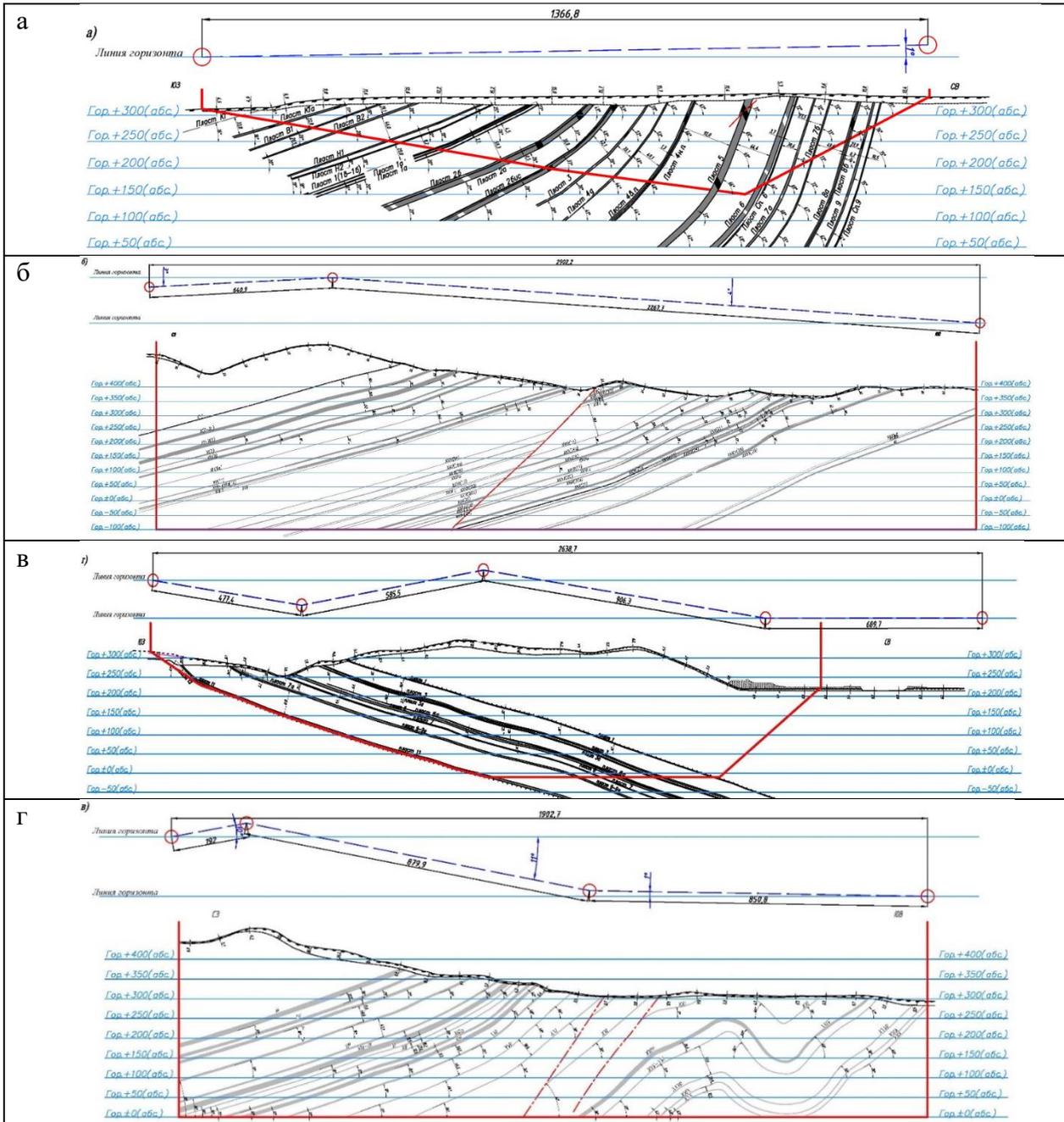


Рис. 3. Характерные геологические разрезы по рассматриваемым участкам, совмещенные со схемами определения рельефа поверхности: а – равнинный; б – наклонный; в – увалисто-долинный, г – сопочно-гористый

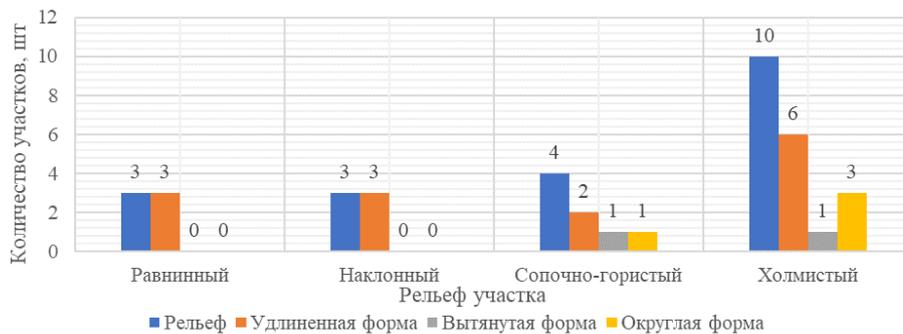


Рис. 4. График распределения участков по результатам оценки рельефа поверхности

Мощность рыхлых отложений может определять экономическую целесообразность применения системы разработки, объём горно-строительных работ, размер капиталовложений и величину среднего коэффициента вскрыши. Особенно объёмы рыхлых отложений важны на первоначальной стадии отработки месторождения. При этом себестоимость выемки четвертичных отложений составляет порядка 40% себестоимости выемки всех пород при отработке участка.

Анализируя представленные геологические разрезы по каждому рассматриваемому месторождению, получены результаты исследования мощности рыхлых отложений. Результаты анализа мощности рыхлых отложений по месторождениям представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты анализа мощности рыхлых отложений

| Наименование участка | Средняя мощность наносов на участке | Рельеф участка |
|-----------------------|-------------------------------------|------------------|
| Нижнетыхтинский | 19,2 | Равнинный |
| Листвяничный | 10,6 | Равнинный |
| Верхнетыхтинский | 17,1 | Наклонный |
| Карачиякский | 8,6 | Сопочно-гористый |
| Кумзасский | 4,7 | Сопочно-гористый |
| Урегольский | 3,1 | Сопочно-гористый |
| Сосновский | 6,1 | Холмистый |
| Сырадасайский | 10,9 | Равнинный |
| Чузасский | 4,2 | Наклонный |
| Бунгурский | 6,4 | Холмистый |
| Инской | 8,6 | Холмистый |
| Караканский 1-2 | 7,8 | Холмистый |
| Караканский Восточный | 8,3 | Холмистый |
| Караканский Южный | 10,1 | Холмистый |
| Талдинский Северный | 6,7 | Холмистый |
| Уропский 1 | 7,7 | Холмистый |
| Уропский 2 | 8,1 | Холмистый |
| Уропский 3 | 7,9 | Холмистый |
| Уропский Северный | 20,2 | Наклонный |
| Корчакольский | 6,3 | Сопочно-гористый |

Анализ мощности рыхлых отложений показывает, что в зависимости от сложности рельефа наблюдается изменение значений средних мощностей рыхлых отложений. Результаты анализа представлены на рис. 5.



Рис. 5. Изменение мощности рыхлых отложений в зависимости от рельефа поверхности

Выводы. Результаты произведённых расчетов указывают на то, что средняя мощность рыхлых отложений на рассматриваемых перспективных участках с рельефом поверхности от равнинного до сопочно гористого повсеместно снижается, и, как следствие, снижаются затраты на выемку четвертичных отложений. Соответственно произведенный анализ показал, что рельеф поверхности и мощность рыхлых отложений оказывают взаимное влияние друг на друга, чем подтверждается необходимость проведения горно-геометрического анализа приповерхностной зоны залежи.

Список литературы

1. Рутковский Б.Т. Блоковый способ обработки карьерных полей с большим простиранием // Разработка угольных месторождений открытым способом: межвуз. сб. научн. тр. – Кемерово: Кузбас. политехн. ин-т, 1972. – С. 81-87.
2. Селюков А. В. Оценивание землеемкости угольных разрезов видоизменением системы открытой разработки // Известия Уральского государственного горного университета. – 2016. – № 3 (43). – С. 82-86.

УДК 622.333

КИЗЕЛОВСКИЙ УГОЛЬНЫЙ БАССЕЙН: ПРОШЛОЕ И БУДУЩЕЕ

д.т.н. Земсков А.Н.

ООО «Проекты и Технологии – Уральский Регион», г. Североуральск, Россия

Аннотация. В статье обоснована актуальность разработки остаточных запасов угля в Кизеловском бассейне. Предложены варианты открытого и подземного способов разработки перспективных участков угольных месторождений с наклонным и крутонаклонным залеганием угольных пластов. Актуальность разработки этих участков обоснована следующими критериями: соответствие качества и количества угля потребностям местных предприятий; снижение экологической нагрузки посредством переработки породных отвалов с самовозгорающими углями, предотвращения самоизлива кислых шахтных вод в естественные водоёмы, возможность попутного извлечения лития, скандия и германия в отвалах

Ключевые слова: угольный бассейн, шахта, угольный разрез, остаточные запасы угля, способы добычи угля, переработка угольно-породных отвалов, охрана природной среды, проектная документация, редкоземельные элементы.

Кизеловский угольный бассейн разрабатывался с 1797 по 2000 гг., за это время было обработано и закрыто 79 шахт и штолен. К 1960 году добыча угля достигала 12 млн./год. Однако, со временем, ухудшались горно-геологические условия залегания продуктивных пластов, шахты вырабатывали свои запасы, лежащие близко к поверхности, была затруднена механизация добычи из-за сложных горнотехнических условий. Кизеловский уголь оказался значительно дороже угля из других районов страны, добываемого открытым способом, прежде всего из Кузбасса.

В соответствии с действующей в то время программой реструктуризации угольной промышленности России, осуществляемой с 1993 г., началось поэтапное закрытие особо убыточных и нерентабельных шахт Кизеловского угольного бассейна, которое завершилось в 1998 – 2000 гг. За этот период проведены необходимые технические работы по ликвидации шахт и соответствующие «социальные мероприятия», которые, к сожалению, не обеспечили необходимую жизнедеятельность населенных пунктов на территориях закрытых шахт бассейна. За период своей промышленной эксплуатации угольные шахты бассейна оказали существенное негативное воздействие на все компоненты окружающей среды, которое проявилось в деградации природного ландшафта и загрязнении водных

источников, атмосферного воздуха и почв твердыми, жидкими и пыле-газообразными отходами производства в десятки и сотни раз превышающих предельно допустимые концентрации. Это негативное воздействие имеет место и сейчас. Хотя полностью прекращена хозяйственная деятельность угольных предприятий, тем не менее, это вызывает необходимость проведения специальных защитных и восстановительных мероприятий в районах размещения ликвидированных шахт.

С учетом специфики продолжающегося негативного воздействия техногенных факторов на природную среду и требований времени, в качестве основных приоритетов природоохранной деятельности в Кизеловском угольном бассейне на ближайшую перспективу были приняты следующие мероприятия:

- по охране водных ресурсов – очистка изливающихся шахтных вод от загрязняющих веществ, оздоровление и рекультивация берегов малых рек и водоемов;
- по охране атмосферного воздуха – предотвращение возгорания породных отвалов;
- по охране земельных ресурсов и восстановлению нарушенных земель – рекультивация нарушенных земель и породных отвалов;
- по использованию твердых отходов – разработка технологий их применения в качестве сырья для производства строительных материалов, органоминеральных удобрений и других промышленных продуктов.

К сожалению, практически все вышеперечисленные мероприятия остались только на бумаге.

Сотрудниками институтов, имеющих отношение к разработке угольных месторождений, специалистами-экологами неоднократно предпринимались попытки реабилитации решений государственных органов, сделанных в 90-е годы прошлого столетия, но реальных шагов сделано не было.

Тем не менее, имеются отдельные исследования, предполагающие возобновление разработки угольных участков Кизеловского бассейна [1].

Остановимся на горнотехнических условиях разработки Кизелбасса (КУБа).

Кизеловский угольный бассейн характеризуется сложными условиями разработки:

- сложное геологическое строение месторождения при небольших рабочих мощностях продуктивных угольных пластов (от 0,6 до 1,5, в отдельных участках до 6-7 м, наличие ложной кровли и почвы);
- преимущественно распространены пласты крутого (от 50° до 90°) и крутонаклонного залегания (от 35° до 50°), имеют место многочисленные тектонические нарушения (сбросы, сдвиги, надвиги);
- относительно высокая крепость угля (до 3 по шкале проф. М.М. Протодяконова), а также вмещающих пород: алевролитов (до 5-6), аргиллитов (до 6-8), песчаников (от 8 до 12-15);
- мелкая тектоническая нарушенность, что, практически, исключает применение высокомеханизированных комплексов и проходческих комбайнов;
- газо-, пыле- и силикозоопасность при ведении подземных работ;
- наличие крепких труднообрушаемых пород кровли и сближенность пластов создают условия возникновения горных ударов, начиная с глубины 200-260 м;
- высокое содержание кремния во вмещающих породах (до 70-80%), склонность углей к самовозгоранию;
- возможные нефтевыделения в горные выработки, при которых создание смеси паров нефти с сопутствующими газами создают взрывоопасные ситуации;
- большая глубина разработки (до 1300 м), при средней глубине 600 м;
- сложные гидрогеологические условия, высокая водообильность и агрессивность шахтных вод (притоки от 400 до 1000 м³/час, максимально до 2100 м³/час, высокая кислотность шахтных вод (РН 2,5-4,0), что требует применения специальных материалов и способов нейтрализации).

Сотрудниками института «Уралгипрошахт» в свое время была выполнена работа по оценке состояния Кизеловского угольного бассейна [1].

За время отработки месторождения все перспективные и экономически эффективные участки по добыче угля в основном отработаны. Остались целики и резервные поля ликвидированных шахт и участки месторождения Южно-Скальнинское, Обманковское и Косореченское. Кроме того, возможна открытая разработка выходов пологопадающих угольных пластов под наносы. Строительство небольших разрезов с использованием высокопроизводительного мобильного оборудования возможно на участках выхода угольных пластов под наносы.

Однако, для этого необходимы:

1. Выбор перспективных участков, их доразведка и оценка с учетом зоны окисления, использования вскрышных пород и др.
2. Изучение устойчивости бортов разрезов на этих участках.
3. Строительство разведочно-эксплуатационного разреза.

В конечном итоге, сотрудники «Уралгипрошахта» сделали вывод о необходимости вернуться к вопросу продолжения разработки углей КУБа, рассматривая, в качестве потенциальных, резервные участки ликвидированных шахт и районы выхода углей под неглубокие наносы. Учитывая, что угольные ресурсы России размещены по территории неравномерно (на долю восточных районов приходится 95%, а на европейскую часть – 5% всех запасов страны), возобновление работы на угольном месторождении в европейской части России имеет общегосударственное значение. Тем более, что в г. Добрянке находится Пермская ГРЭС – четвертая по установленной мощности тепловая электростанция России, работающая на природном газе (ранее планировалась работа на кизеловском и кузнецком углях).

Возможный вариант разработки углей в местах их выхода под наносы для Кизеловского бассейна – это участок резервного поля «Косьва 2-3», в зоне восточнее Косьвинского взброса. При продуктивной мощности пластов 2,5-4,5 м и более, эффективность разработки возрастает при запасах не менее 700-800 т/1м сечения разреза, при его глубине 100-120 м. При длине разреза около 12 км, предварительные запасы составят порядка 9,6 млн. т.

По данным практики, граничный коэффициент вскрыши при добыче угля составляет 15-20 м³/т. В нашем случае коэффициент вскрыши составляет 12,5 м³/т, то есть вписывается в вышеотмеченное ограничение.

Материалы исследований, выполненных сотрудниками «Уралгипрошахт» свидетельствуют о потенциальной возможности и целесообразности отработки открытым способом запасов участка «Косьва 2-3», расположенного в 8 километрах к северо-западу от пос. Широковский.

Согласно нашим данным, требуется строительство шахты на участке «Косьва-Глубокая», с запасами 83,9 млн. тонн, угли коксующиеся, высокосернистые. Необходима проходка нескольких стволов глубиной до 1266 м. При мощности шахты 1,2 млн. тонн в год, срок службы составит более 50 лет.

Для уточнения запасов необходимы дополнительные инженерные изыскания, а в целях разработки КУБа, привлечение инвестиций со стороны государства и заинтересованного бизнеса.

Еще одним из возможных направлений нормализации экологической ситуации на территории КУБа, а также получение реального экономического эффекта, является переработка угольно-породных отвалов.

Технологии переработки угольных отвалов с использованием соответствующего оборудования хорошо разработаны в Германии, Австралии и ряде других угледобывающих стран. В России, прежде всего в Восточном Донбассе, также используются эти технологии. В частности, в Ростовской области ведется интенсивная переработка угольно-породных отвалов (более 2 млн. тонн в год).

В г. Шахты Ростовской области имеются четыре работающие и три строящиеся установки по обогащению породных отвалов. Производительность установок 80-100 т/ч. Средний выход концентрата 15-24% к рядовому углю. Зольность породы 65-80%. Зольность концентрата от 7 до 24%. Стоимость установки (оборудования) 35-52 млн. рублей, включая проект (данные 2018г.).

Производительность труда на таких мини-заводах в 2-3 раза выше, (за счет уменьшения человека/смен при новой технологии), а удельные капвложения в 3-4 раза ниже, чем на предприятиях традиционного типа.

Отвалы обрабатываются с помощью крутонаклонных сепараторов с использованием воды, как рабочей жидкости в закрытом цикле. Пустая порода идет для рекультивации земель, и для переработки в щебень.

Работа установок сезонная – 9 месяцев в году. Количество работающих от 20 до 50 человек. Рентабельность высокая, так как кроме основного продукта – щебня, получается и угольный концентрат. Кроме того, в г. Шахты работают три установки мокрого обогащения с использованием специальных отсадочных машин «Гравикон - 6,25*2» с удлиненным первым отделением, сконструированных для обогащения породных отвалов.

Технико-экономические показатели обогащения хорошие. Зольность исходного сырья после предварительной классификации 60-65%, выход концентрата в среднем до 25%, с золой до 14%.

Современные решения и предпосылки целесообразности переработки угольно-породных отвалов Кизеловского угольного бассейна:

- наличие геологической геоинформационной системы «ГИС-КУБ» для оперативной оценки экологической ситуации в регионе, разработанные ранее природоохранные мероприятия и принятие необходимых управленческих решений в области охраны окружающей среды;

- разработанная технология получения стеклокристаллических литых материалов, тугоплавких неметаллических материалов с заданными функциональными характеристиками (износостойкость, термостойкость и др.) из неметаллических отходов, находящихся в угольных отвалах. Эти материалы находят применение в изготовлении износостойкой футеровки и защитных щитов в оборонной промышленности. Стеклокристаллические материалы, которые также являются продуктом переработки угольно-породных отвалов, являются прекрасным футеровочным материалом;

- проектирование и создание установок по переработке угольно-породных отвалов, исходя из первичной информации о вещественном составе отвалов, крупности кусков и физико-механических свойств пород отвалов. Создание новых конструкций перерабатывающих установок для отвалов различных типов позволит повысить эффективность их работы;

- получение опытно-промышленной партии строительной керамики методом пластического формирования с частичной заменой первичных сырьевых компонентов горными породами терриконов (по совокупности данных затраты на производство единицы продукции при применении отходов угледобычи будут снижены на 38 %).

Использование предлагаемой комплексной технологии переработки породных отвалов, помимо экономического эффекта, позволит решить важную экологическую проблему – уничтожения породных отвалов и рекультивации освободившейся земли, а также обеспечит создание нескольких сотен рабочих мест. Потенциальные потребители продукции:

- угольный концентрат реализуется для бытовых целей городов Кизел, Губаха, Гремячинск;

- строительные материалы будут использованы для отсыпки дорог дорожными организациями;

- часть отходов с высоким содержанием железа будет поставляться в г. Горнозаводск в качестве добавок для получения различных марок цемента на предприятии ООО «Горнозаводскцемент», входящий в холдинг «Akkermann cement»;

– заводы, использующие печи с футеровочным материалом (ОАО «Магнезит» Челябинской обл., ОАО «Башкирская сода», г. Стерлитамак и др.);

– стеклокристаллические литые материалы могут быть использованы в оборонной промышленности для создания щитовых покрытий.

Еще одним важным элементом переработки угольно-породных отвалов является возможность извлечения из них редкоземельных элементов.

В секторе наноминералогии Пермского государственного национального исследовательского университета проведены исследования состава пород отвалов угольных шахт в окрестности города Губахи Пермского края, которые включали в себя оценку концентрации 48 микроэлементов.

Результаты исследований, выполненных докторами геолого-минералогических наук Осовецким Б.М. и Меньшиковой Е.А., показали наличие высоких концентраций лития, скандия и германия в отвалах. Содержание скандия составило 24-54 мг/кг, германия – в среднем 11 мг/кг и галлия – в среднем – 42 мг/кг.

Выводы. Таким образом, переработка угольных и породных отвалов помимо снижения экологической нагрузки на территории проживания населения по фактору «изливы кислотных вод» (10-12% от общего объема поступления кислых вод в естественные водоемы) представляет известный экономический и коммерческий интерес.

На наш взгляд, имеются все предпосылки возрождения горной угольной отрасли в Пермском крае с обеспечением целого комплекса мер по нормализации экологической обстановки.

Список литературы

1. Проектная геологическая документация по перспективным участкам Кизеловского угольного бассейна Пермского края: в 5 т. – Екатеринбург, Институт «Уралгипрошахт», 2010.

УДК 622.271(73):550.814

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЯМИ ОТКРЫТОЙ УГЛЕДОБЫЧИ НА ОСТРОВЕ ЮЖНАЯ СУМАТРА

^{1,2} д.т.н. Зеньков И.В., ³Мулюшкина А.А.

1 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

2 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия

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

Аннотация. В статье представлены результаты исследования деятельности угольных карьеров на территории Южной Суматры. В ходе обработки спутниковых снимков выявлено количество горнотранспортного оборудования, задействованного на открытых горных работах на угольных месторождениях, а по результатам аналитических расчетов установлен годовой объем добычи угля и вскрышных работ. Определены показатели сухопутной логистики угольных потоков от мест добычи угля до морских угольных терминалов.

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

Введение. В Юго-Восточной Азии в настоящее время весьма мощным угледобывающим потенциалом обладает Индонезия, занимающая по праву одно из лидирующих положений по открытой угледобыче не только в этом регионе, но и в мировом энергетическом пространстве. Основные производственные мощности по добыче угля находятся на восточном побережье острова Калимантан и примерно 10 % от общего объема приходится на остров Суматра. По данным спутниковой съемки основной объем добычи угля открытым способом на этом острове сконцентрирован в одной провинции Южная Суматра. Изучение современного состояния угледобывающей промышленности в масштабах мировой экономики предполагает включение в план исследований всех без исключения территорий с размещением отраслевых предприятий. Проведение исследовательских работ в этом направлении на территории острова Суматра является актуальным в плане получения новых знаний об угольных карьерах, работающих в зоне экваториальных лесов. Наш коллектив в исследованиях пользуется результатами научно-технического прогресса в области космических технологий дистанционного зондирования Земли из космоса. Аналогичным высокотехнологичным инструментарием пользуются наши коллеги, работы которых в виде небольшой выборки представлены в [1 – 9].

Исследование технологических аспектов угольных разрезов на территории Южной Суматры. По данным дистанционного зондирования добыча угля открытым способом осуществляется на острове с середины 1970-х гг., а масштабная разработка месторождений угля производится с середины 2000-х гг. [10]. По нашей оценке, объем угля 35 млн. т ежегодно отправляют на экспорт, а 24 млн. т угля сжигают на одиннадцати тепловых электростанциях, расположенных в разных частях острова. Практически весь уголь добывают открытым способом в провинции Южная Суматра в многоугольнике с координатами вершин в точках 3° 43' 31" ю. и 103° 33' 12" в., 3° 40' 12" ю. и 103° 40' 05" в., 3° 44' 11" ю. и 103° 51' 16" в., 3° 47' 47" ю. и 103° 51' 24" в., 3° 53' 06" ю. и 103° 48' 40" в., 3° 53' 38" ю. и 103° 41' 25" в., 3° 51' 59" ю. и 103° 35' 59" в. В исследуемом секторе находятся три сельских поселения *Lahat*, *Muara Enim* и *Tandjung*. Вблизи поселений возделывают значительные по площади пальмовые плантации. Угледобывающие предприятия работают в полном компромиссе с местным населением, что подтверждается приведением нарушенных земель (породных отвалов) практически в первоначальное состояние с высадкой пальмовых деревьев на поверхности отвалов общей площадью 4200 га [10].

Отметим, что собственниками карьеров в период до 2017 г. на выемке небольшого объема вскрышных пород и угля были задействованы роторные экскаваторы (российские аналоги ЭР-1600) в комплексе с конвейерным транспортом и отвалообразователями на породных отвалах. В настоящее время горные работы производят с использованием только экскаваторно-автомобильных комплексов в двух комбинациях. На выемке горных пород используют гидравлические экскаваторы с емкостью ковша 4 м³ и 12 м³. Первые работают в комплексе с автосамосвалами общего назначения грузоподъемностью 30 т и колесной формулой 6×4, а последние – с карьерными автосамосвалами грузоподъемностью 60–90 т [10].

В настоящее время на угленасыщенных участках месторождений работает 28 карьеров с различной протяженностью фронта горных работ и концентрацией горнотранспортного оборудования. Общая протяженность фронта горных работ по нижнему добычному уступу равна 14760 м [10]. Горно-геологическое строение угольных пластов при горизонтальной мощности до 150 м характеризуется вертикальным или крутонаклонным расположением в толще вмещающих пород. Мощность покрывающих угольные пласты вскрышных горных пород находится в диапазоне 15–25 м. Такое расположение пластов в недрах обуславливает постоянную углубку горных работ и размещение вскрышных пород во внешние отвалы.

По данным спутниковой съемки при разработке участков месторождений в карьерах отмечается высокая концентрация горных и транспортных машин (рис. 1). В границах разрабатываемого участка размером 600×680 м в работе находятся 23 гидравлических

экскаватора и 44 автосамосвала. На участке производится разработка трех крутонаклонных угольных пластов с суммарной горизонтальной мощностью 160 м. Отметим, что на о. Суматра в открытой разработке угля буровзрывной способ подготовки горных пород к выемке не используют. Расстояние транспортировки вскрышных пород до внешних отвалов находится в диапазоне от 1,5 до 3 км. Вскрышные породы укладывают также на место отработанных угольных пластов. В этом случае вскрытие пластов производят капитальными траншеями внешнего заложения на глубину до 30 м. Далее вскрывающую трассу располагают на временно нерабочем борту карьера, противоположный борт карьера находится в разноске. По мере отработки запасов угля рабочий борт карьера устанавливают во временно нерабочее положение с одновременным переносом и обустройством вскрывающей трассы на него, а горные работы переносят на противоположный борт. Глубина карьеров после прекращения работ по добыче угля не превышает 180 м. По нашей оценке, конечная глубина карьеров регламентируется устойчивостью бортов карьера в условиях влажного экваториального климата с количеством осадков 1800 мм в год.



Рис. 1. Фрагмент космоснимка открытых горных работ на угленасыщенном участке месторождения с тремя мощными пластами крутонаклонного залегания

Весь объем угля, добываемый в исследуемых границах, концентрируется на двух стационарных поверхностных складах, которые расположены между карьерами [10]. На склады уголь поступает по конвейерам общей протяженностью 15,8 км. К каждому складу подведены железнодорожные пути в виде петли, что обеспечивает сквозное движение составов из 60 вагонов и двух тепловозов в голове состава. Уголь доставляют к терминалам, находящимся на правом берегу р. *Musi*, где его отгружают в балкеры-сухогрузы грузоподъемностью до 10000 т. Далее суда с помощью буксиров двигаются к месту впадения реки в море и вдоль береговой линии до тепловых электростанций. Объем экспортного угля направляют по железной дороге на крупный морской терминал, находящийся в бухте южнее г. *Bandar Lampung* [10].

Также уголь в объеме 2 млн. т в год добывают западнее населенного пункта *Kulu* в провинции *Aceh*. Весь объем добытого угля транспортируют на расстояние 16 км до расходного склада на морском берегу для погрузки в баржи класса река-море грузоподъемностью 10 тыс. т.

Всего по данным спутниковой съемки на исследуемой территории Южной Суматры на вскрышных и добычных работах в угольных карьерах задействовано следующее горно-транспортное оборудование: 253 гидравлических экскаватора типа «обратная лопата» с емкостью ковша 4 м³, 36 и 69 гидравлических экскаваторов с емкостью ковша 12 м³ соответственно «прямая лопата» и «обратная лопата», 896 автосамосвалов грузоподъемностью 30 т

и 469 карьерных автосамосвала грузоподъемностью 60-90 т. В состав автотранспортного парка входит 162 шарнирно-сочлененных автосамосвала повышенной проходимости грузоподъемностью 30 т. В последние годы около половины этого парка находится в резерве. По нашим расчетам парк горных и транспортных машин, находящийся в работе в карьерах, может технологически обеспечить годовой объем вскрышных работ на уровне 380 млн. т и объем добычи угля не менее 59 млн. т. Из этого объема 24 млн. т угля сжигают на тепловых электростанциях, составляющих основу топливно-энергетического комплекса острова, а остальной объем отправляют на экспорт.

Выводы. Итоги научно-исследовательской работы, посвященной исследованию производственной деятельности угольных карьеров в Юго-Восточной Азии на территории острова Суматра, обозначили весьма значимое присутствие предприятий недропользования, развивающихся параллельно с не менее масштабным сектором экономики, как туризм.

Горно-геологическое строение месторождений угля, используемые технологии открытых горных работ и количественный состав горнотранспортного оборудования позволяют обеспечить объем добычи угля на уровне 59 млн. т в год. Результаты дистанционного мониторинга территории Южной Суматры высвечивают стабильный тренд в ежегодно добываемых объемах добычи угля открытым способом.

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. Шихов А.Н., Дремин Д.А. Закономерности повреждения ветровалами лесов европейской территории России и Урала: анализ по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 3. – С. 153-168.
3. Оценка изменчивости характеристик Стоковой фронтальной зоны Карского моря на основе комплексирования данных спутникового дистанционного зондирования / А.А. Коник, А.В. Зимин, О.А. Атаджанова, А.П. Педченко // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 2. – С. 241-250.
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. 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.
7. Regional-scale forest restoration effects on ecosystem resiliency to drought: a synthesis of vegetation and moisture trends on Google Earth Engine / Temuulen Sankey, Adam Belmonte, Richard Massey [et al.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2021. – V. 7. – I. 2. – PP. 259-274.
8. Estimating inundation of small waterbodies with sub-pixel analysis of Landsat imagery: long-term trends in surface water area and evaluation of common drought indices / Ibrahim Sall, Christopher J. Jarchow, Brent H. Sigafus [et al.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2021. – V. 7. – I. 1. – PP. 109-124.

9. Mapping complex coastal wetland mosaics in Gabon for informed ecosystem management: use of object-based classification / Allison Aldous, Steve Schill, George Raber [et al.]. // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2021. – V. 7. – I. 2. – PP. 64–79.

10. URL: <https://www.google.com.earth>.

УДК 622.271(73):550.814

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ В УГОЛЬНЫХ КАРЬЕРАХ НА ОСТРОВЕ КАЛИМАНТАН

^{1,2}Д.т.н. Зеньков И. В., ³Мулюшкина А.А.

1 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

2 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия

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

Аннотация. В статье представлены результаты исследования деятельности карьеров по добыче угля на острове Калимантан в Индонезии. В ходе дистанционного мониторинга выявлено количество горных и транспортных машин, работающих в угольных карьерах, по результатам аналитических расчетов определен годовой объем вскрышных работ и добычи угля. По результатам спутниковой съемки выявлен тренд в незначительном сокращении объемов добычи угля.

Ключевые слова: Индонезия, остров Калимантан, месторождения угля, открытые горные работы, карьеры по добыче угля, годовой объем добычи угля, горные и транспортные машины, дистанционное зондирование Земли.

Введение. В мировой угледобывающей отрасли в последние годы на одно из первых мест по экспорту угля уверенно вышла Индонезия. И это не случайно – страна с запасами угля более 100 млрд. т находится на четвертом месте в мире по численности населения и занимает исключительное географическое расположение в Юго-Восточной Азии относительно стран, потребляющих энергетический уголь. С другой стороны большие запасы твердых полезных ископаемых, спрос на которые со стороны мировой экономики постоянно растет, способствует промышленному развитию национальной экономики Индонезии. Как известно, работа угледобывающего сектора в масштабных объемах инициирует создание большого количества рабочих мест как в основном производстве (добыча угля), так и в логистической системе угольных потоков, представленной в работе [1]. К настоящему времени отсутствует четкое представление о работе карьеров на месторождениях угля на острове. Поэтому, по нашему мнению, необходимо заполнить этот пробел новыми знаниями на основе ресурсов спутниковой съемки, которыми пользуются специалисты в научно-прикладных исследованиях [2 – 8].

Исследование открытых горных работ в карьерах на месторождениях угля. По данным спутниковой съемки масштабные открытые горные работы на месторождениях угля в Индонезии производят вдоль восточного побережья острова Калимантан в полосе с максимальным удалением от береговой линии на 180 км [9]. Протяженность этой полосы с севера на юг острова составляет 980 км. На этой территории месторождения угля характеризуются горно-геологическими характеристиками в широком диапазоне. Углы залегания угольных пластов находятся в широком диапазоне от нуля до 90°. В угленосной толще находится до десяти сближенных крутонаклонных или вертикально расположенных промышленных пластов, суммарная горизонтальная мощность которых доходит до 300 м. В своем

исследовании мы условно сгруппировали все угледобывающие предприятия (карьеры) в три категории: карьеры с производственной мощностью по добыче угля на уровне 1,0 млн т в год, с производственной мощностью от 2 до 5 млн. т в год и карьеры с годовым объемом более 5 млн. т и более.

Главным фактором, в существенной степени сдерживающим темпы подвигания горных работ в карьерах, является работа угледобывающих предприятий в экваториальном климате с количеством осадков в диапазоне 2000–3000 мм в год. Это приводит к большим объемам карьерного водоотлива, а также к проявлению деформаций рабочих и нерабочих бортов карьеров.

По данным спутниковой съемки в карьерах с годовой производственной мощностью по добыче угля в пределах 1 млн. т работают экскаваторно-автомобильные комплексы из гидравлических экскаваторов типа «обратная лопата» с емкостью ковша 2,5–4 м³ и автосамосвалов грузоподъемностью 30 т с колесной формулой 6×4. Эти комплексы используют как на вскрышных работах, так и на отработке угольных пластов на месторождениях с большими запасами до 10 млн. т. На локальных месторождениях залегание пластов горизонтальное, поэтому по мере появления выработанного пространства появляется возможность организации внутренних отвалов [9]. Глубина карьеров не превышает 50 м. Расстояние транспортировки вскрышных пород на отвалы не более 1,0 км. Уголь складировать на прикарьерных поверхностных складах-площадках. Далее по автодорогам общего назначения уголь транспортируют в магистральных полуприцепах до мест его погрузки, обустроенных на берегах рек, на баржи класса «река-море». Период разработки угленасыщенных участков месторождений обычно не превышает 6–8 лет. В структуре угледобывающей отрасли острова общий объем добычи угля на таких месторождениях составляет 54–55 млн. т в год.

Основной объем угля на острове добывают в карьерах на угленасыщенных участках месторождений с несколькими пластами, залегающих под углом 25–45°. Суммарный объем добычи угля на этих месторождениях, по нашей оценке, составляет 260 млн. т в год. Здесь в карьерах работают экскаваторно-автомобильные комплексы из гидравлических экскаваторов типа «прямая лопата» и «обратная лопата» с емкостью ковша от 2,5 до 12 м³ и автосамосвалов грузоподъемностью от 30 до 120 т [9]. Карьеры на месторождениях с большими запасами угля имеют протяженность по нижнему добычному уступу до 20 км. Одновременно в одном карьере на выемке вскрышных пород и угля работают до 40 экскаваторов, а на вывозке горной массы – 160–180 автосамосвалов.

В более мощных карьерах на месторождениях с крутонаклонным или вертикальным расположением угольных пластов технологическое преимущество отдано гидравлическим экскаваторам с емкостью ковша 18–24 м³. Транспортировка горных пород производится автосамосвалами грузоподъемностью 180–260 т. В таких карьерах выемку горных пород осуществляют после буровзрывного рыхления. Суммарный годовой объем добычи угля в карьерах находится на уровне 200 млн. т.

Фрагменты горных работ в карьерах с разной производственной мощностью по добыче угля и разнящимся горно-геологическим строением показаны на рис. 1.

Направление подвигания горных работ в карьерах на участках месторождений с горизонтальным залеганием угольных пластов мощностью до 12 м показано стрелками желтого цвета на рис. 1 а. На этом же рисунке в кольцах желтого цвета находятся гидравлические экскаваторы на выемке вскрышных пород, а кольцом белого цвета обведен экскаватор на отработке угольного пласта. В правой части этого же рисунка показано концентрированно расставленные гидравлические экскаваторы (рис. 1 б). Кольцами зеленого цвета обведены экскаваторы типа «прямая лопата» на выемке вскрышных пород, а в кольце красного цвета находится экскаватор типа «обратная лопата» на выемке угля.

Стрелками синего цвета показано движение груженых автосамосвалов от экскаваторных забоев до мест разгрузки – породных отвалов или угольных складов. Взрывные скважины в горных породах бурят по диагональной сетке с размерами 7×9 м. В ходе изучения

информационных ресурсов дистанционного зондирования установлено, что при разработке месторождений угля применяют как однобортные системы разработки, так и двухбортные с разноской рабочих бортов, ориентированных по длинной оси карьеров. Также широко практикуется разработка угленасыщенных участков блоками, причем в отработанных блоках производят отсыпку внутренних породных отвалов.



Рис. 1. Открытые горные работы на месторождениях угля на острове Калимантан (на снимках из космоса): а) в карьере с производственной мощностью по добыче угля 1 млн. т в год; б) в карьере с производственной мощностью по добыче угля 18 млн. т в год

По данным спутниковой съемки общая протяженность фронта добычных работ составляет 337 км. Всего в карьерах по добыче угля работает 43 буровых станка, 487 гидравлических экскаваторов типа «обратная лопата» с емкостью ковша 2,5–4 м³, 539 гидравлических экскаваторов типа «обратная лопата» и «прямая лопата» с емкостью ковша 8–24 м³. На вывозке вскрышных пород и угля из карьеров используют 2890 автосамосвалов общего назначения грузоподъемностью 30 т с колесной формулой 6×4 и 1465 карьерных автосамосвалов грузоподъемностью от 50 до 260 т. На вспомогательных работах задействовано 386 бульдозеров. Отметим, что такой комплект горнотранспортного оборудования в условиях «сухого» климата может обеспечить годовую производительность на 25–30 % выше, чем в условиях экваториального климата острова Калимантан.

Сухопутную логистику угольных потоков от мест добычи угля до мест погрузки в средства речного транспорта обеспечивают магистральные полуприцепы грузоподъемностью 40–50 т. Также в этом логистическом звене широко используется конвейерный транспорт, по которому уголь перемещают со складов на морское побережье. Протяженность единичного стационарного конвейера достигает 8 км. Вторым звеном угольной логистики на острове являются крупномасштабные речные перевозки [1]. Речную логистику угольных потоков на острове Калимантан обеспечивают 3600 барж класса «река-море» с таким же количеством буксиров. В этих же судах доставляют уголь до тепловых электростанций на островах Ява, Бали, Сулавеси и др.

Параллельно с изучением технологического потенциала угольной отрасли острова по данным спутниковой съемки установлено, что на земной поверхности в границах месторождений угля находятся большие по площади пальмовые плантации, составляющие основу агропромышленного комплекса Индонезии. Это обстоятельство принимается во внимание при возврате в сельскохозяйственный оборот породных отвалов, отсыпанных в ходе открытой разработки месторождений угля. Угледобывающие предприятия проводят на поверхности и откосах отвалов специальные работы по высадке пальм. Отметим, что собственники карьеров по добыче угля находятся в полном компромиссе с местным населением, занимающимся сельским хозяйством на плантациях, находящихся по соседству с угледобывающими предприятиями.

Выводы. По результатам спутниковой съемки определены состав горнотранспортного оборудования, работающего в карьерах по добыче угля на острове Калимантан в

Индонезии. По нашей оценке, совокупный объем добычи угля в карьерах на территории острова характеризуется коэффициентом вскрыши на уровне 4 т/т. Исходя из технологий производства горных работ и производительности горной техники, объем перерабатываемой горной массы (вскрышные породы и уголь) находится на уровне 2,5 млрд. т в год.

В целом по данным дистанционного мониторинга в последние два десятилетия на территории острова Калимантан наблюдается повышательный тренд в объемах добычи угля с небольшим снижением в последние годы.

Список литературы

1. Зеньков И.В. Открытые горные работы и управление логистикой в угледобывающей отрасли Индонезии // Уголь. – 2019. – № 7. – С. 108-110.
2. Кашницкая М.А. Исследование динамики площадей водной поверхности озёр степной зоны Восточного Забайкалья на основе данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 1. – С. 242-253.
3. Курбатова И.Е., Верещака Т.В., Иванова А.А. Космический мониторинг трансформации болотных ландшафтов в условиях антропогенных воздействий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 4. – С. 216-227.
4. 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. – P. 79-83.
5. The colors of heath flowering – quantifying spatial patterns of phenology in Calluna life-cycle phases using high-resolution drone imagery / Carsten Neumann, Robert Behling, Anne Schindhelm [et al.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2020. – V. 6. – I. 1. – PP. 35-51.
6. Fusion of Multi-Temporal PAZ and Sentinel-1 Data for Crop Classification / M. Busquier, R. Valcarce-Diñeiro, JM Lopez-Sanchez [et al.] // Remote Sens. – 2021. – № 13. – 3915.
7. Remote Sensing of Wetlands in the Prairie Pothole Region of North America / J. Montgomery, C. Mahoney, B. Brisco [et al.] // Remote Sens. – 2021. – № 13. – 3878.
8. Parlow E. Regarding Some Pitfalls in Urban Heat Island Studies Using Remote Sensing Technology // Remote Sens. – 2021. – № 13. – P. 3598.
9. URL: <https://www.google.com.earth>.

УДК 622.271(73):550.814

ОРГАНИЗАЦИЯ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ В УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ТАИЛАНДА

^{1,2}д.т.н. Зеньков И. В., ³Мулюшкина А.А.

1 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

2 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия

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

Аннотация. В статье представлены результаты исследования деятельности угледобывающего предприятия в топливно-энергетическом комплексе Таиланда. В ходе дистанционного мониторинга и аналитических расчетов выявлено количество горных и транспортных машин, работающих в угольном карьере. По результатам спутниковой съемки в течение многолетнего периода выявлен стабильный тренд в добыче и потреблении добываемого угля.

Ключевые слова: королевство Таиланд, топливно-энергетический комплекс, месторождения угля, угольные карьеры, горные и транспортные машины, тепловые станции, дистанционное зондирование Земли.

Введение. В последние годы, несмотря на мировые призывы к сокращению количества вырабатываемой электрической энергии на основе сжигания угля, доля последней в структуре вырабатываемой энергии остается на высоком уровне. Планируемый тренд в развитии глобальной энергетики полностью игнорирует ситуацию, в которой при тотальном переходе на «зеленую энергетику» с использованием кремниевых батарей, ветрогенераторов, биотоплива без необходимых мощностей останутся крупные металлургические, машиностроительные и химические концерны. Отметим, что с 1950-х гг. энергоемкие производства начинают массово создаваться в развитых странах, а с 1970-х гг., наблюдается их перенос в государства с дешевой рабочей силой, в том числе и в Юго-Восточную Азию. Как известно в этом макрорегионе доля электрической энергии, вырабатываемой при сжигании угля, до сих пор остается высокой. Климатические условия и теплые воды морей позволяют масштабно развивать здесь пляжный отдых. Вместе с тем здесь работают крупные предприятия с большим потреблением электроэнергии. На очередном этапе многолетних исследований размещения производительных сил в мировом масштабе с использованием ресурсов дистанционного зондирования Земли из космоса изучена деятельность угледобывающего сектора экономики Королевства Таиланд. Этим информационным ресурсом в основном пользуются специалисты при исследовании биосферной оболочки Земли, что отражено в специальной научной литературе [1-8].

Исследование производственной деятельности объектов топливно-энергетического комплекса (угольная генерация) на территории Таиланда. По данным дистанционного зондирования добыча угля открытым способом осуществляется в единственном карьере в центральной части провинции Лампанг исключительно для сжигания на тепловой электростанции. Последняя имеет одиннадцать энергоблоков общей мощностью 2500 МВт и расположена «на борту карьера» [9]. Территория промышленной площадки занимает участок тропического леса в виде овала с размерами осей 9 и 12 км (рис. 1).



- 1 – действующий угольный карьер; 2 – внешний породный отвал; 3 – внешний породный отвал после производства работ по переводу в категорию «природный ландшафт»;
4 – угольный склад; 5 – тепловая электростанция

Рис. 1. Фрагмент космоснимка с расположением объектов угольной генерации электроэнергии в районе Мае Мо на территории Таиланда

Открытые горные работы на этом месторождении масштабно производят с середины 1970-х гг. Два объекта топливно-энергетического комплекса находятся в крупной межгорной впадине. Запуск в эксплуатацию крупного угольного карьера и тепловой станции позволил решить проблему снабжения электрической энергией северных и центральных провинций королевства. Также было создано более 3000 высококвалифицированных рабочих мест, что частично решило проблему занятости местного населения. Площадь промышленной площадки с 1984 г. увеличилась с 2780 га до 8800 га исключительно за счет расширения границ горного отвода на месторождении и контуров внешних породных отвалов [9].

По данным спутниковой съемки установлено горно-геологическое строение разрабатываемого месторождения угля. На угленасыщенных участках в разработке находятся четыре сближенных угольных пласта марки Б2 по российской классификации общей мощностью до 30 м. В углевмещающей толще пласты имеют пологое залегание, близкое к горизонтальному. Покрывающие породы сверху вниз представлены рыхлыми горными породами четвертичного возраста мощностью 5-6 м, крепкими алевролитами мощностью до 30 м и крепкими песчаниками мощностью до 30 м. Породные прослои, разделяющие угольные пласты, состоят на 100 % из песчаников мощностью до 10 м. Отметим, что все горные породы кроме слоя горных пород четвертичного возраста и угля перед экскавацией рыхлят с использованием буровзрывного способа [9].

Логистику горных пород после выемки гидравлическими экскаваторами с емкостью ковша 2,5–8 м³ обеспечивает комбинированный циклично-поточный транспорт. Экскаваторы работают в комплексе с автосамосвалами грузоподъемностью 30–60 т. Транспортное внутрикарьерное плечо не превышает 1,2 км. Вскрышные породы выгружают в приемные бункера передвижных дробильных установок, в конструкции которых предусмотрен выпуск измельченных горных пород на магистральные конвейеры. Расстояние транспортировки вскрышных пород на внешние отвалы по конвейерным галереям составляет 7–9 км. Вскрышу на отвалах принимают пять отвалообразователей каждый производительностью 3000 т/ч. В архитектуре отвалов отчетливо просматриваются восемь ярусов, разделенных между собой по вертикали горизонтальными площадками шириной 8–9 м с обустройством на них автомобильных дорог. Добытый уголь внутри карьера также транспортируют в аналогичных автосамосвалах до приемных бункеров полустационарных дробильных установок с выпуском измельченного угля на конвейер. По конвейерным линиям уголь направляется на стационарный склад размером 360×830 м. Со склада уголь подают на электростанцию.

По данным спутниковой съемки установлено, что собственники угольного карьера в максимальной степени несут социальную ответственность перед обществом за выполнение работ, входящих в комплекс природоохранных мероприятий. Подтверждением этому является внешний отвал (3) на рисунке. Отсыпка его верхнего яруса была закончена в 2002 г. Параллельно с завершением его отсыпки проводились восстановительные работы на протяжении семи лет последовательно по принципу «снизу вверх». Итогом работ явился перевод отвала из категории «земли промышленного назначения» в категорию «земли лесного фонда» по российской классификации. В данном случае возврат объекта горнопромышленного ландшафта в окружающую природную среду, по нашему мнению, можно считать примером-эталоном для многочисленных предприятий угледобывающей промышленности, на которых отношение к природоохранным мероприятиям находится на весьма низком уровне [9].

Всего по данным спутниковой съемки в исследуемом карьере на бурении взрывных скважин работают восемь буровых станков, на выемке вскрышных пород и угля используют 42 гидравлических экскаватора (в основном «обратная лопата») с емкостью ковша 2,5 м³ и тридцать гидравлических экскаваторов с преобладанием типа «прямая лопата» и емкостью ковша 8 м³. Вскрышные породы и уголь транспортируют внутри карьера 126 автосамосвалами грузоподъемностью 30 т и 122 автосамосвалами грузоподъемностью 60 т. Примерно 30 % горных и транспортных машин находится в резерве. Коэффициент вскрыши в этом карьере

находится на уровне 4 т/т. Объем перерабатываемой горной массы, по нашей оценке, составляет 75 млн. т в год. Из этого объема добыча угля находится на уровне 15 млн. т в год.

Вывод. По результатам спутниковой съемки определены состав горнотранспортного оборудования, работающего в угольном карьере, являющемся поставщиком топлива крупную тепловую электростанцию «Мае Мо». По нашей оценке, добыча угля открытым способом на территории Таиланда составляет 15 млн. т в год. За счет работы тепловой электростанции закрывается потребность в электроэнергии не только северных, но и южных территорий. В целом по данным дистанционного мониторинга в последние два десятилетия на территории Таиланда наблюдается стабильный тренд в добыче угля открытым способом.

Список литературы

1. Оценка изменчивости характеристик Стоковой фронтальной зоны Карского моря на основе комплексирования данных спутникового дистанционного зондирования / А.А. Коник, А.В. Зимин, О.А. Атаджанова, А.П. Педченко // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 2. – С. 241-250.
2. Автоматическое распознавание используемых пахотных земель на основе сезонных временных серий восстановленных изображений Landsat / Д.Е. Плотников, П.А. Колбудаев, С.А. Барталев, Е.А. Лупян // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15. – № 2. – С. 112-127.
3. 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.
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. Automated identification of avian vocalizations with deep convolutional neural networks / Zachary J. Ruff, Damon B. Lesmeister, Leila S. Duchac [et al.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2020. – V. 6. – I. 1. – P. 79-92.
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. – P. 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. – P. 139-153.
8. Engaging ‘the crowd’ in remote sensing to learn about habitat affinity of the Weddell seal in Antarctica / Michelle A. LaRue, David G. Ainley, Jean Pennycook [et al.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2020. – V. 6. – I. 1. – P. 70-78.
9. URL: <https://www.google.com.earth>.

УДК622.2

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИИ ОТРАБОТКИ ВЫСОКОГАЗОНОСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Крестьянинов А.В., Шмаков И.К.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье выполнен обзор результатов научных исследований по изучению физико-химических параметров газифильтрационных процессов. Выявлено что

факторами, воздействующими на физико-химические параметры газодиффузионных процессов высокогазоносных угольных пластов, являются внешние нагрузки, давление газа в трещинах, количество сорбированного углем газа и температура.

Ключевые слова: метан, проницаемость угольных пластов, искусственное воздействие, лабораторный эксперимент.

По результатам научных исследований установлено, что актуальность изучения физико-химических параметров газодиффузионных процессов является одним из направлений для повышения эффективности дегазации и отработки высокогазоносных угольных пластов.

Выполнен обзор результатов исследований традиционных способов дегазации высокогазоносных угольных пластов, в которых установлено, что основными направлениями повышения эффективности дегазации является искусственное воздействие на угольный пласт.

В большинстве случаев горнодобывающие предприятия не имеют возможности для проведения исследований физико-химических параметров газодиффузионных процессов, поэтому изучением, модернизацией и разработкой способов и средств повышения эффективности диффузионных свойств угленосного массива занимаются специализированные институты.

Для предварительной оценки газоотдачи угольных пластов как с поверхности выработки, так и в скважины при дегазации пластов и добыче метана необходимо использовать реальные значения проницаемости. Установлено, что количественная оценка проницаемости угольных пластов наиболее достоверно осуществляется с использованием специальных методов определения соответствующей проницаемости в условиях их естественного залегания [1].

В полевых условиях проницаемость угольного пласта оценивается по выходу газа из скважины (по дебиту и/или суммарному объему). В основу метода положено известное решение о радиальном диффузионном потоке газа из бесконечной проницаемой среды в предположении постоянства проницаемости в пласте как по пространству, так и по времени [2]. На практике широко используется метод определения проницаемости пластов (особенно в нефтедобыче), когда она оценивается по результатам закачки воды в пласт [3].

Широкое распространение получили упрощенные модели, состоящие из набора кубиков одинакового размера (рис. 1), для которых достаточно просто вычисляется пористость и ее изменение под действием внешних нагрузок [4].

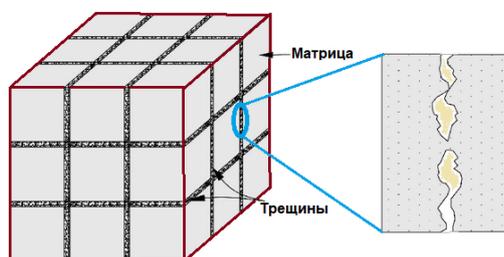
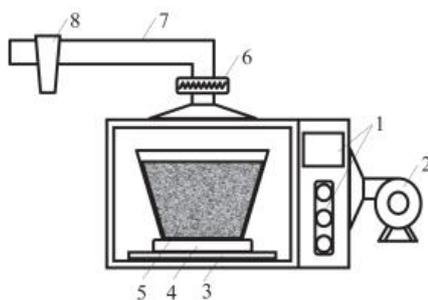


Рис. 1. Модель угленосного массива [4]

При попытках повышения проницаемости угольных образцов в лабораторных условиях возникают определенные трудности в получении экспериментальных результатов, поэтому стоит отметить научные работы, в которых выполнялись исследования физико-химических параметров газодиффузионных процессов углеродов.

Так в научной работе [5] описывается лабораторный метод электромагнитного микроволнового излучения частотой 2450 МГц, позволяющий увеличить адсорбционную активность по йоду на 4-6%, значительно сократить время предварительной термической

обработки углещелочной смеси и сократить время термоллиза при получении сорбентов [5].
 Схема лабораторной электромагнитной микроволновой печи представлена на рис. 2.

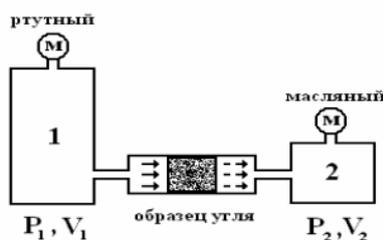


1 – блок управления и индикации режимов работы; 2 – центробежный вентилятор охлаждения магнетрона; 3 – вращающийся поддон; 4 – термоизолирующая подставка; 5 – емкость из жаропрочного стекла для загрузки сырья; 6 – осевой вентилятор газоотводящей магистрали; 7 – газоотводящая магистраль; 8 – гидрозатвор
 Рис. 2. Схема лабораторной электромагнитной микроволновой печи [5]

Как считают авторы основным методом воздействия на твердые горючие ископаемые, позволяющим в значительной степени интенсифицировать химико-технологические процессы и в большинстве случаев получать результаты, недостижимые при традиционных технологиях, является использование электромагнитного микроволнового излучения (ЭМИ) [6-8].

Учеными Национальной академия наук Украины (НАН Украины) [9], проводились исследования зависимости стационарного потока газа, проходящего через уголь, от градиента давления газа. Полученную зависимость, можно использовать далее для определения давления метана в транспортных каналах при его десорбции из угля [9]. На рис. 3 показана схема устройства для измерения проницаемости угля в этих условиях.

Как считают авторы исследования, выход газа, содержащегося в открытых порах угля, происходит в первые секунды после расконсервации равновесной системы уголь-метан, а количество оставшегося в открытых порах газа становится пренебрежимо малым.



1 – резервуар газа, 2 – накопительный сосуд известного объема, М – измерители давления в сосудах 1 и 2

Рис. 3. Схема устройства для измерения проницаемости угля [9]

Выход газа из открытых пор угля в первые секунды после его отделения от пласта, насыщенного газом, может составлять более 25% от его общего содержания в угле. Эту особенность выделения газа необходимо учитывать не только при добыче угля, но также и в случаях, когда берутся пробы для диагностики метановой подсистемы угольного пласта [9].

Выводы. Таким образом, проанализировав работы [1-10] и др., можно предположить, что основными факторами, воздействующими на физико-химические параметры газодиффузионных процессов высокогазоносных угольных пластов, являются внешние нагрузки, давление газа в трещинах, количество сорбированного углем газа и температура. Однако разработанные способы имеют определенные недостатки, такие как сложность

создания лабораторной установки, бесконтрольное улавливание выделяемых газов из угольного образца, а также высокая стоимость оборудования. Проблема разработки новых способов искусственного воздействия на высокогазоносные угольные пласты является актуальной в настоящее время.

Список литературы

1. Зависимость проницаемости угольного пласта от газосодержания и действующих напряжений / В.Н. Захаров [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 2. – С. 16-25.
2. Подземная гидромеханика / К.С. Басниев, Н.М. Дмитриев, Р.Д. Каневская, В.М. Максимов. – 2-е изд., испр. – М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. – 488 с.
3. Руководство по исследованию скважин / А.И. Гриценко, З.С. Алиев, О.М. Ермилов [и др.]. – М.: Наука, 1995. – 523 с.
4. Pinkun Guo, Yuanping Cheng. Permeability prediction in deep coal seam: A case study on the № 3 coal seam of the Southern Qinshui Basin in China // The Scientific World Journal. – 2013. – Vol. 2013 – 10 p.
5. Изменение сорбционных свойств бурых углей Харанорского месторождения при воздействии электромагнитным микроволновым излучением / Е.В. Ворсина, В.А. Михеев, Т.В. Москаленко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 12. – С. 13-20.
6. Synthesis of carbon-based materials by microwave-assisted hydrothermal process / M. Guiotoku, C. Rambo R., C. Maia, D. Hotza // Microwave Heating. – 2011. – P. 291.
7. Preparation of activated carbon from Jatropha hull with microwave heating: Optimization using response surface methodology / Xin-Hui D., Jin-Hui P., Li-Bo Z. [et al.] // Fuel Processing Technology. – 2011. – Vol. 92. – No 3. – P. – 394.
8. Микроволновое излучение и интенсификация химических процессов / Д.Л. Рахманкулов [и др.]. – М.: Химия, 2003. – 220 с.
9. Распределение метана в угле и метод экспресс диагностики метановой подсистемы в угольном пласте / А.Д. Алексеев, В.А. Васильковский, Г.П. Стариков, А.И. Спожакин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № S11. – С. 273-292.
10. Основные положения и характерные особенности фильтрации газа в угольных пластах / С.В. Кузнецов, В.А. Трофимов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – № 8. – С. 79-84.

УДК 622.33:005.6

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ УГЛЕДОБЫЧИ НА КАЧЕСТВО УГОЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ

Мишин С.А., Горбунова А.Р.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Проведён анализ современного состояния угольной отрасли Кузбасса. Проанализировано влияние способов и средств угледобычи на качество угольной продукции, а также выявлены основные проблемы подхода к управлению качеством товарной продукции предприятий в условиях отработки сложноструктурных месторождений.

Ключевые слова: способы добычи угля, качество горной массы, факторы воздействия, сложноструктурные месторождения, центры угледобычи, качество технологического процесса.

Угольная промышленность, обладая значительными разведанными и прогнозными запасами угля, имеет все возможности для эффективного их извлечения и использования в целях стабильного обеспечения внутренних потребностей в угольной продукции и развития экспортных поставок.

Последние 10 лет стали для угольной промышленности этапом стабильного развития, который совпал с восстановительным ростом экономики страны. За этот период объем добычи российского угля вырос более чем в 1,25 раза и в настоящее время превышает уровень 440 млн. тонн в год, в 2,3 раза (в текущих ценах) вырос объем инвестиций в основной капитал угольных предприятий, введено 315 млн. тонн новых мощностей по добыче угля [1].

За эти годы продолжилось развитие традиционных центров угледобычи Кузнецкого, Канско-Ачинского, Горловского и Минусинского бассейнов, а также освоение угольных месторождений в Восточной Сибири, на Дальнем Востоке и в Арктической зоне Российской Федерации. Так, например, ведется промышленное освоение: Бейского каменноугольного месторождения, Эльгинского месторождения, Апсатского месторождения, Ургальского угольного комплекса, УлугХемского угольного бассейна, Элегестского месторождения, Межегейского месторождения, Каа-Хемского и Чаданского месторождений, Ерковецкого бурогоугольного месторождения, а также Огоджинского и Сугодинского месторождений, Малолемберовского и Нижнелемберовского месторождений, Верхне-Алькватваамского и Амаамского месторождений [10].

Почти все перечисленные перспективные центры угледобычи являются сложноструктурными месторождениями.

Перспективы угледобычи в нашей стране определены в Долгосрочной программе развития угольной промышленности России на период до 2035 г., утвержденной распоряжением Правительства РФ №1582-р от 13.06.2020 г. Целью указанной программы является создание российским угольным компаниям условий для повышения их конкурентоспособности, в том числе за счет повышения производительности труда, снижения себестоимости добычи угля, повышения качества угля в условиях добычи и переработки, роста объемов его переработки и обогащения, обеспечения стабильных поставок угля на внутренний и внешний рынки, развития производственных мощностей в регионах, расположенных близко к потребителям [3].

В условиях роста конкуренции на внутреннем и внешних рынках угля, безальтернативными требованиями к перспективному развитию угольной промышленности, в частности, становятся:

- снижение издержек в производстве и транспортировании угля;
- максимальное использование резервов повышения качества поставляемой продукции;
- переход от торговли на внешнем и внутреннем рынках рядовым углем к торговле высокотехнологичным "энергопродуктом", обеспечивающим (в том числе на основе глубокой переработки угля) увеличение эффективности его использования конечным потребителем.

При этом задача повышения качества угольной продукции выходит на первый план. И эта задача достаточно успешно решается, но только при поставках на экспорт, где продукция российских угледобывающих компаний пользуется спросом за высокую теплотворную способность и низкое содержание серы.

Глоссарий. Сложноструктурное угольное месторождение – месторождение, имеющее несколько угольных пластов и пропластков с различной мощностью и с существенными отличиями качественных характеристик полезного ископаемого. Сложноструктурное месторождение характеризуется неравномерной и сильной изменчивостью качественных характеристик полезного ископаемого, а также его сложной морфологией (рис. 1). Типичным представителем таких месторождений является Бейское каменноугольное месторождение, расположенное в Республике Хакасия.

Качество товарной продукции – совокупность свойств получаемой на предприятии продукции, определяющих степень ее пригодности для использования по назначению [5].

Управление качеством товарной продукции – деятельность персонала предприятия, нацеленная на обеспечение наилучшего соотношения средневзвешенной ценности и себестоимости продукции на основе корректировок и реализации функций планирования и контроля качества, коммуникации (информации), разработки мероприятий и реализации соответствующих технологических и организационных решений [6].

Качество технологического процесса – устойчивая совокупность параметров технологических операций, обеспечивающих наилучшее соотношение средневзвешенной ценности и себестоимости продукции предприятия в изменяющихся условиях [7].

Тенденция требований к качеству продукции. Истощение «богатых» месторождений полезных ископаемых предполагает освоение новых месторождений, имеющих более сложную структуру и характеристики. Так, например, в угольной отрасли России доля продукции, произведенной на сложно-структурных месторождениях, расположенных в таких регионах, как Республика Хакасия (Бейский угольный кластер – Восточно-Бейский, Кирбинский, Майрыхский разрезы и т.д.) и Республика Бурятия (Никольский разрез) к 2030 г. вырастет в 3 раза и составит 11,7 % [9].

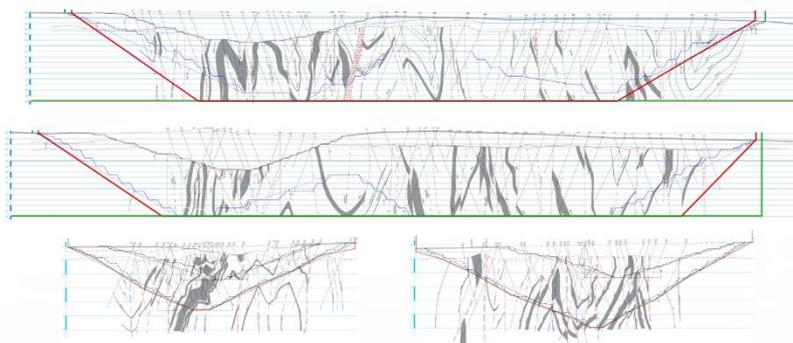


Рис. 1. Пример сложноструктурного месторождения

Глобализация мирового рынка энергетического сырья привела к тому, что в последние десятилетия существенно возросла динамика изменения параметров рынка энергетического угля. Очередное падение цен на угольную продукцию для энергетики началось в 2019 г., оно обусловлено главным образом отказом стран Западной Европы от «грязных» видов топлива. В течение одного календарного года цены на стандартную угольную продукцию снизились в 1,5-2,0 раза. Кризис обострил системные несоответствия, характерные для угольных разрезов России, обрабатывающих сложноструктурные месторождения. Традиционные проектные технические и технологические решения ориентированы на стабильный спрос продукции и достаточно постоянные значения основных параметров горнотехнической системы разреза. В настоящее время для обеспечения жизнеспособности горного предприятия необходимо выдерживать падение спроса на угольную продукцию, которое достигает 20 – 30 % на протяжении года, при росте стоимости материально-технических, энергетических ресурсов, тарифов перевозчиков на 5 – 15 %.

Одновременно рынок ужесточает требования к качеству угольной продукции, ориентированной на энергетическую отрасль: средняя зольность отгружаемого угля в России в 1991 г. составляла 18,2 %, в 2018 – 13 %. [11]

Основные факторы воздействия на качество добываемых углей. Для разработки месторождений полезных ископаемых в зависимости от горно-геологических условий залегания и свойств пород и полезных ископаемых применяют различные технологии. Сейчас широкое применение получили 3 способа добычи угля: открытый, подземный, комбинированный. Их использование зависит от глубины залегания пласта полезного ископаемого, прочности вмещающих пород и доступности [2].

Сравнительная диаграмма способов добычи угля приведена на рис. 2.

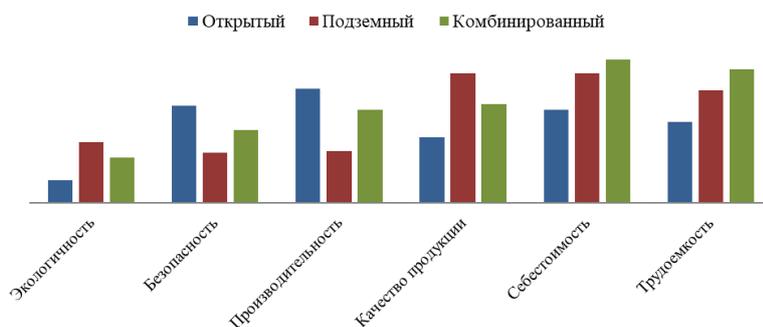


Рис. 2. Сравнительная диаграмма по способам добычи угольной продукции

Обеспечение требуемого уровня качества товарной продукции угледобывающего предприятия в условиях отработки сложноструктурного месторождения каменного угля достигается повышением качества технологических процессов и их дифференциацией по критерию максимального соотношения ценности и себестоимости продукции.

Схема методического подхода к управлению качеством товарной продукции предприятия в условиях отработки сложноструктурного месторождения каменного угля, представленная на рис. 3 [4].

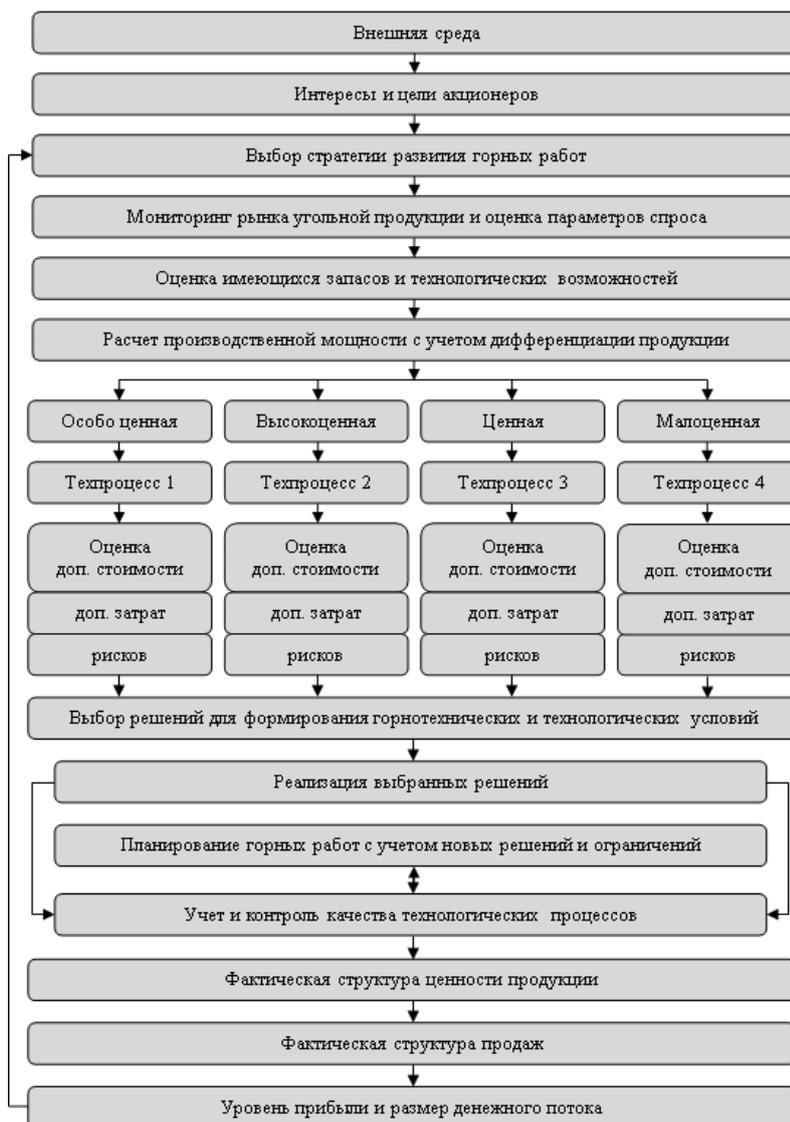


Рис. 3. Схема методического подхода к управлению качеством товарной продукции в условиях отработки сложноструктурного угольного месторождения

Отличительной особенностью методического подхода являются:

– расчет производственной мощности предприятия с учетом дифференциации ценности продукции по следующим категориям: особо ценная; высокоценная; ценная; малоценная. Распределение продукции по ценности зависит от особенностей месторождения и полезного ископаемого. Формирование каждой категории ценности продукции зависит от параметров технологических процессов, включая подготовку, экскавацию, транспортирование, складирование и переработку;

– учет экономической целесообразности освоения нового технологического процесса на основе расчета разности между добавленной стоимостью, полученной в результате повышения качества продукции, и дополнительными затратами на реализацию мероприятий по повышению качества;

– учет возможных ограничений производительности горнотранспортного оборудования для реализации мероприятий по повышению качества;

– соблюдение высокого качества технологических процессов путем учета, мониторинга и регулирования.

Основные этапы отработки сложноструктурного угольного месторождения открытым способом: подготовка угля к выемке, выемка угля, складирование угля, переработка угля [8].

Связь факторов, параметров технологических процессов и ценности продукции представлена табл. 1.

Таблица 1

Связь факторов, параметров технологических процессов и ценности продукции

| Класс | Группа | Вид |
|---|--|---|
| I. Показатели измельчения вещественно-минералогического состава | I-1. Примешивание, перемешивание | I-1.1. Внутриконтурное примешивание горной массы при отделении от массива |
| | | I-1.2. Внутриконтурное перемешивание при нарушении горного массива |
| | | I-1.3. Перемешивание в процессе выпуска, погрузки, доставки, разгрузки, складирования |
| | I-2. Потери (недоизвлеченные) при добыче | I-2.1. Потери неотделенного от массива полезного ископаемого |
| | | I-2.2. Потери отделенного от массива полезного ископаемого |
| II. Показатели изменения физико-механических свойств | II-1. Изменение природной (ненарушенной) структуры | II-1.1. Дробление |
| | | II-1.2. Изменение объемных параметров |
| | | II-1.3. Изменение площадных параметров |
| | | II-1.4. Изменение линейных параметров минеральных отдельностей |
| | II-2. Изменение физико-механических свойств | II-2.1. Увлажнение |
| | | II-2.2. Высыхание |
| | | II-2.3. Выветривание |
| | | II-2.4. Оттаивание, замораживание |
| | | II-2.5. Возникновение развития трещиноватости |
| | | II-2.6. Изменение удельного (объемного) веса |
| III. Показатели химических изменений добываемых твердых полезных ископаемых | III-1. Химические преобразования при добыче | III-1.1. Подземное выщелачивание |
| | | III-1.2. Воздействие мигрирующих жидких, газообразных и гелеобразных потоков |

Выводы. Таким образом, назрела насущная необходимость разработки и внедрения стандартов, регулирующих качество угольной продукции на внутреннем рынке. Использование в энергетике угольного топлива с высокой теплотворной способностью и низким содержанием балластных и вредных примесей позволит: снизить стоимость транспортировки; снизить затраты электростанций на золошлакоудаление, и другие экологические платежи; повысить конкуренцию среди поставщиков угля за счет применения неких «стандартов»; повысить гибкость угольного рынка за счет свободного перемещения объемов между экспортными и внутренними поставками.

В этой связи повышается роль технического регулирования на угольном рынке. Основной задачей технического регулирования качества продукции является создание системы нормативных документов, регламентирующих терминологию, классификацию, технические требования и методы испытания сырья и продукции. В условиях создания Таможенного союза (ТС) и вступления России в ВТО все элементы системы технического регулирования должны быть приведены в соответствие с нормами международных стандартов.

В целом, развитие системы технического регулирования качества угольной продукции будет способствовать повышению прозрачности угольного рынка и объективности ценообразования в торговле углем, создаст основы для биржевой торговли угольным топливом и, в конечном счете, даст новый импульс развитию угольной промышленности в условиях усиливающейся межтопливной конкуренции.

Список литературы

1. Петренко И.Е. Итоги работы угольной промышленности России за 2022 год. // Уголь. – 2023. – № 3. – С. 21-33.
2. Плакиткина Л.С. Перспективы развития Кузнецкого угольного бассейна на период до 2035 г. // Горный журнал. – 2015. – № 12. – С. 28-33.
3. Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года : распоряж. Правительства Российской Федерации от 13 июня 2020 г., № 1582-р. – С.226.
4. ГОСТ 25543-88. Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам: утв. и введ. в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 06.06.88, № 1273: дата введ. 1990-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023993>
5. Вокин В.Н., Морозов В.Н., Назарова Е.Ю. Открытые горные работы. – Красноярск: СФУ, 2012. – 155 с.
6. Деревяшкин И.В. Основы горного дела. Открытые горные работы. – Москва, 2011. – 258 с.
7. Арсентьев А.И., Холодняков Г.А. Проектирование горных работ при открытой разработке месторождений. – М.: Недра; 1994. – 336 с.
8. Веницкий К.Е., Шаль Р.Р. Управление качеством угля на разрезах ПО «Экибасту-уголь»: обзор. ЦНИЭИуголь. – М.; 1981.
9. Людвиг В.М. Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Кемеровской области – Кузбасса на 15.03.2021 г. // Федеральное агентство по недропользованию. – 2021. – С. 1-4.
10. Астафьева О.Е. Формирование механизма устойчивого развития угольной промышленности. // Уголь. – 2021. – № 3. – С. 10-14.
11. Панков Д.А., Афанасьев В.Я. Анализ тенденций мирового рынка угля и направлений российского экспорта // Уголь. – 2021. – № 3. – С. 23-27.

ГОРНЫЕ МАШИНЫ И ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

**РАСПОЗНАВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕДУКТОРОВ
ГОРНОШАХТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ ЭМИССИОННО-
СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА МАСЛА**^{1,2}д.т.н. Герике Б.Л., ³к.т.н. Кузин Е.Г., ¹к.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 – Филиал Кузбасского государственного технического университета
им. Т.Ф. Горбачева, г. Прокопьевск, Россия**

Аннотация. В статье приводится обоснование перехода на интеллектуальное обслуживание приводов горношахтного оборудования по его техническому состоянию на основе анализа работающего масла. Разработанная методика диагностики на основе спектрально-эмиссионного анализа горюче-смазочных материалов позволяет получать не только качественные, но и количественные результаты содержания примесей в работающем масле для сравнения с допустимыми нормами. В качестве примера рассмотрены результаты диагностики состояния редукторов приводов шахтного конвейера. Высокая достоверность оценки работоспособности машин по параметрам работающего масла (0,85 – 0,98) и сравнительно малые затраты, связанные с его применением, делают этот метод весьма перспективным при эксплуатации горношахтного оборудования. В результате использования такого подхода оценка технического состояния позволяет не только предотвращать аварийные выходы из строя горношахтного оборудования, исключать незапланированные простои, но и приносить значительный экономический эффект путем оптимизации сроков и объемов ремонтных работ.

Ключевые слова: горношахтное оборудование, редуктор, оценка технического состояния, анализ горюче-смазочных материалов, механические примеси, количественный анализ.

Введение. По результатам многочисленных исследований годовая производительность горношахтного оборудования к концу срока его службы сокращается по сравнению с первоначальной, снижается безопасность его эксплуатации. Поэтому важным направлением, как при проектировании, так и при эксплуатации является точная и достоверная прогнозная оценка основных показателей надежности отдельных узлов и агрегатов. В качестве средства, обеспечивающего повышение эффективности и надежности работы горношахтного оборудования, является диагностирование его технического состояния.

Постановка задачи. Одним из методов функциональной диагностики, не требующем остановки оборудования, является метод эмиссионно-спектрального анализа горюче-смазочных материалов для выявления посторонних примесей, характеризующих износ отдельных узлов и деталей редукторов. Разрабатываемая методика по проведению измерений параметров эмиссионно-спектрального анализа масла предназначена для оценки технического состояния и остаточного ресурса работоспособности редукторов горного оборудования.

Методика устанавливает два вида диагностических измерений: диагностические и прогностические измерения.

Данные измерения предназначены для оценки технического состояния редукторов горношахтного оборудования с целью диагностирования и прогнозирования технического состояния объекта, а также описания различных процессов, протекающих в них, что дает возможность выявлять причины снижения работоспособности.

В основу методики положены государственные нормативно-методические материалы [1-3]. Для проведения эмиссионного спектрального анализа масла должна быть использована фотоэлектрическая установка МФС-11 (рис. 1) с автоматическим управлением и автоматической обработкой выходных данных о спектральных линиях различных элементов в маслах.

После градуировки потребителем в конкретных производственных условиях установка может быть использована для анализа масел на продукты износа деталей редукторов.

В основу работы установки МФС-11 положен метод эмиссионно-спектрального анализа, использующий явление свечения газа или пара исследуемого твердого или жидкого вещества в результате нагревания его до температуры выше 1000°C [4-6]. При таких температурах энергия движения частиц газа соизмерима с энергией ионизации и химической связи, и при их столкновениях происходят процессы диссоциации и ионизации, в результате которых, наряду с атомами и молекулами, в газе образуются свободные электрические заряды – ионы и электроны. Нагретый, частично ионизированный, проводящий электрический ток газ (плазма) излучает электромагнитные колебания в оптическом диапазоне спектра. Существенной составляющей этого излучения являются линейчатые спектры атомов, причем каждому элементу соответствует свой, вполне определенный, линейчатый спектр излучения. Поэтому, исследуя спектр излучения плазмы, можно определить химический состав образующего ее газа, а, следовательно, и состав анализируемой пробы, часть которой переведена в газообразное состояние.

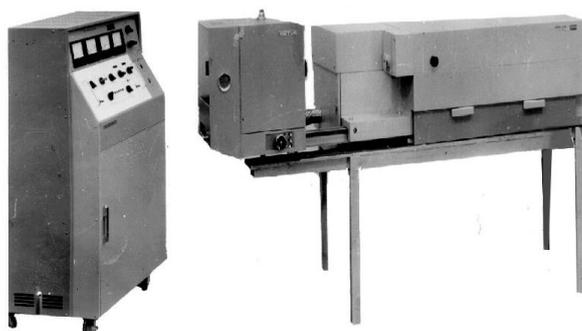


Рис. 1. Многоканальный эмиссионный спектрометр МФС – 11

Исследование спектра в установке осуществляется путем выделения полихроматором аналитических спектральных линий, регистрации и автоматической обработки сигналов этих линий с помощью фотоэлектронных приемников излучения, регистрирующего и вычислительного устройств.

Поскольку интенсивность аналитических спектральных линий (мощность излучения единицы объема плазмы) связана с концентрацией соответствующих элементов в пробе, то установка позволяет определять не только качественный, но и количественный состав пробы. Для проведения количественного анализа в конкретной аналитической задаче необходимо выбрать адекватную модель спектроаналитического процесса (зависимость между сигналом и концентрацией исследуемого элемента) и произвести с ее помощью градуировку установки [7, 8]. Широко известна формула Ломакина-Шайбе, связывающая интенсивность аналитической спектральной линии и концентрацию соответствующего элемента показательной зависимостью. Такая зависимость не всегда удовлетворяет требованиям точности и правильности спектрального анализа, так как недостаточно полно отражает процессы, происходящие в плазме.

При рассмотрении данной задачи в общем случае оказывается, что физико-химические процессы, происходящие при испарении пробы и образовании плазмы, более сложны, и интенсивность аналитической спектральной линии зависит не только от содержания соответствующего элемента в пробе, но и от множества других независимых факторов и

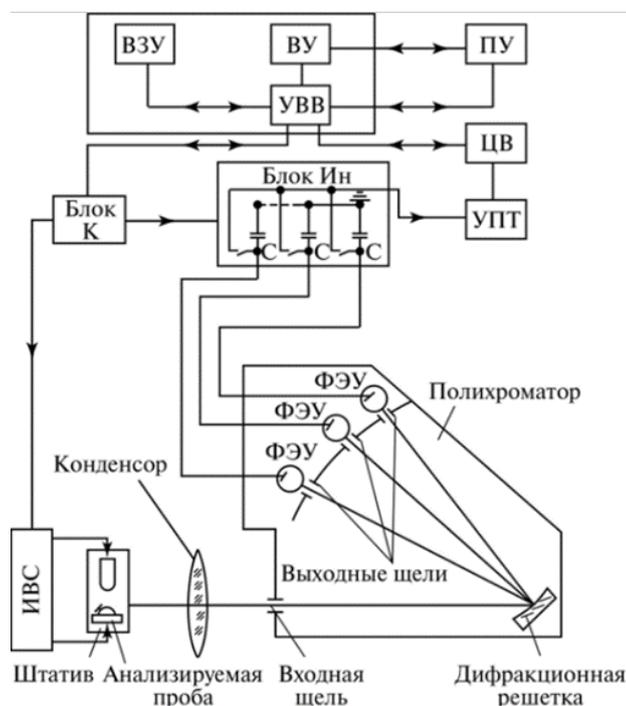
может быть представлена некоторой функцией отклика, аналитическое выражение которой не представляется возможным найти.

На основании экспериментальных данных, получаемых по образцам масел с известным химическим составом, можно найти выборочную оценку функции отклика, представляющей собой, с достаточной точностью, модель спектроаналитического процесса. Такой моделью может быть полином первой, второй, или третьей степени или многомерная зависимость, где устанавливается связь интенсивности аналитической спектральной линии не только с концентрацией исследуемого элемента, но и с концентрациями других элементов, присутствующих в пробе и оказывающих влияние на результаты анализа [9-11].

Данные измерения предназначены для оценки технического состояния редукторов горношахтного оборудования с целью диагностирования и прогнозирования технического состояния объекта, а также описания различных процессов, протекающих в них, что дает возможность выявлять причины снижения работоспособности.

Функциональная схема установки показана на рис. 2.

Штатив установки МФС-11 обеспечивает два способа введения анализируемой пробы масла в электрический разряд, образующий плазму. При одном способе масло подается на вращающийся угольный стержневой электрод вращающимся кварцевым диском, погруженным в ванночку с маслом, при другом способе анализируемое масло подается в разряд вращающимся угольным диском.



ИВС – источник возбуждения спектра; блок К – блок контроллера; ВЗУ – внешнее запоминающее устройство; ВУ – вычислительное устройство; УВВ – устройство ввода-вывода; ПУ – печатающее устройство; ЦВ – цифровой вольтметр; УПТ – усилитель постоянного тока; ФЭУ – фотоэлектронный умножитель; С – емкость интегрирующего конденсатора

Рис. 2. Схема электрическая общая системы фотоэлектрической МФС-11

Подставным электродом в обоих случаях является угольный стержень. Излучение разряда направляется на входную щель полихроматора с вогнутой дифракционной решеткой, которая разлагает излучение в спектр. Выходные щели полихроматора выделяют из спектра необходимые аналитические линии. Поток излучения с длиной волны α , прошедшей через выходную щель, пропорционален интенсивности $I(\alpha)$

$$\Phi(\alpha) = \Sigma_{\alpha} I(\alpha).$$

Коэффициент пропорциональности Σ_{α} можно считать практически постоянным для данной длины волны α данного полихроматора, так как он зависит от размеров входной щели, относительного отверстия и потерь на оптических элементах. Выделенный поток излучения направляется на фотокатод соответствующего ФЭУ, в анодной цепи которого протекает ток. Так как электрический разряд, образующий плазму, чаще всего имеет импульсный характер и, кроме того, интенсивности спектральных линий в электроразрядной плазме испытывают значительные случайные колебания, то для получения стабильных результатов наблюдений необходимо усреднение спектроаналитических сигналов в некотором выбранном промежутке времени. В установке это усреднение достигается накоплением (интегрированием) зарядов на конденсаторах с емкостью C , включенных в анодные цепи ФЭУ и установленных в блоках интеграторов.

Все конденсаторы заряжаются одновременно. Напряжения, до которых заряжаются конденсаторы, пропорциональны усредненным значениям интенсивности аналитических линий. По окончании времени интегрирования в соответствии с программой управления производится последовательный опрос конденсаторов путем подключения их к входу УПТ, выход которого подключен ко входу АЦП, входящего в состав устройства КМС-I-I. КМС-I-I совместно с ЭВМ выполняет программу управления установкой во всех режимах работы и производит обработку, хранение и выдачу информации по всем регистрирующим каналам на экран видеомонитора и печатающее устройство.

Порядок проведения измерений. Ежедневно ответственные по подразделениям лица сообщают старшему лаборанту химического анализа участка «Склад ГСМ» бортовые номера горно-шахтного оборудования, с которых необходимо провести интервальный отбор проб работающего масла. Контрольный отбор проб масла с горно-шахтного оборудования производится в процессе его эксплуатации пробоотборщиком участка «Склад ГСМ».

После интервального отбора проб пробоотборник передает отобранные пробы работающего масла в лабораторию химического анализа участка «Склад ГСМ» сменному лаборанту химического анализа для дальнейшего исследования масла.

Отобранные пробы масла исследуются сменным лаборантом химического анализа, старшим лаборантом химического анализа участка «Склад ГСМ» в день отбора. Результат исследований оформляется в форме справки о качестве масла, где отображаются фактические и браковочные физико-химические показатели масла, заключение о пригодности к дальнейшей эксплуатации масла в сравнении с браковочными показателями.

Работающее масло исследуется по следующим физико-химическим показателям:

- наличие механических примесей;
- наличие следов воды;
- температура вспышки, определяемая в открытом тигле;
- вязкость кинематическая;
- спектральный анализ (содержание следующих элементов: кремний, железо, алюминий, медь, хром, свинец, олово, никель).

Результаты исследования. Ранее выполненные исследования показали, что абразивное изнашивание вызывается процессами микрорезания рабочих поверхностей твердыми частицами пыли (горных пород) или другими продуктами износа. На микрофотографии частицы абразивного износа имеют вид микростружки, а на поверхностях трения имеются царапины, ориентированные в направлении скольжения [12-13].

Характеристика видов изнашивания представлена в табл. 2.

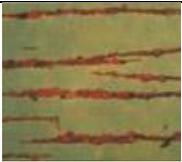
В качестве объекта диагностики были выбраны 3 редуктора Moventas Santasalo D3RST82XO шахтовых конвейеров.

Результаты комплексного обследования параметров смазочного масла, вибрации и инфракрасного излучения редукторов D3RST82XO приведены в работах [14-16].

Рассмотрим результаты мониторинга параметров смазочного масла для редукторов ленточного конвейера ЗЛЛ1600 с расположением приводных блоков Р3, Р4, Р5 представленном на рис. 3.

Таблица 2

Вид и характеристика частиц изнашивания элементов редуктора конвейера

| Вид изнашивания | Характеристика частиц изнашивания | Форма и размеры частиц |
|---|--|---|
| Окислительное (Oxidative wear) | Гладкие пластины размеры частиц 0,5...15 мкм, толщина частиц 0,15...1 мкм |  |
| Абразивное (Abrasive wear) | Частицы абразивного изнашивания стержневой или игольчатой формы длиной от 5 мкм и толщиной от 0,25 мкм |  |
| Адгезионное (Adhesive wear) | Сферические или чешуйчатые частицы, размеры до 20 – 50 мкм |  |
| Усталостное (Fatigue wear) | Плоские хлопьевидные пластины с гладкой поверхностью и хаотичная, беспорядочная форма периферии. Размеры частиц 10...100 мкм и более |  |
| Фреттинг-коррозия (Fretting corrosion wear) | Мелкодисперсные частички окислов железа Fe ₂ O ₃ от светло-коричневого до светло-красного цвета |  |

Содержание механических примесей, содержащихся в работающем масле, представлены на рис. 4.

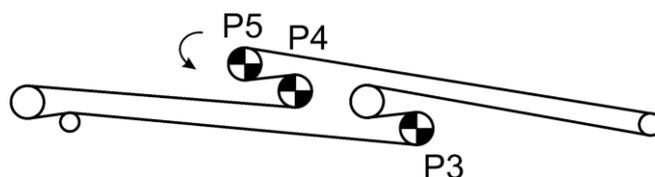


Рис. 3. Схема расположения приводных блоков на конвейере ЗЛЛ1600

Анализ графиков изменения характерных параметров масла и усредненных линий трендов (рис. 4) показывает приемлемые коэффициенты детерминации (R^2 не менее 0,5) для накопления кремния и хорошие (R^2 не менее 0,7) для накопления совокупности цветных металлов, железа и хрома.

Обсуждение результатов. Высокая достоверность оценки работоспособности машин по параметрам работающего масла и сравнительно малые затраты, связанные с его применением, делают этот метод весьма перспективным не только при эксплуатации горношахтного оборудования. Так, достоверность диагноза неисправностей редуктора составляет 0,85 – 0,98, а ошибка точечного прогноза не превышает 15%.

Выводы. Анализ параметров смазочного масла позволит дополнить картину вибрационной диагностики. Наличие в пробе продуктов износа, характерных для материалов сепараторов подшипников, например, конкретизирует дефектный узел с учетом параметров вибрации.

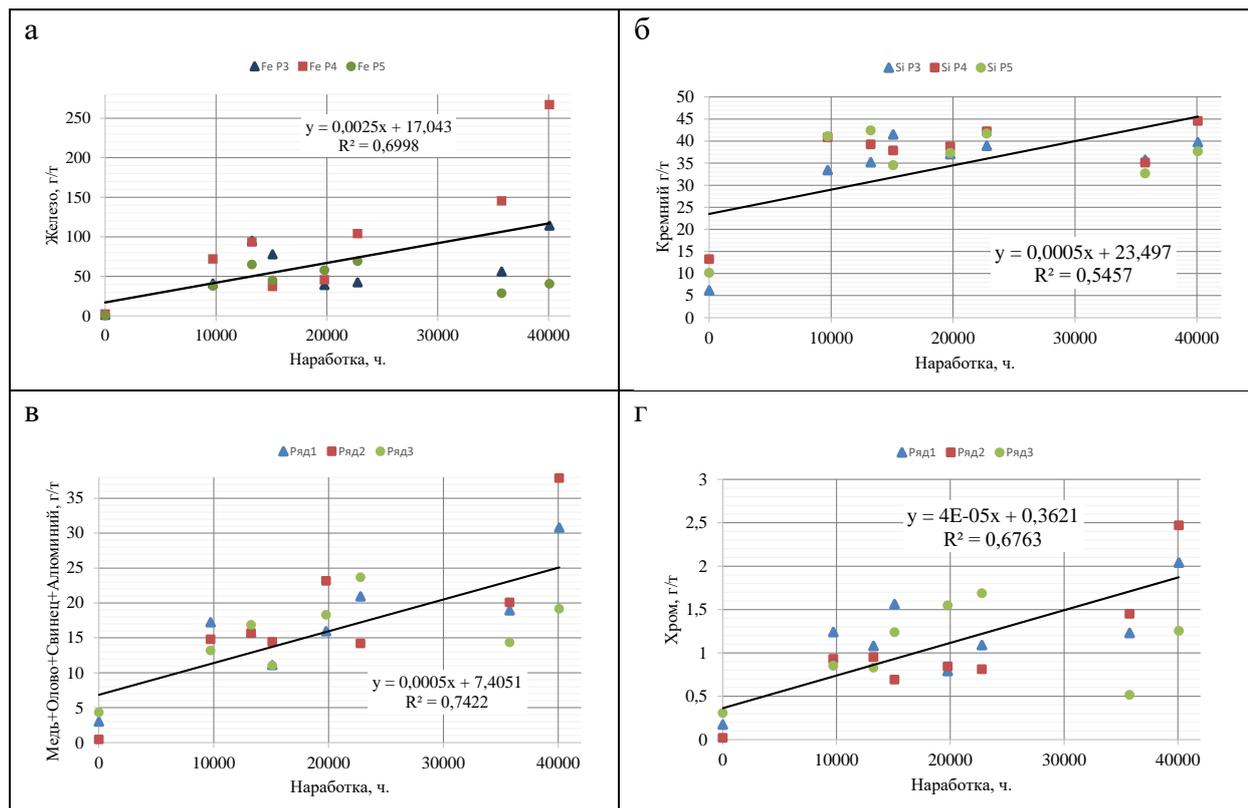


Рис. 4 График изменения содержания параметров в масле редукторов: а – железа; б – кремния; в – совокупности цветных металлов (медь, олово, свинец, алюминий); г – хрома

Разработанная методика оценки технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров по параметрам работающего масла обеспечивает при требуемой достоверности (90%) построение трендов диагностических параметров для прогнозирования остаточного ресурса.

Проведена промышленная апробация методики на шахте «Талдинская-Западная 1» для редукторов D3RST82ХО ленточных конвейеров ЗЛЛ-1600.

Список литературы

- ГОСТ Р 8.563-96. Методики выполнения измерений.
- ГОСТ 8.315-97. Государственная система обеспечения единства измерений. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. Основные положения.
- ГОСТ 27674-88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения.
- Барсуков В.И. Атомный спектральный анализ. – М.: Издательство Машиностроение-1. – 2005. – 132 с.
- Методы спектрального анализа / А.А. Бабушкин, П.А. Бажулин, Ф.А. Королев [и др.]. – М.: Издательство МГУ. – 1962. – 509с.
- Соколов А.И., Тищенко Н.Т., Аметов В.А. Оценка работоспособности машин по параметрам работающего масла: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томского университета, 1991. – 200с.
- Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники: учеб. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. – 336 с.
- Другов Ю.С. Экологическая аналитическая химия. – М.: Москва, 2000. – 216 с.
- Zhan Honglei. The spectral analysis of fuel oils using terahertz radiation and chemometric methods // Journal of physics. – 2016. – № 39. – P. 42- 57.

13. Маркова Л.В. Интеллектуальный метод оценки состояния смазочного масла // Трение и износ. – 2016. – Т. 37. – № 4. – С. 401-409.
14. Владимиров Д.И., Никоноров А.Н. Диагностирование дизелей по соотношению концентраций продуктов изнашивания в работавшем моторном масле // Евразийский научный журнал. – 2016. – №10. – С. 294-296.
15. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
16. Внешний вид зубьев зубчатых колес. Терминология износа и отказа // Appearance of gear teeth – terminology of wear and failure АНСИ/АГМА 1010: E95 (ANSI/AGMA 1010: E95).
17. Кузин Е.Г. Совершенствование технического обслуживания редукторов на основании мониторинга параметров эксплуатационных материалов // Перспективы инновационного развития угольных регионов России : сб. трудов VI междунар. науч.-практ. конф. / Отв. ред. Е.Ю. Пудов, О.А. Клаус. – Прокопьевск, 2018. – С. 47–52.
18. Diagnostics of technical condition of gear units of belt conveyors for the aggregate of methods of nondestructive testing / E.G. Kuzin, B.L Gerike, Yu.V. Drozdenko [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – С. 012013. – DOI: 10.1088/1757-899X/253/1/012013.
19. Identification of mine rescue equipment reduction gears technical condition / B.L. Gerike, V.I. Klishin, E.G. Kuzin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Ser. «International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources». – 2017. – С. 012022. – DOI: 10.1088/1755-1315/84/1/012022.

УДК 681.518.4

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ
ГОРНЫХ МАШИН**
д.т.н Герике Б.Л., Мокрушев А.А.
**Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
г. Кемерово, Россия**

Аннотация. В статье рассмотрен подход к распознаванию дефектов подшипниковых узлов горных машин на основе вейвлет-анализа виброакустических сигналов. Приведена классификация существующих методов вибродиагностики подшипников качения, рассмотрены достоинства и недостатки этих методов. Показана возможность применения вейвлет-анализа для распознавания технического состояния подшипников качения.

Ключевые слова: вибрация, вибродиагностика, дефект, подшипник качения, горная машина, вейвлет-преобразование.

Во время эксплуатации горных машин и оборудования неизбежно возникают механические неисправности различного рода, которые влекут к остановке производственного процесса и, как следствие, к уменьшению объёма добычи сырья. К таким неисправностям относятся проблемы функционирования опорных элементов во всевозможных приводных, преобразующих и исполнительных механизмах – подшипников качения (ПК). Подшипники качения, несмотря на всю простоту конструкции, являются одними из важнейших элементов в узлах горных машин и оборудования. Подшипник качения служит опорой для вращающихся валов и деталей, и функционирует по принципу качения [1, 2].

Существуют следующие виды повреждений подшипников – первичные и вторичные [3, 4]. Первичные повреждения: износ, вмятины, задиры, поверхностные разрушения,

коррозия, последствия прохождения электрического тока. Вторичные повреждения: усталостные раковины, трещины.

Диаграмма распределения отказов подшипников качения представлена на рис. 1.

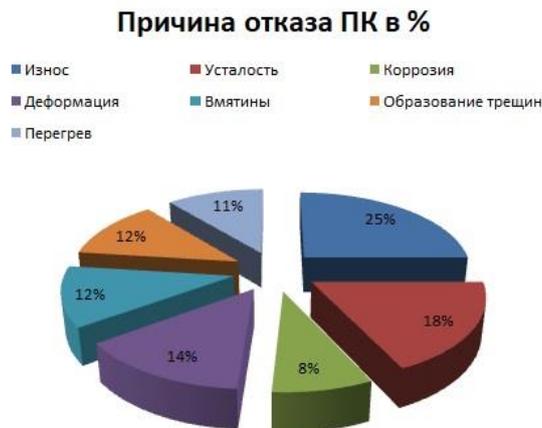


Рис. 1. Диаграмма распределения отказов подшипников качения

Дефекты создают серии ударных импульсов, которые имеют малоамплитудный широкополосный спектр и зачастую принимаются за шум. Параметры ударных импульсов определяются степенью развития и локализации дефекта, поэтому могут служить его достоверными диагностическими признаками [3, 4].

Процесс возникновения ударного импульса, который можно описать следующей моделью:

$$x(t) = a_0 \times \lambda^{-\beta t} \times \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

где x – смещение; a_0 – начальная амплитуда; ω – частота затухающих колебаний, связанная с частотой собственных колебаний $\omega^2 = \omega_0^2 - \beta^2$; $\beta = rt/2m$ – скорость затухания колебаний; r – коэффициент сопротивления; m – масса колеблющейся системы.

Частота собственных колебаний системы здесь понимается как частота, с которой колебалась бы система при отсутствии сил сопротивления. График этой модели представлен на рис. 2.

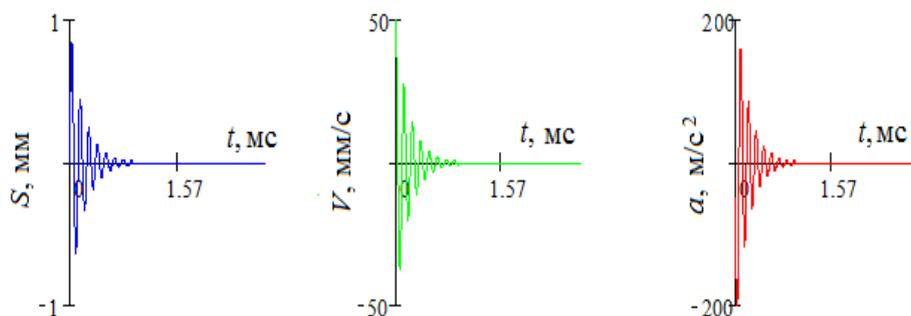


Рис. 2. Виброперемещение (S), виброскорость (V) и виброускорение (a)

В этой модели рассматривается цельная, однородная система. На практике же этот процесс выглядит сложнее. Любая машина состоит из нескольких частей: редуктор, станина, корпус и пр., которые обладают некоторой подвижностью относительно друг друга. Энергия, поступившая от удара, распределяется между этими элементами и узлами, заставляя их колебаться с различными, характерными для них, собственными частотами. [3, 4].

Известно, что подобные дефекты развиваются лавинообразно и приводят к непредвиденным остановкам оборудования, поэтому их диагностика требует получения информации о дефекте на ранних этапах его развития [5].

Высокая информативность и относительная простота измерения параметров вибрации определили широкое применение виброакустических методов в технической диагностике горных машин и оборудования [1].

На сегодняшний день наиболее эффективный, достоверный и экономичный метод оценки состояния подшипников – анализ механических колебаний. Анализ механических колебаний основывается на обработке виброакустического сигнала спектральными методами и выделении диагностической информации. На практике для обработки вибросигнала применяют следующие методы: кепстральный анализ, метод эксцесса, спектр огибающей сигнала, крест-фактор, диагностика по спектру вибросигнала, диагностика по энергетическому спектру, быстрое преобразование Фурье. Главным недостатком спектральных методов является низкая чувствительность к зарождающимся дефектам. В случае с Фурье преобразованием отсутствует возможность, определить в какой момент времени присутствовали те или иные частоты [1-3].

Новым методом в цифровой обработке сигналов является применение математического аппарата вейвлет-анализа. В начале XXI века появились, так называемые, вейвлет-функции. Вейвлет-преобразование одномерного сигнала – это его представление в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций. Результатом вейвлет-разложения (базис всплесков) сигнала $S(t)$ является двумерная функция (ортонормальный базис), зависящая от конкретных значений времени b и масштаба a .

На вейвлет-функцию накладываются два ограничения:

– она должна быть достаточно локализована, т.е. обращаться в ноль при удалении от начала координат;

– интеграл от функции на промежутке от $-\infty$ до $+\infty$ должен быть равен нулю. [8, 9]

Само вейвлет-преобразование выглядит следующим образом:

$$W_{\Psi} f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{C_{\Psi}}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi \left(\frac{b-x}{a} \right) f(x) dx, \quad (2)$$

Где Ψ – вейвлет функция, a – масштаб, b – сдвиг.

Нормирующий коэффициент равен

$$C_{\Psi} = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty, \quad (3)$$

где $\Psi(\omega)$ – Фурье образ вейвлета Ψ .

На рис. 3 представлен вибросигнал дефектного подшипника качения.

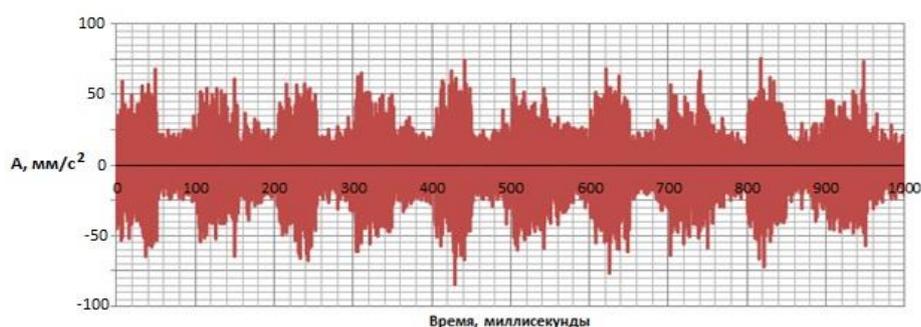


Рис. 3. Вибросигнал подшипника качения с дефектом

На рис. 4 представлен вибросигнал дефектного подшипника качения после вейвлет – преобразования Добеши.

По своей сути вейвлет-преобразование является представлением сигнала в виде одинаковых по форме коротких «всплесков», которые можно сдвигать и растягивать по временной оси, благодаря чему вейвлет-анализ обладает более высокой чувствительностью к кратковременным быстропеременным флуктуациям в вибросигнале. В этом и заключается принципиальное отличие от быстрого преобразования Фурье.

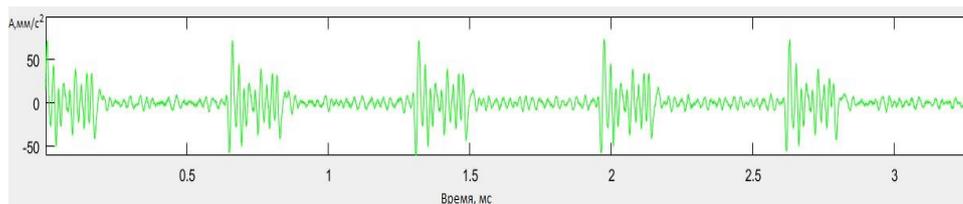


Рис. 4. Вейвлет–разложение Добеши вибросигнала дефектного подшипника с выделением импульсных компонентов

Вывод. Применение вейвлет-анализа позволяет в достаточной мере точно оценить исследуемую неисправность подшипника качения, прогнозировать остаточный ресурс узла, предупреждать возникновения аварийных отказов.

Список литературы

1. Интеллектуальное обслуживание редукторов горных машин / Б.Л. Герике, В.И. Клишин, П.Б. Герике, А.А. Мокрушев // Journal Of Maning and Geotechnical Engineering. – 2018. – NO. 1.
2. Герике Б.Л., Хорешок А.А., Дрозденко Ю.В. Обеспечение качества выпускаемой продукции заводов горного машиностроения // Вестник КузГТУ. – № 5. – 2016. – С. 33 – 40.
3. 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. – № 5 – 2017. – С. 43 – 48.
4. Диагностика неполадок подшипников – NSK Motion & Control, 2009. – 42 р.
5. Кузин Е.Г., Герике Б.Л. Диагностика технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров // ГИАБ. – 2017. – № 8. – С. 47-55.
6. Wen C., Dong L., Jin X, Feature Extraction of Bearing Vibration Signals Using Second Generation Wavelet and Spline-Based Local Mean Decomposition // Journal of Shanghai Jiaotong University (Science). – 2015. – Vol. 20. – No. 1. – P. 56-60.
7. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166. – № 11. – С. 1145-1170.
8. Витязев В.В. Вейвлет-анализ временных рядов: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2001. – 58 с.

УДК 681.518.5: 629.353

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ПОСТОЯННОГО АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ

Швыдкин С.А., д.т.н. Герике Б.Л.

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

Аннотация. Рассмотрены основные положения методики проведения акустико-эмиссионного (АЭ) мониторинга для диагностики технического состояния несущих элементов металлоконструкций карьерных автосамосвалов.

Ключевые слова: мониторинг, техническое состояние, диагностика, акустико-эмиссионный контроль, карьерный автосамосвал.

Интерес в нашей стране к диагностике с применением метода акустической эмиссии возник ещё в конце 1960-х годов, когда пришло понимание, что этот метод может стать мощным инструментом исследования деформации и контроля процессов образования и развития дефектов [1]. Однако сегодня, масштаб его применения для диагностики опасных производственных объектов в различных отраслях промышленности значительно отличается. Широкое распространение этот метод получил в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности, нефтяной и газовой промышленности, при диагностике оборудования, работающего под давлением и других отраслях.

АЭ контроль в сочетании с другими методами неразрушающего контроля (НК) позволил повысить скорость и качество выполнения диагностики, уменьшить временные и экономические затраты на проведение обследования. Наиболее частая схема проведения технической диагностики начинается с АЭ контроля, позволяющего обследовать весь объект целиком [2]. А уже затем в местах, где были обнаружены зоны повышенной активности сигналов акустической эмиссии, проводится визуальный осмотр, и применяется один из традиционных методов неразрушающего контроля (капиллярный (КД) [3], ультразвуковой (УЗК) [4], магнитный (МПД) [5], радиационный [6] и т.д.), позволяющий более точно определить местоположение дефекта, его размеры и другие характеристики.

Что касается угольной отрасли, несмотря на то, что первые работы, подтвердившие возможность применения АЭ контроля для диагностики шагающих экскаваторов и автосамосвалов, были проведены ещё 20 лет назад [7,8], до сих пор использование этого метода остаётся крайне редким. В угольной отрасли АЭ метод не получил широкого распространения из-за особенности эксплуатации оборудования на непрерывных циклах, с редкими и короткими остановками на техническое обслуживание (ТО). А при необходимом условии невмешательства в производственный процесс, применение АЭ контроля становилось неэффективным, то есть использование АЭ метода приводило либо к простоям оборудования, либо к «простоям» специалистов, ожидающих очередного ТО оборудования.

Выход из этой ситуации видится в применении постоянного акустико-эмиссионного мониторинга, когда на объект с самого начала эксплуатации устанавливается система АЭ мониторинга, которая на протяжении всего срока службы следит за его техническим состоянием. Такой подход позволяет организовать круглосуточную диагностику, которая будет положительно влиять на весь производственный процесс. Знание текущего технического состояния оборудования позволит продлить срок межремонтной эксплуатации, что чрезвычайно эффективно экономически [9].

Таким образом, в угольной отрасли для выполнения технической диагностики с применением АЭ мониторинга предлагается использовать следующую схему:

- проведение постоянного АЭ мониторинга во время непосредственной эксплуатации оборудования, обнаружение дефектов и отслеживание их развития;
- проведение (во время очередного ТО) визуально-измерительного контроля на дефектных участках, выявленных при мониторинге;
- обследование (по возможности) дефектных участков с применением других методов неразрушающего контроля;
- проведение ремонта (по необходимости);
- продолжение мониторинга и подтверждение качества проведённого ремонта.

Ранее проведённые работы [10,11] по диагностике металлоконструкций автосамосвалов с применением АЭ контроля позволили наметить основные положения методики по проведению АЭ мониторинга.

Расположение системы АЭ мониторинга. Установка оборудования для АЭ мониторинга проводится во время очередного ТО. Прибор для АЭ мониторинга устанавливается в кабине водителя, питание прибора осуществляется от аккумуляторной батареи автосамосвала напряжением сети 24В. С помощью коаксиального кабеля типа РК-50 соединяются соответственно прибор с предварительными усилителями и далее ПУ с датчиками. Кабели

прокладываются в защитной гофре с изоляцией в негорючем исполнении, отдельно от силовых кабелей автосамосвала для уменьшения влияния электромагнитных помех. Разъёмы коаксиальных кабелей должны обеспечивать надёжный контакт, иначе при движении машины колебания в разъёмах будут приводить к возникновению ложных сигналов от подвижных контактов.

Установка датчиков. Для установки датчиков требуется выполнить зачистку небольших участков поверхности (диаметром ~ 40 мм) до чистоты не менее Rz40. Датчики АЭ размещаются на относительно небольшом расстоянии 0.9-1.2м друг от друга в связи с тем, что на проведение диагностики оказывает влияние высокий уровень шума от потока выхлопных газов, протекающих по трубам и каналам кузова автомобиля. Кроме этого, в связи с отсутствием заземления, проведению диагностики препятствует высокий уровень электрических помех. Поэтому для проведения мониторинга в таких условиях были выбраны высокочастотные датчики с резонансной частотой 450 кГц.

Система мониторинга должна выполнять функцию сбора данных на протяжении всего срока эксплуатации машины, поэтому датчики необходимо приклеивать к металлоконструкции автосамосвала с использованием эпоксидного компаунда. Для защиты датчиков от внешних воздействий необходимо предусмотреть установку защитных экранов.

Установку предварительных усилителей необходимо осуществлять таким образом, чтобы вибрационная нагрузка не передавалась с металлоконструкций автосамосвала на корпуса предусилителей, так как это может привести к выходу из строя элементов платы ПУ. По этой же причине на автосамосвале нецелесообразно применение интегральных датчиков со встроенными предусилителями, да и возможности применения такого типа датчиков при низких температурах значительно ограничены. Согласно техническим условиям, температурный диапазон эксплуатации автосамосвалов составляет от -50 до +50°С. Естественно, что применяемое оборудование для АЭ мониторинга должно быть рассчитано на использование при таких температурах.

Калибровка датчиков. После установки датчиков выполняется проверка их чувствительности, которая должна находиться в диапазоне ± 3 дБ, то есть чувствительность датчиков не должна отличаться более чем в два раза. В качестве источника сигнала можно использовать излом графитового стержня цангового карандаша (источник Су-Нильсена), с диаметром стержня 0,5 мм и твердостью 2Н.

Схема расстановки датчиков. Для определения местоположения дефектов может быть применён как линейный, так и плоскостной тип локации. Линейный тип можно использовать, например, на корпусе редуктора мотор-колеса (РМК). Основным же типом локации, применяемым на автосамосвале, должен быть плоскостной тип, позволяющий регистрировать сигналы от дефекта как минимум тремя датчиками. Это позволит определить более точное местоположение дефекта, что особенно важно на участках с наиболее часто повторяющимися дефектами.

В связи с тем, что для оценки степени опасности обнаруженных дефектов, наиболее информативным показателем является интенсивность сигналов акустической эмиссии [12], необходимо обеспечить установку датчиков АЭ непосредственно рядом с дефектами, за развитием которых осуществляется наблюдение. Это позволит получить более точные характеристики сигналов АЭ, излучаемых дефектом, а также построить достоверную кривую зависимости интенсивности сигналов АЭ от времени эксплуатации автосамосвала.

Замер уровня шумов. Замер уровня шумов необходимо проводить:

- на незаведённой машине, для проверки целостности кабельных линий и определения уровня электромагнитных помех в отсутствие заземления;
- на холостом ходу, для оценки уровня шума от работы двигателя;
- непосредственно во время работы машины в карьере.

Уровень шума на разных участках дороги значительно отличается. Шум достигает наибольшего уровня при движении загруженного автосамосвала в гору, так как при этом машина двигается на максимальных оборотах двигателя (дизель-генератора). В

проведённой ранее работе [13] при АЭ контроле корпусов РМК БелАЗа 75131, после замера уровня шумов на движущейся машине, был установлен порог дискриминации сигналов акустической эмиссии на уровне 60дБ.

Проведение мониторинга. За установку, настройку оборудования и обработку результатов АЭ мониторинга отвечают специалисты по АЭ контролю. Проведение мониторинга должно осуществляться в автоматическом режиме, а собранные данные передаваться на диспетчерский пункт, где они будут аккумулироваться и обрабатываться. Доступ к информации должны иметь как специалисты по АЭ контролю, так и инженерно-технические работники (ИТР) предприятия, ответственные за безопасную эксплуатацию оборудования. ИТР с помощью специалистов по АЭ контролю должны постепенно научиться использовать результаты АЭ контроля в своей ежедневной работе, чтобы на их основе своевременно принимать решения, направленные на обеспечение содержания автосамосвалов в исправном состоянии и создание безопасных условий работы.

Необходимо отметить, что акустико-эмиссионный мониторинг на автосамосвале можно использовать не только для обнаружения развивающихся дефектов. Правильно настроенная система является очень чувствительным инструментом, с помощью которого, можно вовремя «услышать» возросший уровень шума от работы неисправного агрегата или механизма. АЭ оборудование способно регистрировать не только рост трещин или развитие пластической деформации, но и процессы затвердевания, кристаллизации, трения, ударов, течеобразования и фазовых переходов [9].

Вывод. Метод АЭ может использоваться для:

– контроля износа и потерь смазки на объектах, связанных с вращением и трением компонент;

– детектирования потерянных частей и частиц оборудования;

– обнаружения и контроля течей, кавитации и потоков жидкости в объектах и т.д.

Такая организация процесса диагностики в итоге должна оказать существенную помощь обслуживающему персоналу в его ежедневной работе.

Список литературы

1. Иванов В.И. Об истории развития метода акустико-эмиссионной диагностики // Территория NDT. Международный журнал по неразрушающему контролю. – 2019. – № 1. – С. 44-51.
2. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность».
3. ГОСТ 18442-80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1980.
4. ГОСТ Р 55724-2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. – М.: Стандартиформ, 2019.
5. ГОСТ Р 56512-2015 Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Типовые технологические процессы. – М.: Стандартиформ, 2016.
6. ГОСТ 24034-80 Контроль неразрушающий радиационный. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1980.
7. Менчугин А.В., Протасов С.И., Стенин Г.Д. Применение акустико-эмиссионного контроля для оценки технического состояния одноковшовых шагающих экскаваторов // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: труды VII междунар. науч.-практ. конф. - Кемерово: ННЦ ГПИГД им. А. А. Скочинского, ИУУ СО РАН, КузГТУ, ЗАО КВК «ЭкспоСибирь», 2005. – С.79-82.
8. Оценка технического состояния несущих металлоконструкций шагающих экскаваторов по параметрам акустико-эмиссионного сигнала. / А.В. Менчугин, Б.Л. Герике, С.И.

Протасов, П.В. Буянкин // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. – № 5. – С. 25-30.

9. Шемякин В.В., Стрижков С.А. Аспекты применения метода акустической эмиссии для мониторинга опасных промышленных объектов // В мире неразрушающего контроля. – 2004. – №4. – С. 16-19.

10. Диагностика несущих элементов металлоконструкций карьерных автосамосвалов с применением метода акустической эмиссии / С.А. Швыдкин, Б.Л. Герике, Г.Д. Степин, И.М. Фридман // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: сб. труд. XI междунар. науч.-практ. конф., филиал КузГТУ в г. Междуреченск, 2022.

11. Герике Б.Л., Швыдкин С.А. Оценка технического состояния несущих металлоконструкций карьерных автосамосвалов // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении: сб. тр. III междунар. науч.-практ. конф. (ТЭК-2022). – Кемерово: КузГТУ. 2022. – С.199-205.

12. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. М.: Изд-во стандартов, 1976. – 270 с.

13. Швыдкин С.А., Герике Б.Л. Акустико-эмиссионный мониторинг несущих элементов металлоконструкций карьерных автосамосвалов // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2022. – № 8. – С. 153-157.

УДК 681.518.5

СРЕДНЕСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ДИСБАЛАНСА НА ГЕНЕРАТОРНЫХ ГРУППАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

д.т.н. Герике Б.Л., к.т.н. Герике П.Б.

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

Аннотация. В настоящей работе приводятся некоторые результаты моделирования процессов деградации технического состояния роторного оборудования электрических карьерных экскаваторов, полученные с использованием адаптивной прогнозной математической модели и единых диагностических критериев, основанных на результатах комплексного анализа параметров механических колебаний, генерируемых при работе энерго-механического оборудования горных машин.

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

Введение. В условиях действующей сегодня на угольных предприятиях Кузбасса системы планово-предупредительных ремонтов и аварийного обслуживания горной техники практически отсутствует потребность в построении долгосрочных прогнозов процессов изменения технического состояния эксплуатируемых горных машин. Это происходит потому, что все проводимые ремонты на предприятиях горной отрасли четко регламентированы, и эту запланированную последовательность ремонтных мероприятий нарушают только аварийные отказы эксплуатируемой горной техники, приводящие к росту непродолжительных простоев и повышению себестоимости продукции, отправляемой конечному потребителю. В таких условиях поставка запасных частей и материалов «точно в срок» и обслуживание техники по ее фактическому состоянию не является приоритетной задачей, зато повышается ценность результатов кратко- и среднесрочного прогнозирования,

позволяющего получить информацию о вероятности безаварийной работы диагностируемых механизмов до момента проведения ближайшего ремонта.

Большинство существующих прогнозных математических моделей, использующих результаты контроля вибрации различных машин и механизмов, ограничены крайне узкой областью применения результатов прогнозирования и имеют низкую степень апробации получаемых результатов [1-5].

На сегодняшний день на рынке программного обеспечения до сих пор не нашла своей реализации идея создания универсальной математической модели, пригодной для построения среднесрочных прогнозов процессов деградации технического состояния различных элементов энерго-механического оборудования горных машин. Причин этого явления несколько, однако главные из них – это ограниченность применяемых диагностических критериев, сложности интерпретации исходных диагностических данных и несовершенство предлагаемых прогнозных моделей, использование которых на практике почти никогда не позволяет провести прогноз для всей механической системы в целом, не говоря уже о том, что при смене объекта диагностирования работу по созданию критериев оценки и прогнозирования фактического состояния необходимо начинать практически заново [6-11].

Для решения этой задачи в рамках выполнения настоящей работы была предпринята попытка обобщить накопленные знания в области контроля параметров вибрации, генерируемой при работе энерго-механического оборудования горных машин и использовать единые диагностические критерии (ЕДК) в качестве параметров адаптивной деградационной математической модели, что делает результаты моделирования по-своему уникальными, т.к. позволяет получать данные прогноза для всех основных дефектов горного оборудования, начиная от подшипников качения и до зубчатых передач в составе редукторов. Методология создания единых диагностических критериев была разработана в рамках выполнения научного проекта РФФИ и Кемеровской области № 20-48-420010 с использованием принципов «оптимальной» скаляризации результатов комплексного анализа параметров вибрации горного оборудования с применением спектрального анализа в расширенном частотном и динамическом диапазоне, эксцесса и анализа огибающей спектра, в результате были получены восемь единых диагностических критериев, и, кроме того, были определены предельные критические значения новых ЕДК и осуществлена апробация результатов прогнозирования [1, 12]. Объектом настоящего исследования стала выборка диагностической информации по двадцати пяти карьерным экскаваторам различных типов и конструкций, от драглайнов до механических лопат, наблюдение за которой проводилось на протяжении шести лет. При выполнении расчета величин единых диагностических критериев, используемых в качестве параметров предложенной адаптивной модели для выявления дефектов, связанных с неуравновешенностью роторных агрегатов, использовался метод оптимальной скаляризации, основанный на замене векторов диагностических признаков скалярными величинами, эффективность такого решения для создания обобщенных критериев оценки сложных механических систем получила свое обоснование в работах отечественных и зарубежных ученых, таких как Сушко А.Е., Краковский Ю.М., Tse P., Peng Y., Yam R. и других авторов. Полученные в рамках выполнения настоящего проекта научные результаты свидетельствуют о корректности предложенного методологического подхода к созданию ЕДК для диагностики энерго-механического оборудования горных машин по параметрам генерируемой при их работе вибрации [1, 12].

Результаты исследования процессов вибронегруженности динамических узлов и агрегатов горных машин наглядно показали, что одним из самых опасных по силе своего разрушительного воздействия на фактическое состояние обследуемой горной техники физических процессов, напрямую влияющих на скорость деградации технического состояния энерго-механического оборудования карьерных экскаваторов, является дисбаланс, в частности, неуравновешенность роторных агрегатов на электрических двигателях и генераторах, используемых в конструкции горной техники [1, 8, 12]. Развитие дисбаланса всегда влечет за собой появление других неисправностей оборудования, в частности повреждение

соединительных муфт и расцентровку валов агрегатов, нарушение жесткости опорной системы и т.д. Развитие этих процессов является одной из причин, приводящих к аварии, и, как следствие, к непроизводительным простоям сложного и дорогостоящего горного оборудования [13-15].

В качестве единого диагностического критерия выявления дисбаланса вращающихся деталей механизмов карьерных экскаваторов в рамках настоящей работы было обобщено использование величины вклада в общий уровень виброакустического сигнала совокупности амплитуд виброскорости на гармониках (1-5)fr, измеренных во всех трех пространственных плоскостях диагностируемого агрегата, при этом разработанный ЕДК был реализован при помощи алгоритмов скаляризации в условиях многомерного пространства диагностических признаков [1].

В табл. 1 приведены результаты измерений по 24 измерительным точкам роторного оборудования карьерных экскаваторов типа ЭКГ и ЭШ. Также здесь даны результаты расчетов ЕДК и оценки достоверности полученных данных в соответствии с «Методикой разработки адаптивной математической деградационной модели для осуществления кратко- и среднесрочного прогнозирования процессов изменения фактического состояния горных машин», созданной учеными ИУ ФИЦ УУХ СО РАН и ФГБОУ ВО КузГТУ в рамках выполнения гранта РФФИ и Кемеровской области № 20-48-420010.

Таблица 1

Результаты вибрационной диагностики и расчета комплексных критериев для неуравновешенности вращающихся деталей роторного оборудования

| № п/п | Место измерения | | | Результаты виброобследования | | | | | Результаты дефектовки | Комплексный критерий | Недостовверные результаты | Наработка, час |
|-------|-----------------|-------------------|------------------|------------------------------|-------|------|------|------|-----------------------|----------------------|---------------------------|----------------|
| | Агрегат | Точка Направление | Частота вращения | fr | 2*fr | 3*fr | 4*fr | 5*fr | | | | |
| 1 | Агрегат 1 | 1В | 1000 | 5,6 | 18,2 | 2,31 | 7,1 | 1,21 | Авария | 20,4893 | | 8496 |
| 2 | | 1Г | - | 3,21 | 4,15 | 1,25 | 0,89 | 0,56 | Предельное | 5,49498 | | 3792 |
| 3 | | 1О | - | 4,91 | 2,18 | 0,97 | 0,54 | 0,87 | Предельное | 5,55427 | | 4128 |
| 4 | | 2В | - | 5,47 | 19,23 | 4,18 | 1,21 | 0,98 | Авария | 20,4844 | | 7824 |
| 5 | | 2Г | - | 2,79 | 4,29 | 2,32 | 1,18 | 0,79 | Предельное | 5,79544 | | 4464 |
| 6 | | 2О | - | 4,12 | 2,17 | 1,56 | 1,12 | 1,02 | Предельное | 5,13923 | | 4800 |
| 7 | Агрегат 2 | 1В | 1000 | 0,89 | 2,18 | 1,12 | 1,16 | 0,53 | Норма | 2,90265 | | 1440 |
| 8 | | 1Г | - | 1,02 | 2,21 | 0,78 | 1 | 0,69 | Норма | 2,83002 | | 1776 |
| 9 | | 1О | - | 2,61 | 1,08 | 0,97 | 0,51 | 0,32 | Норма | 3,04662 | | 2112 |
| 10 | | 2В | - | 1,36 | 1,61 | 0,88 | 0,32 | 0,16 | Норма | 2,31173 | | 2448 |
| 11 | | 2Г | - | 1,91 | 1,23 | 1,7 | 0,51 | 0,22 | Норма | 2,89128 | | 2784 |
| 12 | | 2О | - | 0,98 | 0,93 | 1,01 | 0,24 | 0,18 | Норма | 1,7133 | | 3120 |
| 13 | Агрегат 3 | 1В | 1000 | 5,11 | 2,21 | 2,58 | 1,64 | 1,69 | Предельное | 6,57254 | | 5136 |
| 14 | | 1Г | - | 3,48 | 3,17 | 2,98 | 1,93 | 0,65 | Предельное | 5,93187 | | 5472 |
| 15 | | 1О | - | 0,34 | 0,97 | 1,15 | 0,89 | 0,35 | Норма | 1,81483 | | 3456 |
| 16 | | 2В | - | 4,98 | 2,71 | 2,16 | 1,45 | 0,78 | Предельное | 6,28657 | | 5808 |
| 17 | | 2Г | - | 3,11 | 2,8 | 1,54 | 1,48 | 1,12 | Предельное | 4,82996 | | 6144 |
| 18 | | 2О | - | 0,51 | 0,42 | 0,34 | 0,34 | 0,11 | Норма | 0,8245 | + | 1156 |
| 19 | Агрегат 4 | 1В | 1000 | 4,5 | 4,6 | 2,3 | 2,21 | 1,78 | Предельное | 7,39949 | | 6480 |
| 20 | | 1Г | - | 5,12 | 4,87 | 3,12 | 2,56 | 1,71 | Предельное | 8,31525 | | 6816 |
| 21 | | 1О | - | 3,18 | 11,69 | 5,23 | 3,66 | 1,54 | Авария | 13,78 | | 8160 |
| 22 | | 2В | - | 4,69 | 3,97 | 4,71 | 3,18 | 1,87 | Предельное | 8,57615 | | 7152 |
| 23 | | 2Г | - | 5,9 | 5,61 | 3,18 | 2,78 | 2,91 | Авария | 9,62242 | | 7488 |
| 24 | | 2О | - | 5,98 | 28,61 | 5,32 | 4,19 | 4,32 | Авария | 30,3119 | | 8832 |

Как следует из анализа проведенных расчетов и графика (рис. 1), на заданном интервале диагностирования (Т=60 календарных дней) уровень авария будет достигнут. Уровень ЕДКАВАРИЯ_ДИСБАЛАНС=18,94, доверительные границы прогноза уровня АВАРИЯ - пессимистическая 14,58 и оптимистическая 23,30, при прогнозе на 60 суток в момент наработки 10 272 часов ЕДК=28,12. Величина достоверности аппроксимации R2=0.8182. Рекомендовано выполнить ревизию и балансировку роторного оборудования с последующим измерением остаточного уровня механических колебаний.

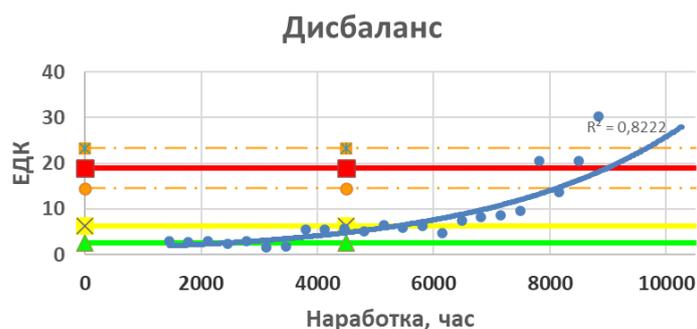


Рис. 1. Обобщение результатов расчета ЕДК для неуравновешенности вращающихся деталей карьерных экскаваторов и построение среднесрочного прогноза в зависимости от наработки

Полученные научные результаты позволили разработать оригинальное программное обеспечение для прогнозирования технического состояния горных машин, особенностью которого является использование единых диагностических критериев оценки параметров вибрации, что в перспективе позволит осуществлять реализацию прогноза не только для единичного узла диагностируемого технологического оборудования (подшипника, двигателя или соединительной муфты), но и для всей машины в целом с учетом поиска и выделения тренда изменения величин единых диагностических критериев, пригодных для выявления всех базовых групп дефектов энерго-механического оборудования горной техники.

Таким образом, подводя итогу вышесказанному, можно заключить, что при помощи использования предложенной деградационной модели, единых диагностических критериев и разработанного программного обеспечения удалось получить ответ на один из самых актуальных для условий действующей на угольных предприятиях системы планово-предупредительных ремонтов вопрос – проработает ли обследуемое техническое устройство до ближайшего ремонта, не возникнет ли аварийной ситуации и дополнительных непроизводительных простоев? Реализованная прогнозная модель является адаптивной, что позволило ей подстраиваться под наиболее свежие получаемые диагностические данные, изменяя при этом моделируемые параметры, что в итоге дает возможность получать эффективный прогноз деградации технического состояния энерго-механического оборудования горных машин на период до двух календарных месяцев. Адекватность сделанных прогнозов, полученных при помощи разработанного программного обеспечения, была протестирована в реальных условиях при проведении годового ремонта карьерного экскаватора ЭКГ-5А, результаты которого подтвердили состоятельность сделанных выводов и рекомендаций по ремонту и наладке диагностируемого оборудования.

Выводы. Полученные результаты подтвердили эффективность предложенной адаптивной прогнозной деградационной математической модели для кратко- и среднесрочного прогнозирования процессов изменения технического состояния энерго-механического оборудования горных машин. Использование единых диагностических критериев в качестве параметров предложенной модели позволяет получать результаты прогнозирования для самых разных узлов и конструктивных элементов горной техники, от подшипников качения до зубчатых передач, что делает реализуемую математическую модель по-настоящему универсальной. Высокая степень адаптивности предложенной модели обуславливается широким применением результатов наиболее свежих диагностических измерений для коррекции параметров моделирования, что позволит применять её в качестве элемента системы управления ремонтами горной техники по результатам оценки фактического состояния. Использование результатов автоматизированного прогнозирования с применением ЕДК позволит свести к минимуму количество ошибок, допускаемых при анализе диагностических данных, что, в конечном счете, приведет к сокращению числа аварий на карьерных

экскаваторах, вызванных недопустимым техническим состоянием энерго-механического оборудования эксплуатируемой горной техники.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0002 «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» (рег. № АААА-А21-121012290021-1).

Список литературы

1. Герике П.Б., Герике Б.Л. Некоторые результаты прогнозирования технического состояния карьерных экскаваторов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2023. – №1. – С. 85-91.
2. Wang T., Han Q., Chu F., Feng Z. Vibration based condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox : a review // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2019. – V. 126. – P. 662-685. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.051>
3. 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. <https://doi.org/10.1115/1.1379745>
4. Shardakov I., Shestakov A., Tsvetkov R., Yepin V. Crack diagnostics in a large-scale reinforced concrete structure based on the analysis of vibration processes // AIP Conference Proceedings. – 2018. – 2053. – 040090 (). – URL: <https://doi.org/10.1063/1.5084528>
5. Неразрушающий контроль: справ. в 7 т. / под ред. чл.-корр. РАН В.В. Клюева. – Москва, 2005. – Т. 7. – 828 с.
6. Краковский Ю.М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. – Новосибирск: Наука, 2006. – 227 с.
7. Основы диагностики технических устройств и сооружений. / Г.А. Бигус, Ю.Ф. Даниев, Н.А. Быстрова, Д.И. Галкин. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 445 с.
8. Герике Б.Л., Герике П.Б., Ещеркин П.В. Математическая модель оценки фактического состояния бурового станка // Уголь. – 2010. – № 2. – С. 45-46.
9. Puchalski A., Komorska I. Stable distributions and fractal diagnostic models of vibration signals of rotating systems // Applied Condition Monitoring. – 2018. – Vol. 9. – P. 91-101. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-61927-9_9
10. Schreiber R. Induction motor vibration diagnostics with the use of stator current analysis // 17th International Carpathian Control Conference. – 2016. – P. 668-672. – URL: <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2016.7501179>
11. Liu G., Parker R. Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration // Journal of Mechanical Design. – 2008. – Vol. 130. – P. 121402/1 – 121402-13. – URL: <https://doi.org/10.1115/1.2976803>
12. Герике П.Б., Герике Б.Л. Прогнозирование процессов безаварийной эксплуатации оборудования горных машин // Горное оборудование и электромеханика – 2023. – № 1. – С. 33-40.
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. – P. 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. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. / В.И. Клишин, Л.В. Зворыгин, А.В. Лебедев, А.В. Савченко. – Новосибирск, 2011. – 524 с.

**ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЭКСКАВАТОРНО-
АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ С ИНТЕРАКТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ
ГОРНЫМИ МАШИНАМИ**

^{1,2}к.т.н., Кузнецов И.С., ^{1,2}к.т.н., Зиновьев В.В., ^{1,2}к.т.н., Николаев П.И.,
^{1,2}к.т.н., Стародубов А. Н.

**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. В работе представлен подход к решению задачи оптимизации параметров экскаваторно-автомобильных комплексов, основанный на эволюционном алгоритме и имитационном моделировании взаимодействия горных машин с интерактивным управлением, где часть операций выполняется автономно роботизированными автосамосвалами, а часть при помощи оператора дистанционного управления, что не требует постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ.

Ключевые слова: экскаваторно-автомобильный комплекс, интерактивное управление, автоматизация, роботизация, имитационное моделирование, оптимизация параметров, эволюционный алгоритм.

Введение. Открытый способ добычи угля занимает лидирующее положение – 74% от общего объема добычи в России [1]. Для выполнения выемочно-погрузочных и транспортно-разгрузочных работ подготовленной горной массы (вскрышная порода или уголь) на разрезах от забоя до пункта разгрузки (внешние и/или внутренние отвалы, угольные склады) используют экскаваторы и автосамосвалы, составляющие экскаваторно-автомобильный комплекс (ЭАК).

Одной из основных проблем разработки угольных месторождений открытым способом являются сложные горно-геологические и горнотехнические условия, что существенно осложняет присутствие и участие человека в технологических процессах и сдерживает эффективность горнодобывающих предприятий. В настоящее время эту проблему решают за счет применения средств автоматизации и роботизации для автономного управления горными машинами в составе ЭАК. Подавляющее большинство предложений сводится к автоматизации процессов управления автосамосвалами в режиме интерактивного управления, где часть операций выполняется автономно горной машиной, а часть при помощи оператора дистанционного управления [2]. Это позволяет передать машинам функционал, выполняемый горнорабочими, что способствует уменьшению времени присутствия людей в зонах ведения горных работ, снижению вероятности травм и влияния неблагоприятных условий на человека.

Современный рынок горных машин насчитывает более 130 моделей автосамосвалов, более 85 моделей экскаваторов (за исключением драглайнов и роторных экскаваторов). При этом для одних и тех же условий разработки могут применяться ЭАК с разным сочетанием горных машин, имеющих различные параметры. Уровень автоматизации и роботизации может быть также различным от дистанционного управления некоторыми операциями до полной роботизации с использованием техники в полностью автономном режиме, под управлением программно-аппаратного комплекса, лишенного потребности в непосредственном участии оператора для выполнения операций технологического цикла. Применение автоматизации и роботизации на определенном уровне предполагает разную стоимость и требует различного объема участия человека в управлении горными машинами.

Эффективность работы ЭАК зависит от множества рабочих технологических и конструктивно-технологических параметров горных машин, а также параметров их взаимодействия в конкретных горнотехнических условиях при разработке подготовленной горной массы, обладающей определенными физико-механическими свойствами. Часть параметров ЭАК представлена на рис. 1 [3-7].

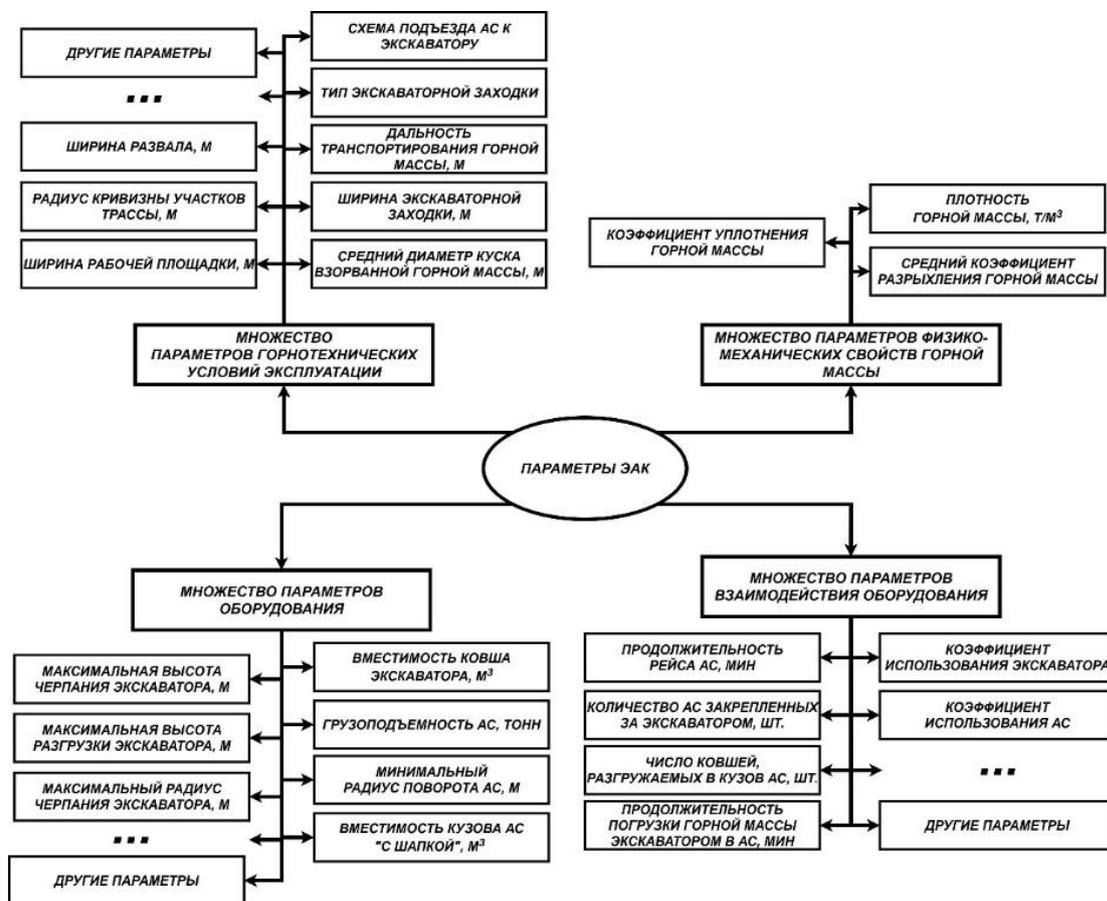


Рис. 1. Параметры ЭАК

Таким образом, возникает задача многопараметрической многофакторной оптимизации для обеспечения максимальной эксплуатационной производительности при минимальных удельных затратах на погрузку и транспортирование горной массы [8].

Для определения параметров ЭАК, как правило, используют аналитические формулы, основанные на соотношениях вместимости ковша, вместимости кузова автосамосвала, продолжительности цикла экскаватора, скорости движения автосамосвалов, коэффициенте использования автосамосвалов, коэффициенте технической готовности оборудования, среднем диаметре куска взорванной горной массы, угле поворота экскаватора и т.д. [7, 9-12].

Такие расчеты не позволяют комплексно учитывать варианты сочетаний горнотехнических и экономических параметров, комплектацию горных машин, уровни их автоматизации и роботизации, динамику горных работ и вероятностную природу процессов. Это делает задачу оценки и выбора параметров ЭАК трудноформализуемой и требует новых подходов к ее решению с использованием современных методов имитационного моделирования и эвристической оптимизации.

Основная часть. Для моделирования различных производственных систем с вероятностной природой процессов, в том числе в горном деле, активно применяют математический аппарат теории массового обслуживания (ТМО) и специализированный язык имитационного моделирования GPSS в различных версиях [13]. На основе ТМО разработаны

концептуальные модели основных технологических процессов при функционировании ЭАК в виде систем массового обслуживания (СМО), которые объединены в единую сеть (СеМО) [13, 14].

Программная реализация СеМО осуществлена с использованием языка GPSS World и представлена в виде имитационной модели, включающей шесть взаимосвязанных сегментов:

1. Прибытие автосамосвалов и присвоение значений параметров.
2. Работа экскаваторов и автосамосвалов в забое.
3. Транспортирование горной массы в пункт разгрузки и возвращение автосамосвалов к экскаватору.
4. Работа автосамосвалов в пунктах разгрузки.
5. Расчет параметров отработки развала.
6. Работа операторов дистанционного управления (рис. 2).

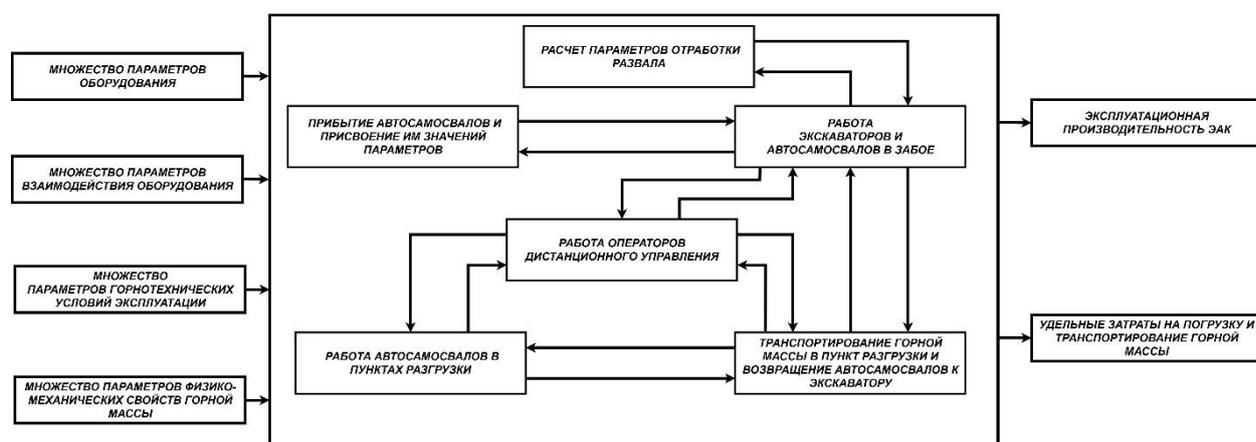


Рис. 2. Структурная схема имитационной модели ЭАК с интерактивным управлением горными машинами

Разработанная имитационная модель позволяет определять эксплуатационную производительность ЭАК на основе введенных горнотехнических условий эксплуатации, а также физико-механических свойств горной массы. Дополнительно модель можно использовать для оценки коэффициента использования экскаватора, среднего времени погрузки горной массы, характеристик очередей из автосамосвалов, ожидающих погрузки/разгрузки, степень загрузки операторов дистанционного управления.

Для ввода вероятностных процессов в имитационную модель функционирования ЭАК осуществлена идентификация законов их распределения с использованием методов статистического анализа и программного обеспечения MS Excel. В качестве исходных данных использовались сформированные выборки на основе диспетчерских отчетов с шести угольных разрезов Кузбасса. В результате установлено, что продолжительность процессов ЭАК и скорости движения автосамосвалов распределены в соответствии с гамма-распределением с ограниченной правосторонней областью:

$$f(x, \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp^{-\frac{x}{\beta}}, x \in (0; \mu + 3\sigma), \alpha > 0, \beta > 0, \quad (1)$$

где α – параметр формы, β – параметр масштаба, $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция Эйлера, μ – выборочное математическое ожидание, σ – выборочное среднеквадратическое отклонение; x – значение элемента выборки.

При наличии хронометражных данных значения μ и σ вводятся в модель напрямую. В случае отсутствия хронометражных данных, значение μ , равное продолжительности i -ого процесса (погрузка, транспортирование и т.д.) – t_i определяется по известным аналитическим формулам, которые напрямую связаны с параметрами, характеризующими

горнотехнические условия эксплуатации, оборудование, физико-механические свойства горной массы. При этом значение σ_i определяется согласно правилу трех сигм:

$$\sigma_i = \frac{t_i}{3}. \quad (2)$$

Значения α и β в обоих случаях определяются по формулам [15]:

$$\alpha = \frac{\mu^2}{\sigma^2}; \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\sigma^2}{\mu}. \quad (4)$$

При выборе параметров ЭАК возникает противоречие между одновременным увеличением производительности и уменьшением удельных затрат на погрузку и транспортирование горной массы. Возникает задача многокритериальной оптимизации, для решения которой предложен комплексный мультипликативный критерий [16]:

$$F = \frac{\prod_{i=1}^{N_i} F_i^{\alpha_i(x)}}{\prod_{j=1}^{N_j} F_j^{\beta_j(x)}} = \frac{Q_{\text{ЭАК}}^{\alpha}}{C^{\beta}} \rightarrow \max, \quad (5)$$

где N_i – показатели, которые максимизируют; N_j – показатели, которые минимизируют; α – весовой коэффициент эксплуатационной производительности ЭАК; β – весовой коэффициент удельных затрат на погрузку и транспортирование горных пород; $Q_{\text{ЭАК}}$ – суточная эксплуатационная производительность ЭАК, т/сут.; C – удельные затраты на погрузку и транспортирование горной массы, руб./т.

При следующих ограничениях: $\alpha + \beta = 1$; $\alpha \in (0;1)$; $\beta \in (0;1)$; $C \neq 0$; $h_{\text{пен.}} \leq 1,5 H_{\text{ч.макс}}$; $V_{\text{макс}} \leq 30$; $h_{\text{пен.}}$ – высота уступа, м; $H_{\text{ч.макс}}$ – максимальная высота черпания экскаватора, м; $V_{\text{макс}}$ – максимально допустимая средняя техническая скорость движения автосамосвалов на участках трассы, км/ч; (в соответствии с требованиями техники безопасности); $3 \leq N_k \leq 10$; N_k – число ковшей, разгружаемых экскаватором в кузов автосамосвала, шт.; $45 \leq q_{\text{макс}} \leq 130$ (добыча); $30 \leq q_{\text{макс}} \leq 450$ (вскрыша); $1 \leq N_{\text{ак}} \leq 20$; $N_{\text{ак}}$ – количество автосамосвалов, закрепленных за экскаватором, шт.; $5 \leq E_{\text{экс}} \leq 11$ (добыча); $5 \leq E_{\text{экс}} \leq 35$ (вскрыша); $E_{\text{экс}}$ – вместимость ковша экскаватора, м³. Значение весовых коэффициентов α и β критерия F определяется методом ранжирования на базе экспертных оценок [17].

Эксплуатационная производительность ЭАК определяется с использованием имитационной модели, а удельные затраты на погрузку и транспортирование горной массы – по эмпирической аналитической зависимости [11].

Целевые функции включают в себя 38 параметров, из которых 9 параметров являются факторами оптимизации. Они включены в группы параметров R_{gm} и $R_{\text{ЭАК}}$:

$$Q_{\text{ЭАК}} = f1(R_{gt}, R_{fm}, R_{gm}, R_{\text{ЭАК}}) \rightarrow \max, \quad (6)$$

$$C = f2(R_{gt}, R_{gm}, R_{\text{ЭАК}}) \rightarrow \min, \quad (7)$$

где R_{gt} – множество параметров горнотехнических условий эксплуатации; R_{fm} – множество параметров физико-механических свойств горной массы; R_{gm} – множество параметров оборудования; $R_{\text{ЭАК}}$ – множество параметров взаимодействия оборудования (параметры ЭАК).

Характер целевых функций в сложной имитационной модели ЭАК, в которой есть обратные связи и разнородные заявки, позволяет сделать вывод о неприменимости точных методов решения оптимизационных задач [18]. Существующие численные методы на основе алгоритмов эвристического класса позволяют найти оптимальные параметры систем за кратчайшее время с высокой точностью, при этом нет необходимости в полном исследовании области допустимых значений и аналитическом описании целевой функции. Наиболее распространенным и проработанным является использование генетических алгоритмов, которые нашли успешное применение для решения многих оптимизационных задач вне зависимости от числа параметров и в различных областях [18, 19]. Сложность применения генетического алгоритма заключается в трудности расчета функции полезности. Однако, данная трудность нивелируется путем использования имитационной модели, которая

рассчитывает необходимую функцию. Всё это позволяет определять оптимальные параметры ЭАК за приемлемое время и с высокой точностью.

Произведена адаптация генетического алгоритма оптимизации, который включает в себя пять шагов (рис. 3) [14].

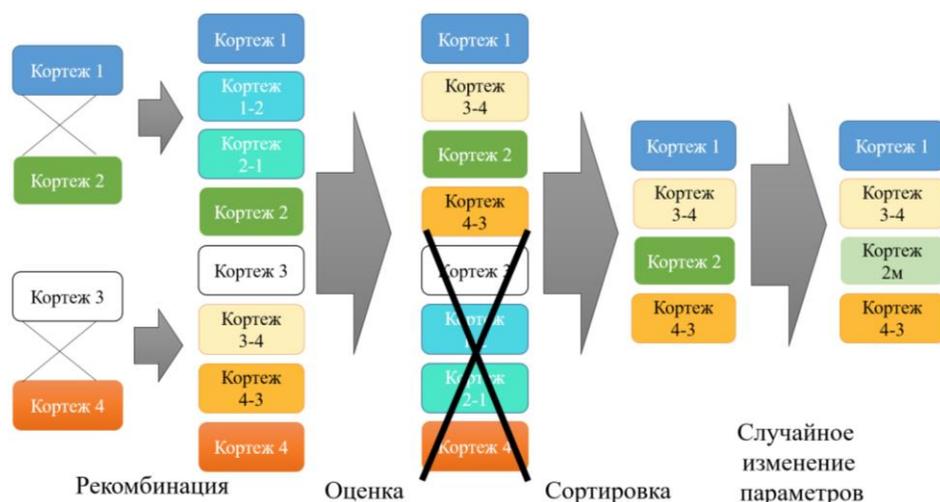


Рис. 3. Принцип определения оптимальных параметров ЭАК с помощью эволюционного алгоритма

На первом шаге, создаётся крупное число так называемых кортежей, т.е. сочетаний параметров ЭАК, (рис. 4).



Рис. 4. Структурная схема кортежа для оптимизации параметров ЭАК

На втором шаге происходит рекомбинация параметров. Число кортежей увеличивается в два раза, при этом новые кортежи генерируются как сочетание параметров уже существующих.

На третьем шаге для каждого сочетания параметров происходит оценка эксплуатационной производительности с использованием имитационной модели и удельных затрат на погрузку и транспортирование.

На четвёртом шаге все кортежи сортируются по значению комплексного мультипликативного критерия оптимизации в агрегированном виде. Половина из них, обладающих наименьшими значениями критерия, удаляется.

На пятом шаге в некоторых кортежах происходит рекомбинация параметров: некоторым параметрам случайным образом присваиваются новые значения. Затем шаги 2-5 повторяются до тех пор, пока среднее значение критерия оптимизации всех сочетаний параметров не перестанет расти.

Результатом работы алгоритма являются оптимальные параметры из группы групп R_{gm} и R_{EAK} , а также значения производительности ЭАК и удельных затрат на погрузку и транспортирование горной массы при оптимальном варианте.

Вывод. Предложенный подход, основанный на совместном использовании имитационного моделирования и эволюционного алгоритма, позволяет решить многофакторную многопараметрическую задачу по определению оптимальных параметров ЭАК с интерактивно управляемыми горными машинами для обеспечения максимальной эксплуатационной производительности при минимальных удельных затратах на погрузку и транспортирование горной массы.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0002 «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» (рег. № АААА-А21-121012290021-1).

Список литературы

1. Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации. – URL: <https://minenergo.gov.ru/>
2. Клебанов Д.А. Разработка технико-технологических решений по созданию и применению роботизированных систем грузоперевозок: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: спец. 25.00.22. – Москва, 2015. – 21 с.
3. Колесников В.Ф., Корякин А.И., Стрельников А.В. Выбор оптимальной структуры экскаваторно-автомобильного комплекса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – №1. – С. 59 – 61.
4. Хмызников К.П., Лыков Ю.И. Горные машины для открытых горных работ. Карьерные экскаваторы: учеб. пособие. – Санкт-Петербург: СПГГИ им. Г.В. Плеханова, 1999. – 40 с.
5. Томаков П.И., Наумов И.К. Технология, механизация и организация открытых горных работ: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1986. – 312 с.
6. Астафьев С.А. Оценка и обоснование рациональных дорожных условий эксплуатации карьерных автосамосвалов большой грузоподъемности: дис. ... канд. тех. наук: спец. 25.00.22; УГГУ. – Екатеринбург, 2015. – 179 с.
7. Стенин Д.В. Обоснование влияния ресурса несущих систем и степени загрузки на производительность карьерных автосамосвалов: дис. ... канд. тех. наук: спец. 05.05.06; КузГТУ. – 125 с.
8. Кузнецов И.С., Зиновьев В.В., Кузнецова А.В. О многовариантности выбора комплекта горных машин и организации работ в забое при открытой добыче угля // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте – 2020 : сб. трудов междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово: КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева. – С. 207 – 211.
9. Оценка степени взаимовлияния вместимости ковша экскаватора и кузова автосамосвала / А.А. Хорешок, Д.М. Дубинкин, С.О. Марков, М.А. Тюленев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 3. – С. 104-112.
10. Фурман А.С. Оценка эффективности эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов на технологических трассах разрезов Кузбасса: дис. ... канд. тех. наук: спец. 05.05.06; КузГТУ. – Кемерово, 2018. – 137 с.
11. Исследование процесса транспортирования вскрышных пород и угля на разрезах / Д.М. Дубинкин, В.Ю. Садовец, Г.О. Котиев, А.В. Карташов // Техника и технология горного дела. – 2019. – № 3. – С. 50-66.
12. Анистратов К.Ю. Разработка метода формирования структуры комплексной механизации горных работ на карьерах: автореф. дис. ... доктора. тех. наук: спец. 25.00.22; ООО «Научно-производственная компания Горное дело». – Апатиты, 2013. – 42 с.
13. Зиновьев В.В., Кузнецов И.С., Стародубов А.Н. Исследование человеко-машинного управления автосамосвалами в составе экскаваторно-автомобильного комплекса применением имитационного моделирования // Уголь. – 2021. – № 7. – С. 9-12.

14. Кузнецов И.С. Оптимизация параметров карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов с учетом внеплановых простоев: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.05.06. – Кемерово, 2022. – 23 с.

15. Орлов А.И. Теория принятия решений: учеб. пособие. – М.: Издательство «Экзамен», 2005. – 656 с.

16. Зак Ю. А. Прикладные задачи многокритериальной оптимизации. – Москва: Экономика, 2014. – 455 с.

17. Макарова И.Л. Анализ методов определения весовых коэффициентов в интегральном показателе общественного здоровья // Символ науки. – 2015. – № 1. – С. 87 – 94.

18. Хивинцев М.А. Агрегированная с многоагентным генетическим алгоритмом имитационная модель предприятия дистанционной торговли для решения задачи многокритериальной оптимизации: дис. ... канд. тех. наук: спец. 05.13.18; НИУ ВШЭ. – Москва, 2015. – 110 с.

19. Загороднев Д.И., Санакулова Л.А., Симонова Л.А. Оптимизация материальных потоков в распределенной системе управления машиностроительного предприятия на основе эвристических алгоритмов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. – 2010. – № 3. – С. 101- 107.

УДК 54.06/54.08

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА МОТОРНОГО МАСЛА КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ОБРАБОТКИ ПРОБ

**Худоногов Д.Ю., Ефременкова М.В., к.т.н. Никитенко М.С., Кизилев С.А.
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
г. Кемерово, Россия**

Аннотация. В статье рассмотрен подход к оперативной оценке текущего состояния качества моторного масла, а также косвенной оценке технического состояния транспортных средств на основе измерения сенсором отклика от воздействия на масло переменным напряжением высокой частоты. Проведено сопоставление результатов оценки качества моторного масла с данными спектрального анализа проб, отобранных на карьерных самосвалах с разной наработкой. Анализ проведен по содержанию в отработанном масле элементов, в наибольшей степени характеризующих уровень износа, в частности Fe, Si, Cu, Pb, Al, Na. Представлены преимущества применения программно-аппаратной реализации технологии на горнодобывающем предприятии.

Ключевые слова: качество масла, система контроля, система мониторинга, лабораторная установка, агрегатный контроль, экспресс анализ.

Россия занимает шестое место в мире по добыче угля за первый квартал 2022 года [1]. Основная часть добычи полезного ископаемого ведётся открытым способом [1], преимущественно с автомобильной откаткой вскрышных пород. Себестоимость полезного ископаемого при этом растет из года в год и объясняется, в том числе, увеличением дистанций и времени транспортировки при возрастании глубины отработки. Также неизбежен естественный износ транспортных машин и узлов, и связанные с этим простои, что влечет значительные экономические затраты [2]. В этой связи целесообразно не допускать критических поломок, проводить оперативный контроль за техническим состоянием узлов карьерного транспорта. При этом качество моторного масла является важным технологическим параметром, влияющих на ресурс надежности работы карьерного транспорта в процессе его эксплуатации. А временной интервал в 50...100 моточасов между регламентным отбором

проб для лабораторного анализа качества масла не позволяет оперативно следить за текущим состоянием техники.

Новое моторное масло обладает перечнем базовых характеристик, установленных нормативной документацией [3]. В процессе эксплуатации масло загрязняется органическими и неорганическими веществами, что напрямую отражается на качестве его дальнейшего использования. Органические загрязнения состоят из карбенов и карбоидов, смол, оксикислот, асфальтенов продуктов окисления и разложения. Неорганические примеси попадают в процессе износа деталей двигателя – это Fe, Al, Cu, Sn, Pb и др. [4]. Изменение физико-химических свойств масла негативно отражается на его качестве, в частности снижается смазочная функция, что приводит к излишнему трению, нагреву и износу деталей [5].

Как правило, периодичность замены моторного масла устанавливается производителем двигателей, регламентируется в километрах пробега, чаще в моточасах [6]. Однако при эксплуатации, интенсивность работы, техническое состояние автомобиля, климатические условия могут отличаться, что делает фактический ресурс работы масла индивидуальным для каждой конкретной единицы техники. В ряде случаев, замененное по регламенту масло ещё может обладать высокими показателями работоспособности, но утилизируется. Многие добывающие предприятия проводят собственный контроль состояния качества масла и уже на основании полученных результатов формируют график замены. Однако на некоторых единицах техники в период между регламентным забором проб существует серьёзный риск резкого ухудшения качества масла, приводящего к выполнению внеплановых капитальных ремонтных работ.

Одним из наиболее распространённых и эффективных методов контроля качества моторного масла является спектральный анализ [7], помимо этого, определяется вязкость, температура вспышки и пр. Задача спектрального анализа – определить количественное содержание примесей и их элементный состав. В большинстве случаев диагностика производится в специализированных лабораториях [8]. В качестве альтернативы существует метод контроля качества масла, основанный на измерении сенсором отклика от воздействия переменным напряжением высокой частоты. Изменение в качестве масла определяется уменьшением емкости и увеличением проводимости. Точное измерение и интерпретация таких характеристик, в сравнении с показаниями от нового масла, позволяют определить эксплуатационное состояние масла в единицах шкалы качества масла (ШКМ) [9].

На основе такого метода, сотрудниками ФИЦ УУХ СО РАН реализована аппаратно-программная система оперативного сбора, обработки и интерпретации показателей качества масла в агрегатном и лабораторном исполнении.

Для установления «чистой точки» и изучения процесса фактической регрессии масла был исследован образец нового всесезонного полусинтетического масла для специальной и внедорожной техники G-Profi MSI Plus 15W-40 для, а также пробы данного масла, отобранные в период эксплуатации с девяти карьерных самосвалов. Время наработки масла составляло 250, 350 и 500 моточасов.

Далее, пробы исследованы спектральным методом для определения в составе двадцати одного элемента. Из наиболее значимых Fe, Si, Cu, Pb, Al, Na, Cr. Также определено в составе наличие Sn, Mo, Ni, Mg, Ca, B, P, Ag, Ba, Cd, Mn, Ti, V, Zn. Наиболее показательные результаты, в частности по содержанию железа, кремния, меди, свинца, алюминия и натрия приведены на рис. 1-3.

Далее на лабораторном исполнении системы контроля качества масла проведен анализ представленных проб в единицах ШКМ. Результаты представлены на рис. 4. Следует отметить, что шкала формируется индивидуально под условия применения техники на основе аккумулялированных статистически полученных данных.

С учетом имеющейся информации о техническом состоянии машин, с которых отобраны пробы, а также на основе полученных данных спектроскопии имеющихся девяти проб, выработана следующая шкала и интерпретация показателей:

данные от тысячи единиц до пунктирной линии (740 ед.) – нормальный уровень качества масла, все показатели в пределах нормы;

данные ниже пунктирной линии (740 ед.) и до сплошной линии (600 ед.) – существенный износ, моторное масло ещё сохраняет рабочие характеристики, но требует постоянного контроля. Последующее сопоставление с данными спектрального анализа с большой вероятностью покажет, что содержание одного или более элементов превышает предельно допустимое значение;

данные ниже сплошной линии (600 ед.) – масло повреждено, не выполняет качественно функции, дальнейшая эксплуатация может привести к повышенному износу или повреждению деталей двигателя, требуется проведение полного комплекса лабораторного анализа масла спектральным методом, также контроля вязкости, температуры вспышки, содержания воды.

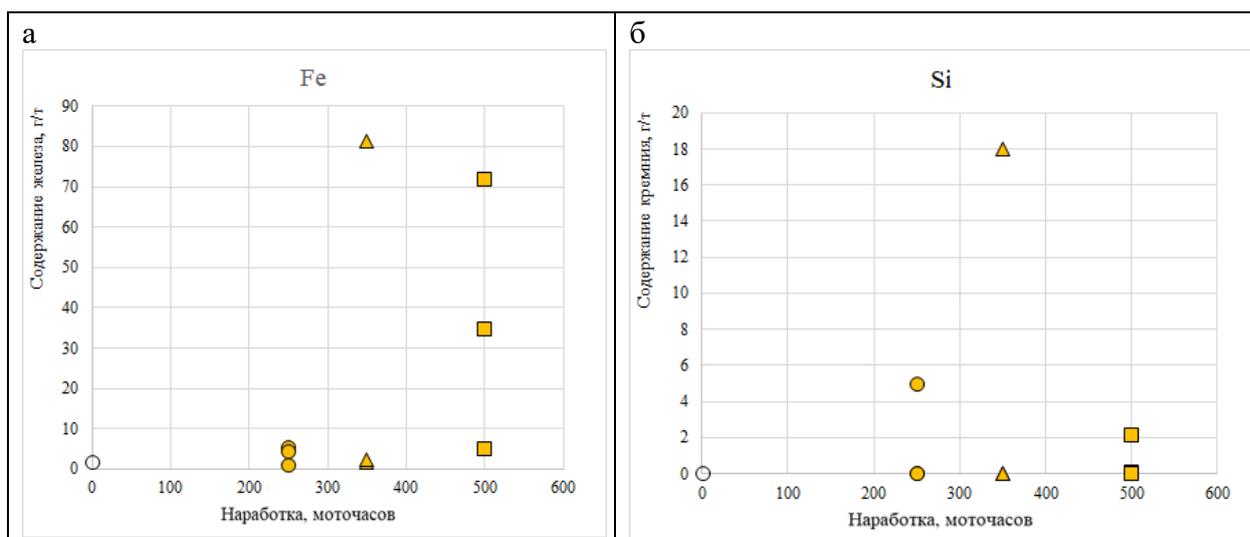


Рис. 1. Результаты спектрального анализа проб: а – содержание железа; б – содержание кремния

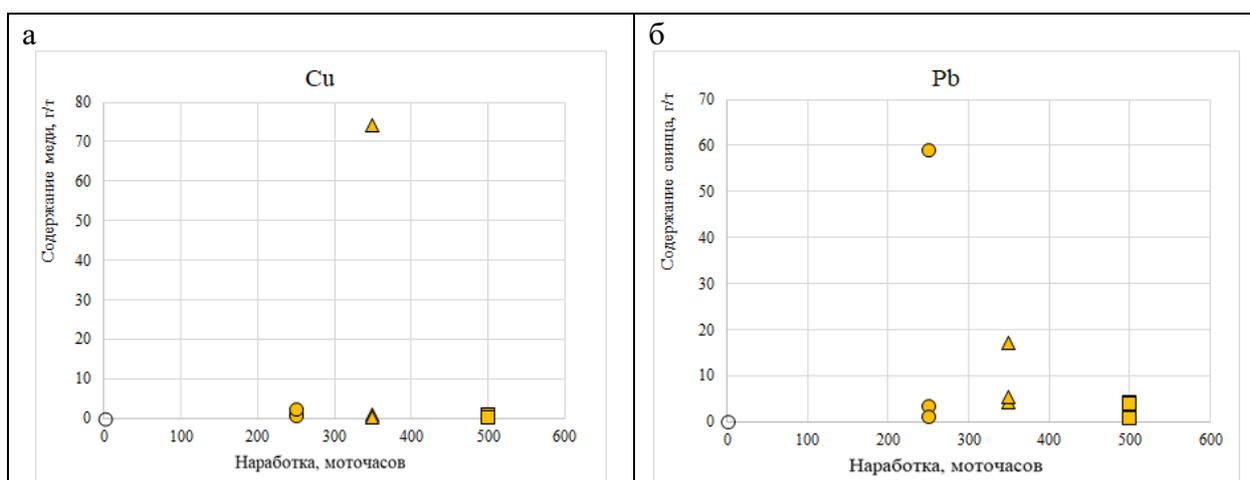


Рис. 2. Результаты спектрального анализа проб: а – содержание меди; б – содержание свинца

Последующее сопоставление с данными спектрального анализа с большой вероятностью покажет, что содержание одного или более элементов многократно превышают предельно допустимые значения, присутствует вода, механические частицы и пр.

Анализируя полученные результаты, представленные на рис. 1-4 прослеживаются следующие зависимости:

– превышение содержания свинца и натрия в одной из проб с малой наработкой в 250 моточасов отражается и по ШКМ, сразу попадая в зону существенного износа.

– в одной из проб с наработкой в 350 моточасов наблюдается значительное превышение содержания железа, кремния, меди и натрия, что также отражается по ШКМ – масло повреждено, требует досрочной замены. Таким образом все три пробы с наработкой 350 моточасов попадают в разные зоны качества по ШКМ – норма, износ, повреждение, что позволяет косвенно судить о техническом состоянии машин, с которых они отобраны.

– почти все пробы с наработкой 500 моточасов близки к существенному износу, одна из них ввиду существенного превышения содержания железа попадает по ШКМ в зону повреждения. Таким образом определяется машина, которую следует направить на регламентную замену масла в первую очередь.

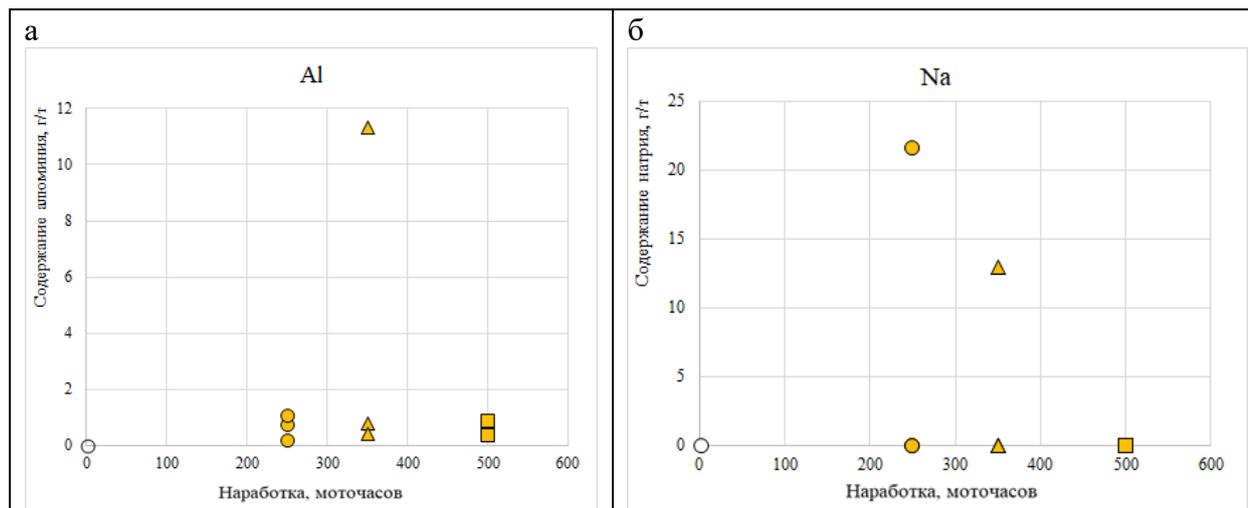


Рис. 3. Результаты спектрального анализа проб: а – содержание алюминия; б – содержание натрия

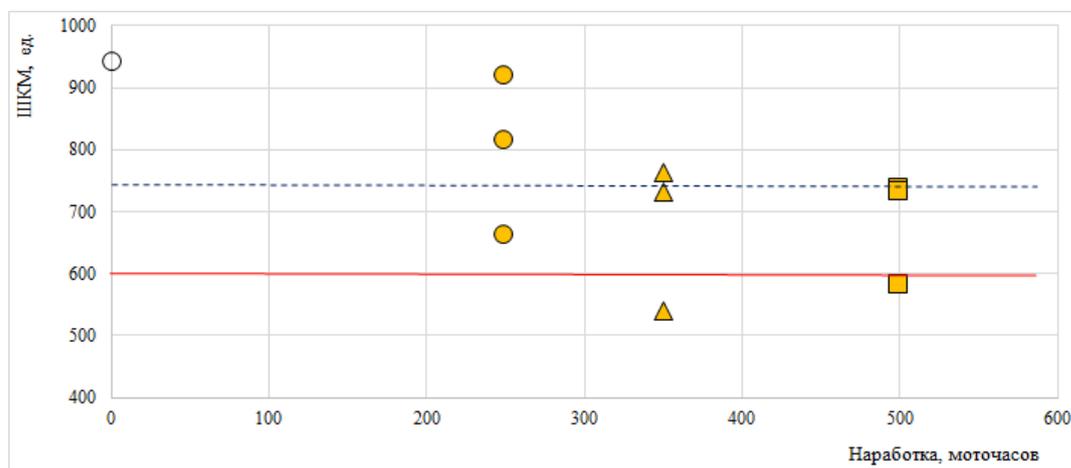


Рис. 4. Результаты оценки качества масла в единицах ШКМ на лабораторной установке

Данный эксперимент подтверждает верификацию результатов лабораторного анализа качества масла на основе сенсорной технологии и данных, полученных спектральным анализом. Предлагаемая технология позволяет оперативно, а значит своевременно предупредить об изменениях в качестве масла в процессе работы самосвалов, как на основе отобранных проб, так и в период между их регламентным отбором при агрегатном исполнении на подвижном составе и беспроводной передачей данных в службу контроля.

Преимуществом представленной программно-аппаратной реализации технологии, является возможность:

- в режиме реального времени проводить анализ состояния масла и с заданным временным интервалом отправлять технологические данные на пульт оператора (службы контроля качества);
- оперативно выявлять факты резкого ухудшения качества масла в период между регламентным забором проб (250, 350 часов и т. д.);
- выдавать своевременную рекомендацию для внепланового (вне регламентного) забора пробы масла на спектральный анализ;
- снизить вероятность внезапного выхода из строя двигателя;
- повысить качество планирования капитальных ремонтов и очередности регламентного обслуживания техники;
- повысить коэффициент готовности парка самосвалов.

Вывод. Таким образом, комплексная интеграция представленных технологических решений на добывающем предприятии может обеспечить качественный оперативный контроль за техническим состоянием двигателей транспорта, за счет чего снизить простои, связанные с проведением ремонтных работ, повысить коэффициент готовности машин.

Список литературы

1. Петренко И.Е. Итоги работы угольной промышленности России за январь – июнь 2022 года // Уголь. – 2022. – № 9. – С. 7-22.
2. Анализ причин роста концентрации свинца в отработавшем масле ДВС КТА 50 карьерных самосвалов БелАЗ 75131, работающих по газодизельному циклу / Г.М. Дубов, А.Р. Богомолов, Е.А. Григорьева, С.А. Нохрин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 3(145). – С. 84-93.
3. Технический регламент таможенного союза : 20.07.2012 № ТР ТС 030/2012. – с изм. и допол. в ред. от 03.03.2017, № 59.
4. Утаев С.А. Закономерности накопления загрязняющих примесей моторных масел в процессе эксплуатации двигателей // Современные материалы, техника и технологии. – 2016. – №2 (5). – С. 207-214.
5. Как губит двигатель моторное масло / В.В. Никишин, Л.В. Моргунов, Е.Д. Паникленко, М.В. Глушков // Конкурс молодых учёных : VII междунар. науч.-исслед. конкурс, Пенза, 25 января 2021 года. – Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г.Ю.), 2021. – С. 68-71
6. Верещагин В.И., Ковальский Б.И., Попов А. Методика оценки ресурса моторных масел // Вестник КрасГАУ. – 2007. – № 6. – С. 169-174.
7. Обоснование использования спектрального анализа моторного масла / С.Н. Болтовский, В.Н. Трифонов, С.В. Бирков, А.С. Союнов // Междисциплинарность науки как фактор инновационного развития : сб. статей междунар. науч.-практ. конф., Тюмень, 12 апреля 2018 года. – Тюмень: ООО «Агентство международных исследований», 2018. – С. 64-66.
8. Сергеев К.О. Анализ масла на содержание продуктов износа как метод диагностики технического состояния судового редуктора // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2020. – № 1. – С. 13-21.
9. Худоногов Д.Ю. Система контроля качества масла в режиме реального времени эксплуатации агрегатов в полевых и лабораторных условиях / Д.Ю. Худоногов, М.В. Ефременкова, М.С. Никитенко, С.А. Кизилев // Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) : тр. всерос. науч.–практ. конф, Новокузнецк, 15-16 декабря 2022 г. Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2022. – С. 90-95.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ИЗ КОНСТРУКЦИОННОЙ И ТЕПЛОУСТОЙЧИВОЙ СТАЛИ

^{1,2}Абабков Н.В., ²Смирнов А.Н., ^{1,2}Пимонов М.В.

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

2 – ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, Россия

Аннотация. В настоящее время научный и практический интерес представляет использование акустических и магнитных методов неразрушающих испытаний для обнаружения зон устойчивой локализации деформации с целью оценки и прогнозирования работоспособности длительно работающего оборудования. Разработан структурно-механический критерий, отражающий выявленные взаимосвязи между структурным и субструктурным состояниями, полями внутренних напряжений и устойчивой локализации деформаций с характеристиками неразрушающих испытаний в металле длительно работающего оборудования из конструкционной стали 20 и теплоустойчивой стали 12Х1МФ.

Ключевые слова: информационные технологии, работоспособность, критерии, конструкционная и теплоустойчивая сталь, структурные параметры, механические характеристики.

Введение. Основная часть (более 80 %) оборудования предприятий электроэнергетики России была введена в эксплуатацию в период с 1960 по 1985 г., следовательно, его наработка составляет от 30 до 50 лет [1]. После этого периода случилось существенное замедление ввода новых генерирующих мощностей, задержка с разработкой и созданием современного экономичного оборудования ТЭС [2–4] при сохранении регламентированных требований по его безопасности. В результате комплекса масштабных исследований, проведенных специалистами многих ведущих организаций страны, было внедрено понятие «парковый ресурс», что позволило в 1,5–2,0 раза увеличить срок службы основного оборудования ТЭС [4]. Понятие «паркового ресурса» было распространено на наиболее ответственное тепломеханическое оборудование ТЭС [5], преимущественно работающее в условиях ползучести или при жестких условиях нагружения, вызывающих потенциально опасную повреждаемость металла.

Данная статья является продолжением и заключением по материалам, которые были представлены в [6]. На основании представленных результатов и их обсуждения можно утверждать, что информация о локализации макродеформации совместно с данными спектрально-акустического метода может быть использована для оценки остаточного ресурса длительно работающего энергетического оборудования. Выполнены исследования структурно-фазового состояния металла образцов без эксплуатации, после эксплуатации без разрушения и с разрушением из конструкционной и теплоустойчивой сталей в зоне устойчивой локализации макродеформаций. Установлена связь между процессами локализации макродеформаций и эволюцией субструктурного состояния для конструкционной и теплоустойчивой сталей.

Для установления характеристик неразрушающих испытаний, наиболее подходящих для оценки того или иного структурного или деформационного показателя, при помощи статистической обработки результатов исследований на основе сравнения полученных значений коэффициентов корреляции для оборудования из конструкционной и теплоустойчивой сталей были выбраны зависимости структурных и деформационных показателей от

акустических и магнитных характеристик, которые позволили с достаточной степенью достоверности оценивать структурные и механические показатели.

В науке и технике используют большое количество методов и подходов к оценке работоспособности жаропрочных материалов. Основа данных методов зародилась в 70-90 х годах прошлого века такими учеными как Аллен Форрест, Антикайн П.А., Березина Т.Г., Ботвина Л.Р., Бочвар А.А., Бугай Н.В., Векслер Е.Я., Голянский С.П., Гофман Ю.М., Злепко В.Ф., Ковпак В. И., Крутасова Е.И., Куманин В. И., Махутов Н.А. [7–25].

Для решения производственных задач, зачастую, многие вышеперечисленные методы бывают неприемлемыми из-за большой длительности испытания. В связи с этим в последнее время широкое развитие получили экспресс-методы оценки жаропрочности, базирующиеся на изменении различных механических, структурных и физических характеристик материала.

Одним из недостатков экспресс-методов является преимущественное выделение одного или нескольких факторов (содержание легирующих элементов в карбидном осадке, плотность карбидных частиц и т.д.) из всего комплекса характеристик исследуемого материала, определяющих жаропрочность.

Материалы и экспериментальные процедуры. Образцы из стали 20 и 12Х1МФ использовались для выполнения исследований. При этом использовались образцы трех партий как из стали 20, так и из стали 12Х1МФ. Так из стали 20 были вырезаны образцы без эксплуатации из водоопускной трубы фронтального экрана энергооборудования, после эксплуатации в течение 219 тысяч часов без разрушения и в течение 242 тысяч часов до разрушения. Из стали 12Х1МФ были вырезаны образцы без эксплуатации изгиба паропровода перед выхлопным клапаном, после эксплуатации в течение 260 тысяч часов без разрушения и в течение 263 тысяч часов до разрушения. Химический состав исследуемых сталей приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав (масс. %) исследованных сталей

| Марка стали | Массовая доля элементов, % | | | | | | | | | |
|-------------|----------------------------|-----------|-----------|---------|---------|-----------|----------|----------|----------|-----|
| | C | Si | Mn | Cr | Ni | Mo | S | P | Va | Fe |
| 20 | 0,17-0,24 | 0,17-0,37 | 0,35-0,65 | до 0,25 | до 0,25 | до 0,25 | до 0,04 | до 0,035 | до 0,08 | ~98 |
| 12Х1МФ | 0,08-0,15 | 0,17-0,37 | 0,4-0,7 | 0,9-1,2 | до 0,3 | 0,25-0,35 | до 0,025 | до 0,03 | 0,15-0,3 | ~96 |

Для проведения испытаний использовались образцы формы «dog-bone», размеры рабочей части составляли 40×6×2 мм (рис. 1).

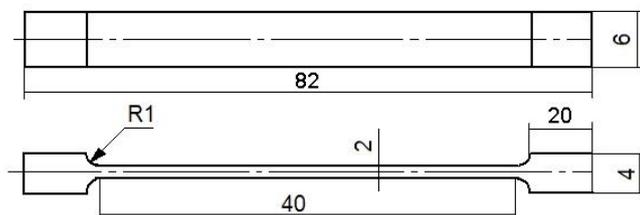


Рис. 1. Образцы для экспериментальных исследований, форма и размеры

Микроструктура образцов изучалась при помощи оптического микроскопа Neophot-21 и цифровой технической видеокамеры UCMOS03100KPA. Оценка механических характеристик производилась на одноосное растяжение с неизменной скоростью на универсальной испытательной установке Walter+Bai AG LFM-125 при соблюдении условия комнатной температуры. При квазистатических испытаниях скорость перемещения подвижного захвата равнялась 0,4 мм/мин. Регистрация картин локализации деформации методом

цифровой корреляции изображений (DIC) выполнялась одновременно с растяжением [26]. Метод цифровой корреляции изображений (DIC) был осуществлен при помощи видеокамеры PL-B781F с освещением рабочей части лазером SNF-xxx-635-30-KB. Такие же эксперименты были произведены на сходных образцах, полученных из труб таких же размеров, которые в эксплуатации не были (исходное состояние) для сравнения.

Метод просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на фольгах использовался для изучения тонкой структуры металла в зонах локализованной деформации с использованием электронного микроскопа ЭМ-125 [27]. Исследования проводились при рабочем увеличении в колонне микроскопа 25000 крат и ускоряющего напряжения 125 кВ.

Для каждого образца в результате проведенных исследований был изучен фазовый состав (качественный и количественный), а также выполнена оценка таких параметров тонкой структуры как: структурные составляющие стали и их объемные доли, плотности дислокаций: скалярная ρ и избыточная ρ_{\pm} , кривизна-кручение кристаллической решетки χ , амплитуда внутренних полей напряжений: напряжения касательные и действующие напряжения. Оценка параметров тонкой структуры выполнена как в целом по каждому образцу, так и по каждой структурной составляющей стали [28].

Испытания неразрушающими методами контроля выполнялись с образцами как перед, так и после пластической деформации. При этом использовались такие методы как: спектрально-акустический метод (измерительно-вычислительный комплекс «АСТРОН» [28]), а также магнито-шумовой метод (анализатор структуры и напряжений «Introspect» [28]). При этом проводилась оценка таких характеристик как интенсивность магнитного шума, скорость и время задержки волн Релея, коэффициент затухания, амплитуда принятого сигнала.

Теоретическая часть. Для более достоверной оценки работоспособности необходим интегральный физический метод исследований, базирующийся на регистрации изменений механических и структурных характеристик металла в процессе длительной эксплуатации энергооборудования.

Развиваются подходы к прогнозированию работоспособности и оценке остаточного ресурса на основе методов неразрушающих испытаний, связанных со структуроскопией. Разработан ряд критериев предельного состояния длительного работающего основного металла и сварных соединений.

Установленные зависимости между длительной прочностью хромомолибденованадиевых сталей, определяемой уровнем локальных полей внутренних напряжений, подтвердили, что для конструкционных сталей величина внутренних напряжений и характер распределения их источников является важнейшим показателем работоспособности для оценки ресурса паропроводов ТЭС [26, 27].

Количественно оценить время, а также место будущего разрушения можно путем установления зоны устойчивой локализации деформаций. Научным коллективом лаборатории физики прочности ИФПМ СО РАН предложен подход к наблюдению деформаций Чернова-Людерса в процессе одноосного растяжения под лазером и при скоростной киносъемке. Одним из главных преимуществ такого подхода является принципиальная возможность обнаружения места будущего разрушения образца – зону устойчивой локализации деформации до образования «шейки» (коллапс автоволны).

Большой научный и практический интерес представляет использование акустических и магнитных методов неразрушающих испытаний для обнаружения зон устойчивой локализации деформации с целью оценки и прогнозирования работоспособности длительно работающего оборудования [3].

Разработан структурно-механический критерий, отражающий выявленные взаимосвязи между структурным и субструктурным состояниями, полями внутренних напряжений и устойчивой локализации деформаций с характеристиками неразрушающих испытаний в металле длительно работающего энергооборудования из сталей 20 и 12Х1МФ.

Текущее состояние оборудования в момент диагностирования характеризуется показателем K_T , который можно представить, как

$$K_T = f(K_{стр}, K_{реж}, K_{деф}, K_{мех}), \quad (1)$$

где $K_{стр}$ – параметры структуры металла в текущем состоянии, определяемые при помощи металлографии; $K_{реж}$ – режимы эксплуатации (температура, давление (нагрузка), цикличность, среда), $K_{деф}$ – наличие дефектов изготовления, монтажа и ремонта, выявляемых физическими методами неразрушающих испытаний; $K_{мех}$ – характеристики металла, полученные разрушающими испытаниями.

В связи с тем, что ранее предложенные комплексные критерии степени поврежденности металла в относительных единицах и основанные на применении времени задержки поверхностной акустической волны (R , нс) не могут применяться, когда металл находится в области пластических деформаций ($\sigma_{0,2} < \sigma < \sigma_B$), то нами предлагается ввести в эту систему структурно-механический критерий локализованной деформации металла в текущем состоянии ($K_{с.-м}$), определяемый методом просвечивающей электронной микроскопии и учитывающий деформационные показатели, а также степень достижения устойчивой зоны локализации деформации:

$$K_T \rightarrow f(K_{с.-м}, K_{реж}, K_{деф}) \quad (2)$$

$$K_{с.-м} = f(\sigma_{л}, \sigma_{д}, \rho_{\pm}, \rho, a_1, a_2, \sigma_{0,2}/\delta), \quad (3)$$

где $\sigma_{л}$ – амплитуда полей внутренних напряжений, МПа; $\sigma_{д}$ – касательные напряжения, МПа; ρ_{\pm} – избыточная плотность дислокаций, см⁻²; ρ – скалярная плотность дислокаций, см²; a_1 и a_2 – деформационные показатели, отражающие степень достижения устойчивой зоны локализации деформации, $\sigma_{0,2}/\delta$ – отношение предела текучести к относительному удлинению (определяются при комнатной температуре).

Для изученных сталей предложен структурно-механический критерий, который был отработан на длительно работающих теплоустойчивых сталях энергооборудования на всех стадиях жизненного цикла (от исходного состояния без эксплуатации до достижения предельного состояния и разрушения) и который имеет следующий вид:

$$K_{с.-м} = \left(\frac{\sigma_{л}}{\sigma_{д}} + \frac{\rho}{\rho_{\pm}} \right) \times \frac{a_2 - a_1}{a_2 + a_1} \cdot \ln \frac{\sigma_{0,2}}{\delta}. \quad (4)$$

При расчетах установлены значения структурно-механического критерия, соответствующие моменту устойчивой локализации деформации: для стали 20 при значениях $K_{с.-м} \leq 0,75$, проверяемый узел оборудования рекомендуется подвергать замене в связи с исчерпанием ресурса работоспособности; для стали 12Х1МФ проверяемый узел оборудования рекомендуется подвергать замене в связи с исчерпанием ресурса работоспособности при значениях $K_{с.-м} \leq 0,78$.

Кроме того, установлены значения касательных напряжений сдвига ($\sigma_{д}$, МПа) при определенных величинах структурно-механического критерия ($K_{с.-м}$) для образцов энергооборудования из теплоустойчивых стали 12Х1МФ (рис. 2).

Общее время эксплуатации любого оборудования складывается из времени наработки оборудования до момента обследования (текущего состояния) $\tau_{тек}$ и дальнейшего времени работы оборудования до достижения предельного состояния $\tau_{ост}$ (остаточный ресурс):

$$\tau_{п.с} = \tau_{тек} + \tau_{ост}. \quad (5)$$

При условии сохранения относительного постоянства $K_{реж}$ и $K_{деф}$ на всем протяжении срока эксплуатации оборудования можно записать:

$$K_T \rightarrow f(K_{с.-м}), \quad (6)$$

$$\frac{\tau_{ост}}{\tau_{тек}} = \frac{K_{п.с.} - K_{с.-м}}{K_{п.с.}}, \quad (7)$$

где $K_{п.с.}$ – коэффициент, характеризующий техническое состояние оборудования в момент достижения предельного состояния.

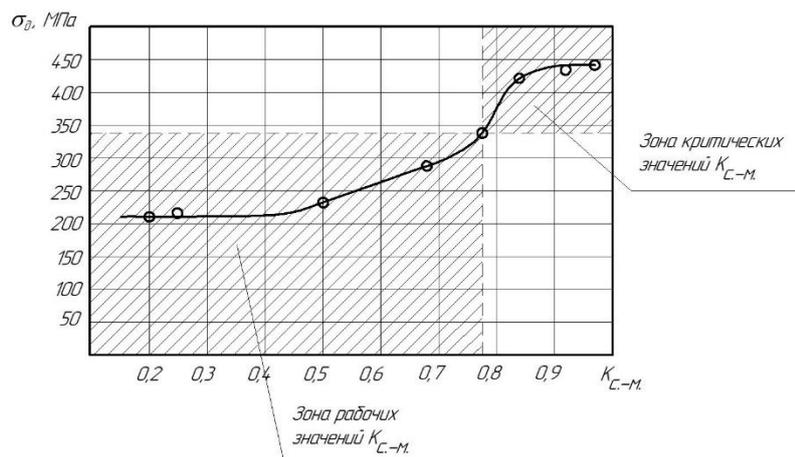
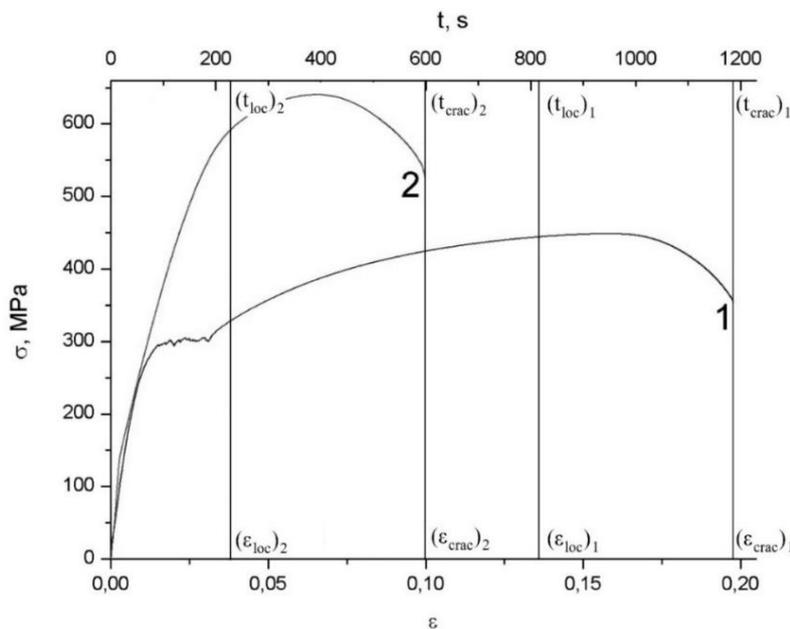


Рис. 2. Влияние касательных напряжений сдвига (σ_{δ} , МПа) на величину структурно-механического критерия (K_{c-m}) для образцов энергооборудования из теплоустойчивых стали 12X1МФ

Основываясь на результатах исследований структуры методом просвечивающей электронной микроскопии и испытаний неразрушающими методами, было произведено наложение диаграмм нагружения для образцов в состоянии без эксплуатации и после длительной эксплуатации (219 тыс. ч) с общим началом нагружения (рис. 3). В результате наложения диаграмм было установлено, что промежутки времени от начала нагружения до момента устойчивой локализации деформации не равны $(t_{loc})_1 \neq (t_{loc})_2$. Однако, промежутки времени от момента устойчивой локализации деформации до разрушения образцов равны $((t_{crac})_1 - (t_{loc})_1 = (t_{crac})_2 - (t_{loc})_2)$ для состояния без эксплуатации и после длительной эксплуатации (219 тыс. ч).



1 – без эксплуатации; 2 – после длительной эксплуатации (219 тыс. ч)

Рис. 3. Совмещение диаграмм «напряжение-деформация» образцов из стали 20 в разных состояниях

Момент достижения устойчивой локализации деформации может использоваться для оценки и прогнозирования работоспособности и остаточного ресурса технического устройства. С учетом этого, остаточное время эксплуатации можно разделить на время до

достижения устойчивой локализации деформации ($\tau_{\text{ост.скорр}}$ – скорректированный остаточный ресурс) и время от устойчивой локализации деформации до разрушения ($\tau_{\text{улд}}$). Тогда выражение (5) примет вид:

$$\tau_{\text{тек}} + \tau_{\text{ост.скорр}} + \tau_{\text{улд}} = \tau_{\text{п.с.}} \quad (8)$$

Так как вместо предельного использовалось состояние устойчивой локализации деформации, то формула (7) будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\tau_{\text{ост.скорр}}}{\tau_{\text{тек}}} = \frac{K_{\text{улд}} - K_{\text{с.-м}}}{K_{\text{улд}}}, \quad (9)$$

где $K_{\text{улд}}$ – коэффициент, характеризующий техническое состояние оборудования в момент достижения устойчивой локализации деформации.

Из формулы (9), проведя математические преобразования и подставляя в формулу результаты расчетов и исследований, получен искомый результат – остаточное время эксплуатации оборудования:

$$\tau_{\text{ост.скорр}} = \frac{\tau_{\text{тек}}(K_{\text{улд}} - K_{\text{с.-м}})}{K_{\text{улд}}}. \quad (10)$$

Результаты расчетов и их обсуждение. Процесс расчета структурно-механического критерия и прогнозирование работоспособности на его основе требует высокой квалификации оператора и занимает относительно продолжительное время. Поэтому для упрощения процесса расчета и уменьшения трудоемкости была разработана автоматизированная система оценки и прогнозирования работоспособности длительно работающего энергооборудования на базе критериев предельного состояния и структурно-механического критерия. Программный модуль оценки состояния длительно работающего энергооборудования разрабатывался на основе спектрально-акустического метода контроля и, соответственно, измерительно-вычислительного комплекса «АСТРОН». В основу работы аппаратной части комплекса положен способ учета всей серии отраженных акустических импульсов для последующей ее обработки средствами программного обеспечения комплекса. В обрабатывающей части системы производится последовательное преобразование осциллограммы отраженных импульсов с определенным шагом дискретизации с момента зондирования исследуемого материала и до прихода n -го отраженного импульса для передачи первичной акустической информации. С ИВК «АСТРОН» используются преобразователи поверхностных волн, которые представляют собой выполненные в одном корпусе излучатель и приемник волн. В настоящей работе использовался преобразователь на 4 МГц с базой 18 мм.

В приложении «Оценка и прогнозирование работоспособности» используется форма с вкладкой «Прогнозирование» (рис. 4, б), которая предназначена для оценки как текущего состояния металла сварных соединений энергооборудования, эксплуатируемого длительное время в сложных напряженных условиях [28], так и прогнозирования остаточного ресурса.

Алгоритм работы с вкладкой «Главная» заключается в выборе типа датчика – 4 или 6 МГц, выборе соответствующей марки стали и срок эксплуатации в часах. После выбора этих параметров затем вручную вводятся значения характеристик, снятых с прибора R (нс) и $K_{\text{зам}}$ (1/мкс). Запускается расчет структурно-механического критерия и выводится результат расчета – металл может работать без проведения ремонтно-восстановительных работ либо металл нуждается в проведении ремонтно-восстановительных работ. В последнем случае выдается рекомендованное количество часов, на которое можно продлить ресурс.

Планируемая к добавлению вкладка «База данных» позволит обращаться к результатам предшествующих измерений по сталям 20 и 12Х1МФ. Кроме того, будет предусмотрена возможность внесения в базу данных новых результатов измерений как по сталям 20 и 12Х1МФ, так и по новым сталям, по которым производятся измерения. При этом для получения адекватных результатов расчета необходимо вносить данные по сталям как минимум в двух состояниях: в исходном (без эксплуатации) и после длительной эксплуатации

до разрушения. При нажатии кнопки «Справка» (рис. 4, б) можно узнать теоретическую информацию по величинам, используемым в расчетах.

Автоматизированная система оценки и прогнозирования работоспособности была апробирована в промышленных условиях на ряде участков паропроводов пара и горячей воды, изготовленных из сталей 20 и 12Х1МФ. Так для 36 паротводящих труб, изготовленных из стали 20, после эксплуатации в 219–242 тыс. часов, была произведена оценка остаточного ресурса, которая показала, что для 70 % труб остаточный ресурс составил 50–75 тыс. часов, 20 % – 25–50 тыс. часов, а для 10 % необходимо произвести замену в связи с исчерпанием ресурса работоспособности. Для 29 паропроводов пара и горячей воды, изготовленных из стали 12Х1МФ после эксплуатации 180–263 тыс. часов, расчет показал, что для 60 % паропроводов остаточный ресурс составил 50–70 тыс. часов, 25 % – 25–50 тыс. часов, а для 15 % необходимо произвести замену в связи с исчерпанием ресурса работоспособности.

Результаты расчета остаточного ресурса по структурно-механическому критерию были сопоставлены с результатами, полученными экспертной организацией при выполнении экспертизы промышленной безопасности. Совпадение результатов оценки остаточного ресурса составило 95 %.

Процесс расчета структурно-механического критерия и прогнозирования работоспособности на его основе требует высокой квалификации оператора и занимает относительно продолжительное время. Поэтому для упрощения процесса расчета и уменьшения трудоемкости была разработана автоматизированная система оценки и прогнозирования работоспособности длительно работающего энергооборудования на базе критериев предельного состояния и структурно-механического критерия (рис. 4).

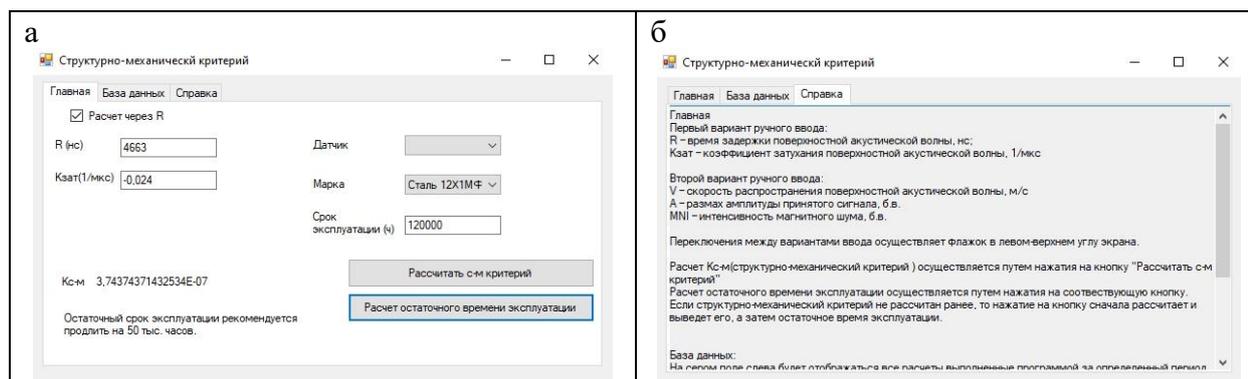


Рис. 4. Автоматизированная система оценки и прогнозирования работоспособности: а – пример расчета структурно-механического критерия и остаточного времени эксплуатации; б – меню программы, Вкладка «Справка»

При сопоставлении результатов расчета остаточного ресурса энергетического оборудования в автоматизированной системе установлена высокая сходимость с результатами, полученными при расчете непосредственно по параметрам микроструктуры (электронная микроскопия) и деформационным показателям. Сравнение с результатами, полученными экспертной организацией при выполнении экспертизы промышленной безопасности, показало более высокую достоверность в оценке остаточного ресурса по расчету структурно-механического критерия.

Предложенный и обоснованный подход к оценке и прогнозированию работоспособности и остаточного ресурса длительно работающего энергооборудования, основанный на выявленных взаимосвязях между структурным и субструктурным состояниями, полями внутренних напряжений и устойчивой локализации деформаций с характеристиками разрушающих испытаний и расчете структурно-механического критерия был применен на ряде электростанций Кемеровской области.

Выводы. Разработан структурно-механический критерий $K_{с.-м}$ на основе установленных взаимосвязей между структурным состоянием, полями внутренних напряжений и устойчивой локализацией деформаций с характеристиками неразрушающих испытаний в металле длительно работающего энергооборудования из сталей 20 и 12Х1МФ. Установлено, что при значениях структурно-механического критерия $K_{с.-м} \leq 0,75$ для стали 20 и $K_{с.-м} \leq 0,78$ для стали 12Х1МФ, соответствующих моменту устойчивой локализации деформации, проверяемые узлы оборудования рекомендуется подвергать замене в связи с исчерпанием ресурса. Однако, структурно-механический критерий требует большого числа расчётов, которые можно автоматизировать с применением интеллектуальных систем.

При сопоставлении результатов расчета остаточного ресурса энергетического оборудования в автоматизированной системе установлена высокая сходимость с результатами, полученными при расчете непосредственно по параметрам микроструктуры (электронная микроскопия) и деформационным показателям.

Разработана методология оценки остаточного ресурса, основанная на выявлении и использовании взаимосвязей между структурным и субструктурным состояниями, полями внутренних напряжений и устойчивой локализации деформаций с характеристиками неразрушающих испытаний и расчете структурно-механического критерия и которая нашла применение на ряде электростанций Кемеровской области. Разработана автоматизированная система прогнозирования работоспособности и оценки остаточного ресурса длительно работающего энергооборудования, в основу работы которой заложен структурно-механический критерий. Система апробирована в промышленных условиях на ряде участков паропроводов пара и горячей воды, изготовленных из сталей 20 и 12Х1МФ. Результаты расчета остаточного ресурса по структурно-механическому критерию были сопоставлены с результатами, полученными экспертной организацией при выполнении экспертизы промышленной безопасности. Расхождение результатов оценки остаточного ресурса не превысило 5 %.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда, соглашение № 22-29-20192 и гранта Кемеровской области – Кузбасса, соглашение №16.

Список литературы

1. Гринь Е. А. Повышение рабочего ресурса элементов теплосилового оборудования электростанций с учетом макроповреждаемости металла: автореф. дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.14.14. – Москва, 2010.
2. Резинских В.Ф., Гринь Е.А. Современные проблемы обеспечения безопасности тепломеханического оборудования при продлении сроков его службы // Теплоэнергетика. – 2013. – №1. – С. 17–24.
3. Смирнов А.Н. Эволюция микроструктуры и критерии предельного состояния при прогнозировании работоспособности теплоустойчивых сталей : дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.16.01, 05.02.11. – Новосибирск, 2004. – 397 с.
4. Березина Т.Г., Бугай Н.В., Трунин И.И. Диагностирование и прогнозирование долговечности металла теплоэнергетических установок. – Киев.: Техника. 1991. – 120 с.
5. Куманин В.И. Структура, поврежденность и работоспособность теплостойкой стали при длительной эксплуатации // МиТОМ. – 1980. – № 12. – С. 26-29.
6. Structural-phase state, mechanical properties, acoustic and magnetic characteristics in the sustainable deformation localization zones of power equipment made of structural and heat resistant steels / N. Ababkov, A. Smirnov, V. Danilov [et al.] // Metals. – 2021. – No. 10. – P. 1-19.
7. Ковпак В.И., Олисов А.Н. Некоторые особенности высокотемпературной ползучести сплавов на никелевой основе // Проблемы прочности. – 1973. – № 2. – С. 21-25.
8. Ковпак В.И. О пересчете показателей жаропрочности на различные температуры // Заводская лаборатория. – 1971. – № 12. – С. 1113-1119.

9. Ковпак В.И. К вопросу об оценке и прогнозировании статистик характеристик длительной прочности жаропрочных металлических материалов // Проблемы прочности. – 1977. – № 7. – С. 49-57.
10. Ковпак В.И. К вопросу о прогнозировании остаточной долговечности металлических материалов // Проблемы прочности. – 1981. – № 10. – С. 95-99.
11. Антикайн П.А., Зыков А.К. Изготовление объектов котлонадзора: справ. изд. – Металлургия, 1988. – 328 с.
12. Куманин В.И. Структура, поврежденность и работоспособность теплостойкой стали при длительной эксплуатации // МиТОМ. – 1980. – № 12. – С. 26-29.
13. Куманин В.И., Шкляр М.И., Ковалева Л.А. О характере разрушения гибов паропроводных труб // Теплоэнергетика. – 1979. – № 7. – С. 56-58.
14. Злепко В.Ф., Бугай Н.В. О связи длительных и кратковременных свойств прочности трубных сталей // Энергетик. – 1970. – № 11 – С. 14-17.
15. Методические рекомендации по оценке длительной прочности жаропрочных сплавов по результатам кратковременных испытаниях / Институт проблем прочности АН УССР: сост. В. В. Кривенюк. – Киев; 1978. – 37 с.
16. Бугай Н.В., Кривенюк В.В., Авраменко Д.С. Об использовании кратковременных механических характеристик для оценки длительных прочностных свойств стали 12Х1МФ // Проблемы прочности. – 1980. – № 3. – С. 54-56.
17. Бочвар А.А. Зависимость жаропрочности алюминиевых сплавов от времени старения // Известия АН СССР. – 1947. – № 10. – С. 2-4.
18. Кривенюк В.В. О связи кратковременных механических характеристик с длительной прочностью // Проблемы прочности. – 1974. – № 3. – С. 31-35.
19. Векслер Е.Я., Голянский С.П. Определение длительной прочности стали 12Х1МФ методом горячей длительной твердости // Электрические станции. – 1965. – № 2. – С. 23-26.
20. Крутасова Е.И. Надежность металла энергетического оборудования. – М.: Энергоиздат, 1981. – 237 с.
21. Крутасова Е.И., Талова Т.М. Надежность работы металла паропроводов после расчетного срока службы // Электрические станции. – 1968. – № 2. – С. 15-19.
22. Рохлин И.Н. Ускоренный метод определения длительной прочности путем измерения твердости // Заводская лаборатория. – 1960. – № 7. – С. 850-852.
23. Злепко В.Ф., Захарова А.И. Критерий эксплуатационной надежности стали 12Х1МФ // Электрические станции. – 1970. – № 4. – С. 32-34.
24. О корреляции структуры, физических свойств и жаропрочности хромомолибденованадиевой стали в условиях ползучести // В.Ф. Злепко, В.П. Самсонов, Т.А. Швецова [и др.] // Жаропрочность и жаростойкость металлических материалов. – М.: Наука, 1976. – С. 156-159.
25. Гофман Ю.М. Ускоренный метод определения длительной прочности металла паропроводов из стали 12МХ после продолжительной эксплуатации // Энергетик. – 1969. – № 6. – С. 31-32.
26. Danilov V.I., Orlova D.V., Zuev L.B. On the kinetics of localized plasticity domains emergent at the pre-failure stage of deformation process // Materials and Design. – 2011. – № 32. – P. 1554-1558.
27. Смирнов А.Н., Фольмер С.В., Абабков Н.В. Локальные поля внутренних напряжений в сварных соединениях, спектрально-акустический метод их выявления и синергетический подход к материаловедению // Вестник КузГТУ. – 2009. – № 3. – С. 28–38.
28. Смирнов А.Н., Абабков Н.В. Критерии оценки состояния и ресурса длительно работающих барабанов котлов высокого давления // Сварка и диагностика. – 2013. – № 4. – С. 55–58.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАБОЧИХ КОЛЕС ОСЕВЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ
НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ИНЕРЦИОННО-МАССОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК****к.т.н. Панова Н.В.****Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия**

Аннотация. В данной статье рассматриваются пути снижения массы корпуса рабочего колеса (РК) шахтного осевого вентилятора путем топологической оптимизации распределения материала корпуса рабочего колеса с использованием программного комплекса ANSYS.

Ключевые слова: осевой вентилятор, топологическая оптимизация, корпус рабочего колеса, напряженное состояние.

Главные вентиляторные установки (ГВУ) являются неотъемлемой частью системы обеспечения безопасности подземных работ. С развитием высокопроизводительных технологий добычи полезных ископаемых и переходом шахт на более глубокие горизонты возрастает потребность в повышении производительности и давления воздуха. Это можно обеспечить либо увеличением площади проточной части вентилятора, либо путем увеличения окружной скорости вращения рабочего колеса [1, 2]. Увеличение площади проточной части вентилятора влечет за собой увеличение его габаритов и расширение строительной части (здания) ГВУ, поэтому этот вариант здесь не рассматривается. Окружная скорость по концам лопаток рабочего колеса, большинства изготавливаемых в РФ шахтных ВГП, не превышает 105-120 м/с. Это обусловлено большим значением нормальной силы инерции лопаток (центробежной силы) и параметрами прочности применяемых материалов.

Учитывая, что производительность вентилятора увеличивается пропорционально скорости вращения, а давление пропорционально квадрату скорости, то такой путь повышения аэродинамических параметров является перспективным. Повышение скоростей вращения вентиляторов возможно в ограниченных пределах, так как скорость обтекания лопаточных венцов может приблизиться к скорости звука, что приведет к неработоспособности лопаток, рассчитанных на дозвуковые скорости. Кроме того, на больших скоростях вращения значительно возрастают нагрузки на корпус рабочего колеса (РК), что требует новых подходов к разработке конструкций корпусов РК.

При повышении скорости возникают задачи, связанные как с обеспечением прочности самих рабочих лопаток, так и с прочностью корпуса рабочего колеса. По этим причинам, достижение окружных скоростей по концам лопаток более 150-160 м/с требует снижения нормальной силы инерции. Следовательно, необходимо снижение массы рабочих лопаток и разработки рациональных конструкций корпусов РК.

Оптимизация геометрических параметров рабочих колес осевых вентиляторов по критерию минимума инерционно-массовых параметров. Ранее было установлено, что при оптимизации конструктивных параметров шахтного осевого вентилятора главного проветривания (на примере вентилятора ВО-36) можно существенно уменьшить металлоемкость рабочего колеса, что позволяет снизить массу силового пояса и перейти от конструкции с двумя опорными (коренными) дисками к конструкции с одним диском [3-6].

Распределение материала однодискового РК также можно оптимизировать, получив минимальную по массе и моменту инерции конструкцию. Топологическая оптимизация однодискового РК проведена в программном пакете ANSYS.

Цель оптимизации – снижение массы и момента инерции корпуса рабочего колеса при сохранении требуемых параметров прочности.

Уменьшение массы РК позволяет снизить его металлоемкость и, как следствие, стоимость, а также позволит использовать менее мощный приводной двигатель и снизить нагрузки на подшипниковые узлы вентилятора.

В качестве ограничений при оптимизации приняты следующие параметры: максимальные допустимые напряжения по Мизесу 220 МПа (с учетом коэффициента запаса 1.8) и ограничение по массе – не менее 30 % от исходной массы. Закрепление корпуса принято в виде глухой заделки по ступице.

Для топологической оптимизации использован метод SIMP (Solid Isotropic Material with Penalty, твердый изотропный материал с штрафной функцией), реализованный в программном пакете ANSYS [7-9].

Оптимизация корпуса рабочего колеса была выполнена на примере шахтного осевого вентилятора главного проветривания ВО-43 с диаметром рабочего колеса по концам лопаток 4300 мм и частотой вращения до 1000 об/мин, окружная скорость по концам рабочих лопаток до 220 м/с, масса колеса до оптимизации составляла 3622 кг

Основная нагрузка на РК возникает от действия центробежных сил от лопаток и втулки. На рис. 1 показана общая закономерность распределения материала в структуре корпуса РК после оптимизации, а на рис. 2 – преобразованная к твердотельной геометрии модель, полученная путем сглаживания, удаления остаточных областей материала и конструкторской проработки, при этом итоговая расчетная модель будет отличаться от исходной формы. Отличия могут быть как незначительные (например, просто сглаживание геометрии), а могут содержать значительные изменения (в виде коррекции полостей, несвязанных элементов геометрии и пр.) [10].

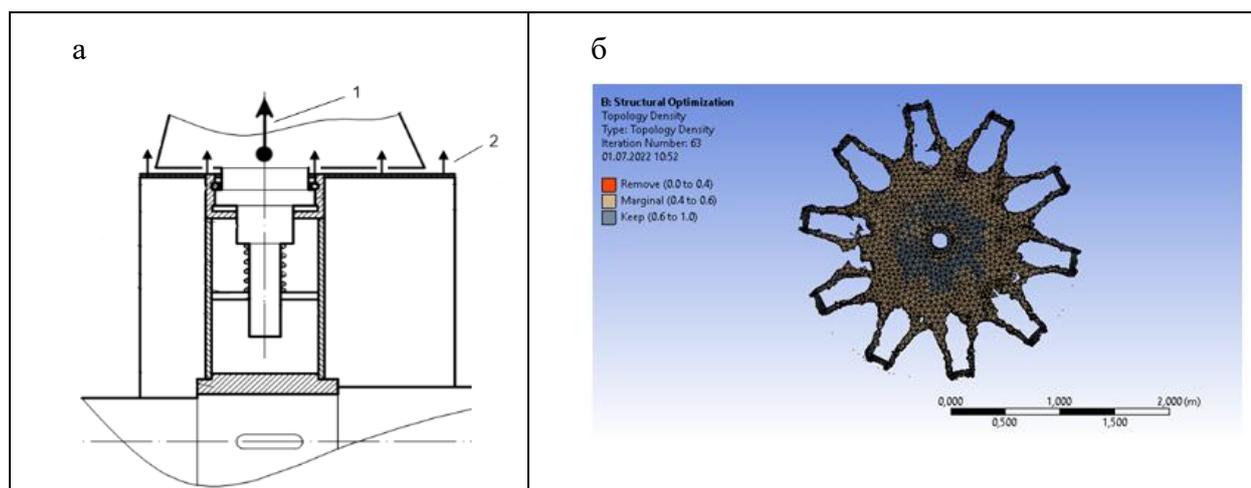


Рис. 1. Схема нагружения рабочего колеса (а); распределение материала в РК после оптимизации вентилятора с диаметром рабочего колеса по концам лопаток 4300 мм (б)

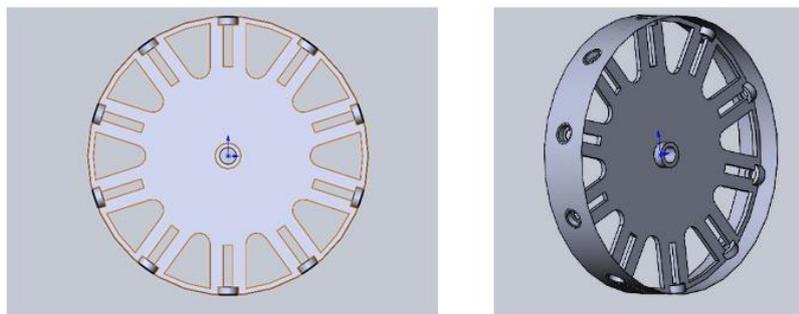


Рис. 2. Оптимизированная модель корпуса РК после сглаживания для вентилятора с диаметром рабочего колеса по концам лопаток 4300 мм

Оптимизированное рабочее колесо после сглаживания имеет массу 1245 кг, что удовлетворяет ограничению по массе – не менее 30 % от первоначальной массы колеса. На рис. 3 представлены результаты проверочного расчета напряженно-деформированного состояния в корпусе РК после оптимизации и сглаживания конечно-элементной модели. Закрепления приняты по внутренней поверхности ступицы в виде заделки, нагрузка от действия центробежной силы, включая нагрузки от лопаток РК, передается на опорный диск РК.

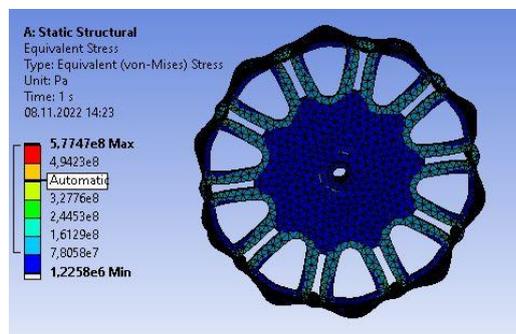
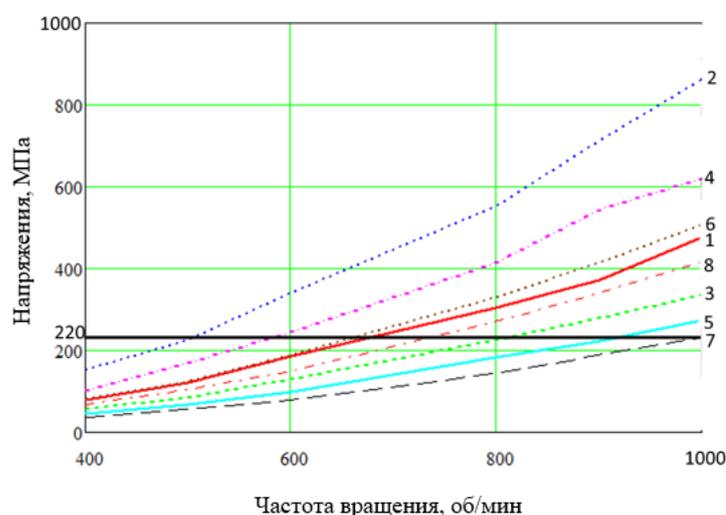


Рис. 3. Распределение напряжений в оптимизированном корпусе рабочего колеса

На основе проведенных исследований для вентилятора с диаметром рабочего колеса по концам лопаток 4300 мм, определены зависимости НДС для оптимизированного однодискового корпуса рабочего колеса от частоты вращения ротора, толщины несущего диска, и массы установленных лопаток (монолитных лопаток, и облегченных, с массой на 50% меньше монолитных).

По представленному на рис. 4 графику можно подобрать толщину несущего диска в зависимости от частоты вращения ротора и массы установленных лопаток.



- 1 – толщина несущего диска 20 мм, облегченная лопатка; 2 – толщина несущего диска 20 мм, монолитная лопатка; 3 – толщина несущего диска 30 мм, облегченная лопатка; 4 – толщина несущего диска 30 мм, монолитная лопатка; 5 – толщина несущего диска 40 мм, облегченная лопатка; 6 – толщина несущего диска 40 мм, монолитная лопатка; 7 – толщина несущего диска 50 мм, облегченная лопатка; 8 – толщина несущего диска 50 мм, монолитная лопатка

Рис. 4. Распределение напряжений для корпуса рабочего колеса с диаметром по концам лопаток 4300 мм в зависимости от толщины несущего диска и частоты вращения ротора

Вывод. Спроектировано рабочее колесо осевого вентилятора на основе оптимизации инерционно-массовых характеристик. Определена зависимость напряженного состояния для оптимизированного однодискового рабочего колеса вентилятора главного

проветривания от частот вращения ротора, толщины несущего диска и варианта установленных лопаточных узлов (монолитная/облегченная).

Список литературы

1. Петров Н.Н., Панова Н.В., Грехнёва Е.Ю. Адаптация аэродинамических характеристик главных вентиляторов к изменениям вентиляционных режимов шахт // ФТПРПИ. – 2013. – № 5. – С. 119 – 126.
2. Красюк А.М., Лугин И.В., Косых П.В., Русский Е.Ю. Обоснование способа продления ресурса шахтных двухступенчатых осевых вентиляторов главного проветривания. // ФТПРПИ. – 2019. – № 3. – С. 150 – 167.
3. Петров Н.Н., Панова Н.В. Анализ влияния конструктивных элементов корпуса рабочего колеса на прочности высоконагруженных вентиляторов серии ВО // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 7. – С. 17 – 20.
4. Петров Н.Н., Панова Н.В. Исследование прочности рабочих колес со сдвоенными листовыми лопатками ряда высоконагруженных вентиляторов главного проветривания шахт // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 1 (50). – С. 190 – 194.
5. Красюк А.М. Русский Е.Ю. К вопросу оптимального проектирования лопаток осевых вентиляторов с повышенными скоростями вращения // ФТПРПИ. – 2020. – № 6. – С. 161 – 169.
6. Панова Н.В. Особенности перехода от двухдискового корпуса рабочего колеса шахтного осевого вентилятора к однодисковому. // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2022. – № 8. – С. 137-142.
7. Saleem W., Lu H., Yuqing F. Topology Optimization // Problem Formulation and Pragmatic Outcomes by integration of TOSCA and CAE tools : Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008, WCECS 2008. – USA: SanFrancisco, 2008. – P. 6.
8. Eschenauer H., Olhoff N. Topology Optimization of Continuum Structures: a review // ASME Applied Mechanics Reviews. – 2001. – Vol. 54. – No. 4. – P. 331-390.
9. Zhao, L.a, Xu, B.aEmail Author, Han, Y.a, Rong, J.b. Continuum structural topological optimization with dynamic stress response constraints // Advances in Engineering Software. – 2020. – Vol. 148. – № 102834.
10. Максимов П.В., Фетисов К.В. Анализ методов доработки конечно-элементной модели после топологической оптимизации // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 9 (51). – Часть 2. – С. 58—60.

УДК 622.646

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КРИВИЗНЫ УПРУГОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА ВИБРОПИТАТЕЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ ЕГО КОЛЕБАНИЙ

^{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. Приведено описание конструкции и работы вибрационного питателя «Волна» с упругим рабочим органом и приводом от пневматического вибровозбудителя «Напор», разработанных в ИГД СО РАН. Приведены результаты численного моделирования динамики таких машин и определения зависимости затухания изгибных колебаний грузочного участка рабочего органа от радиуса его кривизны

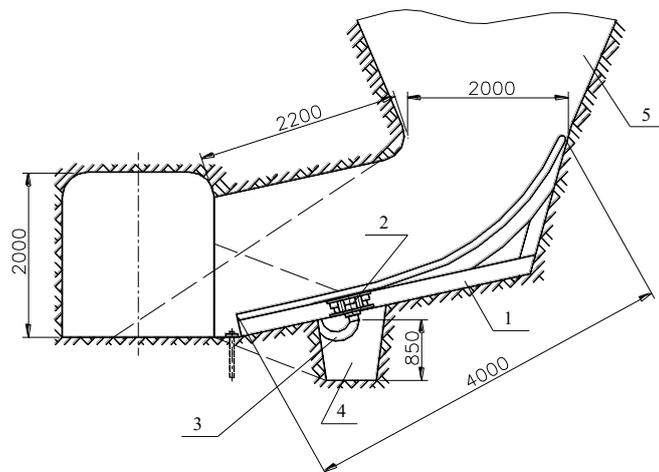
Ключевые слова: вибрационный питатель, упругий рабочий орган, кривизна грузочного участка, амплитуда колебаний, затухание колебаний

Питатели – устройства, применяемые для связи отдельных типов транспорта и организации бесперебойно действующих перегрузочных пунктов в различных областях народного хозяйства. Они позволяют регулировать скорость подачи сыпучих материалов в накопительную емкость и их выпуск из нее в транспортное средство. Стоит отметить, что при выпуске сыпучих грузов использование питателей позволяет решать важную задачу предотвращения сводообразования в сходящихся каналах, образуемых стенками емкости. На предприятиях горной промышленности они находят применение и на карьерах, и в условиях подземной добычи полезных ископаемых [1–4], применяясь как самостоятельные машины или в качестве комплектующих более сложного оборудования. Например, механизированная крепь с регулируемым выпуском сыпучей массы на забойный скребковый конвейер, созданная для разработки мощных угольных пластов, оснащена плунжерным питателем с бортами, расположенным между гидростойками в проеме перекрытия [5–7]. Его рабочая поверхность с клиновыми рифлениями обеспечивает минимальное сопротивление перемещению ее в сторону завала, а также максимальное трение и сцепление рабочей поверхности питателя при передвижении в сторону выпуска угля. Такая конструкция надежна и безопасна при работе под завалом угля, однако гидравлический привод не позволяет развивать высокую скорость подачи породы на конвейер.

В связи с этим есть смысл обратить внимание на вибрационные питатели с упругим рабочим органом, созданные в лаборатории вибротехники ИГД СО РАН [8–11]. Грузонесущий орган таких машин выполнен из стального листа малой изгибной жесткости, как правило, свободно укладывается на раму и при работе совершает изгибные колебания под действием вынуждающей силы виброисточника, закрепленного на его разгрузочном участке. Эти машины отличаются простотой конструкции, компактностью, малой массой, небольшими затратами на монтаж, а принцип их действия дает широкие возможности для реализации различных режимов транспортирования в зависимости от физико-механических свойств сыпучих материалов.

Одними из первых таких вибрационных машин были питатели ВЛР-1, ВЛР-2, ВЛР-3, предназначенные для выпуска руды из рудоспусков и погрузки ее в транспортные средства. Их рабочий орган укладывался на специальное основание или раму, предварительно смонтированную в основании рудоспуска.

Следующее поколение вибропитателей с упругим рабочим органом «Волна» стали изготавливаться с опорной рамой пенального типа, что значительно упростило монтажные работы. Питатель может устанавливаться как в рудоспуске (рис. 1), так и закрепляться с помощью упругих элементов на стенках бункера или в проеме перекрытия механизированной крепи.



1 – вибропитатель; 2 – вибровозбудитель; 3 – воздухоподводящий шланг; 4 - пряминок; 5 - выработка

Рис. 1. Схема установки вибропитателя «Волна-4П» на выпуске руды из блока

Малая жесткость рабочего органа питателя «Волна» позволяет выполнить его криволинейной формы, что решает следующие задачи:

- скорость движения сыпучих материалов по рудоспуску не равномерна. Она определяется углом его наклона, сходимением вертикальных стенок (образование сходящегося канала) и физико-механическими свойствами выгружаемой породы (гранулометрический состав, липкость, влажность и т.д.). При достижении прямолинейной транспортирующей поверхности питателя сыпучий материал вынужден изменить направление своего движения, что также снижает скорость его перемещения. В результате образуется застойная зона (треугольник ABC на рис. 2, а и 2, в), в которой порода остается в неподвижном состоянии, в некоторых случаях даже при работающем питателе. Криволинейный рабочий орган в процессе выпуска создает искусственную поверхность скольжения сыпучего материала, близкую по форме к его естественным поверхностям скольжения (рис. 2, б и 2, г), что дает возможность выпустить весь объем сыпучего материала из рудоспуска;

- равномерное движение породы в области выпускного окна позволяет обеспечить одинаковую скорость перемещения сыпучего материала по устью рудоспуска с постепенным снижением каждого слоя материала (рис. 2 б), что предотвращает перемешивание отдельных слоев руды или угля с пустой породой и их разубоживание. Как показали результаты лабораторных исследований (рис. 2 г), даже в случае выпуска фракций с большой разницей в размере куса смешивания пород практически не происходит;

- отсутствие крупногабаритной фундаментной рамы и упругих связей между ней и рабочим органом в конструкции питателя «Волна» позволяет использовать эти машины под завалом любой мощности и увеличивать длину транспортирующей поверхности при необходимости относительно габаритов механизированной крепи. За счет этого увеличивается зона вибровоздействия на выпускаемый материал, растет скорость его выпуска и производительность добычи.

С целью повышения надежности и пожаробезопасности использования питателей в условиях угольных шахт был разработан простой по конструкции пневматический вибровозбудитель «Напор» [12–14]. Его основное достоинство – отсутствие пар скольжения, а наличие сменного ударника позволяет при постоянных габаритах изменять в широких пределах частоту и вынуждающую силу. Вибровозбудитель не нуждается в смазке, при работе во влажной, запыленной или агрессивной среде исключена опасность заклинивания даже при загрязнении и коррозии деталей, что определяет его высокую надежность.

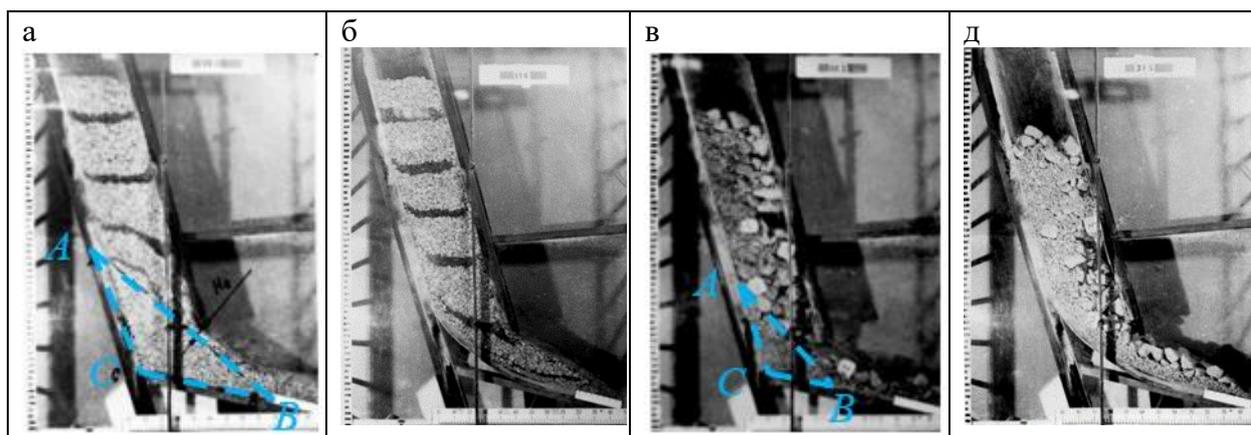


Рис. 2. Результаты экспериментального исследования влияния кривизны рабочего органа на форму фигуры выпуска сыпучего материала [15]: а, б – выпуск мелкодисперсного материала; в, г – выпуск кусковатого материала

Относительно небольшая высота вибровозбудителя дает возможность применять его в стесненных условиях.

Создан типоряд вибровозбудителей «Напор», работающих при давлении сжатого воздуха от 0,2 до 0,5 МПа. Они имеют следующую характеристику: расход – от 0,5 до 10,0 м³/мин, частота колебаний – от 35 до 80 Гц, вынуждающая сила – до 50000 Н, энергия удара – до 200 Дж.

Технические характеристики некоторых питателей «Волна», оборудованных такими вибровозбудителями, выполненных по одной конструктивной схеме и отличающихся габаритными размерами и производительностью, приведена в табл 1. Цифра в обозначении соответствует длине рабочего органа.

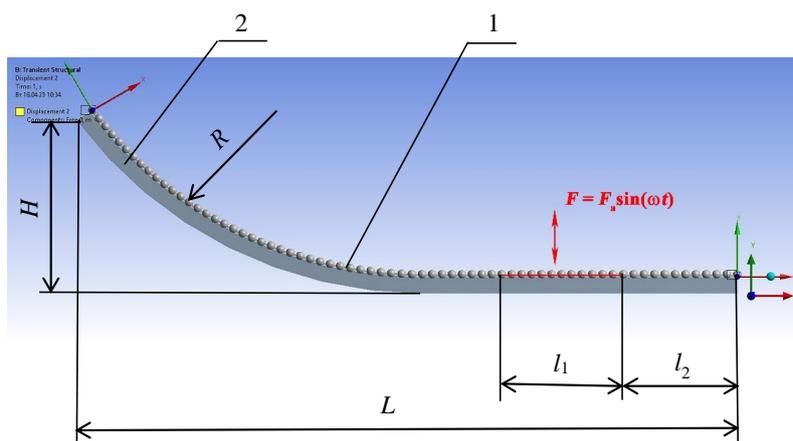
Улучшая условия движения сыпучего материала, кривизна транспортирующей поверхности может стать причиной повышения затухания изгибных колебаний, передаваемых вдоль грузонесущего органа от источника вибрации на его загрузочный участок. Были проведены экспериментальные и аналитические исследования влияния формы упругого рабочего органа на амплитуду его колебаний [16–18]. Однако вследствие сложности и трудоемкости таких работ их результаты недостаточны для решения этого вопроса.

Таблица 1

| Тип питателя | Параметры | | | |
|--------------|-------------------------|----------------------|----------------------|-----------|
| | Производительность, т/ч | Тип вибровозбудителя | Вынуждающая сила, кН | Масса, кг |
| «Волна-1,5П» | до 250 | «Напор-1М» | 15,0 | 305 |
| «Волна-2П» | до 250 | Тот же | 19,6 | 592 |
| «Волна-3П» | до 300 | «Напор-3М» | 29,4 | 1170 |
| «Волна-4П» | до 500 | Тот же | 35,6 | 1800 |

Современное развитие вычислительных комплексов позволило расширить возможности исследователей. В ходе ряда численных экспериментов с помощью программного комплекса ANSYS было установлено влияние радиуса кривизны загрузочного участка упругого рабочего органа на амплитуду его поперечных колебаний при различных частотах вынуждающей силы виброисточника.

Для исследования динамики системы «рабочий орган – сыпучий материал – упругое основание» в установившемся режиме вынужденных колебаний была разработана расчетная схема (рис. 3).



1 – рабочий орган; 2 – упругое основание

Рис. 3. Расчетная схема вибрационного транспортирующего устройства

Рабочий орган представлял собой балку малой поперечной жесткости, состоящую из прямолинейного разгрузочного и криволинейного загрузочного участка, описываемого дугой радиуса R . На расстоянии l_2 от правого конца балки был выделен участок l_1 ,

соответствующий площадке крепления вибровозбудителя. Нижней кромкой по всей длине балка свободно контактировала с упругим основанием, профиль которого повторял ее форму.

Габаритные высота H и длина L балки, длины участков l_1 и l_2 принимались постоянными, радиус кривизны R имел переменное значение в диапазоне $(0,37 - 0,78) L$.

Задача решалась в плоской постановке.

Для удобства вычислений помимо глобальной была введена локальная система координат, начало которой совпадало с верхней точкой загрузочного участка балки, а ось ординат направлена по касательной к его дуге.

Нижняя линия основания была жестко зафиксирована. Свободный конец загрузочного участка обездвижен в направлении OY локальной системы координат, а свободный конец разгрузочного участка – вдоль OX глобальной системы координат.

Рассматривались только поперечные колебания балки, создаваемые вынуждающей силой F , прикладываемой к участку l_1 по нормали и изменяющейся по гармоническому закону:

$$F = F_a \sin \omega t,$$

где F_a , ω – амплитуда и круговая частота вынуждающей силы соответственно; t – время.

Во всех экспериментах принималось одно и то же амплитудное значение F_a . Круговая частота вибрации изменялась в диапазоне $63 - 314$ 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 $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициентом Пуассона $\mu = 0,3$ и пределом прочности $[\sigma_{\text{доп}}] = 175$ МПа, упругого основания – модель материала с нелинейной характеристикой Elastomer Sample (Mooney-Rivlin) с плотностью 1720 кг/м³, экспериментальными коэффициентами $C10 = 1,839 \cdot 10^7$ Па, $C01 = -1,3475 \cdot 10^7$ Па и параметром несжимаемости $D1 = 4,8865 \cdot 10^5$ Па⁻¹, а также пределом прочности на сжатие $[\sigma_{\text{сж}}] = 54$ МПа (принят по аналогии с природным каучуком).

По результатам каждого эксперимента определялись амплитуды виброперемещения на линии приложения вынуждающей силы (A_B) и на свободном конце загрузочного участка (A_3) балки.

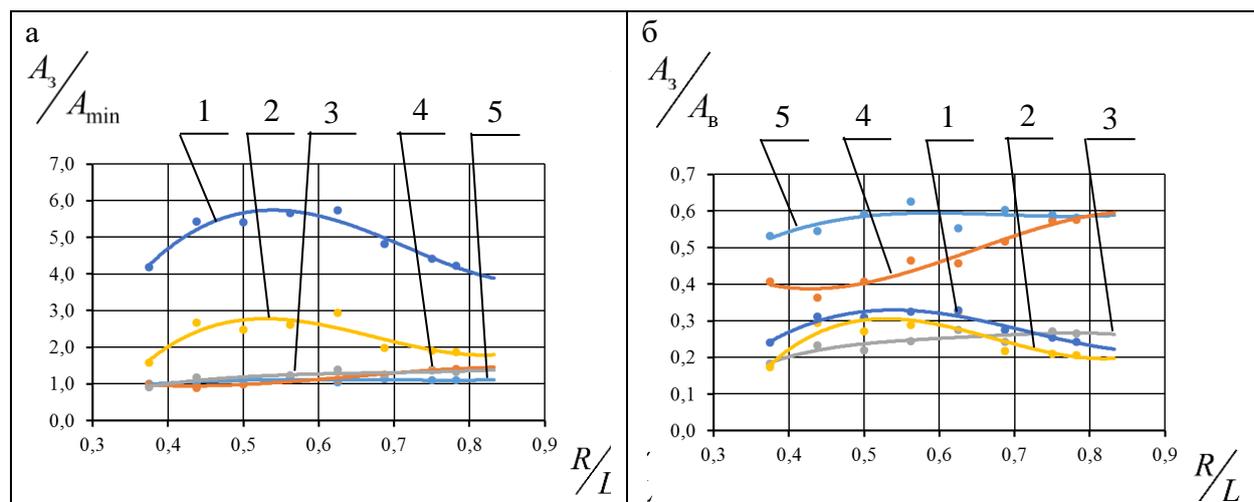
В начальный момент времени все перемещения и скорости вибросистемы были приняты равными нулю.

Полученные результаты показали, что степень влияния кривизны загрузочного участка на амплитуду его поперечных колебаний зависит от частоты вибрации, передаваемой от участка приложения вынуждающей силы (рис. 4).

Вынуждающая сила с угловой частотой 314 рад/с вызывает колебания загрузочного участка с минимальной амплитудой (рис. 4 а, кривая 5), но и с наименьшим затуханием относительно амплитуды на участке, соответствующем площадке крепления вибровозбудителя (рис. 4 б, кривая 5), в независимости от радиуса кривизны R . Это объясняется тем, что колебания высокой частоты при неизменной вынуждающей силе виброисточника имеют малую амплитуду, но волновое движение рабочего органа, обеспечиваемое ими, характеризуется и малой длиной волны, поэтому передается по криволинейной траектории с меньшими потерями энергии. В рассматриваемом диапазоне изменения R эти потери были практически не заметны.

С ростом амплитуды и длины волны повышается затухание вибрации загрузочного участка. Как показывают полученные результаты, колебания с угловой скоростью ниже 110

рад/с передаются с наименьшим затуханием и имеют наибольшее значение в исследуемой точке рабочего органа при радиусе R , составляющем 0,45 – 0,65 от габаритной длины L .



угловая частота вынужденных колебаний: 1 – 63 рад/с; 2 – 110 рад/с; 3 – 157 рад/с;
4 – 235 рад/с; 5 – 314 рад/с;

A_{\min} – амплитуда колебаний минимальная на загрузочном участке при всех частотах;
 A_B – амплитуда колебаний на участке приложения вынуждающей силы для каждой конкретной частоты

Рис. 4. Зависимость амплитуды колебаний загрузочного участка рабочего органа A_3 от радиуса его кривизны R , принятого в пропорции к длине рабочего органа L

Таким образом, изменение кривизны загрузочного участка упругого рабочего органа в диапазоне $(0,37 - 0,78)L$ практически не влияет на затухание поперечных колебаний высокой частоты, передаваемых вдоль транспортирующей поверхности вибропитателя, а при передаче колебаний с круговой частотой менее 110 рад/с даже способствует его снижению, тем самым не только улучшая условия выпуска сыпучего материала, но и его производительность.

Выводы. Благодаря своим достоинствам вибрационные питатели «Волна» с криволинейным упругим рабочим органом, созданные в ИГД СО РАН, дают возможность улучшить условия выпуска сыпучих материалов и могут использоваться как самостоятельные машины, так и комплектующие более сложной техники. Оборудованные пневматическими вибровозбудителями «Напор» они могут эффективно применяться при добыче как руды, так и угля.

В результате численного эксперимента установлено, что при приложении вынуждающей силы с круговой частотой выше 230 рад/с кривизна загрузочного участка рабочего органа с радиусом $(0,37 - 0,78)L$ одинаково влияет на затухание его колебаний и может быть принята в этом диапазоне в зависимости от условий закрепления питателя на месте работы. При частоте менее 110 рад/с рациональный диапазон значений радиуса R снижается до 0,45 – 0,65 от габаритной длины вибротранспортирующей поверхности.

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. Ляшенко В.И., Дятчик В.З., Франчук В.П. Совершенствование конструкций вибрационных питателей-грохотов для горной промышленности // Горная промышленность. – 2014. – № 2(114). – С. 100–102.
3. Ляшенко В.И., Дятчин В.З., Франчук В.П. Исследование, динамический расчет и совершенствование малогабаритного вибрационного питателя для подземных горных работ // Известия ВУЗов. Горный журнал. – 2018. – № 5. – С. 102–110.
4. Сайлаубек Е.Т. Шнековый питатель для транспортировки угля // Студенческий форум. – 2017. – № 19 (19). – С. 24–26.
5. Клишин В.И., Клишин С.В. Исследование процессов выпуска угля при отработке мощных пологих и крутых угольных пластов // ФТПРПИ. – 2010. – № 2. – С. 69–81.
6. Особенности выпуска подкровельной (межслоевой) толщи угля механизированными крепями / В.И. Клишин, Ю.С. Фокин, Д.И. Кокоулин, Кубанычбек уулу Бакыт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 6. – С. 206–210.
7. Клишин В.И., Кубанычбек уулу Бакыт. Влияние параметров механизированной крепи на принудительный выпуск самообрушающегося угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 1. – С. 327–331.
8. Технология подземной добычи руд на основе применения комбинированных комплексов самоходного и вибрационного оборудования / В.В. Шказпетин, Д.Р. Каплунов, А.Я. Тишков [и др.] // Горный журнал. – 1986. – № 6. – С. 44–46.
9. Энергосберегающие вибрационные устройства для выпуска связных материалов из емкостей на предприятиях горной промышленности / С.Я. Левенсон, Л.И. Гендлина, Т.Г. Глотова [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2010. – № 10. – С. 8–12.
10. Levenson S. Ya., Gendlina L.I., Eremenko Yu.I. Operational Background and the Outlook for the Vibration Machine Equipped with an Elastic Executor in the Mining Industry // Congress Proceedings of 21st World Mining Congress & Expo. – Poland, Krakow, 2008. – P. 75–79.
11. Вибромашины для подземных и открытых горных работ / С.Я. Левенсон, Л.И. Гендлина, Ю.И. Еременко [и др.] // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. трудов VI междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2008. – С. 34–38.
12. А.с. № 1641735 СССР. Пневматический вибровозбудитель / А.Я. Тишков, П.В. Родионов, Д.А. Райник, В.А. Чекушкин, Л.В. Зимонин. – Оpubл. БИ № 14, 1991.
13. А.с. № 1748884 СССР. Пневматический вибровозбудитель / А.Я. Тишков, П.В. Родионов, Б.Н. Смоляницкий, Д.А. Райник. – Оpubл. БИ № 27, 1992.
14. Патент № 118950 РФ. Пневматический вибровозбудитель / Л.И. Гендлина, С.Я. Левенсон, А.В. Морозов, В.А. Голдобин, В.М. Усольцев; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук. – № 2012116147/11; заявл. 20.04.2012; опубл. 2012.
15. Зимонин Л.В. Разработка вибропитателей с упругим криволинейным рабочим органом: дис. канд. техн. наук: спец. 05.05.06. – Новосибирск, 1986. – 164 с.
16. Зимонин Л.В. Исследование производительности криволинейной виброленты // Виброударные процессы в строительном производстве: сб. науч. тр. – Новосибирск, 1986. – С. 23–27.
17. Зимонин Л.В. Повышение эффективности выпуска руды с использованием вибролент // Научные основы механизации открытых и подземных горных работ: сб. науч. тр. – Новосибирск, 1983. – С. 17–21.
18. Гендлина Л.И., Зимонин Л.В., Суворов И.Б. Способ определения коэффициента постели упругого основания // Научные основы механизации горных работ: сб. науч. тр. – Новосибирск, 1986. – С. 28–31.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ И РЕИНЖИНИРИНГ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ

д.т.н. Чинахов Д.А., к.т.н. Чернухин Р.В., Алимов А.А., Филиппов В.В.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. Износ и поломка уникальных деталей угледобывающего комплекса приводит к остановке процесса угледобычи на продолжительное время и экономическим потерям. Быстрое восстановление детали или замена на новую деталь, изготовленную по российским технологиям, позволит снизить расходы и простои оборудования при ремонте. Технология реинжиниринга в сочетании с технологией аддитивного производства электродуговой наплавкой является одной из наиболее перспективных, с точки зрения номенклатуры и стоимости расходных материалов. Обладает высокой производительностью и обеспечивает требуемые механические свойства деталей.

Ключевые слова: аддитивное производство, сварка, высокопрочная сталь, восстановление, реинжиниринг, свойства.

В современных реалиях угольная промышленность испытывает повышенный спрос и нехватку деталей и узлов импортной техники, которые выходят из эксплуатации. Вопросы ремонта, восстановления, реинжиниринга и импортозамещения деталей и узлов ответственного назначения и сложной формы вышли на первое место. Крупные габариты и уникальность деталей вызывает ряд трудностей при транспортировке и ремонте. Уникальные детали конструкций угледобывающего комплекса обеспечивают его работоспособность и выход их из строя приводит к остановке процесса угледобычи на продолжительное время и к экономическим потерям. Быстрое восстановление детали или замена на новую деталь, изготовленную по российским технологиям, позволит снизить расходы и простои оборудования при ремонте.

Одной из основных задач современного машиностроения является улучшение технико-экономических показателей на основе снижения удельной металлоемкости конструкции, увеличения эксплуатационной надежности и долговечности с одновременным уменьшением ресурсо- и трудозатрат. Для этого в производстве применяют высокопрочные стали с пределом текучести 550...950 МПа (30ХГСА, 12Х2НЧА, 50Г, 40Х и др.). Они обеспечивают высокую прочность и работоспособность конструкции при одновременном снижении ее металлоемкости. Однако при сварке данных сталей под воздействием термического цикла в зоне термического влияния (ЗТВ) формируются закалочные структуры, как правило, характеризующиеся большим значением твердости и малой вязкостью, что увеличивает вероятность образования холодных трещин и разрушений сварных соединений. Многие детали и узлы угледобывающего оборудования изготавливают из высокопрочных сталей, которые требуют специальные технологии ремонта и восстановления, иногда с применением предварительного подогрева и последующей термообработки [1, 3].

В работе [4] авторы указывают на целесообразность снижения температуры предварительного подогрева, а послесварочную термообработку рекомендуют вообще исключить из процесса изготовления сварных конструкций из высокопрочных сталей.

Известны и другие подходы к решению проблемы повышения качества наплавленного слоя и сварки высокопрочных сталей [5]. Условно их можно разделить на следующие группы:

- металлургические (изменение и добавление легирующих элементов в сварочных материалах);
- технологические (применение различных способов сварки, защитных сред, технологических приемов);

– энергетические (различные способы управления термическим циклом сварки).

Широкое применение при сварке легированных сталей получили аустенитные сварочные материалы, дающие хорошие результаты при правильном подборе аустенитной сварочной проволоки к свариваемой стали и в соответствии с требованиями к эксплуатационным свойствам. Однако соответствующие требованиям сварочные материалы не всегда удается подобрать. Наряду с применением аустенитных сварочных материалов, предлагается использование шагодуговой (с программированием мощности дуги) и двухдуговой сварки под флюсом и в среде CO_2 , дуговой сварки в смеси газов $\text{CO}_2 + \text{O}_2$, $\text{CO}_2 + \text{воздух}$, $\text{CO}_2 + \text{Ar}$ и др., а также добавка в металл шва различных поверхностно-активных элементов (цезий, кальций, бор и др.) и многое другое. Разрабатываются новые технологии: сварка закаливаемых сталей с предварительной наплавкой на кромки слоя низколегированного металла, имеющего небольшое содержание углерода; сварка с послойным заполнением шва низкоуглеродистыми низколегированными сварочными проволоками и аустенитными проволоками высокой прочности и т.д. [5].

Технологии ремонта и восстановления деталей и узлов угледобывающего оборудования из высокопрочных сталей усложняются, увеличивается количество компонентов (дорогостоящих), входящих в сварочные материалы, иногда для обеспечения точности воспроизведения геометрии детали необходимо использовать 3D-сканер.

Технология аддитивного производства электродуговой многослойной наплавкой плавящимся электродом в среде защитных газов является одной из наименее затратных и обладает высокой производительностью [6]. Аддитивное производство позволяет слой за слоем создавать в металле трехмерную модель, спроектированную в системе автоматизированного проектирования [7-9]. На данный момент аддитивное производство и восстановление методом электродуговой сварки набирает популярность в аэрокосмической отрасли, в машиностроении, судостроении и других отраслях [8]. Послойное 3D выращивание изделий электродуговой наплавкой в среде защитного газа с использованием сварочной проволоки позволяет получить более качественный, однородный и плотный наплавленный слой [9]. Это особенно актуально для изготовления и восстановления изделий со сложной геометрией. Однако этот процесс имеет свои недостатки, среди которых значительные остаточные напряжения из-за перегрева металла изделия [6, 10]. В ходе получения изделия путем послойного выращивания происходит неравномерное распределение тепла по его объему, что имеет важное значение при производстве детали больших размеров в различных отраслях промышленности [11]. Значимое влияние оказывают: количество введенного тепла, скорость охлаждения, количество повторных нагревов изделия [12].

Для отработки технологии восстановления деталей сложной формы взяли косозубую шестерню. Восстановление сломанного зуба шестерни до первоначально работоспособности является непростой задачей, которая состоит из нескольких этапов. В первую очередь определили химический состав материала шестерни (табл. 1) и твердость материала.

Таблица 1

Химический состав материала шестерни

| Наименование | Содержание химических элементов, % | | | | | | | | |
|--------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| | C | Mn | Si | P | S | Ni | Cr | Cu | Al |
| Деталь | 0,538 | 0,708 | 0,254 | 0,027 | 0,007 | 0,004 | 0,022 | 0,003 | 0,13 |
| Марка | Материал соответствует стали марки 50Г согласно ГОСТ 4543-71 | | | | | | | | |

Затем выполнили сканирование шестерни и определили форму и параметры зуба шестерни (рис. 1).

В условиях отсутствия технической документации или снижения поставок импортных деталей для различных производственных механизмов и угледобывающих комплексов, часто необходимо восполнять их нехватку или отсутствие путем реинжиниринга.

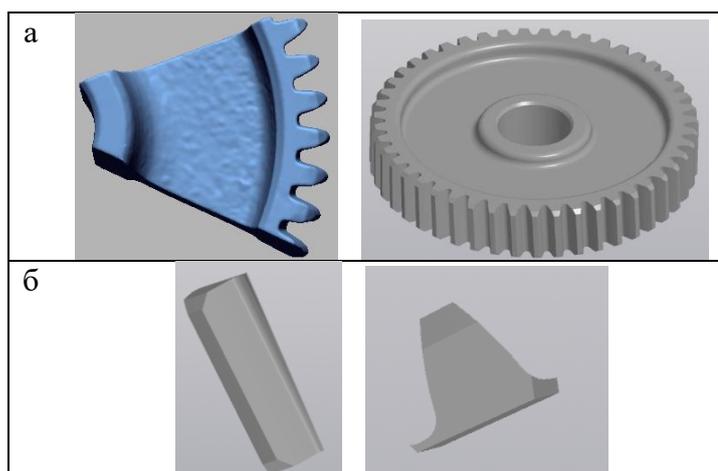


Рис. 1. 3-D модель шестерни (а) и зуба шестерни (б)

Для обеспечения функциональности восстановленного зуба шестерни (элемента) провели подбор сварочных материалов и режимов сварки, выполнили тестовую наплавку элемента (рис. 2) для оценки правильности выбора режима наплавки и количества наплавленных слоев. Полученный наплавленный образец должен превышать геометрические параметры зуба шестерни для придания окончательной формы на станке ЧПУ. После механической обработки и воссоздания геометрических размеров зуба шестерни нужно подобрать параметры режима термобработки. После термообработки выполняется финишная доводка геометрических размеров зуба шестерни и замер твердости.

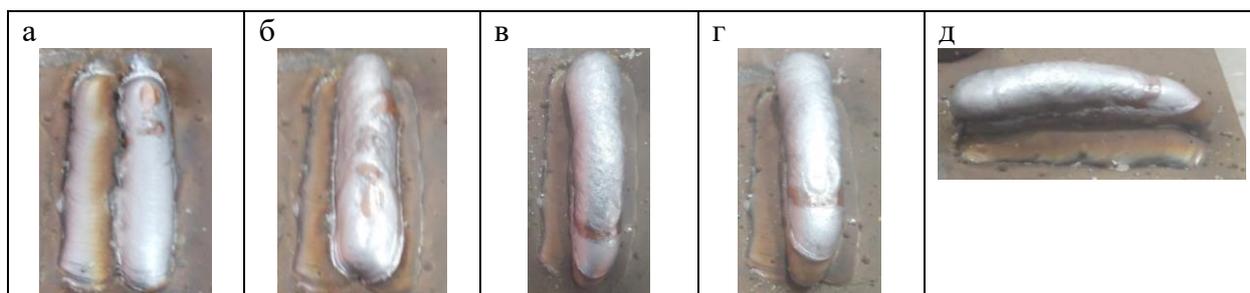


Рис. 2. Наплавленный образец зуба шестерни

Реинжиниринг деталей представляет собой разработку конструкторской и технической документации на основе образца изделия и последующее изготовление изделия. Целью реинжиниринга является максимально быстрое получение технических материалов и документации, по которым будет выполнено производство нужного изделия.

В основном реинжиниринг состоит из следующих этапов.

1. Получение образца детали (узла) и имеющейся информации о ней. Берётся оригинал детали, по которому можно разработать конструкторскую документацию.
2. Выполняется замер параметров детали и 3-D сканирование. Изучаются строение оригинала детали, размер и расположение каждого элемента.
3. Исследование химического состава, твердости, химических покрытий и способов термической обработки (если имеются), использованных в ходе изготовления детали.
4. Проектирование и обработка 3D-модели в компьютерном программном комплексе.
5. Разработка комплекта чертежей и технологических условий для изготовления элементов деталей.
6. Разработка технологии изготовления и маршрутных технологических карт для каждой детали и сборки.

7. Изготовление опытных образцов деталей и испытание их в лабораторных условиях.
 8. Анализ и выявление отклонений готовых деталей от оригинала.
 9. Корректировка конструкторской и технологической документации и доработка технологии изготовления, если это необходимо.
 10. Технологическая документация для выпуска деталей.
- Использование технологии реинжиниринга позволяет обеспечить:
- уменьшение расходов на закупку и поставку запасных деталей, т.к. реинжиниринг предусматривает использование местных материалов;
 - доступность и экономичность необходимых комплектующих независимо от внешних экономических условий;
 - возможность улучшения детали;
 - многократность и постоянство изготовления деталей.

Технология реинжиниринга в сочетании с технологией аддитивного производства электродуговой наплавкой плавящимся электродом в среде защитных газов является одной из наиболее перспективных, с точки зрения первоначальных инвестиций, номенклатуры и стоимости расходных материалов, а также имеет высокую производительностью.

Выводы. Использование технологии аддитивного производства электродуговой наплавки плавящимся электродом в среде защитных газов обеспечивает высокие механические свойства наплавленных материалов, соизмеримые с литым металлом.

Для восстановления и изготовления деталей из высокопрочных сталей можно использовать как промышленные роботы, так и автоматизированные трехкоординатные столы совместно с распространенными источниками питания, горелками и вспомогательным оборудованием, предназначенным для дуговой сварки и наплавки.

Список литературы

1. Миходуй Л.И., Гончар А.К. Особенности сварки толстолистовых конструкций из низколегированных высокопрочных сталей // Автоматическая сварка. – 1990. – № 10. – С. 41-45.
2. Готальский Ю.Н., Новикова Д.П. О механизме предотвращения околошовных трещин при сварке закаливающих сталей с использованием аустенитных материалов // Автоматическая сварка. – 1992. – № 2. – С. 21-25.
3. Готальский Ю.Н. К проблеме сварки высокопрочных сталей // Автоматическая сварка. 1984. № 6. С. 36-40.
4. Миходуй Л.И., Касаткин С.Б. Предварительный и послесварочный подогревы при сварке высокопрочных легированных сталей // Автоматическая сварка. – 2000. – № 1. – С.19-22.
5. Чинахов Д.А. Влияние режимов сварки плавлением на структуру и свойства соединений из легированных сталей: монография. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 114 с.
6. Механические и трибологические свойства металлической стенки выращенной электродуговым способом в среде защитных газов / М.А. Кузнецов, В.И. Данилов, М.А. Крампит [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22. – № 3. – С. 18–32. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-18-32.
7. The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al–6.3 Cu alloy / J. Gu, J. Ding, S.W. Williams [et al.] : Mater Sci Eng A. – 2016. – № 651. – P.18-26.
8. Li R., Xiong J., Lei Y. Investigation on thermal stress evolution induced by wire and arc additive manufacturing for circular thin-walled parts // J Manuf Process. – 2019. – № 40. – P. 59-67.

9. Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting / L.E. Murr, S. Gaytan, A. Ceylan [et al.] // Acta Mater. – 2010. – № 58 (5). – P.1887-1894.

10. Wire+ arc additive manufacturing / S.W. Williams, F. Martina, A.C. Addison [et al.] // Mater Sci Technol. – 2016. – № 32 (7). – P. 641-647.

11. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement / B. Wu, Z. Pan, D. Ding [et al.] // J. Manuf. Process. – 2018. – № 35. – P. 127–139.

12. GMAW Cold Wire Technology for Adjusting the Ferrite–Austenite Ratio of Wire and Arc Additive Manufactured Duplex Stainless Steel Components // J. Stützer, T. Totzauer; B. Wittig [et al.] // Metals. – 2019. – № 9. – 564.

УДК 622.35

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ОРГАНА ЩЕЛЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Новик А.В.

ООО «Автостройкомплект», г. Новосибирск, Россия

Аннотация. Приведен теоретический расчет траектории движения режущего органа (резца) щелеобразователя. Представлена новая конструкция устройства, приведены результаты лабораторных исследований по определению нагрузок, действующих на исполнительный орган в процессе резания.

Ключевые слова: направленный гидроразрыв, щелеобразователь, инициирующая щель, траектория, режущий орган.

Создание на стенках шпура инициирующих щелей (ИЩ), являющихся концентраторами напряжений и задающих ориентацию искусственных трещин, имеет первостепенное значение в технологии направленного гидроразрыва. При этом, чем больше исходный диаметр ИЩ, тем выше вероятность развития искусственной трещины в заданном направлении.

Работы по созданию щелеобразователей – устройств для нарезания инициирующих щелей, велись на протяжении длительного времени многими исследователями, в том числе в ИГД СО РАН и СКБ ПГ СО РАН [1–4]. Однако, создаваемые существующими устройствами инициирующие щели не всегда обеспечивают необходимое распространение трещин в заданном направлении, следовательно, метод направленного гидроразрыва остается малоэффективным. Анализ конструкций щелеобразователей показал, что наиболее перспективным путем их модернизации является изменение траектории движения режущих органов.

Наиболее перспективной с точки зрения практической реализации является параболическая траектория движения режущих органов. Рассмотрим щелеобразователь с параболическими направляющими уклонами (рис. 1).

На рис. 2 а показана схема предполагаемой траектории движения опорной части отдельно взятого резца.

В общем случае уравнение параболы имеет вид:

$$R = aL^2 + bL + c, \quad (1)$$

где R – величина выхода резца из корпуса, L – длина хода толкателя.

Задача определения рациональной траектории движения опорной части резца сводится к поиску неизвестных коэффициентов a , b , c в уравнении (1). Для ее решения выберем прямоугольную декартову систему координат таким образом, чтобы начало координат

совпадало с точкой контакта режущего органа и направляющего уклона в начальный момент времени, отсюда $c = 0$.

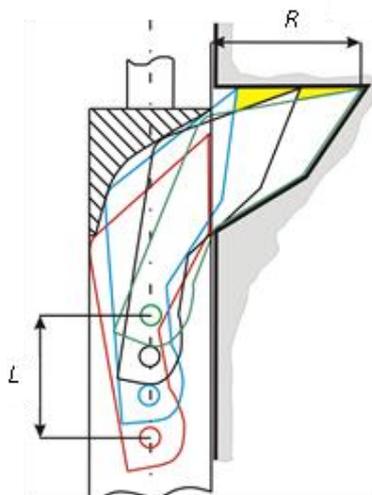


Рис. 1. Траектория движения режущего органа щелеобразователя ЩМ – 45М

С целью исключения заклинивания режущего органа в процессе движения по направляющему уклону на траекторию движения накладывается ограничение – угол трения α между направляющим уклоном и режущим органом не должен превышать 20° . Исходя из этого, уравнение касательной имеет вид:

$$R - R_0 = f'(L_0)(L - L_0), \quad (2)$$

где $f'(L_0)$ – производная функции R в точке L_0, R_0, L_0 .

По координатам точки касательной к графику функции определяем $b = 0,17$.

Коэффициент a находится из условия: при $L = 32,5$ мм $R = 42,5$ мм.

Таким образом, уравнение траектории движения режущего органа примет вид:

$$R = 0,03L^2 + 0,17L. \quad (3)$$

На рис. 2 б показана зависимость величины выхода R от длины хода L толкателя в соответствии с формулой (3).

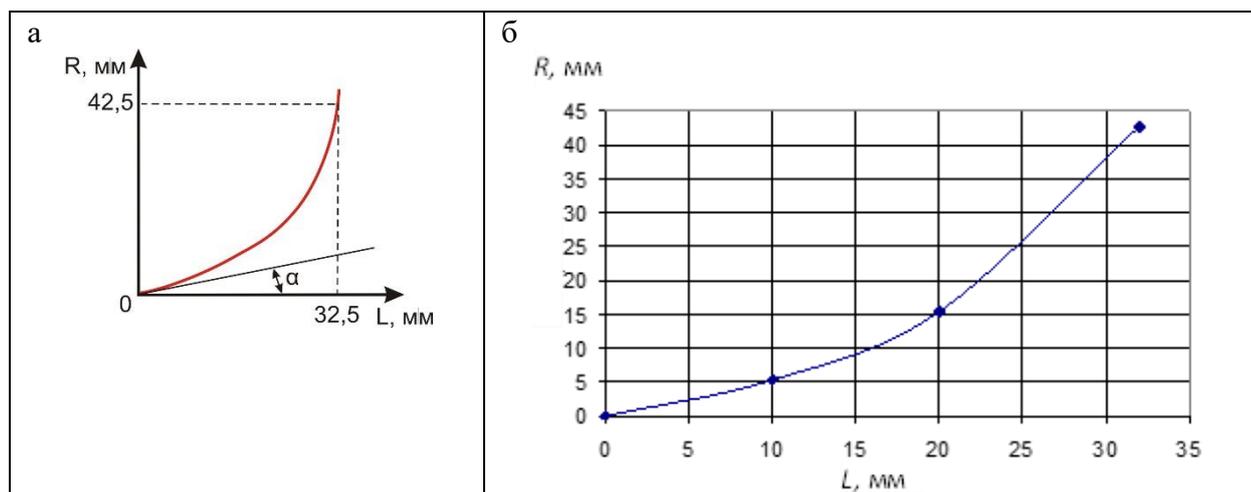


Рис. 2. Траектория движения режущего органа щелеобразователя:

а – схема параболической траектории движения опорной части резца щелеобразователя ЩМ – 45М; б – зависимость величины выхода резца (R) от длины хода (L)

Таким образом, изменение профиля направляющих уклонов позволяет увеличить радиус нарезаемой иницирующей щели до 42,5 мм, а, следовательно, повысить вероятность развития трещины в плоскости ее заложения.

По результатам проведенных исследований, совместно с сотрудниками ИГД СО РАН была разработана и изготовлена модернизированная конструкция щелеобразователя ЩМ – 45М [5], в которой выход режущих органов из корпуса осуществляется по найденной траектории. На рис. 3 а представлена кинематическая схема щелеобразователя ЩМ – 45М, а на рис. 3 б его внешний вид.

Устройство работает следующим образом. Щелеобразователь устанавливается на буровой штанге после окончания бурения скважины и вводится в нее с буровым ставом до упора в забой. Под действием осевого усилия со стороны станка толкатель 3 начинает поступательно вдвигаться в корпус 1, а режущие органы 4 по направляющим уклонам 7 выходят режущей частью из корпуса 1 через продольные окна 2 и нарезают в стенках шпура иницирующую полость (щель) тарельчатой формы в плоскости перпендикулярной оси шпура. После завершения работы толкатель 3 возвращается в исходное положение под действием усилия со стороны пружины возврата 8, а режущие органы 4 занимают первоначальное положение под действием фигурных пружин 6.

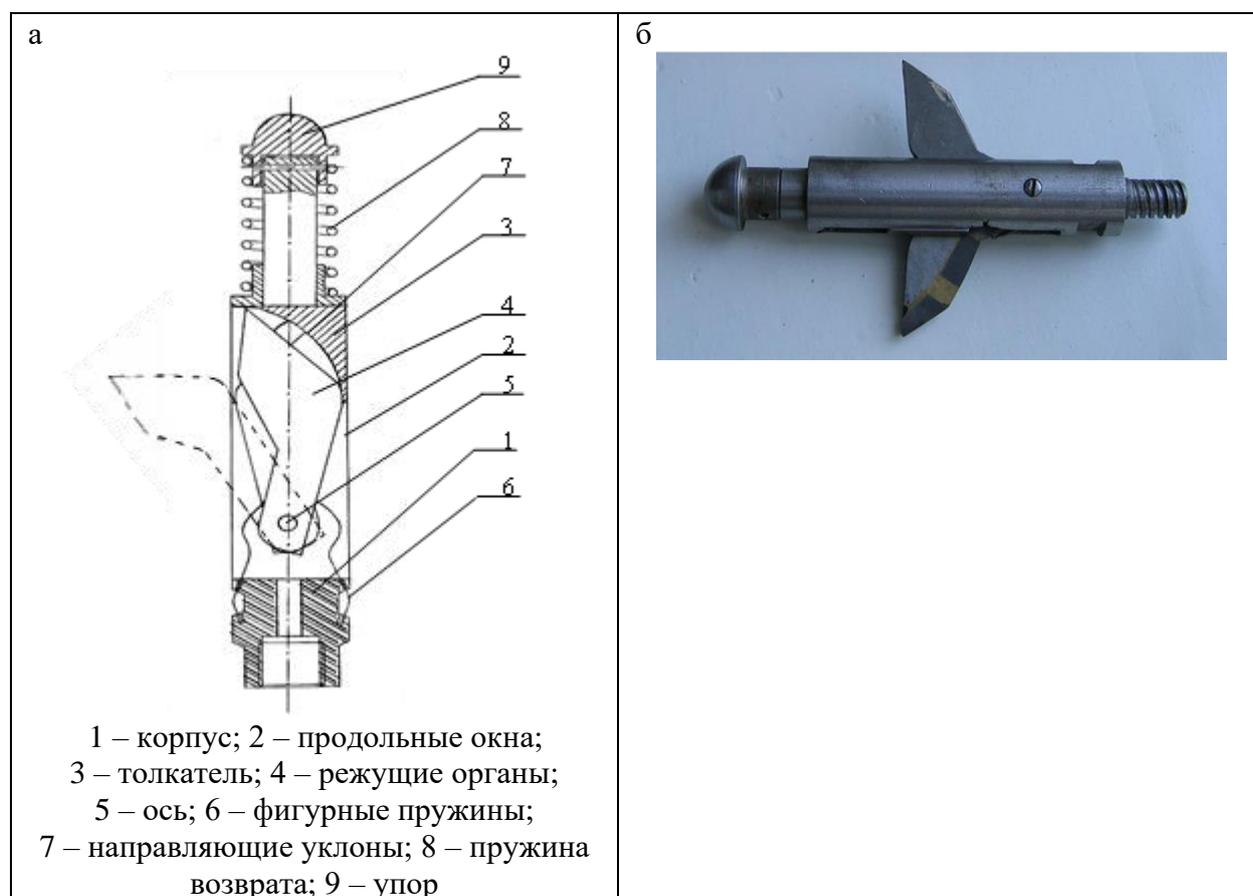


Рис. 3. Щелеобразователь ЩМ – 45М: а – кинематическая схема щелеобразователя ЩМ – 45М; б – внешний вид щелеобразователя ЩМ – 45М с выдвинутыми резцами

С целью выбора рационального режима работы щелеобразователя (создание до 100 щелей без замены резцов) были определены нагрузки, действующие на режущий орган при различных значениях усилия подачи по мере увеличения глубины иницирующей щели.

На рис. 4 представлены зависимости усилия резания от осевой нагрузки (усилия резания) при нарезании иницирующей щели.

Значения осевых нагрузок на инструмент выбирались исходя из характеристик бурового станка, наиболее широко распространенного на шахтах Кузбасса при бурении шпуров диаметром 45 мм (станки типа БЖ – 45 – 100 Э).

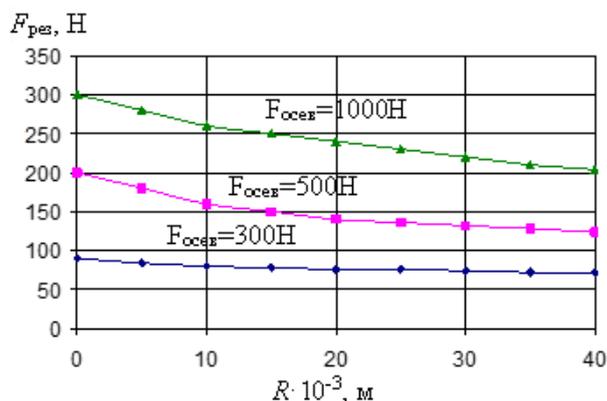


Рис. 4. Зависимость усилия резания при различных значениях осевой нагрузки

Вывод. Как видно из зависимостей, представленных на рис. 4, новая траектория движения режущих органов ЦМ – 45М и их конструкция обеспечивают благоприятный режим работы инструмента, так как с увеличением глубины иницирующей щели (или выхода резца R) нагрузки на режущий орган $F_{рез}$ уменьшаются. При данной конструкции щелеобразователя обеспечивается более интенсивная подача промывочной жидкости в рабочую зону, что также повышает долговечность режущих органов, а увеличенный радиус ИЩ повышает вероятность развития искусственной трещины в заданной плоскости.

Список литературы

1. Клишин В.И. Адаптация механизированных крепей к условиям динамического нагружения. – Новосибирск: Наука, 2002. – 199 с.
2. Чернов О.И., Леконцев Ю.М., Кодола В.В. Применение флюидоразрыва для разупрочнения подкровельной толщи при отработке мощных пологих пластов // Уголь. – 2000. – № 9. – С. 17 – 19.
3. Кю Н.Г., Шепелев Л.Н. Устройства для прорезания в скважинах иницирующих щелей // Управление горным давлением в комплексно – механизированных забоях. Вопросы горного давления: сб. трудов. – Новосибирск. – 1989. – Вып. № 47. – С. 44 – 53.
4. Авторское свидетельство СССР №1458569. Устройство для образования щелей на стенках скважин. / О.И. Гребенник, О.И. Чернов, В.Г. Зарубин, Л.В. Зворыгин, Р.С. Прасолова, Н.П. Патрушев, С.Ф. Аверьянов ; опубл. 1989, Бюл. № 6.
5. Пат. №2263776 РФ. Щелеобразователь / В.И. Клишин, Ю.М. Леконцев, П.В. Сажин ; опубл. 2005, Бюл. № 31.

УДК 622.817.3:234.573

АППАРАТ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ РЕЗКИ ПОРОД И РАСШИРЕНИЯ СКВАЖИН В ГОРНОМ МАССИВЕ

Альвинский Я.А., Григорьев А.А., Мананников С.Д., Никитина А.М.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Представлено техническое решение расширения дегазационных скважин с использованием аппарата гидравлической резки горных пород и формирования дискообразных полостей. Предложен алгоритм расчёта параметров гидравлической струи и производительности гидроструйного аппарата. Реализация технического решения обеспечивает расширение скважин и увеличения коэффициента дегазации газоносных угольных пластов при подземной разработке месторождений полезных ископаемых.

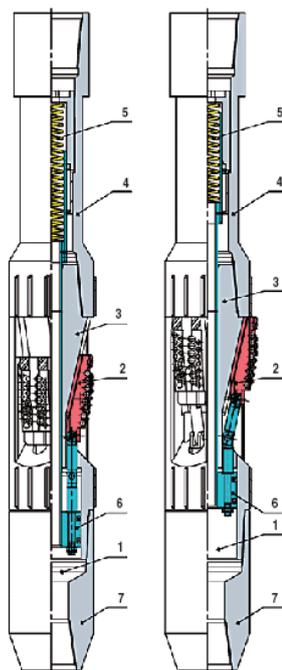
Ключевые слова: дегазационная скважина, скважинные расширители, гидроструйный аппарат, дискообразные полости, метан, угольный пласт, алгоритм.

Повышение эффективности работы угольных шахт в современных условиях связано с ростом нагрузок на очистной забой, которые могут ограничиваться в связи с увеличением притоков метана из угольных пластов [1,8-10]. По мере углубления горных работ ситуация осложняется вследствие повышения газоносности угольных пластов. Обеспечение безопасности горных работ является важнейшим условием эффективной отработки угольных месторождений на сегодняшний день, поэтому разработка новых или усовершенствование существующих технологий дегазации пластов с помощью внедрения новых способов и технических средств для этих целей является весьма актуальным.

Основными требованиями к новым способам дегазации являются их стоимость и эффективность. Классические методы дегазации бурением сетки скважин не дают необходимого эффекта из-за малой плотности дегазационных скважин в выемочном столбе и низкой интенсификации метаноотдачи угольного пласта по скважинам малого диаметра.

Для повышения коэффициента дегазации необходимо увеличить площадь обнажения или разрыхления угольного пласта. Это достигается посредством увеличения количества скважин, площади их поперечного сечения или гидроразрывом пласта. Согласно результатам опытной дегазации при уплотнении сетки скважин эффект дегазации существенно не возрастает. Гидроразрыв пласта теоретически намного эффективнее, но на практике он является трудно управляемым процессом и в некоторых случаях его эффективность значительно снижается и практически равна дегазации обычными скважинами [4-8].

Как показывает практика применения скважинных расширителей на нефтяном и газовом промысле, способ является довольно действенным, но имеет ряд недостатков, таких как ограниченность размеров расширения, долговечность агрегата и возможность его применить на угольных месторождениях. Применяемые на промысле расширители создают в горных породах полости большого объема со сравнительно небольшими площадями обнажения из-за конструктивных особенностей агрегата, представленных на рис. 1 [2].



1 – гидрокамера; 2 – плашка с резами PDC; 3 – корпус; 4 – верхний переводник;
5 – пружина; 6 – поршень; 7 – нижний переводник

Рис. 1. Расширитель раздвижной РРМ 216/240: а – в транспортном положении;
б – в рабочем положении [2]

Представленный агрегат создает небольшие расширения скважин, очень малой площади обнажения, применение которых для дегазации угольных пластов не принесет эффекта. Для создания полостей большего объема применяют расширители схожей конструкции, представленные на рис. 2 [3].

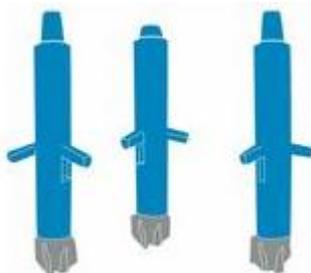


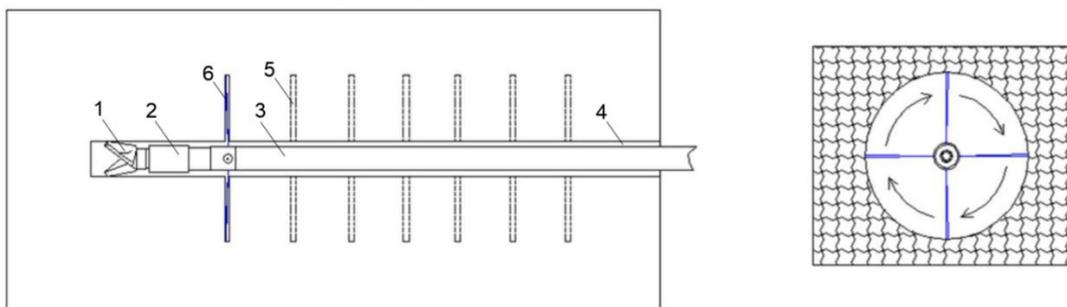
Рис. 2. Расширитель скважин для мягких и средних пород [3]

Данный агрегат применяется на мягких породах создавая цилиндрические или полусферические расширения диаметром до 600 мм. применение данного агрегата для расширения скважин в угольном пласте теоретически повысит коэффициент дегазации, но при расширении этим методом возникнет большое количество буровой мелочи, возможность извлечения которой затруднено через скважины малого диаметра.

Увеличение площади сечения скважин можно добиться увеличением диаметра бурового инструмента или применением скважинных расширителей. Однако при этом возникают проблемы обеспечения устойчивости мягких пород на стенках скважины.

В настоящей работе предлагается новый способ повышения эффективности дегазации посредством изменения структуры угольного массива в окрестности дегазационных скважин при увеличении площади их поперечного сечения на отдельных участках нарезкой дискообразных полостей.

Поставленная задача заключается в создании инструмента способного образовать полости максимально возможной площади обнажения при минимальном ее объеме. Такими характеристиками обладает диск. Для нарезки дискообразных полостей предлагается создание гидравлического расширителя. Метод нарезки полостей таким инструментом заключается в возможности резания горных пород струями воды высокого давления с вращением агрегата в полости скважины (рис. 3).



1 – буровая коронка; 2 – аппарат гидравлической резки; 3 – буровая штанга; 4 – скважина;
5 – нарезаемая полость; 6 – струя воды

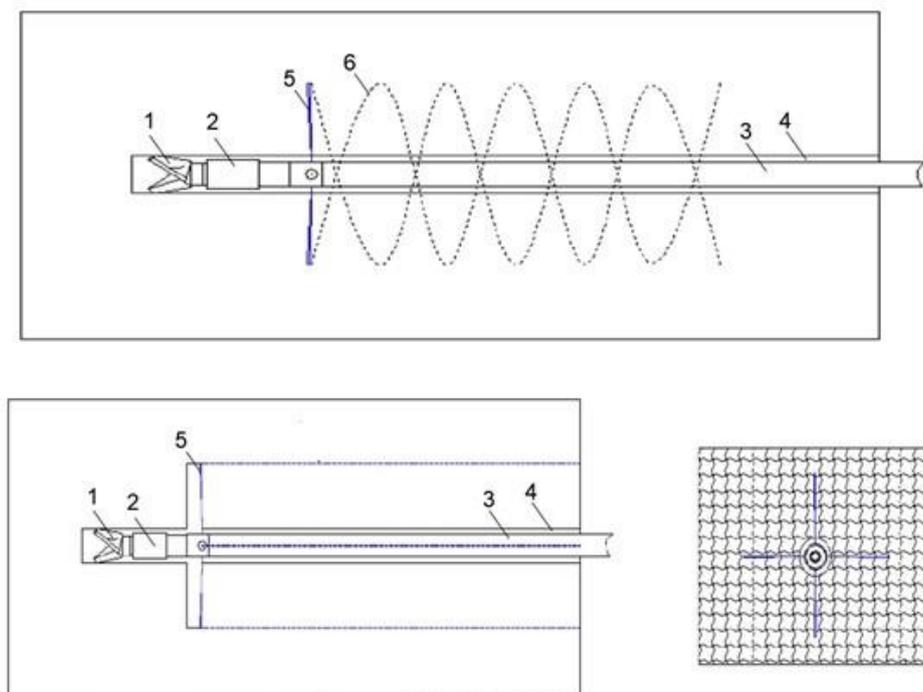
Рис. 3. Схема нарезки дискообразных полостей

Аппарат предусматривает резку массива обратным ходом, то есть после бурения скважины, когда рабочий орган извлекают из скважины, попутно осуществляют резку. Преимуществом данного способа является его универсальность, так как он не имеет ограничений по прочности и вязкости пород, а также по диаметру создаваемых полостей, так как эти показатели зависят только от подаваемого в аппарат давления рабочей жидкости.

Применение данного аппарата не ограничивается дисковым способом резки массива. Возможности инструмента позволяют производить крестовую (звездообразную, в

зависимости от количества форсунок) резку массива путем его извлечения - удаления от забоя скважины, без вращения бурового инструмента (рис. 4).

При совмещении вращательного и поступательного движения появляется возможность создания спиралевидных разрезов массива или же размыва полостей цилиндрической формы. Также планируется применение данного аппарата для расширения скважин и полостей различного назначения: при размыве грунтов, гидравлической добычи растворяемых в воде полезных ископаемых.



1 – буровая коронка; 2 – аппарат гидравлической резки; 3 – буровая штанга; 4 – скважина; 5 – струя воды; 6 – траектория движения жидкости

Рис. 4. Крестовая и спиральная схемы резки

Ниже приведен алгоритм расчета параметров резки массива с применением аппарата гидравлического расширения скважин.

Расход воды. Расход воды через форсунку гидроструйного аппарата Q_{ϕ} , м³/с, определяется по формуле [1]:

$$Q_{\phi} = \mu \frac{\pi d_{\phi}^2}{4} \sqrt{\frac{2P}{\rho}}, \quad (1)$$

где P – рабочее давление в Па, $P = 12$ МПа; ρ – плотность технической воды, кг/м³; d_{ϕ} – диаметр насадка, м, $d_n = 0,005$ м; μ – коэффициент расхода для коноидальных насадок = 0,97; для других = 0,95.

Аналогично проводятся расчеты расхода воды через промывочные каналы $Q_{п.к.}$, м³/с:

$$Q_{п.к.} = \mu \frac{\pi d_{п.к.}^2}{4} \sqrt{\frac{2P}{\rho}}. \quad (2)$$

Расход воды гидроструйного аппарата определяется по формуле:

$$Q = nQ_{\phi} + \sum Q_{п.к.}, \quad (3)$$

где n – количество форсунок.

Производительность гидроструйного аппарата по углю. Теоретическая производительность гидроструйного аппарата по углю, $\Pi_{теор}$, т/с определяется, как:

$$\Pi_{теор} = Q\Psi, \quad (4)$$

где Ψ – теоретическая консистенция, т.е. отношение массы твердого (отбитого) к массе израсходованной воды, взятых за один и тот же промежуток времени. В расчетах Т:Ж принимается равным не более $1/3=0,33$ для обеспечения гидротранспорта.

Эксплуатационная производительность, $\Pi_э$, т/с (по углю).

$$\Pi_э = \Pi_{теор} K_H, \quad (5)$$

где K_H – коэффициент, учитывающий неравномерность подачи воды в гидроструйный аппарат ($K_H = 0,86 \div 0,7$).

Глубина струйного разрыхления массива. Глубина струйного разрыхления массива равна l_p – рабочей длине гидромониторной струи, м:

$$l_p = \frac{K_\phi d_H}{E} \sqrt{\frac{P}{P_K} - 1}, \quad (6)$$

где K_ϕ – коэффициент формы потока, зависит от проточной части ствола и составляет 0,70-1,5; d_H – диаметр насадки, м (0,005 м); E – коэффициент турбулентной структуры струи.

$$E = 10^{-3} \left(2,2 + 5,35 \cdot 10^{-6} \frac{Q}{\gamma D_{ств}} \right), \quad (7)$$

где $D_{ств}$ – диаметр проточной части ствола гидроструйного аппарата, равный диаметру форсунки.

Время нарезки полостей. Теоретическое время нарезки дисковой полости $T_{нар.т}$, мин, определяется по формуле:

$$T_{нар.т} = (\pi l_p^2 N_{пол.}) \div 60 Q \Psi = (\pi l_p^2 N_{пол.}) \div 60 \Pi_{теор.}, \quad (8)$$

где $N_{пол.}$ – глубина полости, для дисковых полостей равна $N_{пол.} = 3d_\phi$.

Теоретический расход воды, затрачиваемой на нарезку полостей в одной скважине, вычисляется по формуле:

$$Q_t = Q_\phi n_\phi n_\pi T_{нар.т}, \quad (9)$$

где n_ϕ – количество форсунок; n_π – количество полостей, вычисляемое по формуле:

$$n_\pi = \frac{L_{скв} - l_{пгд}}{l_{шаг}}, \quad (10)$$

где $L_{скв}$ – длина скважины; $l_{пгд}$ – длина зоны повышенных напряжений в массиве; $l_{шаг}$ – шаг нарезки полостей.

Площадь обнажения массива одной дискообразной полостью $S_{пол.}$, м², вычисляется по формуле:

$$S_{пол.} = 2\pi l_p^2 + 2\pi l_p N_{пол.} \quad (11)$$

Площадь обнажения массива видоизмененной скважиной $S_{скв}$, м² вычисляется по формуле:

$$S_{скв} = (L_{скв} - N_{пол.} n_\pi) \pi D_{скв} + \frac{\pi D_{скв}^2}{4} + (S_{пол.} n_\pi). \quad (12)$$

Выводы. Применение гидравлического расширителя повысит площадь обнажения и интенсификацию метаноотдачи угольного пласта. За счет повышения газопроницаемости пласта планируется повышение метаноотдачи. Способность аппарата гидравлической резки пород и расширения скважин в горном массиве создавать дискообразные полости положительно изменит показатели угольных шахт за счёт снижения количества буровой мелочи в сравнении с механическими раздвижными расширителями. Применение жидкости в качестве инструмента резания создает возможность применения агрегата как на мягких и вязких породах, так и на породах с высокой крепостью.

Список литературы

1. Домрачев А.Н., Риб С.В., Никитина А.М. Выбор и обоснование алгоритма моделирования работы длинного очистного забоя с учетом влияния неравномерности метаноотделения // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 44-45.

2. Бурение и нефть: Инструменты для разобщения пластов. – URL: <https://burneft.ru/archive/issues/2014-06/8>

3. Раздвижные расширители – URL: <https://drillmarket.ru/shop/rasshiriteli-skvazhiny/razdvizhnye-rasshiriteli/>
4. Мерзляков В. Г. Гидроструйные технологии в горном деле. Основные результаты научно-исследовательских работ // Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – № 2. – С. 6-11.
5. Жабин А. Б., Поляков А. В., Хачатурян В. Г. Исследование закономерностей разрушения горючих сланцев высокоскоростными струями воды // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2016. – № 3. – С. 135-141.
6. Хачатурян В. Г. Разрушение горючих сланцев высокоскоростными струями воды по щелевой схеме: Автореф. дис.... канд. техн. наук. – Тула: ТулГУ, 2016. – 16 с.
7. Комбинированная разработка угольных месторождений с рекультивацией нарушенных земель: монография / Вал. В. Сенкус, А.Ю. Ермаков, Н.М. Качурин, В.В. Сенкус. – Кемерово: АИ «Кузбассвуиздат», 2017. – 267с.
8. Подготовка и разработка высокогазоносных угольных пластов: справ. пособие / Под общ. ред. А.Д. Рубана, М.И. Щадова. – М.:Издательство «Горная книга», 2010. – 500 с.
9. Оценка газоносности угольного пласта в границах выемочного участка шахты / Д.М. Борзых, А.М. Никитина, С.В. Риб, Е.М. Кузив // Вестник СибГИУ. – 2021. – № 3 (37). – С. 37-44.
10. Численное исследование напряженно-деформированного состояния приконтурного массива в окрестности проводимой горной выработки / А.М. Никитина, Д.М. Борзых, С.В. Риб, А.С. Лесных // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2021. – № 7. – С. 119-123.

УДК 622.243.2

ПРИМЕНЕНИЕ ИННОВАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ШАХТНОГО НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН

**¹к.т.н. Волошин В.А., ¹к.т.н. Риб С.В., ²Рахимкулов И.Р., ²Гончаров Р.С.,
²Черняк М.Г., ³Галимов Р.Н.**

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

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

3 – ПАО «Распадская», г. Междуреченск, Россия

Аннотация. Описан уникальный положительный опыт проведения водоспускных скважин буровым комплексом направленного бурения типа РСЗ-40, отвечающий требованиям промышленной безопасности, в условиях ПАО «Распадская». Буровой комплекс РСЗ-40 был установлен в горной выработке пласта 7-7а, а конечная точка проводимых скважин располагалась в затопленном вентиляционном штреке вышележащего пласта 15. При производстве работ было с точностью 10см рассчитаны траектории скважин, пролегающие через семь угольных пластов в сложных горно-геологических условиях (различная мощность, газоносность и структурная нарушенность). Перепад высот составил более 220м. Проведены скважины методом направленного бурения длиной до 444м для спуска воды из затопленной одиночной выработки. После подтверждения технической возможности и эффективности уникального опыта бурения направленных водоспускных скважин этой же компанией ООО «ДМТехнологии» были выполнены работы по проведению аналогичных водоспускных скважин с пласта 6-6а в горные выработки пласта 9. Обозначены перспективы направленного бурения при решении сложнейших технических задач со значительным усложнением горно-геологических условий на угольных шахтах.

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

Актуальность

При подземной разработке угольных пластов кроме общей повышенной опасности, при ведении горных работ на отдельных участках возникают особо опасные ситуации – опасные зоны, в пределах которых требуется осуществлять дополнительные меры безопасности (рис. 1).

Опыт работы угольных шахт в опасных зонах за последние годы указывает на производственный и научный интерес к вопросу усложнения условий.

Широкое распространение получило бурение скважин направленного бурения при решении задач, связанных со спуском воды из затопленных выработок, дегазацией массива и др. В настоящее время трудно найти шахту, где бы ни производилось бурение скважин. По целевому назначению скважины подразделяют на разведочные, нагнетательные, дегазационные, опережающие, разгрузочные, технологические.



Рис. 1. Виды опасных зон [1]

Актуальность исследования вызвана необходимостью достижения высокой точности при проведении скважин методом направленного бурения в углепородном массиве, что невозможно достичь при роторном бурении.

Задача организации спуска воды из затопленных выработок посредством применения новых решений представляет значительный интерес для угольных шахт.

Существует опыт организации регулируемого дренирования (водопуска) подземных вод посредством возведения водоупорных перемычек в сопряжениях вертикальной выработки с горизонтальными, возведения вокруг перемычек и по длине ствола противотрационной тампонажной завесы, сооружения дренажных и водопускных скважин [2, 3], что влечет за собой высокие финансовые затраты и не всегда возможно с технической точки зрения.

В качестве объекта исследований принят углепородный массив ПАО «Распадская». На шахте отрабатываются угольные пласты 6-6а и 7-7а, которые находятся под влиянием опасной зоны от затопленных горных выработок на вышележащих, соответственно, пластах 9 и 15.

Соблюдение проектной (и нормативной) технологии спуска воды из затопленных выработок ПАО «Распадская» привело бы к проведению специальных мероприятий и негативно отразилось на показателях работы горного предприятия.

В подобных условиях реальное снижение сроков выполнения работ по спуску воды было достигнуто внедрением новых решений.

Специалисты ПАО «Распадская» провели тендерную процедуру по поиску компаний с инновационными разработками. Компания ООО «ДМТехнологии» подтвердила своё

намерение выполнить поставленную задачу, предложив портфель уже выполненных работ по горной тематике.

На основании технического задания на выполнение комплекса работ по бурению технических скважин ПАО «Распадская» методом направленного бурения специалистами компании ООО «ДМТехнологии» была разработана технология бурения водопускных скважин.

Для бурения водопускных скважин применялся буровой комплекс направленного бурения типа РСЗ-40 компании «Группа ФИД. Инновационное оборудование», республика Беларусь (рис. 2, табл. 1).

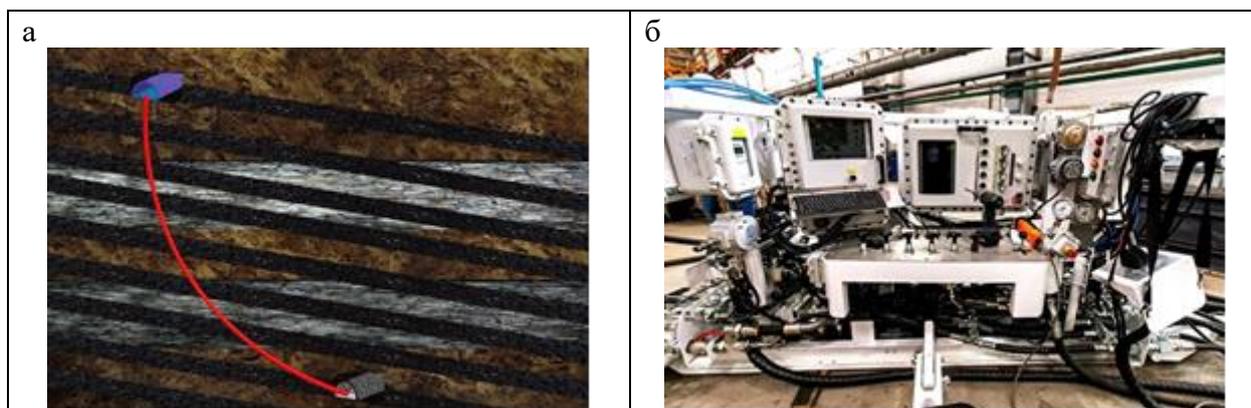


Рис. 2. Ликвидация опасных зон у затопленных горных выработок на ПАО «Распадская»: а – схема бурения водопускных скважин; б) модуль управления бурового комплекса РСЗ-40

Буровой комплекс предназначен для направленного бурения горизонтальных, пологонисходящих и пологовосходящих скважин из горных выработок угольных шахт, опасных по газу и пыли, как роторным способом, так и с применением винтового забойного двигателя (ВЗД) совместно с системой направленного бурения (СНБ) диаметром 76 мм на глубину до 1500м.

Инновационный буровой комплекс для направленного бурения нового поколения обладает рядом преимуществ перед применяющимся сегодня оборудованием иностранного производства, т. к. максимально адаптирован к условиям действующих горных выработок [9].

Таблица 1

Техническая характеристика бурового комплекса РСЗ-40

| Наименование показателя | Величина |
|---|----------------|
| Усилие тягово-толкающее каретки, кН, не менее | 200 |
| Максимальный крутящий момент вращателя, Нм | 3700 |
| Максимальная частота вращения вращателя, об/мин (в обе стороны) | 150 |
| Диаметр буровых труб, мм | 73; 89 |
| Длина буровых труб, мм | 1500/3000 |
| Диаметр обсадных труб, мм | 73; 89; 114 |
| Длина обсадных труб, мм | 1500/2000/3000 |
| Угол поворота станины: | |
| - по азимуту, град | ± 90 |
| - по зениту, град | ± 20 |
| Мощность электродвигателя, кВт | 132 |
| Электрическое напряжение, В | 660/1140 |
| Максимальное давление НВД, бар | 150 |
| Максимальный расход НВД, л/мин | 420 |

| | |
|--|-----------------------|
| Масса, кг, не более – модуль буровой; – модуль силовой; – модуль управления. | 4000 3000* 1700 |
| *масса силового модуля указана без учета запорочных жидкостей (масло гидравлическое, масло редуктора НВД, жидкость в линии воды) | |

Уникальная технология проведения водоспускных скважин в условиях ПАО «Распадская» реализована со следующими параметрами.

1. Проведены водоспускные скважины методом направленного бурения длиной до 444м для спуска воды из затопленной одиночной выработки. Перепад высот составил более 220м.

2. При производстве работ были с точностью 10см рассчитаны траектории скважин, пролегающие через семь угольных пластов в сложных горно-геологических условиях (различная мощность, газоносность и структурная нарушенность). Траектория проведения скважин поднималась в месте выбуривания до плюс 45°.

3. Буровой комплекс РСЗ-40 был установлен в горной выработке пласта 7-7а, а конечная точка проводимых скважин располагалась в затопленном вентиляционном штреке вышележащего пласта 15 (рис. 3, 4).

4. При сооружении устьев водоспускных скважин произведена установка обсадной колонны диаметром 219мм на длину 20 метров и цементаж затрубного пространства с обязательной опрессовкой для предотвращения прорыва воды с вышележащих затопленных выработок, установки запорной арматуры и регулировки объема поступающей жидкости. Обсадные трубы изготавливались индивидуально под данный проект.

Выполнение поставленной задачи стало возможным благодаря уникальности технических характеристик применяемого оборудования компании «Группа ФИД. Инновационное оборудование» и профессиональной слаженной работе коллектива ООО «ДМТехнологии». При проходке буровым снарядом пластов 11 и 13 имелись осложнения в виде вымывания пласта, образования полостей, выбросы угля и газа, прихваты буровой колонны. Для эффективной проходки применялись химические реагенты, специально разработанные методы бурения и рабочие параметры (давление бурового раствора, скорость подачи, сочетание способов бурения и т.д).

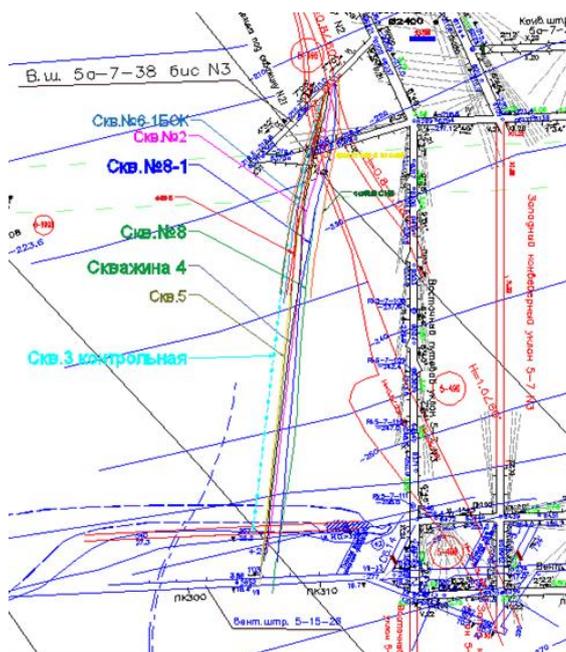


Рис. 3. Выкопировка из плана горных выработок

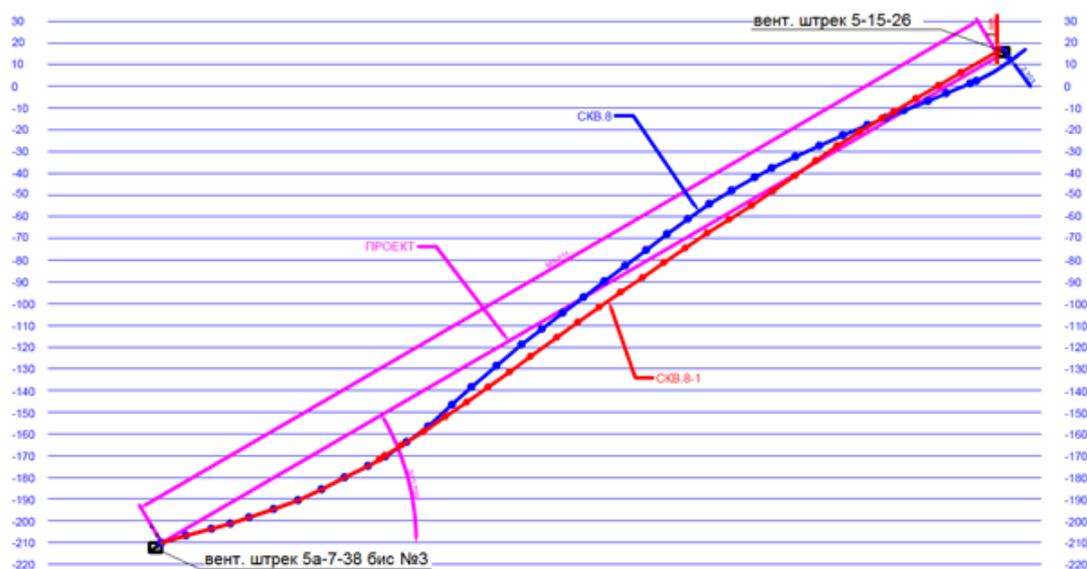


Рис. 4. Профиль траектории скважины №8

Основываясь на достигнутом практическом опыте в целях расширения области применения технологии направленного бурения скважин специалистами на уровне изобретения предложены новые технологические решения - поданы заявки на получение патентов.

При использовании буровой установки РСЗ-40 определены ряд преимуществ перед существующими аналогами.

1. Буровое оборудование имеет компактные габариты, что упрощает доставку и установку бурового станка.

2. Угол забуривания устьев скважин составлял до 30° относительно горизонтали. Аналогичные буровые станки других производителей не имеют возможности установки станка под углом более $+10^\circ$. Для этого буровой модуль комплекса РСЗ-40 снабжён вертикальными аутригерами для корректировки угла забуривания скважины.

3. Благодаря таким параметрам буровой установки, как тяговое усилие в 250кН, существует возможность поднимать буровую колонну весом до 20т (в точке выбуривания тягово-толкающее усилие составило 220кН, у аналогичных буровых установок этот показатель составляет 150-170кН), а с помощью высокопроизводительного насоса высокого давления НВД с производительностью до 400л/мин и давлением 15МПа возможно промывать скважину и обеспечивать бесперебойную работу винтового забойного двигателя ВЗД под углом наклона до плюс 45° .

4. Точность проведения траектории скважин установки РСЗ-40 обеспечивается модулем телеметрии, имеющим погрешность 0.1° по горизонтали и до $0,5^\circ$ по азимуту. Аналогичные модули и системы направленного бурения (СНБ) имеют большую погрешность – до 1° по горизонтали и до 3° по азимуту). Благодаря непрерывной связи СНБ и модуля телеметрии (в онлайн режиме), обеспечивается полный контроль за траекторией проведения скважины.

В результате выполненных работ компанией ООО «ДМТехнологии» на ПАО «Распадская» сдано в эксплуатацию 4 водоспускные скважины с пласта 7-7а с водопритоками до $350\text{м}^3/\text{ч}$. Все скважины точно были пробурены в затопленные выработки.

После подтверждения технической возможности и эффективности уникального опыта бурения направленных водоспускных скважин с пласта 7-7а в затопленные горные выработки пласта 15, компании ООО «ДМТехнологии» предложили выполнить работы по проведению аналогичных водоспускных скважин с пласта 6-ба в горные выработки пласта 9 в условиях шахты ПАО«Распадская».

Новый проект по проведению 3-х водоспускных скважин с пласта 6-ба на пласт 9 был выполнен, подтвердив эффективность разработанных методов бурения, применения материалов, оборудования и инструментов.

Из вышеизложенного следует, что метод направленного бурения может, наилучшим образом, решать различного рода задачи горного производства.

В настоящее время на шахтах единственным полноценным способом решить проблемы дегазации возможно направленным бурением скважин. Применение направленного бурения позволяет обуривать до 1,5 км длины выемочного столба, при этом обуривание этого участка может производиться из одной точки (промежуточного штрека), что позволяет значительно уменьшить время на транспортирование станка. Установка позволяет бурить скважины по направленной траектории (трассе) [4-6].

Производственный опыт показал, что применение скважин направленного бурения в условиях Ерунаковского угольного месторождения Кузбасса является эффективным способом дегазации метаноносных пластов, обеспечивающим снижение метанообильности проводимых подготовительных выработок и содержание метана в исходящей струе воздуха из подготовительного забоя в пределах установленных норм [7, 8].

Направленное бурение даёт возможность увеличить зону контакта скважины с пластом и горными породами за счёт увеличения её длины при обеспечении контроля внутрискважинных параметров в режиме реального времени. Это обстоятельство побудило научное сообщество и инженерно-технических сотрудников увеличить зону дренирования за счет формирования различных схем расположения скважин направленного бурения относительно местоположения подготовительных, очистных забоев и выработанного пространства.

К нестандартным способам применения технологии направленного бурения можно отнести бурение направленных скважин с целью последующей закачки цементного раствора для закрепления пород в условиях сложного геологического строения массива.

Области применения современного станка направленного бурения РСЗ-40 (рис. 5):

- дегазация многозабойными скважинами;
- дегазация из купола обрушения на весь период работы выемочного участка;
- профилактика и тушение эндогенных пожаров;
- дегазация с поверхности;
- дегазация ликвидированных шахт;
- ликвидация опасных концентраций метана;
- ликвидация опасных зон у затопленных горных выработок;
- доразведка горно-геологических условий проведения горных выработок.

Станок имеет существенные преимущества перед оборудованием других производителей:

- модульную конструкцию для удобного размещения в выработках (транспортировка любым шахтным транспортом, в выработках малого сечения, шахтной клетки без разбора модуля);
- удобный интерфейс и обновленное программное обеспечение;
- высокопроизводительную систему подготовки и закачки химвеществ для особых условий бурения;
- высокую точность бурения (точность измерения азимутальных и зенитных углов превышает многие мировые аналоги $\pm 0,5^\circ$ и $\pm 0,1^\circ$ соответственно).

В системе направленного бурения имеется постоянный онлайн-вывод на дисплей компьютера таких показателей, как зенитный и азимутный угол, угол положения отклонителя, температура, нагрузка на долото, давление и вибрация.

Отдельно стоит отметить наличие в модуле телеметрии блока датчиков гамма-каротажа, который, при необходимости в режиме онлайн регистрирует и передаёт данные о естественной радиоактивности породы на дисплей компьютера.

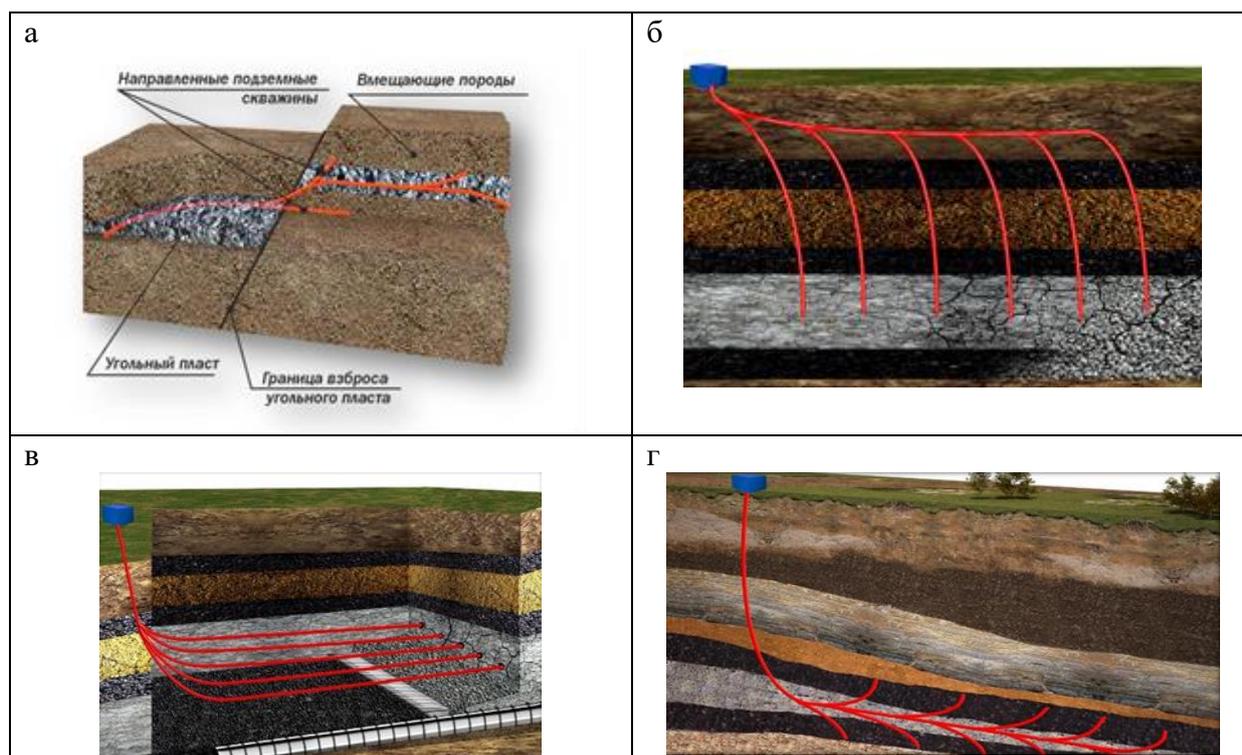


Рис. 5. Бурение скважин любого технологического назначения в угольных шахтах (перспективы развития метода направленного бурения для улучшения безопасности горных работ): а) доразведка горно-геологических условий проведения горных выработок; б) для дегазации из купола обрушения на весь период работы выемочного участка; в) для профилактики и тушения эндогенных пожаров; г) дегазация многозабойными скважинами [10]

Блок датчиков гамма-каротажа сертифицировался как средство измерения, что позволяет считать получаемые данные достоверными и тем самым снижать временные и денежные издержки за счёт отсутствия дополнительных спускоподъёмных операций для проведения гамма-каротажа с отдельными геофизическими приборами [9]. Также оператор всегда может видеть, в какой породе находится оборудование.

Выводы. В условиях ПАО «Распадская», благодаря уникальным техническим характеристикам применяемого оборудования компании «Группа ФИД. Инновационное оборудование» и профессиональной слаженной работе коллектива ООО «ДМТехнологии», реализована технология проведения водоспускных скважин методом направленного бурения, отвечающая требованиям промышленной безопасности.

Применяемый буровой комплекс РСЗ-40 был установлен в горной выработке пласта 7-7а, а конечная точка проводимых скважин располагалась в затопленном вентиляционном штреке вышележащего пласта 15. Для эффективной проходки, при прохождении бурового снаряда через пласты 11 и 13 в сложных условиях (вымывание пласта, образование полостей, выбросы угля и газа, прихваты буровой колонны), применены специально разработанные методы бурения с химическими реагентами. Буровой комплекс нового поколения РСЗ-40 может успешно применяться для бурения направленных скважин с целью уточнения строения пластов и физико-механических свойств угля и пород.

Техническая возможность бесперебойной работы винтового забойного двигателя ВЗД под углом наклона до плюс 45° и промывки скважин обеспечена высокопроизводительным насосом высокого давления НВД с производительностью до 400л/мин и давлением 15МПа. Очевидно, что ООО «ДМТехнологии» руководит коллективом профессиональных специалистов, которым по силам решать различного рода задачи горного производства.

Благодаря непрерывной связи системы направленного бурения СНБ и модуля телеметрии (в онлайн режиме) обеспечивается полный контроль за траекторией проведения скважины при высокой точности с погрешностью 0.1° по горизонтали и до 0.5° по азимуту.

Применение технологии направленного бурения водоспускных скважин привело к реальному снижению сроков выполнения работ по спуску воды с примерно 6 месяцев при проведении нормативных специальных мероприятий до 4 месяцев фактически.

Реализованный метод направленного бурения способен существенно повысить качество и снизить затраты на работы по ликвидации опасных зон, увеличить многократно эффективность эксплуатации угольных месторождений, решить многие сложнейшие технические задачи со значительным усложнением горно-геологических условий эксплуатации на угольных шахтах (в том числе проведение дегазации) и при этом повысить уровень промышленной безопасности.

Список литературы

1. Лазаревич Т.И., Власенко Ю.Н., Рогова Т.Б. Виды опасных зон при подземной разработке угольных месторождений // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов : сб. науч. статей / Под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк: Сиб. гос. индустр. ун-т, 2013. – С. 244-250.

2. Поддубный И.А. Обоснование технологии изоляции горных выработок угольных шахт от затопления // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2003. – № 5. – С. 49-54.

3. Мохов А.В. О путях предотвращения прорывов воды в горные выработки из затопленных каменноугольных шахт // Технологии гражданской безопасности, 2008. – Вып. 5. – № 1-2. – С. 188-193.

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.

5. Коряга М.Г. Применение станков подземного направленного бурения скважин для извлечений метана и борьбы с самовозгоранием угля при разработке мощных угольных пластов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета, 2013. – № 1(3). – С. 12-13.

6. Забурдяев В.С. Зарубежный опыт промысловой добычи угольного метана // Уголь. – 2003. – № 2. – С. 21 – 24.

7. Ширяев С.Н., Никитина А.М., Дадынский Р.А. Применение современных методов дегазации при отработке пласта 48 в условиях филиала «Шахта «Ерунаковская-VIII» // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2018. – № 3(25). – С. 41-47.

8. Разработка технических и технологических решений по совершенствованию дегазации с использованием направленного бурения для условий ООО «Шахта «Усковская» / Д.М. Борзых, А.М. Никитина, С.В. Риб, В.А. Волошин // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : тр. всерос. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 13–15 июня 2018 года / Под общ. ред. М.В. Темлянцева. – Новокузнецк: Сиб. гос. индустр. ун-т, 2018. – С. 27-31.

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

10. ДМТехнологии. Направленное бурение — инновационный инструмент для обеспечения безопасности и эффективности угольных шахт/ — URL: <http://dmt42.com/#rec523967622>.

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГОРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ¹Дадынский Р.А., ²к.т.н. Никитина А.М., ²к.т.н. Риб С.В.

1 – ООО «УМГШО», г. Новокузнецк, Россия

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

Аннотация. Представлена система онлайн мониторинга процесса бурения дегазационных скважин и транспортировки секций крепи из демонтажной камеры в монтажную камеру со смежными цифровыми продуктами, позволяющая выявлять узкие места (анализ простоев техники), осуществлять оперативный контроль работы буровых станков, визуально отслеживать движение секций механизированной крепи. Предложенные к внедрению цифровые технологии позволят ускорить вспомогательные процессы, тем самым повысив их эффективность при подземной разработке месторождений полезных ископаемых.

Ключевые слова: цифровой продукт, система позиционирования, оперативный контроль, буровой станок, секция крепи, простои техники.

Важным этапом развития подземной угледобычи являются решения задач оперативного управления технологическими процессами. Горнодобывающему предприятию в режиме реального времени необходимы сведения о производстве, качестве, продолжительности различных операций, состоянии машин и оборудования, а также других переменных, что обуславливает применение цифровых технологий. Развитие технической инфраструктуры является необходимым условием для цифровой трансформации предприятия [1]. Первостепенным направлением развития информационных технологий, применяемых при добыче полезных ископаемых, является повышение уровня безопасности. Примерами таких решений являются системы, включающие комплекс аппаратных устройств и программного обеспечения для сбора, передачи и обработки данных. При этом обеспечиваются [2]:

- контроль загазованности шахт, состояния выработок и работы горно-шахтного оборудования;
- позиционирование каждого шахтера;
- предупреждение о предвестниках и риске возникновения опасных ситуаций;
- ведение учета и контроля своевременной выдачи средств индивидуальной защиты;
- регистрация работников на контрольно-пропускных пунктах;
- информирование о результатах пройденного предсменного медицинского осмотра и т. д.

Комплексная обработка этих данных позволит определять оптимальные режимы выполнения, в том числе, и вспомогательные процессы при соблюдении параметров промышленной безопасности горных работ.

Совершенствование вспомогательных процессов для обеспечения требований к порядку производства работ в угольных шахтах является одним из направлений повышения безопасности труда шахтеров [3]. Не случайно в действующих «Правилах безопасности в угольных шахтах» [4] сформулировано требование по применению на каждой угольной шахте многофункциональной системы безопасности (МФСБ). Так в ООО «Распадская угольная компания» с января 2022 года изучен потенциал взаимодействия системы контроля бурения дегазационных скважин со смежными цифровыми продуктами. Использование системы позиционирования Flexcom для процесса бурения дегазационных скважин позволяет визуализировать станки на мнемосхеме и отслеживать их расположение с учетом объектов инфраструктуры для оперативного управления доступом к Wi-Fi. Для теста позиционирования использовалась иконка дизелевоза в условиях ООО «Шахта

«Осинниковская» (рис. 1). В дальнейшем планируется изменить иконку юнита и применить отдельный тег.

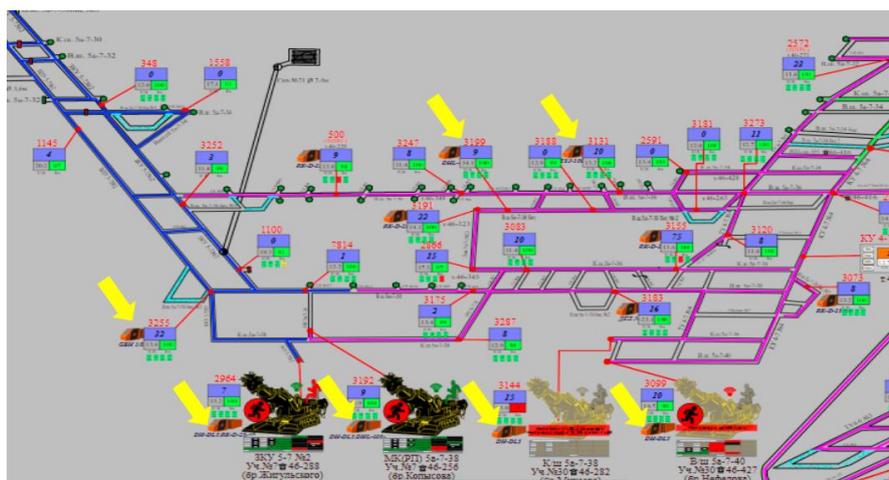


Рис. 1. Использование системы Flexcom для отслеживания расположения буровых станков DHL 1200 на ООО «Шахта «Осинниковская»

В рамках совершенствования продукта:

- усовершенствован в программном продукте и тестируется автоматический учет отбуренных штанг и расчет фактических метров (усложнение алгоритма позволило повысить точность расчета отбуренных штанг/метров с 60 до 90%);
- доработаны визуальные решения для информационной панели данных (zoom экрана)
- тестируется применение системы позиционирования буровых станков на базе МСБ Flexcom в условиях шахты «Распадская».

Достоинства от внедрения:

- увеличение производительности буровых станков;
- своевременная и качественная пластовая дегазация подготавливаемых очистных забоев.

Так, за счет оперативного контроля работы буровых станков, задействованных на пластовой дегазации в условиях ПАО «Распадская», за период реализации проекта удалось достичь перевыполнения плана бурения скважин на ≈ 3 км, рис. 2.

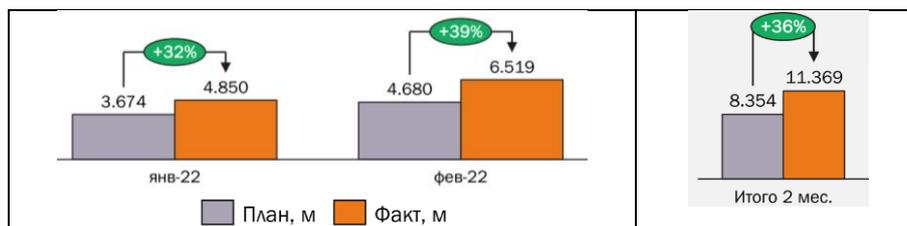


Рис. 2. Динамика достижения технического эффекта по отношению к планам бурения в условиях ПАО «Распадская» [5]

Динамика среднесуточных темпов бурения по станкам, оборудованным датчиками контроля в условиях АО «Распадская-Коксовая», представлена на рис. 3.

При сравнении среднесуточных темпов бурения скважин до установки датчиков контроля и после установки, наблюдается существенная динамика по росту темпов.

Автоматизированная система планирования и диспетчеризации ремонтов, включая контроль за перемещением секций крепи. На период ремонта очистного комплекса и транспортировки секции по горным выработкам при использовании подвесной или напочвенной техники происходят неучтенные или организационные простои техники.

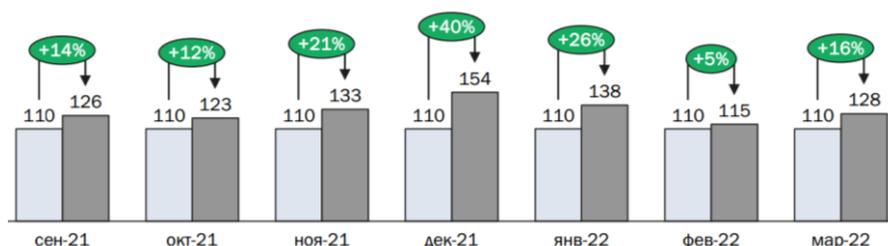


Рис. 3. Динамика среднесуточных темпов бурения по станкам, оборудованным датчиками контроля в условиях АО «Распадская-Коксовая» [5]

На сегодняшний день выявлен ряд «узких» мест:

- не ведется хронометраж цикла доставки секции;
- отчет по доставке секции можно узнать только у сменного руководителя по выходу из шахты;

- невозможность оперативно принять корректирующие меры;

- нет возможности понять, где находится секция в режиме реального времени;

- отсутствие точных данных по простоям для анализа.

С целью повышения эффективности перемонтажа очистных забоев предлагается к внедрению онлайн система мониторинга логистики секций компании Mine Radio Systems (MRS) (рис. 4), обеспечивающая выполнение следующих функций:

- наблюдение в режиме онлайн за перемещением секций крепи в выработках шахты по заданному маршруту;

- поиск на технологической маршрутной мнемосхеме местоположения любой секции;

- контроль за временем перемещения секций, учет и фиксация логистических простоев.

Получаемые преимущества от системы онлайн мониторинга:

- оперативный контроль руководителями за доставкой секций;

- визуальное отслеживание за движением секций диспетчерами;

- выявление «узких мест», анализ простоев;

- построение оптимального графика доставки с учетом полученных данных;

- ведение статистики с оформлением отчета для последующих улучшений по доставке.



Рис. 4. Местонахождение секции с rfid меткой [5]

В качестве направления развития системы онлайн мониторинга могут применяться инструменты автоматизации процесса планирования (построение и контроль критического пути), а также сбора и анализа статистики по выполнению ремонтных работ.

Выводы. Таким образом, внедрение системы онлайн мониторинга процесса бурения дегазационных скважин и транспортировки секций крепи с демонтажной камеры в монтажную камеру позволяют выявлять «узкие» места (анализ простоев техники), проводить оперативный контроль работы буровых станков, визуально отслеживать движение секций, выполнять цифровой автоматизированный сбор данных с оформлением отчета для последующих улучшений по доставке.

Цифровая трансформация вспомогательных процессов обеспечит рациональную загрузку парка горного оборудования и транспортных средств, оптимизацию параметров технологических схем, автоматизацию сбора данных в реальном времени, повышение безопасности и эффективности горного производства.

Список литературы

1. Цифровая трансформация - условие и основа устойчивого развития горнотехнических систем / М.В. Рыльникова, К.И. Струков, Д.Н. Радченко, Е.Н. Есина // Горная промышленность. – 2021. – № 3. – С. 74-78.
2. Мацко Н.А. Опыт и перспективы использования цифровых технологий в добывающих отраслях // Имущественные отношения в Российской Федерации. – 2020. – №.6 (225). – С. 7-13.
3. Совершенствование технологии вспомогательных работ для обеспечения эффективной работы длинных очистных забоев / А.М. Никитина, С.В. Риб, Д.М. Борзых, Р.А. Дадынский // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – № 6. – С. 113-118.
4. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила безопасности в угольных шахтах": утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020, № 507; зарег. 18.12.2020, № 61587.
5. Технический отчет специалистов ООО «Распадская угольная компания» о системе контроля за перемещением секций крепи. – 2022. – 36 с.

УДК 621.926.22

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЫ, РАБОТАЮЩЕЙ НА СДВИГ

д.т.н. Никитин А.Г., Демина Е.И., Курочкин Н.М.

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Аннотация. Приведено описание конструкции одновалковой дробилки, в которой обеспечивается процесс генерации в исходном разрушаемом куске сдвиговых деформации. Разрушение происходит за счет сил, действующих на дробимый кусок в одной плоскости навстречу друг другу, при этом в куске возникают только касательные напряжения, что позволяет уменьшить расход энергии на дробление.

Ключевые слова: дробилка, энергоэффективность, напряжение, деформация, сжатие, сдвиг.

Мировая потребность в различных видах раздробленного материала растет на 3 – 8 % в год [1], так как в качестве исходного продукта практически всех производств, в том числе и металлургической промышленности, требуется разрушенные до необходимой фракции куски, получаемый с использованием различных измельчителей, в том числе

дробильных машин. Опыт эксплуатации дробильных машин свидетельствуют о широком применении валковых дробилок различных конструкций [2].

Принцип действия валковых дробилок заключается в следующем. Подлежащий разрушению материал подается в зазор между вращающимися друг на встречу другу цилиндрическими валками, при этом кусок затягивается в зазор в том случае, если угол трения между куском и поверхностью валка больше угла, под которым линия, соединяющая точку контакта кусок-валок с центром вращения валка, наклонена к горизонту. Затянутый в зазор кусок раздавливается между валками за счет действия в нем нормальных напряжений. Таким образом, валковая дробилка является машиной, работающей на сжатие. Разрушение сжатием самый энергоемкий из известных способов дробления [3].

Одним из основных показателей процесса дробления является энергоэффективность дробления [4], которая определяется массой дроблёного материала, получаемой при расходе единицы электроэнергии.

Для уменьшения расхода энергии разработана конструкция одновалковой дробилки с гладким валком [5], которая работает следующим образом. Устанавливается необходимый зазор между валком и неподвижной щекой. Дробимый материал подают в зазор, при этом в разрушаемом куске формируется сложное напряженное состояние вследствие одновременно действующих в нагружаемом теле нормальных и касательных напряжений. Такое напряженное состояние способствует уменьшению расхода энергии на дробление по сравнению с двухвалковыми дробилками на 60 – 70 % [6].

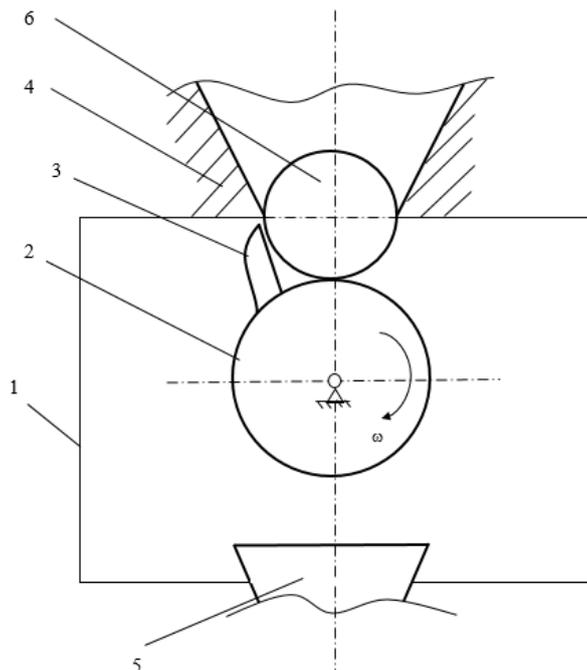
С целью повышения энергоэффективности процесса разрушения хрупких материалов в Сибирском государственном индустриальном университете спроектирована одновалковая дробильная машина, конструкция которой обеспечивает генерацию в исходном разрушаемом куске сдвиговых деформаций, при которых возникают только касательные напряжения за счет того, что в процессе работы дробилки разрушение перерабатываемого материала происходит за счет сил, действующих на дробимый кусок в одной плоскости навстречу друг другу. При таком виде деформации предел прочности для данного материала принимает минимально возможное значение, в два раза меньше, чем при действии только нормальных напряжений, возникающих при сжатии [7]. Отсюда следует, что такой способ дробления является наиболее энергоэффективным по сравнению со всеми другими при получении готового продукта заданной крупности.

Конструкция одновалковой дробилки, в которой обеспечивается осуществление процесса генерации в исходном разрушаемом куске сдвиговых деформаций, при которых возникают только касательные напряжения, должна удовлетворять следующим условиям: на валке установлены ребра одинаковой высоты, при этом их высота равна половине размера исходного дробимого куска; зазор между валком и нижней кромкой выходного отверстия тетки соответствует половине размера исходного дробимого куска; валок вращается с постоянной частотой, обеспечивающей попадание исходного куска в зазор между предыдущем и последующим ребрами; размер выходного отверстия тетки равен величине исходного дробимого куска.

Дробилка (рис. 1) состоит из корпуса 1, в котором установлен в радиальных подшипниках приводной валок 2. Валок приводится во вращение электродвигателем (на рис. 1 условно не показан) через муфту и клиноременную передачу, передающую вращение валку. Валок оснащен ребрами 3, закрепленными на поверхностях валка, при этом рабочая поверхность ребер совпадает с радиальной линией валка. Высота ребер должна быть одинаковой и равна величине зазора между наружной поверхностью валка и нижней кромкой выходного отверстия тетки, чтобы обеспечить генерацию в исходном разрушаемом куске сдвиговую деформацию.

В верхней части корпуса имеется тетка 4 для подачи материала, размер выпускного отверстия которой соответствует размеру загружаемого куска 5, при этом ось тетки совпадает с вертикальной осью валка. Нижняя кромка тетки не должна касаться верхней части

ребра, установленного на валке. В нижней части корпуса расположена разгрузочная воронка 6.



1 – корпус дробилки; 2 – приводной валок; 3 – ребро; 4 – течка;
5 – дробимый кусок; 6 – разгрузочная воронка

Рис.1. Схема дробильной машины, работающей на сдвиг

Дробление происходит следующим образом. Куски дробимого материала 6 через течку один за другим подаются в зону дробления, образованную внешней поверхностью валка, рабочей поверхностью ребра и нижней кромкой выходного отверстия течки.

При вращении валка ребра, расположенные на поверхностях валка, периодически образуют зазор между нижней кромкой выходного отверстия течки и внешней поверхностью валка, размер которого больше размера куска, в который проваливается кусок и опирается на кромку течки, находящейся со стороны, противоположной направлению вращения валка. При дальнейшем вращении валка кусок зажимается между рабочей поверхностью ребра и кромкой течки, при этом за счет возникновения в нем касательных напряжений развивается деформация сдвига и кусок разрушается. В результате разрушения исходного куска образуется два фрагмента одинакового размера.

Один из фрагментов, который находится под ребром,двигающимся в сторону вращения валка, проваливается в разгрузочную воронку. Другой фрагмент падает вниз в карман, образованный поверхностями валка и следующего ребра, а затем перемещается, опираясь на рабочую поверхность следующего ребра, в сторону разгрузочной воронки.

В зависимости от заданного гранулометрического состава исходного продукта и требуемого размера фракции конечного, устанавливается необходимый зазор между валком, на котором крепятся сменные ребра соответствующей высоты, и нижней кромкой выходного отверстия течки, а также меняется течка соответствующего размера.

В процессе работы рассмотренной дробилки, разрушение хрупкого материала происходит в результате действия в дробимом куске касательных напряжений, которые вызывают деформацию чистого сдвига.

Таким образом, использование предлагаемого способа позволяет уменьшить расход энергии на дробление в одновалковой дробилке.

Анализ работы валковых дробилок показал, что наиболее энергоэффективными являются такой способ дробления, при котором разрушение хрупкого материала происходит

в результате действия в дробимом куске только касательных напряжений, которые вызывают деформацию чистого сдвига.

Вывод. Приведено описание конструкции дробилки, в которой разрушение перерабатываемого материала происходит за счет сил, действующих на дробимый кусок в одной плоскости навстречу друг другу, при этом в обрабатываемом куске возникают только касательные напряжения, что позволяет уменьшить расход энергии на дробление.

Список литературы

1. Линч А. Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование, управление. – М.: Недра, 1981. – 343 с.
2. Holger Lieberwirth, Philipp Hillmann, Max Hesse. Dynamics in double roll crushers // Minerals Engineering. – 2017. – Vol. 103–104. – P. 60–66.
3. Масленников В. А. Дробилки, разрушающие материал сжатием // Известия вузов. Горный журнал. – 1996. – № 10-11. – С. 124–138.
4. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. – Москва : Машиностроение, 1990. – 320 с.
5. Патент № 2430783 Российская Федерация, МПК В02С1/08. Способ дробления в валковой дробилке : № 2010112761/21 : заявл. 01.04.2010 : опубл. 10.10.2011 / Никитин А.Г., Сахаров Д.Ю., Прилукова Н.З. ; патентообладатель Сибирский государственный индустриальный университет. – Бюл. № 28.
6. Никитин А.Г., Сахаров Д.Ф. Анализ сил, действующих на кусок дробимого материала в одновалковой дробилке // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. – №10. – С. 41-42.
7. Степин П.А. Сопротивление материалов. – Санкт-Петербург : Лань, 2014. – 320 с.

**РОБОТИЗАЦИЯ И
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ
ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

УПРАВЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТЬЮ СЛОИСТЫХ ПОРОД КРОВЛИ В ОКРЕСТНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ

д.т.н. Павлова, д.т.н. Фрянов

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Изложены результаты исследования, направленные на обоснование управляющих решений для повышения устойчивости слоистого массива горных пород в окрестности подземной выработки на основе критерия минимизации высоты свода обрушения пород в кровле выработки. Определение высоты свода осуществляется посредством выбора оптимальной схемы установки анкеров на первом уровне и параметров канатных анкеров на втором уровне, что обеспечивает снижение степени расслоения пород кровли и повышение эксплуатационной устойчивости выработки.

Ключевые слова: слоистость горных пород, подземная выработка, свод обрушения, анкерная крепь, смещения пород, прочность пород, зона разрушения, метод конечных элементов.

Введение. Темпы подвигая подготовительных забоев на высокопроизводительных угольных шахтах существенно ниже скорости движения очистных комплексно-механизированных лав. Основными причинами неудовлетворительных показателей горно-подготовительной системы угольных шахт являются неоднородность и изменчивость свойств пород кровли по длине выработки, что приводит к непрогнозируемым рискам аварий и инцидентов из-за остановок подготовительных забоев при вывалах пород кровли, внезапных выбросах угля и газа, прорывах воды, геологических нарушениях и др. Эти аномальные явления возникают, как правило, в анизотропном слоистом углепородном массиве, ослабленном трещинами, пластичными прослойками угля или аргиллитов. Для предотвращения опасных производственных ситуаций в аномальных зонах необходимо разработать и реализовать способы и средства профилактики этих явлений на основе выявленных закономерностей взаимодействия элементов крепи и слоистой кровли.

В технической литературе известно несколько методических подходов обоснования технологических и технических решений по обеспечению устойчивости пород кровли в сложных горно-геологических условиях. В качестве критерия устойчивости рассматриваются, как правило, предельные смещения и деформации пород в окрестности выработок [1-3]. В настоящей работе предлагаются варианты обеспечения устойчивости пород кровли посредством сравнения эффективности применения анкерной крепи в неоднородном слоистом и сплошном массиве горных пород.

Целью исследования является изучение по результатам численного моделирования влияния слоистости массива горных пород на устойчивость пород кровли в подготовительной выработке для обоснования оптимального варианта анкерной крепи.

В соответствии с целью поставлены и решены следующие задачи:

- вычисление параметров напряжённо-деформированного состояния сплошного и слоистого массива горных пород при креплении подготовительной выработки анкерной крепью;
- выявление значимых отличий в распределении параметров напряжённо-деформированного состояния сплошного и слоистого массива горных пород в окрестности подготовительной выработки;
- обоснование оптимального варианта анкерной крепи при проведении подготовительной выработки по угольному пласту с учётом слоистости вмещающих его пород.

Объект и методы исследования. В качестве объекта исследования принят массив горных пород в окрестности подземной подготовительной выработки, которая проводится

по угольному пласту, залегающему в типичных для Кузбасса горно-геологических условиях: глубина 500-700 м, угол падения 0-20°, мощность пласта 2,0-4,0 м, пласт сложного строения включает породные прослойки мощностью 0,02-0,30 м.

Рассматривается геологический участок Увального каменноугольного месторождения Кузбасса. Геологическое строение этого месторождения изучалось с 1949 по 1965 годы. Стратиграфический разрез углепородной толщи нормальной мощности 460 м включает более 16 пластов сложного строения с пространственным изменением свойств угольных пластов и породных слоёв. Под влиянием тектонических процессов сформировались складчатые и разрывные структуры, три системы трещин. Особенности геологического строения месторождения установлены лишь буровыми скважинами, поэтому при проведении выработок проводилась эксплуатационная разведка, которая включала выбуривание керна в кровле выработок пневматическим анкероустановщиком с накрученным на буровую штангу керноотборником. Через каждые 500 мм керноотборник выдавался из скважины для извлечения образцов породы. По породным кернам осуществлялось описание природных трещин, расслоений, зеркал скольжения, включений флоры. Пробы пород после отбора подвергались консервации в соответствии с ГОСТ 24941-81. Испытания пород в лабораторных условиях при одноосном сжатии осуществлялись пробником БУ39 [6]. Результаты исследований свойств угля пласта 67 и вмещающих его пород Увального месторождения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика угольного пласта 67 и вмещающих его пород

| Пласт, вмещающие породы | Мощность, м | Состав пород | Свойства пород | Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа |
|---|--------------------|--|--|---|
| | от-до средняя | | | |
| Пласт 67, количество породных прослоев 1-5, мощность прослоев 0,02-0,30 | 1,64-2,93 2,11 | Породные прослои представлены алевролитом мелкозернистым | Породные прослои разрушаются вместе с углём | 6,65 |
| Ложная кровля | 0,16-0,94 0,39 | Аргиллит углестый, алевролит мелкозернистый | Весьма неустойчивые, обрушаются вслед за выемкой угля | 15,12 |
| Непосредственная кровля | 2,00-20,76 9,70 | Алевролит мелко- и крупнозернистый | Средней устойчивости и устойчивые, легко и средне обрушаемые | 15,89 |
| Основная кровля | 1,80-23,78 9,25 | Переслаивание алевролитов и песчаников | От легко-до труднообрушающейся, склонной к зависанию | 36,74 |
| Ложная почва | 0,08-1,20 0,38 | Аргиллит, аргиллит углестый | Весьма неустойчивые, склонные к пучению | 8,67 |
| Непосредственная почва | 0,32-7,00 4,64 | Алевролит мелкозернистый, реже аргиллит | Средней устойчивости и устойчивая, склонная к пучению | 15,89 |

Геометрическая модель объекта исследования представляет собой массив горных пород с расположением одиночной выработки в угольном пласте на глубине 600 м. Размеры модели в поперечном сечении выработки приняты равными 1000 м, количество угольных пластов, породных слоёв, мягких слоёв (контактов) по разделяющим поверхностям между соседними породными слоями принято равным 100.

Предел прочности мягкого слоя по контакту соседних породных слоёв вычислялся по формулам:

$$\sigma_{\text{сж.мс}} = 0,5(\sigma_{\text{р.вс}} + \sigma_{\text{р.нс}}); \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{сж.мс}} = 0,5(\sigma_{\text{сж.вс}} + \sigma_{\text{р.нс}}), \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{сж.мс}}$ – предел прочности при сжатии пород на контакте соседних слоёв; $\sigma_{\text{р.вс}}$ – предел прочности при растяжении пород в слое, расположенном над контактом, разделяющим соседние породные слои; $\sigma_{\text{р.нс}}$ – предел прочности при растяжении пород в слое, расположенном под контактом, разделяющим соседние породные слои; $\sigma_{\text{сж.вс}}$ – предел прочности при сжатии пород в слое, расположенном над контактом, разделяющим соседние породные слои; $\sigma_{\text{сж.нс}}$ – предел прочности при сжатии пород в слое, расположенном под контактом, разделяющим соседние породные слои.

Выбор формулы (1) или (2) осуществляется автоматически в компьютерной программе при работе её в итерационном режиме по следующему алгоритму: если на предыдущей итерации на контакте выявлены растягивающие нормальные напряжения, то используется формула (1), а если сжимающие, то формула (2).

Для исследования напряжённо-деформированного состояния массива горных пород в окрестности подготовительной выработки пласта 67 использованы разработанные авторские пакеты проблемно-ориентированных компьютерных программ [4, 5]. При численном моделировании методом конечных элементов по каждому варианту получены следующие результаты вычислительных экспериментов: вертикальные η и горизонтальные ξ смещения массива при упругопластическом состоянии горных пород; вертикальные σ_v и горизонтальные σ_r напряжения в массиве горных пород; отношение остаточной прочности угля или пород R к исходной прочности.

По результатам сравнительного анализа состояния угля и пород в боках и кровле выработок, полученных при проведении натуральных и вычислительных экспериментов на шахтах «Осинниковская», «Чертинская-Коксовая», «Распадская», «Ерунаковская VIII» в Кузбассе, установлены следующие критерии прочности:

$R > 1,0$ – уголь или порода находятся в упругом состоянии без нарушения сплошности;

$0,8 \leq R < 1$ – уголь или порода находятся в блочном состоянии, нарушены крупными трещинами;

$0,5 \leq R < 0,8$ – уголь или порода находятся в запредельном состоянии, нарушены системой трещин;

$R < 0,5$ – уголь или порода разрушены, наблюдается интенсивный отжим с боков или вывалы пород кровли выработки.

Обсуждение результатов исследования. При проведении вычислительных экспериментов исследуемая область массива горных пород в виде вертикального разреза всей толщи автоматически разделяется на 40400 конечных элементов. При этом учитывается слоистая неоднородная структура породных слоёв и угольных пластов согласно реальной стратиграфии и литологии, а также индивидуальные прочностные и деформационные свойства угольных пластов и породных слоёв.

Форма и размеры выработок, разрывные нарушения, контакты соседних породных слоёв и угольных пластов учитываются в модели посредством ввода в задание их контуров в глобальной системе координат. Для повышения точности расчётов размеры сторон конечных элементов вблизи выработок, нарушений и на контактах расслоения между соседними

слоями принимаются равными 0,05-0,5 м, а угольные пласты и боковые породы делятся на подслои.

Общая схема дискретизации одного из локальных участков геометрической модели на конечные элементы представлена на рис. 1. Для повышения точности расчёта параметров напряжённо-деформированного состояния массива горных пород и крепи сеть конечных элементов принята неравномерной, минимальные размеры конечных элементов равны 0,05 м.

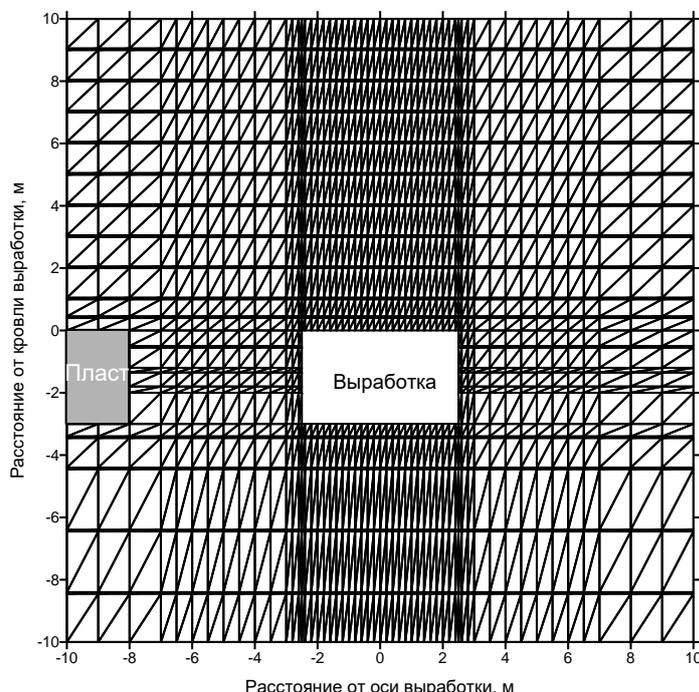


Рис. 1. Фрагмент конечно-элементной модели в окрестности выработки

В соответствии с программой исследований рассмотрено 4 варианта распределения геомеханических параметров к окрестности одиночной выработки шириной 5м, высотой 3 м, пройденной по угольному пласту мощностью 3м:

Вариант 1. Сплошной анизотропный массив горных пород без крепления пород кровли выработки;

Вариант 2. Анизотропный массив горных пород с расслоением породной толщи тремя плоскостями ослабления прочности на расстоянии 1,4 м от почвы выработки ($y=-4,4$ м на рис. 2) и на расстояниях 1,0; 2,0; 3,0 от кровли выработки (соответственно на рис. 2 $y=1,0$ м, $y=2,0$ м и $y=3,0$ м) без крепления пород кровли;

Вариант 3. Сплошной анизотропный массив горных пород с учётом влияния установленных анкеров первого уровня длиной 2,5 м и канатных анкеров второго уровня длиной 4,0 м в кровле выработки;

Вариант 4. Анизотропный массив горных пород с расслоением породной толщи тремя плоскостями ослабления прочности на расстоянии 1,4 м от почвы выработки ($y=-4,4$ м на рис. 2) и на расстояниях 1,0; 2,0; 3,0 от кровли выработки (соответственно на рис. 2 $y=1,0$ м, $y=2,0$ м и $y=3,0$ м), с учётом влияния установленных анкеров первого уровня длиной 2,5 м и канатных анкеров второго уровня длиной 4,0 м.

В качестве примера на рис. 2 показаны изолинии распределения вертикальных напряжений в окрестности выработки. Согласно графикам рисунка зона разгрузки выработки в кровле и почве распространяется на расстояние до 10-12 м. Размеры зоны повышенных напряжений в боках выработки достигают 8 м, то есть 1,6 ширины выработки.

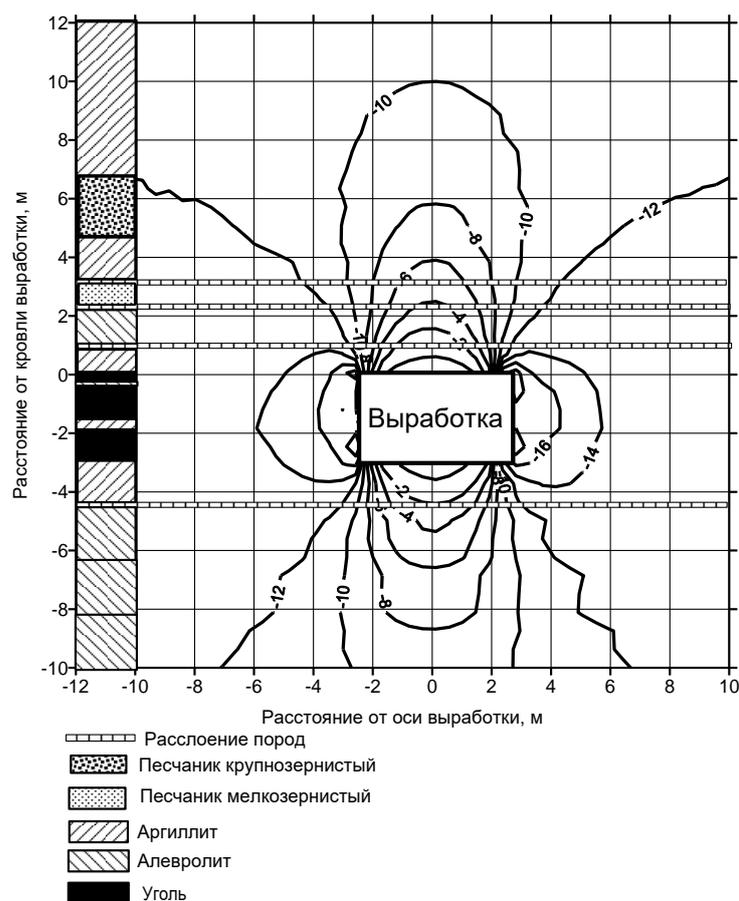


Рис. 2. Схема расположения поверхностей расслоения вмещающего угольный пласт боковых пород и распределения изолиний вертикальных напряжений (МПа) в окрестности подземной выработки

По результатам численного моделирования выявлено, что расслоение массива горных пород и анкерная крепь, установленная в сплошном или неоднородном массивах, наиболее существенно влияет на растягивающие деформации породных слоёв и контактов между ними в кровле выработки.

На рис. 3 показаны графики изменения вертикальных растягивающих деформаций пород кровли вдоль вертикальной оси. Во всех вариантах при увеличении расстояния от контура выработки относительные вертикальные деформации пород в кровле и почве уменьшаются.

При моделировании влияния расслоения пород без крепи (варианты 1 и 2 на рис. 3) на контактах соседних слоёв растягивающие вертикальные деформации увеличиваются в 1,5-2,5 раза, а породы почвы на контактах слоёв расширяются в 1,7 раза.

После установки анкерной крепи первого уровня и канатных анкеров второго уровня (рис. 3) происходит сжатие пород кровли по оси выработки в сплошном и слоистом массиве в 1,5 раза. Установка анкеров способствует созданию несущей плиты в кровле выработки. Однако в неоднородном массиве влияние слоистости сохраняется, вертикальные растягивающие деформации в слоистом массиве после установки крепи в 1,4 раза больше по сравнению с деформациями в сплошном массиве.

Следует особо выделить тот факт, что после установки анкеров глубокого заложения выше зоны их закрепления, на рис. 3 на расстоянии 6-7 м от кровли выработки, при наличии в кровле слоёв прочных пород, выявлено отслоение сформировавшейся породной плиты и возникновение трещины отрыва, то есть сплошность массива нарушается и возможны прорывы по этой трещине флюидов в виде воды, газа.

Для выбора параметров анкерной крепи предлагается, с учётом результатов исследований в работах [7-9] проводить численное моделирование по указанным вариантам и построение зон формирования блоков и разрушения пород в кровле. Схема расположения анкеров должна быть такой, чтобы анкера располагались в опасных зонах. В качестве критериев выделения границ зон формирования трещин и вывалов принято отношение остаточной прочности пород к исходной $R \leq 0,5$.

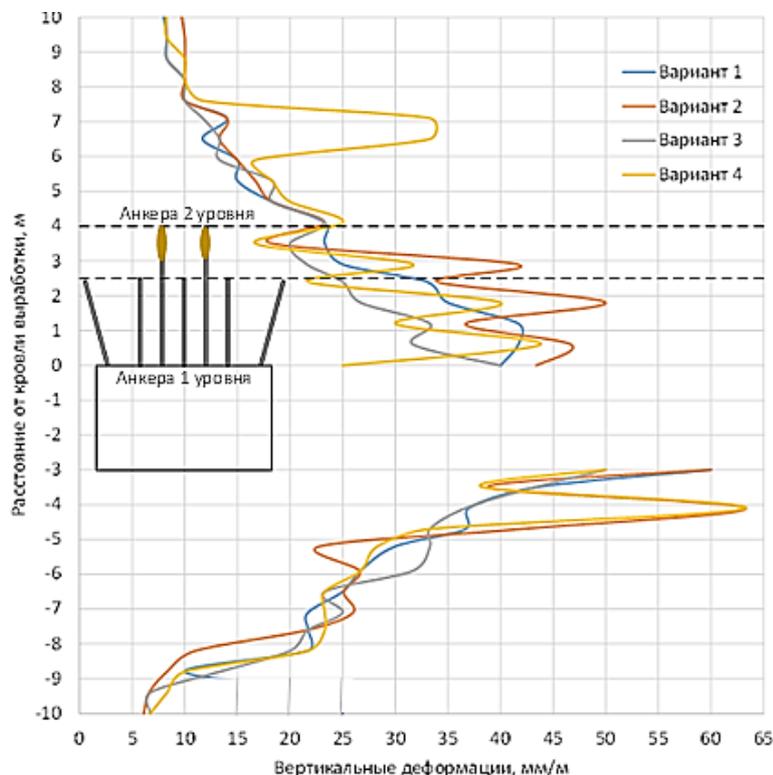


Рис. 3 Графики изменения деформаций породных слоёв и их контактов в кровле и почве выработки

На рис. 4 в качестве примера показаны результаты расчёта зоны и границы вероятных вывалов пород кровли ($R=0,5$) в сплошном массиве (рис. 4 а) и с учётом его расслоения (рис. 4 б).

Формы зоны вероятных вывалов вблизи кровли подземной выработки подобны, однако при расслоении породных слоёв в кровле формируются дополнительные локальные участки разрушенных пород (рис. 4б). Поэтому рекомендуется увеличение длины анкеров и верное их расположение, чтобы предотвратить деформирование пород по контактам соседних слоёв.

Из сравнения схем расположения анкеров на рис. 4 а и 4 б следует, что в кровле, склонной к расслоению, длина анкеров в 1,5 раза больше, а их расположение должно быть верным для предотвращения вертикальных растягивающих деформаций и обеспечения эксплуатационной устойчивости выработки.

Выводы. По результатам проведённых исследований предложена система управления устойчивостью слоистых пород кровли в окрестности подземной выработки, включающая метод количественного прогнозирования основных геомеханических параметров массива горных пород, критерий устойчивости в виде минимальной высоты свода обрушения пород кровли, варианты схем установки анкеров первого и второго уровней для предотвращения расслоения породного массива в кровле выработки.

Рекомендуются следующие управляющие решения при проведении подготовительных выработок в слоистом массиве горных пород: проведение исследований структуры и свойств пород кровли на этапе эксплуатационной разведки, многовариантное

прогнозирование геомеханических параметров при разных схемах установки анкеров первого и второго уровней или рамной крепи, разработка паспорта проведения и крепления выработки по оптимальному варианту.

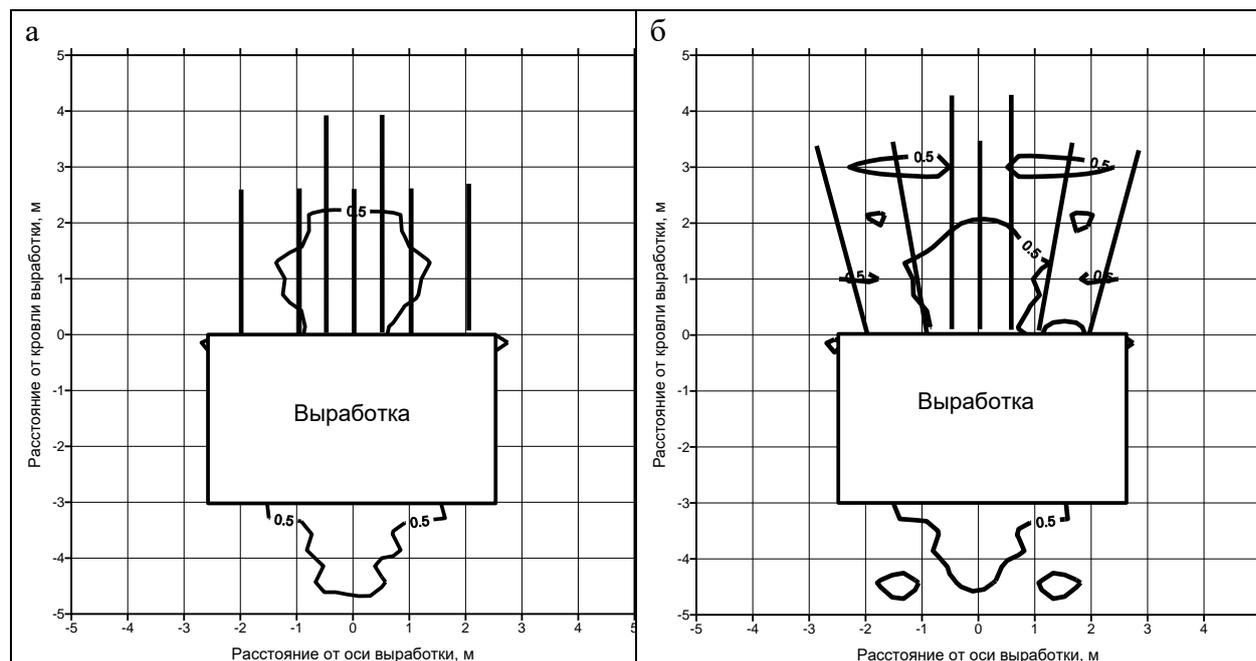


Рис. 4. Зоны вероятных вывалов пород кровли и рекомендуемые схемы установки анкеров: а – в сплошном массиве; б – с учётом расслоения соседних породных слов по контактам

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых 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», утверждённой распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022г. №1144-р (Соглашение № 075-15-2022-1190 от 27.09.2022г.) в рамках НИР по теме: «Разработка технологий эффективной отработки трудноизвлекаемых запасов пластовых угольных месторождений подземным способом и скоростной проходки горных выработок роботизированными модулями».

Список литературы

1. Контроль кровли в пластовых выработках: пер. с нем. / М. Юнкер [и др.]. – М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2015. – 680 с.
2. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 216 с.
3. Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах» (утв. Приказом Ростехнадзора №448 от 19.11.2020г.). – 167с.
4. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2020618419. Программа для численного исследования нелинейной математической модели деформирования геомассива с учетом разномодульности горных пород /А.Б. Цветков, Л.Д. Павлова, В.Н. Фрянов; ФГБОУ ВО Сиб. гос. индустр. ун-т. – Фед. служба по интеллект. собств.; Дата регистр. 27 июля 2020.
5. 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.

6. Методы и средства решения задач горной геомеханики / Г.Н. Кузнецов, К.А. Ардашев, Н.А. Филатов [и др.]. – М.: Недра, 1987. – 248 с.

7. Моделирование взаимодействия сталеполимерных анкеров с массивом горных пород при различных условиях закрепления для оценки их несущей способности / В.А. Трофимов, Ю.А. Филиппов, И.М. Закормешный [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – №1. – С. 35-48.

8. Physical model test study on support of super pre-stressed anchor in the mining engineering / J.C. Cao, N. Zhang, S.Y. Wang [et al.] // Engineering Failure Analysis. – 2020. – Vol. 118. – P. 104833. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104833.

9. Influence of anchorage length and pretension on the working resistance of rock bolt based on its tensile characteristics / J. Chang, K. He, D. Pang [et al.] // International Journal of Coal Science & Technology. – 2021. – Vol. 8. – No. 6. – P. 1384—1399. – DOI: 10.1007/s40789-021-00459-9.

УДК 622.271:622.68

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ДИСПЕТЧЕРСКОГО КОНТРОЛЯ БУРОУГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА «АНГРЕНСКИЙ»

¹к.т.н. Якубов С.И., ²Нигматуллин Ш.Н., ³д.т.н. Прошунин Ю.Е.

1 – Институт общей и неорганической химии Академии наук
Республики Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан

2 – АО «Узбекуголь», г. Ташкент, Узбекистан

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

Аннотация. Внедрение автоматизированной информационной системы централизованного диспетчерского контроля позволяет оперативно и своевременно принимать решения по эффективному управлению горнотехническими процессами в буроугольном разрезе «Ангренский». В настоящей статье приводятся результаты по функционированию горнотехнических систем в совокупном взаимодействии с АИС ЦДК.

Ключевые слова: Разрез «Ангренский», добыча угля, хронометраж процессов добычи и транспортирования, средняя скорость, расход топлива, экономия, эффективность управления.

Ангренское буроугольное месторождение является уникальным месторождением по геологическим параметрам и технологическим условиям ведения горнотехнических работ, а также по одновременному функционированию на месторождении угледобывающих предприятий, применяющих различные способы добычи угля: открытый, подземный и подземной газификации [1-4]. Эти предприятия, расположенные на месторождении, составляют уникальный комплекс, не имеющий аналогов в мировой практике. Кроме того, месторождение в течение многих лет являлось полигоном для исследователей и объектом особого значения по отработке передовых технологий добычи полезных ископаемых. В последние годы на месторождении выполнялись различные научно-исследовательские работы по изучению возможности повышения эффективности функционирования месторождения, внедрения новых современных технологий и создания востребованных производств [4-9].

Использование современных информационных технологий в АО «Узбекуголь» принято приоритетным направлением при совершенствовании управления систем производственных, транспортных и хозяйственных объектов угольной отрасли Узбекистана. Принят ряд основополагающих документов, реализация которых позволила усовершенствовать систему управления производством, выдачи отчетов утвержденного формата, повысить производительность труда, улучшить коэффициенты использования техники и оборудования, а также решить ряд других текущих проблем [10-12].

На основании Постановления Президента Республики Узбекистан от 3 апреля 2014 г. №ПП-2158 «О мерах по дальнейшему внедрению информационно-коммуникационных технологий в реальном секторе экономики» и Постановления Кабинета Министров республики Узбекистан об утверждении программы модернизации, технического и технологического перевооружения предприятий угольной промышленности и ее сбалансированного развития на период 2013-2018 годы в АО «Узбекуголь» были разработаны организационно-технические мероприятия и в 2013-2014 годах реализован инвестиционный проект «Автоматизированная информационная система централизованного диспетчерского контроля и управления производством» (АИС ЦДК) стоимостью \$ 2,2 млн.

Основные цели и задачи реализованного проекта АИС ЦДК [10]:

- повышение эффективности использования оборудования горнотехнического комплекса и увеличение его производительности;
- обеспечение экономии ресурсов при достижении необходимых объемов производства;
- повышение безопасности работ за счет контроля соблюдения параметров и установленных маршрутов движения горнотранспортной техники, работы циклично-поточной конвейерной линии, своевременного оповещение персонала в нестандартных ситуациях;
- повышение эффективности использования трудовых ресурсов и улучшение уровня трудовой и технологической дисциплины за счет инструментального контроля времени и продолжительности выполнения всех технологических операций, автоматизации сбора и обработки информации.

Важными особенностями системы централизованного диспетчерского контроля горнотехнического комплекса разреза «Ангренский» являются изменение его физических параметров в трех измерениях пространства, многообразие используемых технических средств, значительные размеры. И, как следствие, организовано слияние систем управления технологическими процессами и систем организационного управления локальных объектов в объединенные системы управления.

Исходя из особенностей существующих объектов, были приняты основные концептуальные решения. При этом система централизованного диспетчерского контроля позиционируется, как система подготовки и принятия управленческих решений.

Эта система формировалась по многоуровневой схеме, а каскадное соединение уровней позволяет добиться наилучшего представления информации для технологического персонала и менеджеров разного уровня, а также масштабируемости. Для решения вышеуказанных задач в системе предусмотрены развитие интеграционных процессов сбора достоверной технологической информации с дальнейшим формированием значимой информации для каждого каскада систем.

В процессе создания АИС ЦДК формировалась политика технических требований к оборудованию, поставляемому при модернизации производства на разрезе «Ангренский», с целью включения в него модулей для организации информационного обмена.

Практически функционально реализованная система состоит из следующих основных подсистем:

- сбора данных и управления технологическими объектами (оборудование, устанавливаемое на объекты управления системы);

- передачи данных (включает в себя радиотехническое оборудование, волоконно-оптические линии связи, беспроводную аппаратуру и системы передачи данных);
- обработка отображения, хранения данных с формализованными функциями управляющих команд (средства подсистемы устанавливаются в пунктах диспетчерского управления, на технических площадках разреза и рабочих местах пользователей, подключенных к информационной системе предприятия).

Объектами управления разреза «Ангренский» являются:

- стационарные комплексы: циклично-поточный конвейерный транспорт, участки водоотлива, посты видеонаблюдения, углесортировочный комплекс, весовые посты;
- полустационарные и малоподвижные технологические комплексы (объекты), объекты электроснабжения, шагающие экскаваторы;
- передвижные технологические объекты: железнодорожной, тракторно-бульдозерной, автотранспортной и специальной техники.

Внедренная система включает следующие технологические подсистемы:

- система контроля работы технологического оборудования;
- система учета расхода горючесмазочных материалов;
- система слежения за железнодорожным и автомобильным транспортом;
- система контроля состояния энергосистем;
- система контроля отгрузки;
- система видеонаблюдения за перемещением товарно-материальных ценностей.

Оперативные данные всех систем и подсистем передаются на центральный диспетчерский пункт разреза «Ангренский» (рис. 1), где после тщательного анализа, формируются периодические отчеты для руководства, принимаются соответствующие решения по управлению, организации ремонтных работ, ликвидации простоев, аварийных и нестандартных ситуаций, также ведется архив оперативных данных систем.

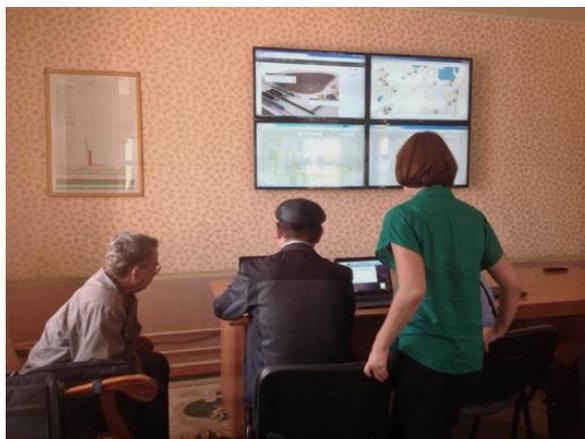


Рис.1. Центральный диспетчерский пункт по контролю за функционированием работы горнотехнических и энергетических объектов разреза «Ангренский»

В системе контроля особое внимание уделяется процессам вскрышных работ, добычи угля, транспортирования угля и пород вскрыши. Транспорт угля осуществляется конвейерным, автомобильным и железнодорожным транспортом. Уголь отгружается как с разреза, так и со склада готовой продукции. При этом отборный уголь, в основном, предназначен для поставок населению и бюджетным организациям автотранспортом. А на тепловые электрические станции и дистрибьюторские пункты уголь поставляется только железнодорожным транспортом.

К вскрышным породам относятся лессы, суглинки, известняки, вторичные пестроцветные и серые каолины. Особенностью вскрышных работ является то, что часть породы складывается на внутреннем отвале, а большая часть вывозится на внешние

отвалы. Транспортирование вскрышных пород на внешние отвалы осуществляется в основном железнодорожным транспортом, а на внутренние отвалы конвейерным и автомобильным транспортом.

В связи со сложностью транспортных систем, транспортная техника более масштабно охвачена системами контроля работы технологического оборудования, учета расхода ГСМ, а также, в настоящее время, в плане повышения эффективности транспортных средств более детально анализируются основные параметры функционирования, например для автосамосвала «Белаз», это маршруты (рис. 2), загруженность, средняя скорость и расход топлива (рис. 3). На рисунках приведены выборочные эпизоды хронометрических данных работы автосамосвалов разреза «Ангренский», произвольно полученные при выполнении пуско-наладочных работ.

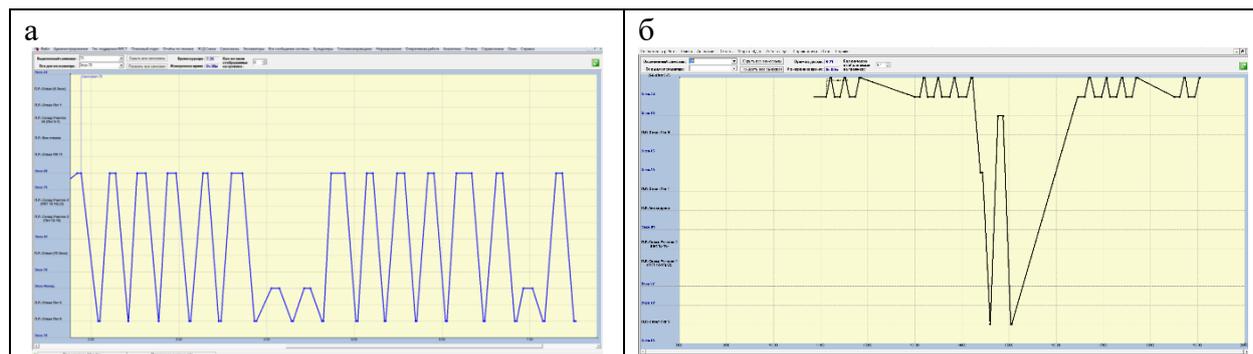


Рис. 2. Эпизод диаграммы работы (маршрута) автосамосвала А «Белаз» (а); автосамосвала В «Белаз» (б)

Из рис. 2 а, следует, что хронология работы транспортной техники «А» циклична и монотонна, без резких изменений ритмичности маршрута по сравнению с транспортной техникой «В» (рис. 2 б). В маршруте транспортной техники «В» имеется отклонение от заданного режима временного параметра рабочей смены, т.е. допущено неэффективное использование транспортной техники. Полученные оперативные данные позволяют своевременно принимать решения, направленные на устранение причин простоев автотранспортной техники или замены ее на резервные агрегаты.

Кроме того, установлено, что в процессе эксплуатации допущено неэффективное использование топливных ресурсов, рассчитанных за определенное рабочее время, что приводит к недополучению производственных прогнозных показателей.

Что касается анализа загруженности грузового автосамосвала, средней скорости и сжигаемого топлива на выполнение заданного сменного задания, можно наблюдать на примере автосамосвала «Белаз» «С», по хронометражу, приведенному на рис. 3.

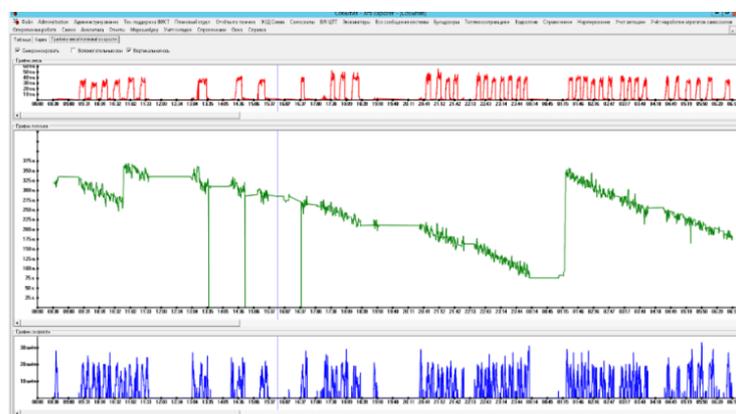


Рис. 3. Эпизод контроля по загруженности грузового автосамосвала «Белаз» «С», развиваемой средней скорости и сжигаемого топлива

Автосамосвал «С» с топливным ресурсом в количестве примерно 325-330 литров выходит на смену, приступает к выполнению перевозки, при этом масса перевозимого автосамосвалом угля колеблется от 30 тонн до 45 тонн, а средняя скорость движения составляет 15-20 км/час. Автосамосвал выполняет намеченные грузоперевозки до остатка топлива в количестве 70-75 литров и заправляется до 370-375 литров (т.е. до среднесменной нормы). Необходимо отметить, что после некоторого времени датчики показывают, что уровень топлива увеличивается до среднесменной нормы 370-375 литров. Явление, которое зафиксировано датчиками топлива, подлежит уточнению. На практике часто бывает, когда в рамках взаимопомощи водители одалживают своим партнерам по смене в экстренных производственных случаях и в удобные моменты возвращают долги.

На рис. 4 приведены эпизоды работы экскаваторов ЭКГ на добыче угля и вскрыше пород, показывающие фактический отгруженный вес, время ожидания погрузки, начало погрузки, окончание погрузки, время, затраченное на погрузку, время разгрузки. Сканирование работы экскаватора ЭКГ, обслуживающего на добыче угля автосамосвалы, курсирующие между объектами склада и добычного участка, показывает, что процессы в рассматриваемом отрезке времени четко организованы. Например, карьерный экскаватор № 24 обслуживает автосамосвал №79.

Во втором случае экскаватор ЭКГ выполняет на отведенном участке обслуживающие функционально процесса добычи, а также вскрыши. При этом этот экскаватор (№70) обслуживает автосамосвалы №73 и №77. Из ведомости следует, что данный экскаватор выполняет как удаление вскрышных пород, так и занимается добычей угля. Данный экскаватор функционирует на границе угольного пласта и пород вскрыши.

| Отчет о работе экскаваторов за 08.06.2018. г. 2 смена | | | | | | | | | |
|---|------------------|--------------------------|-----------|-------------|----------------|--------------|---------|----------------|----------------|
| Самосвал | Тип груза | Пункт разгрузки | Вес факт. | Время приб. | Ожид. погрузки | Начало погр. | Погрузк | Окон. погрузки | Время разгруз. |
| Экскаватор №24 | | | | | | | | | |
| 79 | Добыча авт Склад | Участок 1 (54) (Пкт 5-7) | 72,00 | 10.50.49 | - | 10.50.49 | 0ч. 16м | 11.06.47 | 11.12.16 |
| 79 | Добыча авт Склад | Участок 1 (54) (Пкт 5-7) | 82,00 | 11.17.35 | - | 11.17.35 | 0ч. 7м | 11.24.38 | 11.30.43 |
| 79 | Добыча авт Склад | Участок 1 (54) (Пкт 5-7) | 77,00 | 11.36.12 | - | 11.36.12 | 0ч. 8м | 11.44.08 | 11.50.18 |
| 79 | Добыча авт Склад | Участок 1 (54) (Пкт 5-7) | 88,00 | 12.59.51 | - | 12.59.51 | 0ч. 6м | 13.06.07 | 13.11.10 |
| 79 | Добыча авт Склад | Участок 1 (54) (Пкт 5-7) | 84,00 | 13.16.06 | - | 13.16.06 | 0ч. 8м | 13.23.43 | 13.29.52 |
| 79 | Добыча авт Склад | Участок 1 (54) (Пкт 5-7) | 85,00 | 13.34.14 | - | 13.34.14 | 0ч. 10м | 13.44.15 | 13.50.31 |
| 79 | Добыча авт Склад | Участок 1 (54) (Пкт 5-7) | 85,00 | 13.55.28 | - | 13.55.28 | 0ч. 10м | 14.05.41 | 14.12.20 |
| Экскаватор №70 | | | | | | | | | |
| 73 | Вскрыша авт | Автодорога | 71,00 | 09.23.13 | 0ч. 5м. | 09.28.12 | 0ч. 6м. | 09.34.02 | 09.34.46 |
| 77 | Вскрыша авт | Отвал Пкт 5 | 71,00 | 09.12.11 | 0ч. 23м. | 09.34.56 | 0ч. 8м. | 09.43.24 | 09.52.22 |
| 73 | Добыча авт | Отвал Пкт 9 | 74,00 | 09.46.52 | 0ч. 2м. | 09.48.53 | 0ч. 9м. | 09.57.49 | 10.04.49 |

Рис. 4. Эпизоды режимов работы экскаваторов ЭКГ на добыче угля и вскрыше пород

Подсистемой АИС ЦДК в реальном режиме времени оперативно фиксируются простои автосамосвалов и другой техники, анализируются причины простоев, вносятся коррективы в прогнозные показатели, формируются отчетные ведомости (пример представлен на рис. 5).

| Простой белазов за 08.06.2018 г. 1 смена | | | | |
|--|-----------------|--------------------|-------------------------|--|
| Время начала | Время окончания | Длительность(мин.) | Причина простоя | |
| № Самосвала: 35 | | | | |
| 08:00 | 13:14 | 05:14 | Сломан шасси | |
| 13:14 | 13:37 | 00:23 | ожидании погрузки | |
| 14:42 | 15:03 | 00:21 | ожидании погрузки | |
| 16:30 | 17:03 | 00:33 | ремонт ЭКГ | |
| № Самосвала: 43 | | | | |
| 8:00 | 8:32 | 0:32 | Ожидание масла (Прочие) | |

Рис. 5. Эпизоды простоев белазов

Таким образом, реализованный проект «Автоматизированная информационная система централизованного диспетчерского контроля и управления производством» на угольном разрезе «Ангренский» позволил достичь поставленных целей и улучшить материальные, экономические, социальные аспекты угольного разреза «Ангренский».

Результаты эффективности внедренной АИС ЦДК оценены соответствующими критериями, и отражены в следующих показателях:

- увеличение объемов производства (добыча угля, отработка вскрыши), снижение себестоимости продукции;
- сокращение технических и технологических ошибок, уменьшение аварийных и несчастных случаев, несогласованных действий персонала;
- повышение ритмичности и устойчивости технологического процесса, уменьшение числа смен, характеризующихся невыполнением установленных плановых заданий;
- увеличение коэффициента использования технологического оборудования;
- повышение производительности погрузочного транспортного оборудования;
- повышение производительности производственного персонала;
- улучшение экономических показателей горнотранспортных и других работ в карьере (уменьшение затрат на единицу производимой продукции);
- сокращение непроизводительных расходов;
- повышение готовности погрузочного и транспортного оборудования за счет непрерывного контроля технического состояния и оперативного планирования планово-предупредительных ремонтов.

Вывод. Совокупность исследований и экспериментальные опробования работоспособности систем и подсистем АИС ЦДК определил дальнейшие направления развития и внедрения информационных технологий в угольной отрасли.

Список литературы

1. Кривенко Ю.Н., Боднар В.И. Разрез «Ангренский» – уникальное каолино-угольное месторождение // Горный вестник Узбекистана. – 2008. – № 1. – с. 10-14.
2. Энергетическое топливо СССР: справочник. – М. Энергоатомиздат, 1991. – 184 с.
3. Косимов М.О. ОАО «O'zbekko'mir»: от настоящего к будущему // Горный вестник Узбекистана. – № 1. – 2013. – С. 3-7.
4. Якубов С.И. Перспективные направления угольной промышленности в сфере инновационного развития // Проблемы и пути инновационного развитие горно-металлургической отрасли : сб. науч. трудов МНТК. – Ташкент, 2014. – С. 223-226.
5. Якубов С.И. О состоянии подземной газификации угля в Республике Узбекистан и вопросы глубокой переработки горючих газов // Проблемы энерго- и ресурсосбережения : сб. науч. трудов ТашГТУ. – Ташкент, 2020. – С.138-144.
6. Best Practices in Underground Coal / E. Burton, J. Friedmann, R. Upadhye. – Livermore : University of California, 2013. – 119 p.
7. Mallett C. Underground Coal Gasification: An Overview of an Emerging Coal Conversion Technology // The Official Journal of the World Coal Industry. – 2015. – № 3. – P. 56–60.
8. Лавров Н.В., Кириченко И.П. Состояние и перспективы подземной газификации углей // Вестник Академии наук СССР. – 1958. – № 6. – С. 56 – 61.
9. Крейнин Е.В. Нетрадиционные термические технологии добычи трудноизвлекаемых топлив: уголь, углеводородное сырье. - М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2004. – 235 с.
10. О внедренной автоматизированной информационной системы централизованной диспетчерского контроля АО «Узбекуголь / С.И. Якубов, Ш.Н. Нигматуллин, А.В. Леднев, П.В. Макашев // Горно-металлургический комплекс: достижения, проблемы и перспективы инновационного развитие : сб. науч. трудов РНТК. – Навои, 2016. – С. 474-478.
11. 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.
12. Захаров В.Н. Кубрин С.С. Автоматизация процессов дегазации и утилизации метана при отработке метаноносных угольных пластов // Уголь. – 2010. – № 7. – С. 28–30.

**ЗАДАЧИ РАЗРАБОТКИ, ВНЕДРЕНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ СИСТЕМ
АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ**

¹д.т.н. Мышляев Л.П., ²к.э.н. Ивушкин К.А., ^{1,3}к.т.н. Макаров Г.В.,
^{1,3}к.т.н. Грачев В.В.

**1 – ООО «Научно-исследовательский центр систем управления»,
г. Новокузнецк, Россия**

2 – ООО «Объединенная компании «Сибшахтострой», г. Новокузнецк, Россия

**3 – Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия**

Аннотация. Статья посвящена рассмотрению задач разработки, внедрения и сопровождения систем автоматизации управления промышленными объектами. Приведены организационные и научно-технические задачи создания современных систем автоматизации управления. Отмечена необходимость и важность соблюдения принципов системного анализа, положений теории новых типов обратной связи, а также интеграции подходов, методов и алгоритмов управления при построении систем управления и обучении теории управления.

Ключевые слова: системы автоматизации управления, организационные задачи, научно-технические задачи, защита интеллектуальной собственности, принципы системного анализа, новые типы обратной связи, натурно-математическое моделирование.

Задачи создания систем автоматизации управления разделяются на организационные и научно-технические.

К основным организационным задачам относятся в первую очередь следующие.

1. Формирование и обеспечение постоянного функционирования коллектива исполнителей из представителей научных, образовательных, проектных, монтажных, пуско-наладочных организаций и промышленных предприятий. Необходимость в таких комплексных коллективах обуславливается требованием быстрее освоения выделяемых ресурсов и, что очень важно, все возрастающим дефицитом квалифицированных кадров. С этих позиций необходимо совершенствование тендерных процедур, так как тендерную документацию (заявку) должны готовить несколько участников конкурса – как минимум три-четыре коллектива исполнителей. Отсюда вытекает, что два-три коллектива, не выигравших тендер, напрасно затратили свои интеллектуальные и финансовые ресурсы. Также следует иметь в виду, что поданные заявки оцениваются в основном по заявляемой стоимости при условии выполнения требований технического задания. Тем самым предпочтение может быть отдано не самым перспективным и наукоемким разработкам, а уже проверенным ранее реализованным системам. Определить же эффективность качественно новых решений крайне затруднительно – для этого необходимы развитые имитационные комплексы, что требует дополнительных ресурсов.

2. Совершенствование системы защиты интеллектуальной собственности, в частности изобретений и полезных моделей. При существующей системе патентование изобретений и полезных моделей ведет к их публикации в открытой печати. Тем самым эти изобретения и полезные модели становятся общедоступными, что позволяет заинтересованным лицам (конкурирующим подрядным организациям, конечным потребителям и т.д.) пользоваться результатами интеллектуальной деятельности без каких-либо ограничений и без согласия правообладателя. Доказать же использование изобретений в проектах, особенно, если оно реализовано программным путем, практически невозможно. Такое положение дел, конечно, не стимулирует разработчиков к созданию интеллектуальной продукции.

3. Подготовка квалифицированных кадров. Основное внимание в этом вопросе уделяется подготовке студентов в высших и средних учебных заведениях, реже – периодическому повышению квалификации специалистов. И практически «в тени» остается подготовка кадров высшей квалификации – кандидатов и докторов наук и, соответственно, доцентов и профессоров. Здесь можно отметить несколько факторов: ослабление связей преподавательского состава с реальным сектором экономики, в том числе из-за загруженности «бумажной работой», уменьшение количества научных руководителей, имеющих опыт подготовки специалистов высшей квалификации (особенно профессоров), слабое обновление лабораторной базы в части натуральных объектов управления.

Научно-техническими задачи.

1. Здесь в первую очередь требуется содержательное осмысление задач синтеза и анализа систем управления с соблюдением основных принципов системного анализа [1, 2]. После уяснения целей управления главенствующим принципом является определение (выделение) **полного объекта** изучения и оптимизации. Согласно этому принципу, сформулированного в [1] как принцип однонаправленности причинно-следственных связей, полный объект управления и оптимизации не должен охватываться сильными обратными связями. Несоблюдение именно этого принципа ведет к негативным результатам как при создании систем управления, так и при обучении методам теории управления. Ярким примером тому служат работы по идентификации объектов в системах управления по данным нормальной (промышленной) эксплуатации [3-5].

2. Применение основ теории новых типов обратной связи для синтеза алгоритмов управления сложными нестационарными процессами в условиях неопределенности [6].

Математические модели теории управления в отличие от других наук, таких как физика, химия и др. отражают влияние внешних воздействий на выходные воздействия, например,

$$y = \varphi_u \cdot u + \varphi_w \cdot w, \quad (1)$$

где y - выходные воздействия, u, w – управляющие и внешние воздействия, φ_u, φ_w – операторы преобразования u и w в y .

Принципиальная особенность задач управления заключается в том, что охват объекта управления обратными связями изменяет закон преобразования u и w в y без какого-либо вмешательства в объект управления, то есть

$$y = \frac{\varphi_u}{1 \pm \varphi_{uf}} \cdot u + \frac{\varphi_w}{1 \pm \varphi_{wf}} \cdot w, \quad (2)$$

где f – оператор обратной связи.

При описании реальных объектов операторы φ_u и φ_w принимают сложную форму. Для многих реальных объектов можно выделить следующие случаи.

2.1 Операторы зависят от управляющих воздействий. Например, для проточных аппаратов, в частности для установки металлизации окисленных окатышей (шахтной печи) операторная зависимость изменения степени металлизации $\Delta\eta(s)$ от изменения производительности $\Delta G(s)$ имеет вид [5]

$$\Delta\eta(s) = \frac{k_G}{s} (1 - e^{-s\theta_G}) \cdot \Delta G(s), \quad (3)$$

где θ_G – время отсечки, k_G - коэффициент передачи по каналу $\Delta G(s) - \Delta\eta(s)$. θ_G и k_G зависят от величины изменения управляющего воздействия G и их вариации составляют до 70%.

2.2 Операторы зависят не только от управляющих, но и от выходных воздействий. Например, при выплавке стали в кислородном конвертере изменение содержания углерода $\Delta C_{ст}$ в стали на повалке конвертера от изменения расхода кислорода ΔV_{O_2} на продувку имеет вид [7]

$$\Delta C_{ст} = -\frac{1}{2800 + \frac{3,5}{C_{ст} \cdot C_{ст}^M}} (1 - 0,35 \cdot \Delta H_\phi), \quad (4)$$

где $C_{ст}$ и $C_{ст}^M$ – фактическое и модельное (расчетное) содержание углерода в стали на по-валке конвертера, ΔH_ϕ – изменение положение фурмы над уровнем расплава (управляющие воздействия).

2.3 Операторы для объектов с рециклом (положительной обратной связью) [8]

$$\varphi_0(s) = \frac{\varphi_{п.ц.}(s)}{1 - \varphi_{п.ц.}(s) \cdot \varphi_p(s)}, \quad (5)$$

где $\varphi_{п.ц.}(s)$, $\varphi_p(s)$ – операторы прямой цепи объекта и рецикла.

2.4 Операторная зависимость для объектов с распределенными управлениями

$$\delta y(s) = \sum_{j=1}^J \frac{k_j}{T_i s + 1} \cdot e^{-\tau_j s} \cdot \delta u_j(s), \quad (6)$$

где J – число управляющих воздействий, k_j , T_j – коэффициенты передачи и постоянная времени для каждого j -ого канала управления.

2.5 Операторы для объектов с изменяемой структурой под влиянием внешних воздействий или целенаправленно для достижения желаемых динамических свойств и (или) производительности объекта [9].

Синтез контуров координатного, параметрического и структурного управления указанными объектам возможен методами теории новых типов обратной связи.

3. Комплексное применение подходов, методов и алгоритмов построения систем управления. Следует выделить следующие подходы.

3.1 Модельный подход [10], когда сначала строится модель объекта управления, включая модель преобразующего механизма, модель внешних воздействий, в том числе и неконтролируемых; на основе этих моделей формируется алгоритм управления.

3.2 Натурно-модельный подход, где можно выделить два направления:

– часть блоков системы управления представлены натурными элементами, а часть модельными [11];

– натурные блоки информационно состыкованы с их пересчетными (инкрементными) моделями [12-14], позволяющие формировать многовариантные структуры [15].

Можно, по-видимому, отметить и еще один подход, когда задаются гипотезой о поведении объекта (системы) и на ее основе выдвигаются возможные стратегии управления. К этому тяготеет, например, теория активных систем [16].

4. Развитие методов и алгоритмов объединения функций управления: контроля, идентификации, регулирования, планирования, оптимизации, моделирования. Примером такого объединения может служить оптимизация режимов управления с учетом ошибок их реализации с применением вычислительной процедуры метода оптимума номинала [17].

Вывод. Содержательный анализ задач управления с соблюдением принципов системного анализа, применение положений теории новых типов обратной связи, интеграции подходов, методов и алгоритмов управления должны быть главенствующими при построении систем управления и обучении теории управления.

Список литературы

1. Емельянов С.В. Основные принципы системного анализа. В кн. «Проблемы научной организации управления социалистической промышленностью» / С.В. Емельянов, Э.Л. Наппельбаум. – М.: Экономика, 1974. – С. 92-99.
2. Оптнер С. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем / С. Оптнер. – М.: Советское радио, 1975. – 272 с.
3. Ротач В.Я. По поводу работ, связанных с идентификацией объектов в условиях их нормального функционирования // Автоматика и телемеханика. – 1969. – №6. – С. 201-202.
4. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. – М.: Мир, 1975. – 683 с.
5. Методы идентификации промышленных объектов в системах управления / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, Л.П. Мышляев [и др.]. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2007. – 307 с.

6. Емельянов С.В. Коровин С.К. Новые типы обратной связи. Управление при неопределенности. – М.: Наука, Физматлит, 1997. – 352 с.
7. Способы расчета масс материалов конвертерного процесса / В.П. Авдеев, Р.С. Айзатулов, Л.П. Мышляев [и др.]. – М.: Metallurgia, 1994. – 192 с.
8. 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.]. – Новосибирск: Наука, 2006. – 483 с.
9. Автоматизация управления углеобогачительными фабриками / Л.П. Мышляев, С.Ф. Киселев, А.А. Ивушкин [и др.]. – Новокузнецк: Издательство СибГИУ. – 304 с.
10. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
11. Динамическое моделирование и испытания технических систем / И.Д. Кочубиевский, В.А. Стражмейстер, Л.В. Калиновская, П.А. Матвеев. – М.: Энергия, 1978. – 303 с.
12. Авдеев В.П. К основам натурно-математического моделирования // Известие ВУЗов. Черная металлургия. – 1979. №6 – С. 131-134.
13. Алгоритмы натурно-математического моделирования систем управления / В.П. Авдеев, Л.П. Мышляев, С.Р. Зельцер, В.И. Носырев // Алгоритмы управления металлургическим и машиностроительным производством: сб. науч. трудов. – Карловы Вары, 1980. – Т. 2. – С. 250-256.
14. Мышляев Л.П. Развитие пересчетного моделирования для систем управления // Известие ВУЗов. Черная металлургия – 1989. – №12. – С. 129-132.
15. Производственно-исследовательские системы с многовариантной структурой / В.П. Авдеев, Б.А. Кустов, Л.П. Мышляев. – Новокузнецк: Кузбасский филиал Инженерной академии, 1992. – 188 с.
16. Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем. – М.: Наука, 1977. – 255 с.
17. Метод оптимума номинала и его применение / Г.В. Горелова, В.В. Здор, Д.В. Свечарник. – М.: Энергия, 1970. – 199 с.

УДК 681.518

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ «УБИНСКАЯ»

^{1,2}к.т.н. Грачев В.В., ¹д.т.н. Мышляев Л.П., ^{1,2}Коровин Д.Е., ^{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

Аннотация. Рассматриваются вопросы проектирования системы автоматизации управления обогатительной фабрики «Убинская» (г. Белово Кемеровской области). Представлены обобщенная функциональная и укрупненная техническая структуры системы автоматизации управления углеобогачительной фабрики «Убинская». Приведено описание режимов управления, технического и программного обеспечения системы.

Ключевые слова: система автоматизации управления (САУ), углеобогачительная фабрика, техническое обеспечение, программное обеспечение, SCADA-система.

В период с 2023 по 2025 г. компаниями угледобывающей отрасли Кузбасса заявлены планы на строительство семи углеобогачительных фабрик (ОФ) [1]. Одной из таких фабрик является ОФ «Убинская» АО разрез «Шестаки» (г. Белово Кемеровской обл.) с общим

объемом переработки 2 млн. т в год. Разрез «Шестаки» работает с 1970 года и является одним из старейших на территории региона угледобывающим предприятием. В 2000 году он стал частью группы предприятий АО «Стройсервис», что положило начало основной деятельности компании – добыче угля. Разрез «Шестаки» добывает уголь высокого качества коксующихся и энергетических марок СС, КО и Ж на Бачатском и Убинском каменно-угольных месторождениях.

В 2019 году компания АО «Стройсервис» приняло решение о строительстве на территории промышленной площадки разреза обогатительной фабрики «Убинская». В настоящее время осуществляется разработка проектных решений и прохождение экспертиз. Среди основных проектных и технологических решений ОФ «Убинская» можно отметить [2-3]:

- оптимальное сочетание отечественного и зарубежного оборудования с его объединением в эффективную и высоконадежную структуру;
- гибкость технологической схемы, обеспечивающая возможность изменения структуры объекта, выбора и реализации рациональных схем и режимов процесса погрузки и складирования;
- экологичность и безопасность производства;
- высокий уровень автоматизации агрегатов, технологических процессов и в целом всего производства с применением современных программно-технических средств.

Основная цель создания системы автоматизации управления (САУ) ОФ «Убинская» – это повышение эффективности управления технологическим комплексом и, вследствие этого, улучшение технико-экономических показателей его функционирования.

Достижение поставленной цели обеспечивается по следующим направлениям:

- 1) Автоматизация информационных и управляющих функций при решении задач:
 - оперативного формирования и анализа информации об изменениях режимов функционирования и состоянии технологических процессов, агрегатов и оборудования, потреблении электрической и тепловой энергии;
 - оперативной согласованной коррекции заданий на режимные параметры технологических процессов;
 - оперативной реализации управляющих решений и регулирования технологических параметров;
 - контроля, учета и анализа нарушений технологической и производственной дисциплины, эффективности управления.
- 2) Повышение надежности системы автоматизации управления технологическим комплексом, 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.

Проектируемая система автоматизации управления ОФ «Убинская» имеет иерархическую структуру и включает в свой состав верхний уровень и нижний уровень САУ [5-6].

Верхний уровень САУ – система централизованного сбора, регистрации и отображения информации о состоянии технологических процессов и оборудования технологического комплекса фабрики, дистанционного управления техкомплексом.

Нижний уровень САУ – система автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами и оборудованием технологического комплекса, выполняющая следующие задачи:

- автоматического контроль и диагностика состояния технологических процессов и оборудования технологического комплекса;
- автоматическое программно-логическое управления оборудованием технологического комплекса;
- автоматическое регулирования технологических параметров;
- взаимодействие с системами локальной автоматики, поставляемыми комплектно с технологическим оборудованием.

Укрупненная функциональная структура САУ ОФ «Убинская» представлена на рис. 1.

В ее состав входят следующие основные системы:

- 1) система централизованного сбора, обработки и хранения информации ОФ;
- 2) система автоматизации управления производственными процессами обогатительной фабрики;
- 3) система инженерного сопровождения;
- 4) система автоматизации управления технологическим комплексом (САУ ТК), состоящей в свою очередь также из шести систем:
 - автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления технологическим комплексом ОФ;
 - система автоматизации управления углеприемом;
 - система автоматизации управления главным корпусом;
 - система автоматизации управления комплексом погрузки;
 - система автоматизации управления сушильно-топочным отделением;
 - система автоматизации управления насосной станцией.

В САУ ОФ «Убинская» распределение функций управления между программно-аппаратными средствами системы и оперативным персоналом определяется выбранным режимом реализации управляющих функций.

Основной режим – «Автоматический». Все функции контроля и управления выполняются автоматически, включая локальное и взаимосвязанное регулирование технологических параметров комплекса, автоматический плановый пуск/останов технологического комплекса с соблюдением технологического регламента по командам операторов, отслеживание и реализация логической зависимости взаимных блокировок агрегатов и оборудования всего технологического комплекса и его частей, непрерывный контроль за выключателями аварийного останова и устройствами обеспечения безопасности обслуживающего персонала.

Вспомогательный режим – «Дистанционный». Все информационные и управляющие функции реализуются аналогично основному режиму, за исключением планового пуска/останова и переключения технологических схем, выполняются автоматически. Включение и выключение технологического оборудования и механизмов производится по командам операторов комплексов и отделений. При этом система автоматически обеспечивает выполнение требований технологического регламента.

Вспомогательный режим – «Дистанционный без блокировок». Все информационные и управляющие функции реализуются аналогично основному режиму, за исключением планового пуска/останова и переключения технологических схем, аварийных взаимных блокировок механизмов и оборудования, выполняются автоматически. Включение и выключение технологического оборудования и механизмов производится по командам диспетчера фабрики или оператора комплекса.

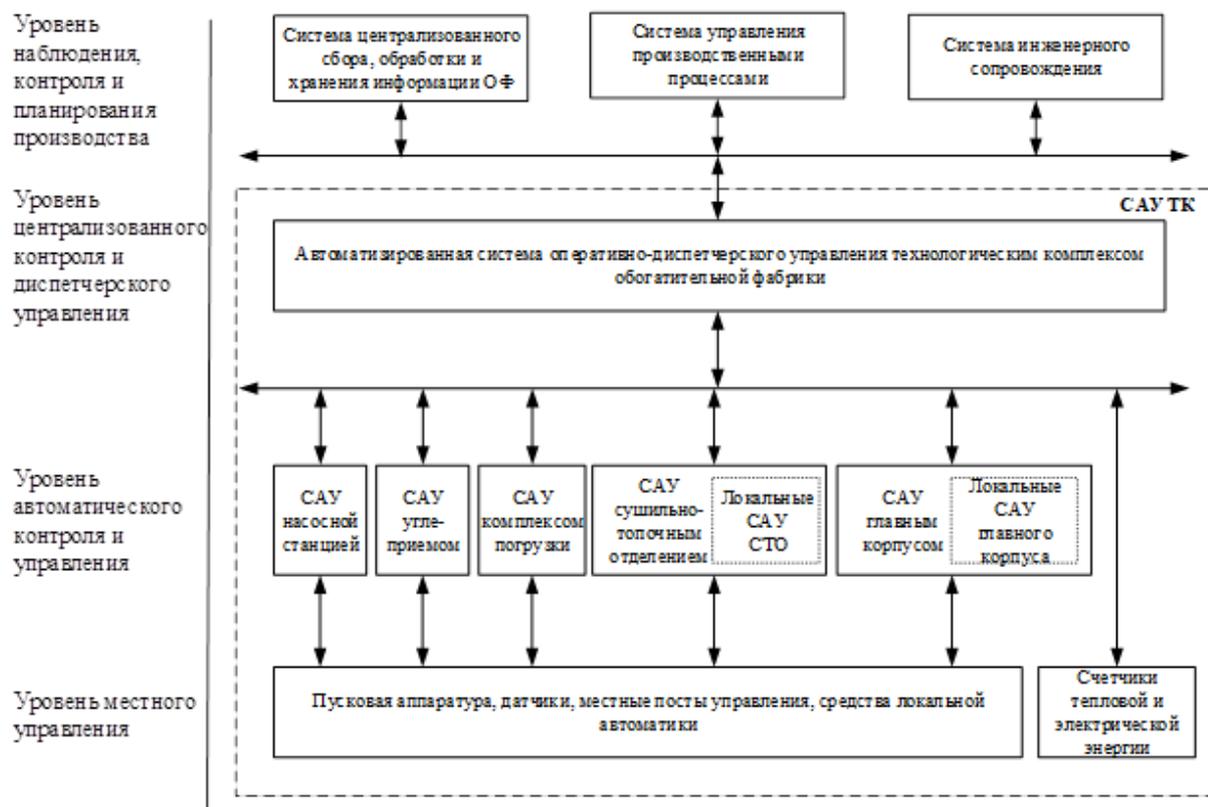


Рис. 1. Схема функциональной структуры системы автоматизации управления ОФ «Убинская»

Наладочный режим – «Местный». Все информационные функции выполняются автоматически. Все управляющие функции выполняются производственным персоналом. Включение и выключение электроприводов производится по сигналам управления, поступающим с кнопочных станций местных постов управления каждого агрегата.

Схема укрупненной технической структуры САУ ОФ «Убинская» представлена на рис. 2.

Аппаратная реализация системы выполнена на базе микропроцессорных программируемых контроллеров, серверов, дискового массива, персональных компьютеров, НМИ-терминалов, ноутбука, принтера, коммутаторов и преобразователей интерфейсов как отечественного, так и зарубежного производства.

Аппаратная реализация систем верхнего уровня САУ ОФ (система централизованного сбора, обработки и хранения информации, система управления производственными процессами, система инженерного сопровождения, автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления технологическим комплексом обогатительной фабрики) выполнена на базе серверов, персональных компьютеров компаний Hewlett-Packard (США), Advantix (Россия) и НМИ-терминалов корпорации Omron (Япония).

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 HP Proliant, 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, НМИ-терминалов операторов в процессе поиска рационального технологического регламента, наладки, последующего развития и модернизации проектируемой системы.

Система представлена стационарным АРМ инженера (персональный компьютер), реализованным на базе HP ProDesk с 32' LCD-монитором и мобильным АРМ инженера (ноутбук), реализованным на базе ноутбука HP.

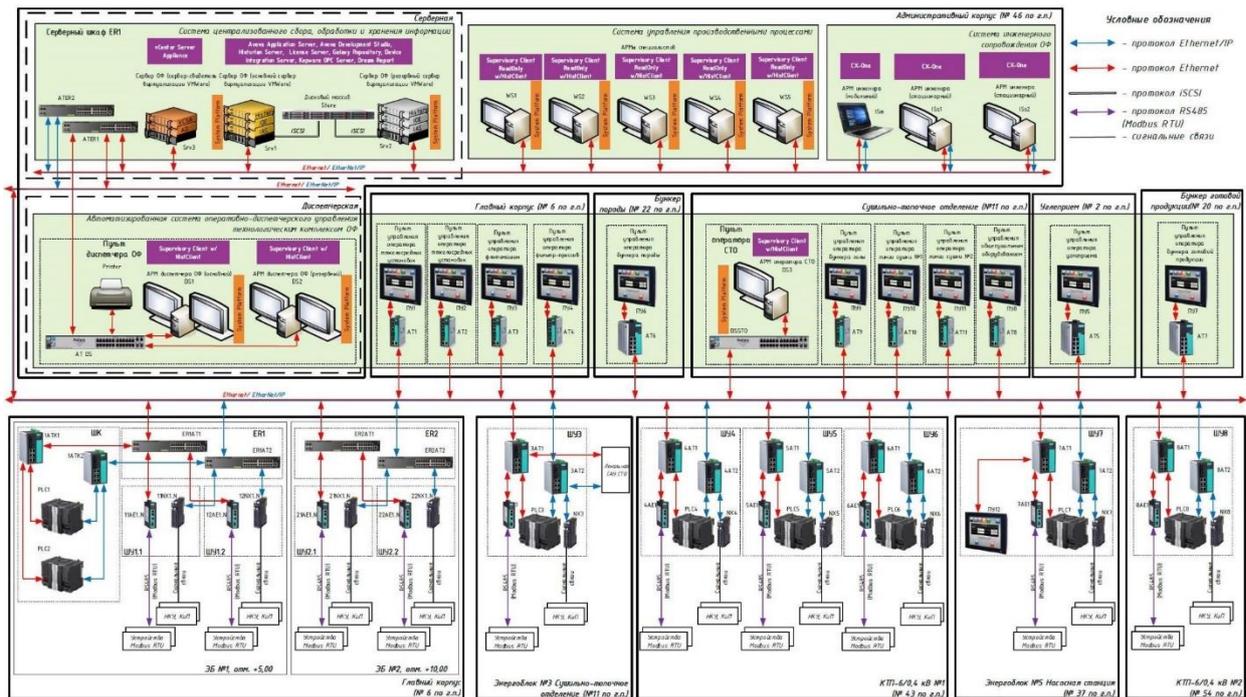


Рис. 2. Схема укрупненной технической структуры системы автоматизации управления ОФ «Убинская»

Автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления технологическим комплексом обогатительной фабрики представлена АРМ базе персонального компьютера HP ProDesk с 32' LCD-монитором и НМИ-терминалами компании Omron. Поставщиком производственных данных реального времени для АРМ оператора является сервер проектируемой системы, для НМИ-терминалов операторов – программируемые логические контроллеры.

Аппаратная реализация систем нижнего уровня САУ ОФ (система автоматизации управления углеприемом, главным корпусом, комплексом погрузки, сушильно-топочным отделением, насосной станцией) выполнена на базе контроллеров серии NX корпорации Omron (Япония). Функциональные возможности и технические характеристики этих контроллеров в полной мере соответствуют задачам их применения в проектируемой системе.

Системы нижнего уровня строятся с использованием контроллеров, связанных между собой с помощью сети Ethernet/IP, с переходом, на оптоволоконный кабель для подключения контроллеров, расположенных в других распределительных пунктах.

Для подключения внешних устройств и автономных систем с интерфейсом RS485 (протокол Modbus) используются соответствующие коммуникационные модули Omron.

Обмен информацией между контроллерами, с устройствами, подключенными по RS485 к соответствующим коммуникационным модулям контроллера Omron, с АРМ оператора, АРМ инженера, с сервером, с операторскими НМИ-терминалами осуществляется по информационной сети Ethernet.

Данный комплекс технических средств достаточен для выполнения всех автоматизированных функций. Все выбранные компоненты системы являются техническими средствами серийного производства и размещаются с соблюдением требований, содержащихся в технической, в том числе эксплуатационной, документации на них, и так, чтобы было удобно использовать их и выполнять техническое обслуживание.

Информационный обмен между всеми компонентами проектируемой системы осуществляется посредством информационной сети Ethernet.

В качестве активного сетевого оборудования информационной сети системы используются управляемые коммутаторы компании MOXA (Тайвань) и Eltex (Россия).

В качестве базового программного обеспечения проектируемой системы выбраны:

- пакет MasterSCADA 4D компании «МПС Софт» (Россия);
- программное обеспечение Sysmac Studio для настройки, конфигурирования, программирования и отладки оборудования автоматизации компании Omron (Япония).

MasterSCADA 4D – это современная вертикально интегрированная и объектно-ориентированная SCADA и SoftLOGIC система отечественного производства, ни в чем не уступающая зарубежным аналогам. Она предназначена для разработки АСУТП, систем диспетчеризации, АСКУЭ и АСТУЕ во всех отраслях промышленности, ЖКХ, а также в области автоматизации зданий.

MasterSCADA – это универсальный инструмент, позволяющий в рамках одного проекта программировать задачи всех уровней систем управления – начиная от программирования контроллеров, далее АРМ операторов и далее рабочие места руководителей и специалистов из области управления предприятием.

Базовое программное обеспечение верхнего уровня САУ ОФ, построенное на базе SCADA-системы MasterSCADA 4D, включает в себя следующие программные продукты:

- средства ввода-вывода данных;
- средства архивации и хранения предыстории;
- программное обеспечение для анализа данных и подготовки отчетности;
- программное обеспечение сбора и обработки производственных данных;
- средства визуализации данных;
- программное обеспечение разработки и сопровождения системы.

Вывод. Проектирование САУ ОФ «Убинская» осуществляется в ускоренном режиме. Стандартный срок проектирования сокращен с 12-16 месяцев до 7-8 месяцев. Столь существенное сокращение сроков проектирования стало возможным за счет одновременного, параллельного осуществления большинства проектных работ, использования унифицированных проектных решений и применения сред и программных продуктов автоматизированного проектирования [4-5].

Список литературы

1. Пять угольных предприятий могут появиться в Прокопьевском округе в ближайшие три года. – URL: <https://prokopievsk.ru/news/ekonomika/pyat-ugolnykh-predpriyatiy-royavitsya-v-prokopevsk>
2. Сазыкин Г.П., Синеокий Б.А., Мышляев Л.П. Проектирование и строительство углеобогатительных фабрик нового поколения. – Новокузнецк: СибГИУ, 2003 – 126 с.
3. Мышляев Л.П. 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.
4. MasterSCADA 4D. – URL: <https://www.masterscada.ru/>
5. Revit: BIM software for designers, builders, and doers. – URL: <https://www.autodesk.com/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=subscription&plc=RVT>

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ ОБЪЕМА ГОРНОЙ МАССЫ ЛАЗЕРНЫМ ДАЛЬНОМЕРОМ В ПРОЦЕССЕ ВЫПУСКА УГЛЯ НА ЗАБОЙНЫЙ КОНВЕЙЕР

^{1,2}Черкасов П.В., ^{1,2}к.т.н. Никитенко М.С., ^{1,2}Кизилев С.А., ¹Худоногов Д.Ю.

1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,

г. Кемерово, Россия

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

г. Кемерово, Россия

Аннотация. Рассмотрены различные способы измерения объема сыпучих материалов. Предложен способ измерения объема с помощью лазерного дальномера. Применен фильтр Калмана для данных с лазерного дальномера с обоснованием подобранных весовых коэффициентов на действующем макете. Данные о расстоянии от модулей лазерных дальномеров до искомой поверхности могут быть применены для количественной оценки угля на питателе, а также для измерения и расчета текущей производительности питателя крепи в процессе выпуска угля на забойный конвейер.

Ключевые слова: управляемый выпуск, объем горной массы, лазерный дальномер, Arduino, фильтрация Калмана, стандартное отклонение, скорость реакции на изменение, карта высот, выпуск угля подкровельной толщи.

Значительное количество мировых запасов угля расположено в мощных пластах. Для их отработки применяются технологии с выпуском угля подкровельной толщи [1]. Для снижения потерь при выпуске угля из подкровельной толщи, выпуск необходимо производить одновременно из групп секций, применяя волновой (последовательным включением питателей на каждой секции крепи, но с временной задержкой) или площадной (питатели работают одновременно на группе секций) выпуск [2]. Для реализации данных технологических режимов, секция крепи, из которой производится выпуск, должна обладать возможностью регулирования производительности встроенного в нее механизированного питателя. Данные технологические приемы недоступны для современных очистных комплексов, с целью их реализации разработана крепь КУВ, где для транспортировки угля применен лотковый (качающийся) питатель. Принцип действия питателей данного типа основан на совершении дискретных возвратно-поступательных движений. Груз на каретке питателя увлекается в сторону движения питателя за счет трения и порционно ссыпается на забойный конвейер.

Эффективность технологии выпуска угля подкровельной толщи напрямую зависит от способности автоматизированной системы управления поддерживать требуемую производительность каждого из питателей в группе секций, производящих выпуск угля. Таким образом, технологии волнового и площадного выпуска угля невозможно реализовать в полном объеме без реализации автоматизированной системы управления производительностью питателя [3], что в свою очередь требует разработки метода измерения текущей производительности качающегося питателя, встроенного в секцию кепи КУВ.

Обеспечение возможности получения системой управления данных об объеме горной массы на питателях позволит принимать обоснованные решения для продолжения выпуска угля либо корректировки загрузки питателей.

Известны различные способы измерения объема сыпучих материалов. Перспективным являются технологии с применением машинного зрения [4]. Примеры таких технологий являются: лидар [2, 5], эхолокационное сканирование [6]. На фоне остальных технологий можно выделить лидар, так как лазерные трехмерные лидары могут использоваться для определения объемов сыпучих веществ, перемещаемых с разными скоростями или

находящихся в статичном состоянии [4]. Принцип работы лидара основан на излучении направленного светового импульса на объект и расчета времени возвращения сигнала. Но трехмерный лидар не может нормально функционировать в условиях угольной шахты. В Австралии разрабатывался проект трехмерного лидара для угольных шахт – ExScan описанный в [7], но на 2023 год проект так и не вышел на стадию коммерческой эксплуатации, а информация о нем пропала с сайта компании разработчика.

Выбор метода измерения производительности питателя следует осуществлять, основываясь на конструктивных особенностях питателя. А именно, дозирующее свойство качающегося питателя, что позволяет измерять статичные объемы каждой из сбрасываемых порций и сложив их за определенный промежуток времени получить производительность питателя за этот промежуток времени [2].

Ранее был предложен способ определения объема с применением технологии машинного зрения [2], где на измеряемый материал проецировалась сетка излучателями световых контрастных линий. Измерение высот происходило в точках пересечения лазерных линий. Затем по созданному массиву данных формировалась карта высот исследуемого объекта, с помощью которой на ЭВМ вычислялся его объем.

На примере узлов проецируемой сетки излучателями, подход к измерению объема может быть развит в части применения массива лазерных дальномеров [8-10], который позволяет рассчитать расстояние по времени распространения лазерных импульсов до исследуемого объекта и обратно. Массив дальномеров может располагаться по заданным координатам узлов, заменяя перекрестия проецируемой сетки, и работать на основе математики вышеприведенного способа. Используя информацию о расстоянии от каждого дальномера до объекта, строится карта высот и измеряется объем.

Для апробации предложенного способа разработан лабораторный стенд (рис. 1 а) для проведения серий экспериментов по обоснованию работоспособности способа и анализа получаемых данных (рис. 1 б). Макет представляет из себя каркас с закрепленным контроллером, к которому подключен лазерный дальномер.

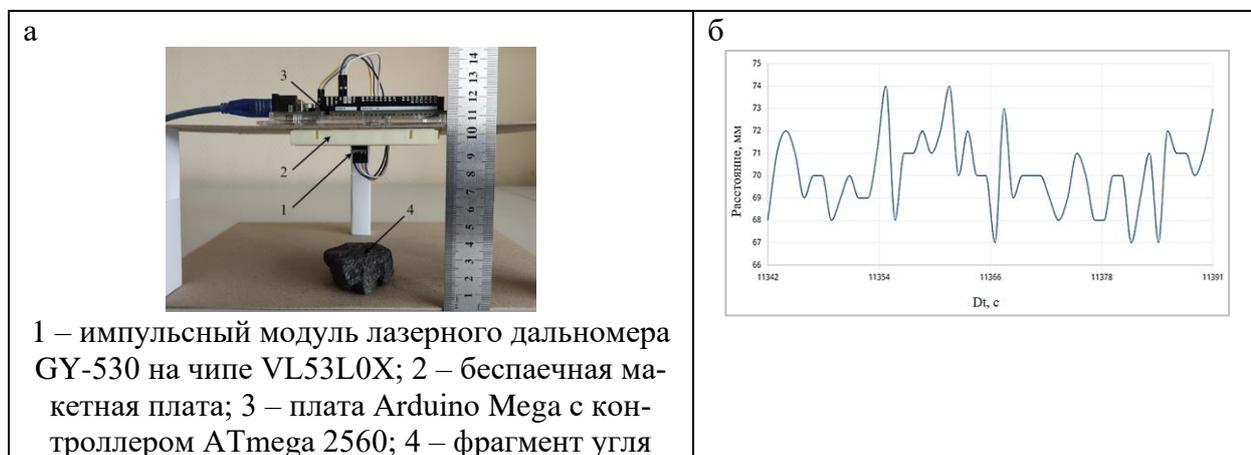
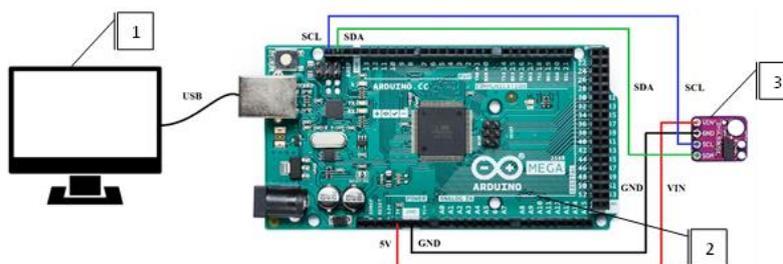


Рис. 1. Результаты первой серии экспериментов: а – действующий макет; б – данные со стандартной программы микроконтроллера (расстояние от дальномера до фрагмента угля 71 мм)

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. В первой серии экспериментов фрагмент угля помещался под лазерный дальномер в зону его действия на заданном расстоянии. После вывода измеренного расстояния на монитор последовательного порта происходила обработка полученных данных. Они заносились в ПО Microsoft Excel для расчета стандартного отклонения и относительной погрешности.

В качестве лазерного дальномера использован модуль GY-530 на чипе VL53L0X (рис. 2). Лазерный дальномер установлен на универсальную беспаяечную макетную плату.

Технические характеристики импульсного модуля лазерного дальномера представлены в табл. 1.



1 – ЭВМ; 2 – плата Arduino Mega с контроллером АТmega 2560; 3 – импульсный модуль лазерного дальномера GY-530 на чипе VL53L0X

Рис. 2. Обобщённая схема подключения аппаратного и программного обеспечения

Таблица 1

Технические характеристики лазерного дальномера GY-530 на чипе VL53L0X

| Характеристика | Значение |
|-------------------------------------|-------------------|
| Напряжение питания | + (2,8 ... 5) В |
| Время ранжирования | < 30 мс |
| Потребляемая мощность | 20 мВт |
| Энергопотребление в режиме ожидания | 5 мкА |
| Область измерения | 0,03 ... 2 м |
| Канал связи | Протокол связи ИС |

Получение данных и управление лазерным дальномером осуществлялось через плату Arduino Mega [11] с контроллером АТmega 2560 [12] (рис. 2). На основе стандартных библиотек среды разработки Arduino IDE 2.0.4. и свободнораспространяемого кода была разработана программа для микроконтроллера, позволяющая выводить измеренное модулем VL53L0X расстояние до объекта в монитор последовательного порта на персональном компьютере. Листинг программы представлен на рис. 3.

```

#include <Wire.h> // подключение библиотеки I2C
#include <VL53L0X.h> // подключение библиотеки дальномера VL53L0X
VL53L0X sensor;
void setup() // объявление метода setup(), в котором происходит старт микро-
контроллера
{
    Serial.begin(9600); // скорость передачи данных от Arduino в ПК по com порту,
бит/с
    Wire.begin(); // инициализация библиотеки Wire и подключение Arduino к шине
I2C
    sensor.setTimeout(500); // ожидание первого отклика датчика, мс
    if (!sensor.init()) // проверка связи с датчиком
    {
        Serial.println("Failed to detect and initialize sensor!"); // если от-
клик датчика превысил 500 мс, то отображается сообщение об ошибке
        while (1) {}
    }
    sensor.startContinuous(); // запуск непрерывного режима снятия показани-
ний с датчика
}
void loop() // объявление метода loop(), обеспечивающий выполнение цикла
{
    Serial.print(sensor.readRangeContinuousMillimeters());
    if (sensor.timeoutOccurred()) { Serial.print(" TIMEOUT"); }
    Serial.println();
}
    
```

Рис. 3. Листинг программы

После тестирования лабораторного стенда были проведены эксперименты по определению чувствительности модуля лазерного дальномера на чипе VL53L0X. В первой серии экспериментов модуль устанавливался над фрагментами угля на заданном расстоянии 71 мм.

Результат измерения отображался в программном обеспечении в виде списка дискретных значений и графика (рис. 1 б). По значениям оси ординат на графике видно, что получаемые данные близки к действительным. Однако однозначно определить расстояние от модуля дальномера до угольной массы достаточно сложно. Наблюдается погрешность в измерении расстояния. Для автоматизированной оценки объема горной массы требуются более точные данные о расстоянии от модуля до исследуемой горной массы. Важно снизить погрешность измерений лазерного дальномера, потому что при явной величине погрешности, последняя будет прибавляться к теоретической погрешности уже оценки объема.

Далее для повышения точности была применена первичная цифровая обработка данных от лазерного дальномера. Существует несколько способов повышения точности данных на основе фильтров, которые применяются к входным данным. Наиболее известные способы цифровой фильтрации – алгоритм скользящего среднего (Simple Moving Average) и упрощенный фильтр Калмана [13], позволяющий уменьшить вычислительную нагрузку на ЭВМ. Фильтр скользящего среднего усредняет несколько значений первичного сигнала и рассчитывает выходной сигнал. Для данного фильтра характерны отставание выходного сигнала от оригинального, а также низкая способность отделять близкие частоты сигнала. Фильтр Калмана, используя информацию о динамике системы, прогнозирует состояние системы с последующей коррекцией [14-16]. Фильтрация Калмана обеспечивает меньшую задержку выходного сигнала и может применяться в системе, где важна динамика ее поведения [13]. К такой системе относится автоматизированная система управления выпуском. Регистрация изменений объема горной массы должна поступать в систему автоматизированного управления очистным комплексом в режиме реального времени. По этой причине выбираем для лабораторного стенда упрощенный фильтр Калмана с целью повысить точность измеряемого расстояния от лазерного дальномера VL53L0X.

Важными элементами фильтра Калмана, оказывающими влияние на его эффективность являются весовые коэффициенты. Для подбора весовых коэффициентов фильтра необходимо учитывать, что средняя частота работы качающегося питателя составляет одно колебание в секунду. Поэтому в ходе эксперимента на лабораторном стенде предъявляется и убирается фрагмент угля из-под лазерного дальномера с частотой 1 раз в секунду, моделируя ступенчатый характер изменения расстояния в зоне действия дальномера, измерения производятся с помощью секундомера, встроенного в смартфон.

Используя свободнораспространяемый программный код, в ранее описанную программу была добавлена функция, применяющая фильтр Калмана к массиву измерений расстояния до угля, поступивших с датчика VL53L0X в микроконтроллер за 1 секунду, и возвращающая результат обработки в монитор последовательного порта ЭВМ.

Листинг программы в микроконтроллере с модифицированной упрощенной фильтрацией Калмана представлен на рис. 4 [17].

Алгоритм работы программы, следующий: микроконтроллер опрашивает датчик, получает информацию о расстоянии от лазерного дальномера до фрагмента угля и сглаживает выходную величину. Весовые коэффициенты, которые необходимо подобрать представлены в программе переменными Mst и Alt_react . Для калибровки сглаженным сигналом имеется возможность варьирования коэффициентом скорости реакции системы на изменение Alt_react с заранее вычисленным стандартным отклонением данных с дальномера Mst , полученных при первой серии экспериментов.

После проведения каждой серии замеров данные копируются из монитора последовательного порта и переносятся в ПО Microsoft Excel для расчета стандартного отклонения. Выборка выходных данных, включающая 39 пиковых значений (рис. 1 б) с датчика

VL53L0X. Стандартное отклонение рассчитывалось с помощью функции СТАНДОТКЛОН, реализующейся по формуле (1)

$$Mst = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \mu)^2}{n-1}}, \quad (1)$$

где x_i – каждое наблюдаемое значение расстояния; μ – среднее арифметическое; n – объем выборки.

Таким образом, в программу, модифицированную упрощенным фильтром Калмана, указывалось стандартное отклонение $Mst = 1,83$.

```

#include <Wire.h> // подключение библиотеки I2C
#include <VL53L0X.h> // подключение библиотеки дальномера VL53L0X
VL53L0X sensor;
float Mst = 1.83; // переменная с плавающей точкой, в которую записывается
стандартное отклонение исходной выборки
float Alt_react = 0.5; // переменная с плавающей точкой, в которую записыва-
ется скорость реакции системы на изменение (от 0.001 до 1)
float Mst_est = 1.0; // переменная с плавающей точкой, в которую записывается
оценка погрешности
float Gain = 0.0; // переменная с плавающей точкой, в которую записывается по-
лучение данных
float L_est = 0.0; // переменная с плавающей точкой, в которую записывается
последняя оценка
float Filter_value = 0.0; // переменная с плавающей точкой, в которую будут
записываться результаты
void setup()
{
  Serial.begin(9600); // скорость передачи данных от Arduino в ПК по com порту,
бит/с
  Wire.begin(); // инициализация библиотеки Wire и подключение Arduino к шине
I2C
  sensor.setTimeout(500); // ожидание первого отклика датчика, мс
  if (!sensor.init()) // проверка связи с датчиком
  {
    Serial.println("Failed to detect and initialize sensor!"); // если от-
клик датчика превысил 500 мс, то отображается сообщение об ошибке
    while (1) {}
  }
  sensor.startContinuous(); // запуск непрерывного режима снятия показаний с
датчика
}
void loop() объявление метода loop(), обеспечивающий выполнение цикла
{
  float A = filter(sensor.readRangeContinuousMillimeters()); // вызов функции
фильтрации, которая обрабатывает и возвращает данные в переменную A
  Serial.print(sensor.readRangeContinuousMillimeters()); // вывод данных с
датчика до применения фильтра в монитор последовательного порта на ПК
  Serial.print(" "); // вывод пробела
  Serial.print(A); // вывод данных с датчика после применения фильтра в мони-
тор последовательного порта на ПК
  if (sensor.timeoutOccurred()) { Serial.print(" TIMEOUT"); }
  Serial.println(); // перемещение на следующую строку
}
float filter(float val) { // функция фильтрации
  Mst_est = Mst_est + Alt_react;
  Gain = Mst_est / (Mst_est + Mst);
  Mst_est = (1 - Gain) * Mst_est;
  L_est = Filter_value;
  Filter_value = Gain * (val - L_est) + L_est;
  return (Filter_value);
}

```

Рис. 4. Листинг программы с модифицированной упрощенной фильтрацией Калмана

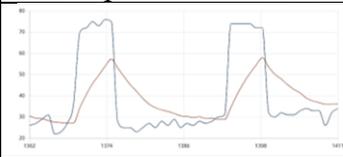
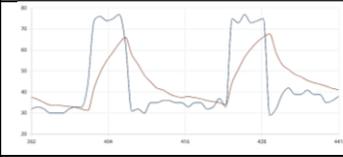
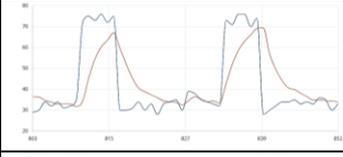
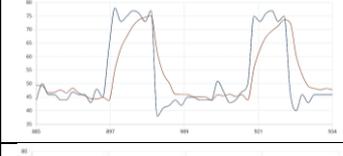
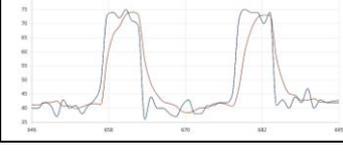
Подбор коэффициента скорости реакции на изменение был произведен экспериментальным путем с учетом того, что питатель крепи с управляемым выпуском выполняет возвратно-поступательное перемещение угля дискретными порциями с частотой, равной одному колебанию в секунду [2]. Предъявлялся и убирался фрагмент угля из-под лазерного дальномера, моделируя ступенчатый характер изменения расстояния в зоне действия дальномера. Результаты второй серии экспериментов по подбору значения коэффициента Alt_react представлены в табл. 2.

Подтверждено, что уменьшение коэффициента скорости реакции влияет на повышение точности выходного значения, но увеличивает время реакции системы на изменение расстояния. Исходя из графиков оригинальных и фильтрованных значений с учетом изменения расстояния от дальномера до фрагмента угля с частотой дискретизации 1 Гц, видно, что сглаженные графики 4 и 5 показывают достаточную точность исходных данных. Однако при коэффициенте $Alt_react = 1$ могут сохраняться паразитные шумы. Это говорит о

возможности применения в управляющей программе с фильтром Калмана значения коэффициента $Alt_react = 0,5$.

Таблица 2

Калибровка коэффициента, компенсирующего разброс данных с датчика

| № | Значение коэффициента Alt_react | Первичное пиковое значение датчика, мм | Фильтрованное пиковое значение датчика, мм | Погрешность измерений, % | График оригинальных и фильтрованных значений с учетом изменения расстояния |
|---|------------------------------------|--|--|--------------------------|---|
| 1 | 0,0625 | 75 | 57 | 22,6 |  |
| 2 | 0,125 | 75 | 65 | 13,3 |  |
| 3 | 0,25 | 75 | 68 | 9,3 |  |
| 4 | 0,5 | 75 | 74 | 1,3 |  |
| 5 | 1 | 75 | 74 | 1,3 |  |

На примере различных фрагментов угля в результате исследования было протестировано, что в независимости от размера и фракции угля регистрируются удовлетворительные результаты (рис. 5) фильтрованных данных с применением выбранных весовых коэффициентов.

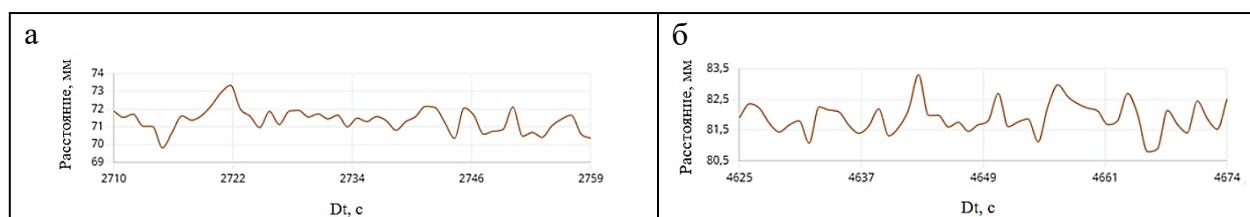


Рис. 5. Подтверждение унифицируемости значений весовых коэффициентов упрощенного фильтра Калмана: а – расстояние от дальномера до угля 71 мм (погрешность измерений до $\pm 3,2\%$); б – расстояние от дальномера до угля 82 мм (погрешность измерений до $\pm 1,6\%$)

Вывод. Представлен метод, обеспечивающий достижение достаточной точности выходных данных в условиях определения расстояний. Фильтрация Калмана является предпочтительным для решения поставленной задачи. Стохастичность результатов, получаемых от лазерного дальномера VL53L0X, снизилась с $\pm 5\%$ до $\pm 3,2\%$ по сравнению с опытами до применения фильтра. Данные о расстоянии от группы модулей лазерных дальномеров до исследуемой горной массы могут быть применены для измерения и расчета

текущей производительности угля на питателе крепи в процессе выпуска угля на забойный конвейер.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0017 «Разработка научных основ создания автономных и автоматизированных горных машин, оборудования, технических и управляющих систем на базе перспективных цифровых и роботизированных технологий» (рег. №121121000036-1).

Список литературы

1. Применение имитационного моделирования для исследования режимов выпуска угля подкровельной толщи / А. Н. Стародубов, В. В. Зиновьев, В. И. Клишин, В. А. Крамаренко // Имитационное моделирование и его применение в науке и промышленности : тр. девятой всерос. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 16–18 октября 2019 года. – Екатеринбург: Издательство Уральского государственного педагогического университета, 2019. – С. 540-547.
2. Измерение производительности питателя при выпуске угля из подкровельной толщи на основе технологии машинного зрения / М.С. Никитенко, С.А. Кизилов, Ю.Н. Захаров [и др.] // Горные науки и технологии. – 2022. – Т. 7. – № 4. – С. 264-273. – DOI 10.17073/2500-0632-2022-09-22.
3. Клишин С.В. Моделирование площадного выпуска сыпучих сред из камер методом дискретных элементов с учетом несферической формы частиц // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т. 6, № 2. – С. 118-123. – DOI 10.15372/FPVGN2019060221.
4. 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) : тр. всерос. науч.-практ. конф., Новокузнецк, 15–16 декабря 2022 года. – Новокузнецк: СибГИУ, 2022. – С. 20-25.
5. Применение технологии лазерного сканирования при оценке объемов сыпучих материалов / А.А. Ватагин, А.Е. Лебедев, А.Б. Капранова, И.С. Гуданов // Умные композиты в строительстве. – 2021. – Т. 2, № 1. – С. 20-28. – DOI 10.52957/27821919_2021_1_20.
6. Буза М.Н., Бутусов Н.О., Алехин А.Г. Разработка автоматической системы измерения объема сыпучих материалов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2022. – № 1(260). – С. 48-51. – DOI 10.35211/1990-5297-2022-1-260-48-51.
7. Dunn M., Reid P., Malos J. Development of a protective enclosure for remote sensing applications // Laser scanning in underground coal mines. – 2020. – № 9(5):56. – URL: <https://doi.org/10.3390/resources9050056>.
8. Time-of-Flight ranging sensor VL53L0X. – URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l0x.pdf>
9. Антоненко К.О. Краткий обзор импульсных и фазовых лазерных дальномеров // Академическая публицистика. – 2021. – № 4. – С. 22-29.
10. Михеев И.А., Достовалов Н.Н. Разработка и исследование лазерного дальномера // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 7. – № 2. – С. 68-71.
11. Arduino MEGA 2560 Rev3. – URL: <https://docs.arduino.cc/static/1c43098f126d2b3c58ca9496687751f3/A000067-datasheet.pdf>
12. ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V. – URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega640-1280-1281-2560-2561-Datasheet-DS40002211A.pdf>
13. Панфилов П.В. Морозов В.В. Повышение точности твердотельных лазерных дальномеров путем первичной обработки данных // Вестник МГТУ «Станкин». – 2022. – № 2(61). – С. 56-60.

14. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана-Бьюси. – М., 1982. – 200 с.
15. Казмирук Е.С. Предсказание поведения динамических объектов на основе фильтра Калмана // Телекоммуникационные устройства и системы. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 39-43.
16. Замятин Н.В., Смирнов Г.В., Маковкин В.И. Фильтр Калмана для измерения уровня веществ в резервуарах // Успехи кибернетики. – 2022. – Т. 3. – № 2. – С. 31-35. – DOI 10.51790/2712-9942-2022-3-2-4.
17. Фильтрация сигналов. – URL: <https://alexgyver.ru/lessons/filters/>

УДК 622 + [004.421 : 62-51] : 550.835.41

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ СТЕНДОМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ СВОЙСТВ УГЛЯ И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

Баловнев Е.А., Худоногов Д.Ю., Попинако Я.В., Кизилов С.А., Каменная А.В.
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
г. Кемерово, Россия

Аннотация. В статье описана программная реализация управления стендом для исследования радиационных свойств угля и вмещающей породы с целью выявления параметров, влияющих на определение границы уголь – порода в процессе выпуска угля из подкровельной толщи на забойный конвейер. Представлен алгоритм управления параметрами стенда, описана разработанная на основе алгоритма виртуальная панель управления стендом.

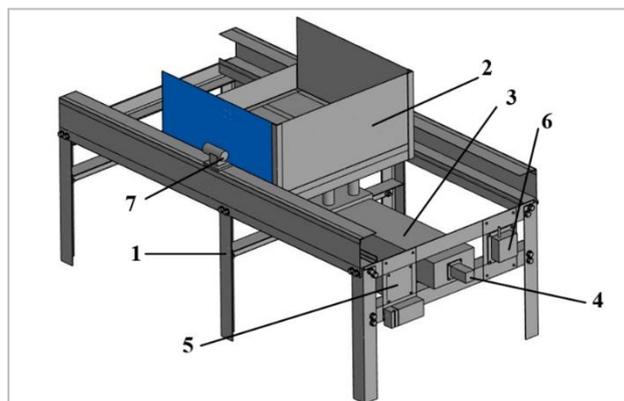
Ключевые слова: дозиметр, гамма-излучение, естественная радиоактивность, алгоритм, программная реализация, панель управления, горная масса, граница уголь – порода.

В настоящее время истощение легкодоступных запасов угля обуславливает актуальность применения технологий отработки мощных пластовых месторождений с выпуском [1-3]. В частности, применением крепи с выпуском на забойный конвейер КУВ [4, 5], разрабатываемой в ФИЦ УУХ СО РАН, является перспективным для отработки мощных пластов в широком диапазоне углов падения [6]. Разработка системы автоматизированного управления техническими средствами, обеспечивающими выпуск, является комплексной задачей, требующей поэтапную программно-техническую проработку на основе изучения особенностей технологического процесса выпуска и исследования параметров выпускаемой горной массы. Реализация управления шиберной заслонкой питателя секции крепи КУВ на основе гамма-метода анализа движущейся выпускаемой горной массы позволяет вести управление выпуском [7]. При этом основной задачей является определение критериев остановки выпуска для установления так называемой границы уголь-порода. То есть экспериментальное установление параметров, характеризующих значительное увеличение пустой породы в выпускаемом потоке угля.

Для решения этой проблемы спроектирован стенд [8], который позволит произвести следующие исследования горной массы: глубина чувствительности гамма-метода, влияние скорости движения горной массы и защитного ограждения в виде элементов конструкции секции крепи на получаемые данные для точного моделирования режимов и отладки работы системы автоматизированного управления [7]. Внешний вид и основные элементы стенда показаны на рис. 1.

На рис. 1 не показаны концевые выключатели, установленные внутри корпуса модуля линейного перемещения 3, срабатывающие при достижении рабочим столом модуля крайних положений, к которому прикреплена ёмкость для загрузки исследуемой горной

массы 2. Для снижения нагрузки на модуль линейного перемещения ёмкость 2 оснащена шестью обрешиненными колёсами, которые опираются на раму 1.



1 – рама; 2 – ёмкость для загрузки исследуемой горной массы; 3 – модуль линейного перемещения; 4 – шаговый двигатель модуля линейного перемещения с блоком управления; 5 – блок питания шагового двигателя; 6 – ЭВМ управления устройством линейного перемещения и дозиметром; 7 – дозиметр гамма-излучения

Рис. 1. Внешний вид стенда с указанием основных элементов

Конструкция стенда предусматривает автоматизацию и удалённое управление экспериментальными процессами. Но для реализации автоматизированного управления стендом необходима разработка специализированного программного обеспечения, назначение которого заключается в управлении функциями стенда такими как: модуль линейного перемещения и прибор сбора данных об естественном гамма-излучении горной массы – дозиметр.

Управляющая программа должна обеспечивать:

- перемещение ёмкости вдоль стенда в ручном режиме с автоматической остановкой при срабатывании концевых выключателей;
- автоматическое перемещение ёмкости вдоль стенда до срабатывания концевых выключателей;
- автоматическое перемещение ёмкости в зону действия дозиметра;
- регулирование скорости перемещения ёмкости в процессе эксперимента;
- возможность перемещения ёмкости с горной массой в циклическом режиме с возможностью изменения скорости движения согласно плану эксперимента в автоматическом режиме;
- управление включением и отключением дозиметра и временем прибытия ёмкости с исследуемой горной массой в зоне действия чувствительного элемента дозиметра;
- вывод результатов измерения естественной радиоактивности исследуемой горной массы в виде графика измерений на дисплей ЭВМ оператора.

В ходе предварительных работ над программным обеспечением стенда разработан алгоритм, на основе которого было создано программное обеспечение управления стендом для исследования параметров, обеспечивающих возможность определения границы уголь-порода на основе данных о естественном гамма-излучении горной массы. Данный алгоритм показан на рис. 2.

Управление стендом осуществляется с виртуальной панели, отображаемой на дисплее ЭВМ оператора стенда. Панель управления включает в свой состав следующие функциональные блоки: управление перемещением в ручном и в автоматическом режиме; управление дозиметром; отображение данных дозиметра. Реализация интерфейса лицевой панели оператора показана на рис. 3. Панель управления состоит из трех основных блоков: управления перемещением ёмкости, управления работой дозиметра и плоттера выводящего результаты измерения в виде графика.

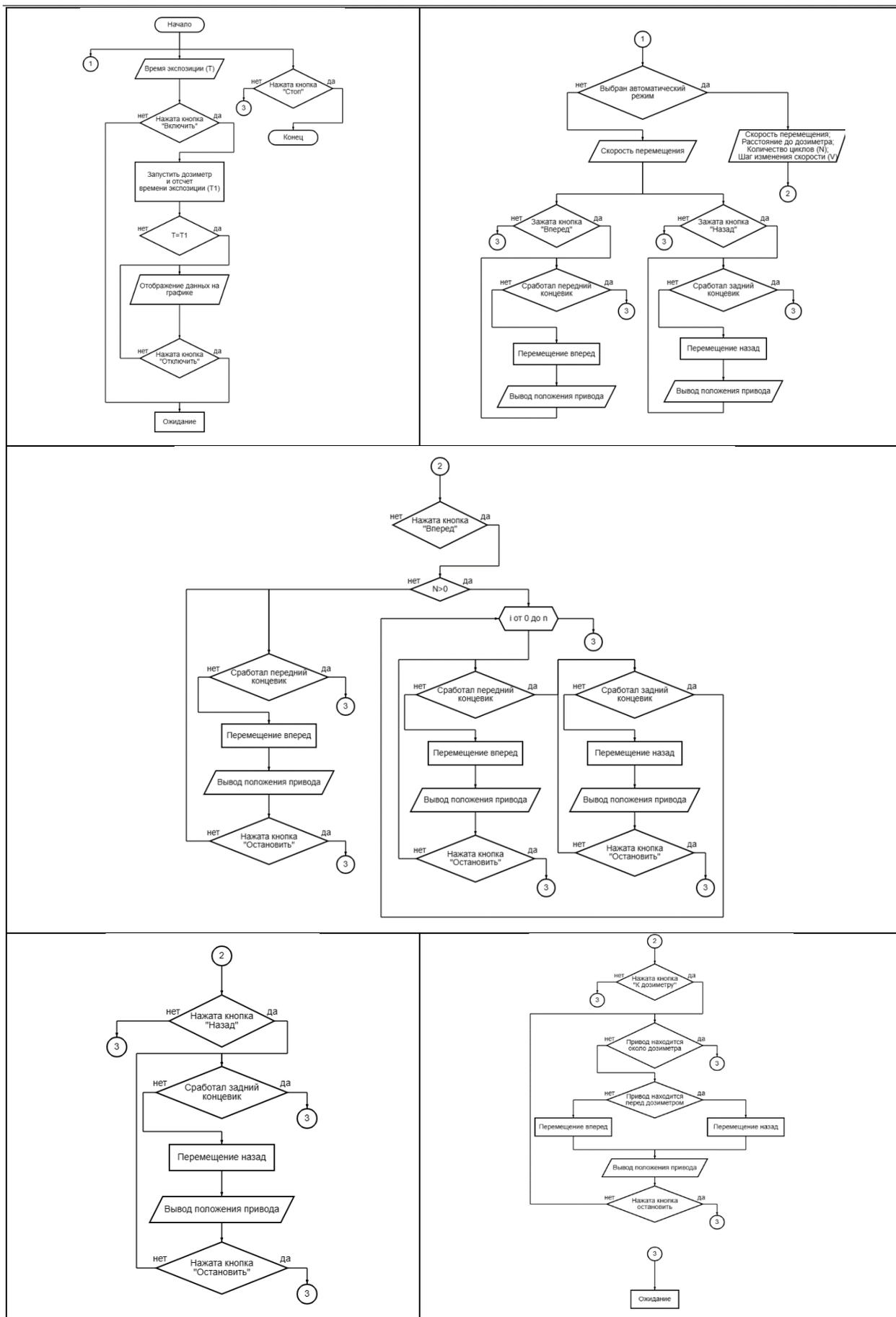


Рис. 2. Алгоритм программного обеспечения стенда для исследования параметров определения границы уголь – порода

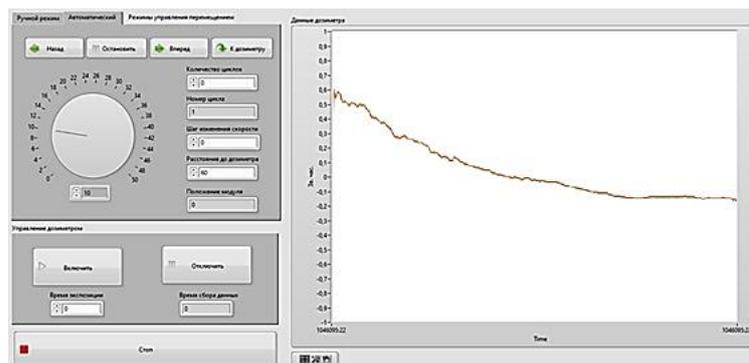


Рис. 3. Интерфейс виртуальной панели управления стендом

Интерфейс программы управления перемещением разделен на две вкладки – ручной и автоматический режим. Ручной режим управления перемещением содержит элементы управления движением вперед и назад, контроль скорости перемещения и индикатор положения привода (рис. 4 а). Движение емкости с горной массой осуществляется удержанием кнопки направления движения, при достижении модулем линейного перемещения встроенного концевого выключателя шаговый двигатель, приводящий его в движение, отключается.

Автоматический режим управления перемещением включает в себя такие элементы управления как: движение вперед, назад, к дозиметру, с указанием расстояния от заднего концевого выключателя до дозиметра и принудительная остановка движение оператором. Аналогично ручному режиму, присутствует возможность контроля скорости перемещения и индикации положения модуля. Реализовано циклическое движение от заднего концевого выключателя к переднему и обратно с указанием количества циклов с изменением скорости в каждом последующем цикле. Интерфейс автоматического режима показан на рис 4 б.

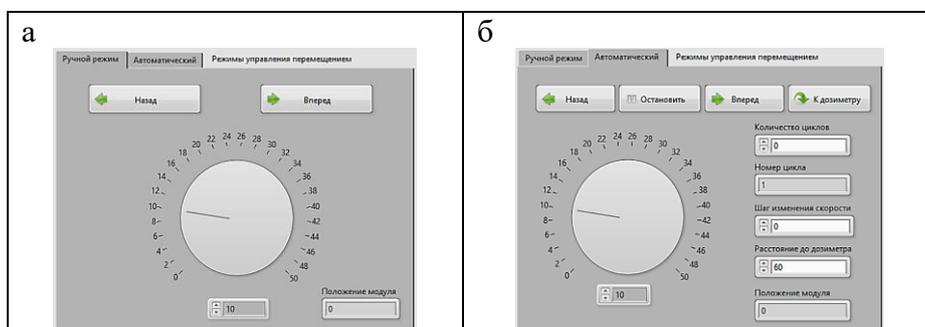


Рис. 4. Интерфейс ручного режима управления перемещением (а); интерфейс автоматического режима управления перемещением (б)

Блок управления дозиметром позволяет осуществлять включение дозиметра с началом сбора данных об естественном гамма-излучении горной массы и его отключение. Имеется возможность задать время экспозиции – задержку перед выводом данных на график. Также происходит отображение времени сбора данных рис 5.

Выводы. В результате разработки стенда для исследования радиационных свойств угля и вмещающей породы с целью выявления параметров, влияющих на определение границы уголь – порода в процессе выпуска угля из подкровельной толщи на забойный конвейер, разработана управляющая программа с виртуальным интерфейсом пользователя, отображаемом на дисплее ЭВМ оператора.

Программа обеспечивает функционирование элементов стенда: модуля линейного перемещения, с закреплённой на нем ёмкостью с исследуемой горной массой, а также дозиметра, который ведет сбор данных об естественном гамма-излучении горной массы.

Произведено первичное тестирование разработанного программного обеспечения, показавшие отсутствие критических ошибок в алгоритме и программном коде.

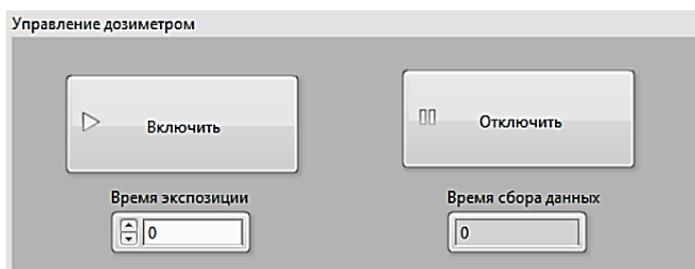


Рис. 5. Блок управления дозиметром

Выбранная концепция с отображением виртуальной панели управления на дисплее, позволяет изменять функционал стенда, добавляя новые функции, без внесения изменений в физическую конструкцию, что было подтверждено на этапе первичного тестирования: в интерфейс автоматического управления добавлено поле, отображающее текущее положение ёмкости под горную массу, на основе показаний энкодера встроенного в шаговый двигатель.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0017 «Разработка научных основ создания автономных и автоматизированных горных машин, оборудования, технических и управляющих систем на базе перспективных цифровых и роботизированных технологий» (рег. №121121000036-1).

Список литературы

1. Автоматизация управления технологическими процессами при отработке мощных пластов с выпуском угля подкровельной толщи / С.А. Кизилов, М.С. Никитенко, Б. Неоджи [и др.] // Горная промышленность. – 2017. – № 6(136). – С. 76.
2. Перспективные технические решения отработки мощных пологих угольных пластов с выпуском / В.И. Клишин, А.В. Николаев, А.П. Егоров [и др.] // Уголь. – 2011. – № 12(1029). – С. 6-10.
3. Роботизированный комплекс по отработке мощных крутонаклонных пластов угля и рудных месторождений / М.С. Никитенко, Ю.В. Малахов, С.М. Никитенко // Научно-технические проблемы разработки и использования минеральных ресурсов. – 2017. – №3. - С. 248-251.
4. Патент на полезную модель № 210254 U1 Российская Федерация, МПК E21D 23/04. Секция механизированной крепи очистного забоя с устройством регулируемого выпуска угля / В.И. Клишин, Б.А. Анферов, Л.В. Кузнецова [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» – № 2021131401 ; заявл. 26.10.2021 ; опубл. 04.04.2022.
5. Клишин В.И. Исследование процессов выпуска угля при отработке мощных пологих и крутых угольных пластов / В.И. Клишин, С.В. Клишин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – № 2. – С. 69-81.
6. Klishin Vladimir, Nikitenko Sergey, Nikitenko Mikhail. Advanced technologies and roof supports as a platform to create robotic mining complexes for the development of thick seams and ore deposits // Proceedings of WRFER International Conference, 30th December 2018. – New Delhi, India, 2018. – P. 6–9.
7. 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 // Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве): тр. всерос. науч.–практ. конф.

(с международным участием), Новокузнецк, 15-16 декабря 2022 г. – Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2022. – С. 20-25.

8. 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 / С.А. Кизилов, М.С. Никитенко, Д.Ю. Худоногов [и др.]. – № 2022109522 ; заявл. 11.04.2022 ; опубл. 08.11.2022. – 6 с.

УДК 622 + 62-50 : 550.835.41

РАСПОЗНАВАНИЕ ПРЕПЯТСТВИЙ МАШИНЫМ ЗРЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ИСКАЖЕНИЯ СЕТКИ СВЕТОВЫХ МАРКЕРОВ

Верховцев Д.О., Попинако Я.В., к.т.н. Никитенко М.С., Худоногов Д.Ю.,
Кизилов С.А.

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

Аннотация. В статье рассматривается способ обнаружения препятствий системой управления автономным транспортным средством на основе машинного зрения и подсветки траектории движения световыми маркерами. Предложен способ сбора данных для расчета и оптимизации видеосцены. Особенностью реализации задачи для обнаружения препятствий является учет искажений проецируемой сетки световых маркеров. Продемонстрирована программная реализация обнаружения препятствия на основе искажения геометрии сетки световых маркеров.

Ключевые слова: система обнаружения препятствий, машинное зрение, световой маркер, автономное транспортное средство.

В настоящее время, неотъемлемой частью автономного транспортного средства (АТС) является устройство, сканирующее пространство перед ним для обнаружения препятствий и дефектов дорожного полотна. Применяются различные типы сканирующих устройств, радары, ультразвуковые датчики расстояния, трехмерные и двухмерные лазерные сканеры (далее по тексту Lidar), системы машинного зрения. Наиболее часто используется трехмерные LIDAR так как данная технология позволяет исследовать пространство перед АТС с высокой детализацией и скоростью. Трехмерный LIDAR создает облако точек, формируя трехмерную картину с расстояниями от Lidar до каждой из точек в зоне его действия, которую можно перевести в понятный для системы управления язык, связывающий расстояние до некой части облака точек и действия органов управления (изменить траекторию движения, снизить скорость, ускориться), что важно на дорогах общего пользования, где дорожная ситуация может измениться за небольшие промежутки времени, и от реакции системы обнаружения препятствий зависят жизни людей. При этом на выделенной промышленной площадке, предназначенной для движения АТС, окружающая ситуация более прогнозируема, что позволяет понизить требования к скорости и точности средств фиксации состояния окружающей обстановки. Таким образом, применение LIDAR в условиях эксплуатации АТС, в зоне промышленной площадки может быть заменено альтернативными решениями.

Если рассматривать задачу технологической замены с позиции взаимодействия нескольких технологий, альтернативой является аппаратно-программное решение на основе машинного зрения.

Задачей работы являлась разработка алгоритма, обеспечивающего обнаружение препятствий машинным зрением во время движения модели автономного транспортного

средства. Для эффективной работы машинного зрения предложено дополнить видеосцену проекцией сетки из световых маркеров на дорожное покрытие перед АТС (рис 1 а).

Применение световых маркеров обусловлено оптимизацией процесса определения препятствий. Проведенные эксперименты (рис 1 б) показали, что предметы, которые находятся в зоне проецируемой сетки, изменяют ее геометрию и таким образом позволяет определить наличие препятствия на маршруте автономного транспортного средства.

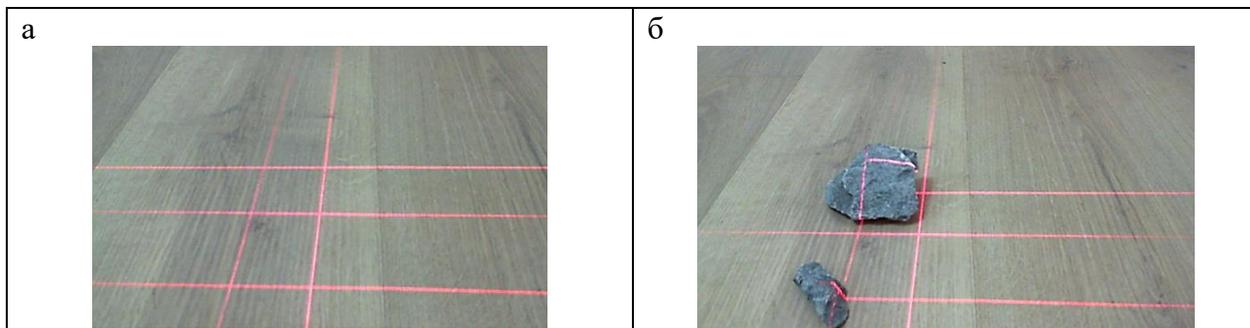


Рис 1. Сетка световых лазерных маркеров (а); искажение геометрии сетки световых маркеров (б)

Алгоритмы машинного зрения выделяют зону проекции световых маркеров и определяют наличие геометрических искажений в проекции световых маркеров. На рис. 2 представлен алгоритм обработки видеосцены.

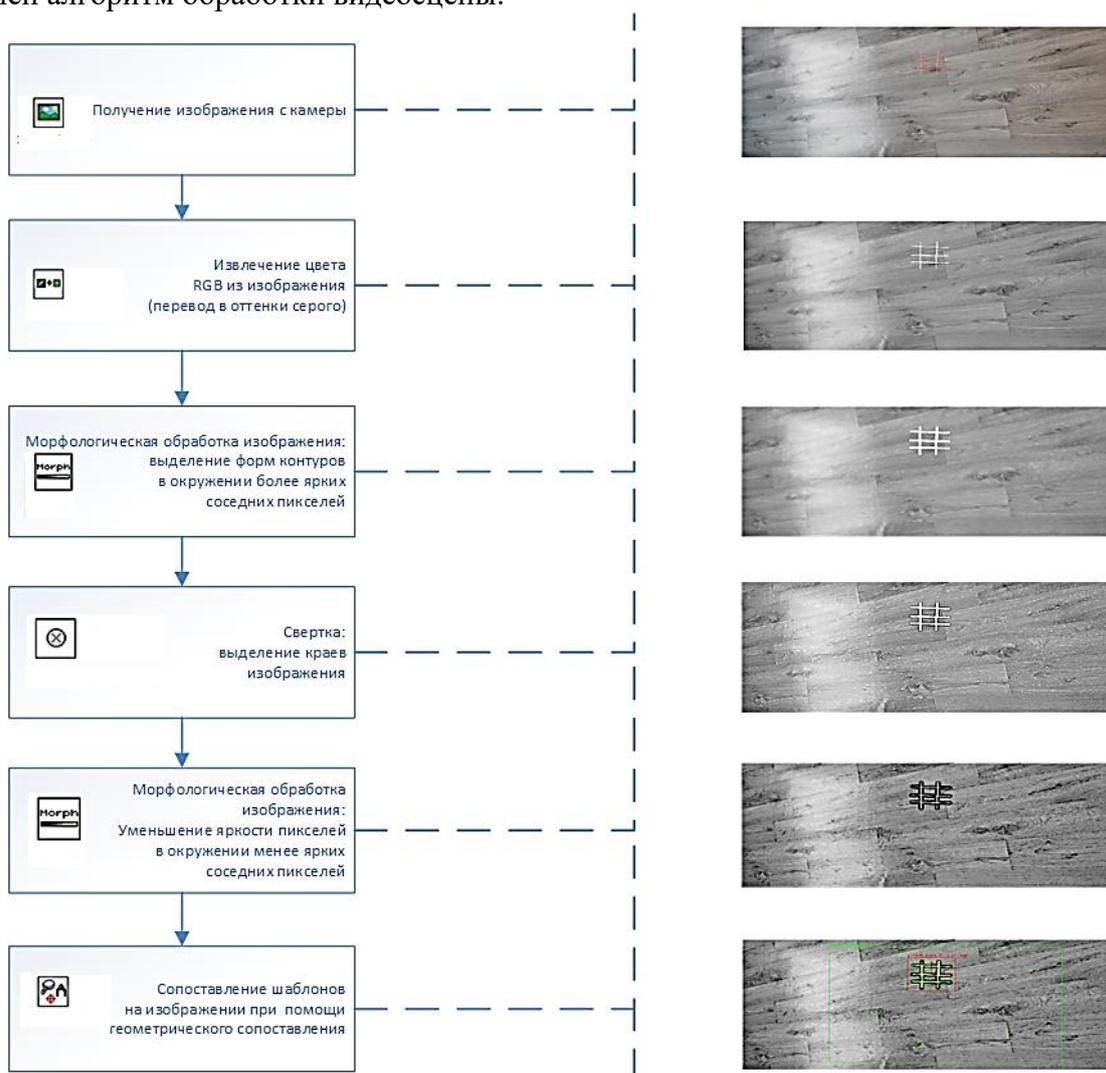


Рис. 2. Алгоритм обработки видеосцены

Алгоритм обработки выполняет следующую последовательность обработки видеосцены: после получения сцены с камеры машинного зрения используется операция извлечения заданного цвета (Color Plane Extraction) [6], обеспечивая выбор красной кодировки (R из RGB), так как в качестве излучателей сетки световых маркеров используются линейные лазерные излучатели красного цвета (рис. 1).

Далее, выполняется морфологическая обработка – процедура определения изменений геометрической структуры изображения, которая реализована на основе наложения фильтра Превитта, эрозии и дилатации. Применение данных методов позволяет выделить контур и структуру геометрических изменений.

Операция дилатации добавляет пиксели к границам объектов на изображении и управляется структурирующим элементом.

Структурный элемент представляет собой двумерную матрицу размером $n \times n$, состоящую из «0» и «1» (рис. 3 а, б). Размерность матрицы определяет размер элемента, а расположение «0» и «1» в векторе определяет линейную форму элемента. Наложение маски структурного элемента «квадрат» матрица (3×3) эффективно определяет пиксели прямой лазерной линии. Наложение маски структурного элемента «крест» матрица (3×3) эффективно определяет пиксели зоны пересечения лазерных линий.

При использовании геометрического сопоставления создается шаблон, представляющий поисковый объект. Затем выполняется поиск экземпляров шаблона на каждом контрольном изображении и вычисляется значение для каждого соответствия. Такое значение показывает, насколько близко это совпадение в процентном соотношении. На рис. 3 в представлен шаблон эталонной сетки без геометрических искажений.

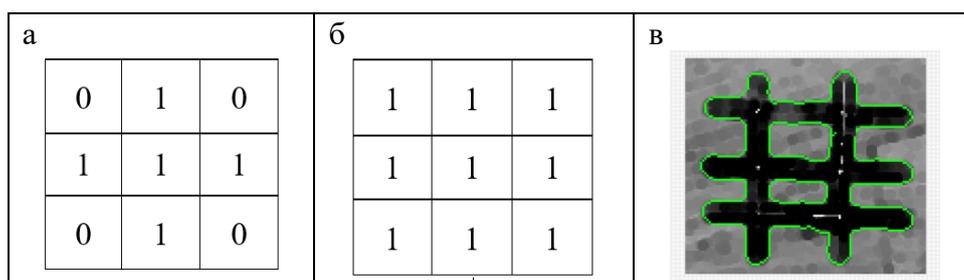


Рис. 3. Структурный элемент: а – «крест»; б – «квадрат»; в – шаблон сетки без геометрических искажений

Следующий шаг алгоритма применение функции эрозии – морфологической операции фильтрации, в результате которой удаляются шумы и выделяются наиболее светлые пиксели изображения.

Далее, границы изображения выделяются функцией свертки. Главным параметром свертки является ядро свертки – матрица коэффициентов. При вычислении значений выбранного пикселя изображения (регион сетки), ядро свертки накладывается своим центром к этому пикселю. После наложения ядра свертки вычисляется сумма произведений значений пикселей изображения на значения наложенного пикселя элемента ядра.

Полученная сумма является параметром сопоставления обработанного изображения с шаблоном. Результатом работы сопоставления являются параметры (рис. 4), которые показывают, насколько близко совпадение в процентном соотношении:

Score – оценка искажения, значения которой могут варьироваться от 0 до 1000, где 1000 баллов указывает на его отсутствие;

Occlusion – величина окклюзии, выраженная в процентах от кривых шаблона для каждого объекта, соответствующего шаблону;

Template Target Curve Score – указывает, насколько близко искажение в шаблоне соответствуют кривым в области соответствия контрольного изображения. Значения баллов

могут варьироваться от 0 до 1000, где значение 1000 указывает на то, что все кривые шаблона имеют соответствующую кривую в области соответствия контрольного изображения.

| | |
|-----------------------------|--------|
| Results ... | 1 |
| Score | 977,00 |
| Occlusion % | 0,00 |
| Template Target Curve Score | 977,00 |

Рис. 4. Результат работы геометрического сопоставления

При определении алгоритмом машинного зрения искажений сетки световых маркеров (рис. 5) модель АТС производила остановку и объезд до момента прекращения искажения сетки световых маркеров в зоне видимости камеры, после чего продолжала движение вперед. Объезд препятствия выполнялся двумя способами:

- если зона максимальных искажений определялась справа, производился маневр влево;
- если зона максимальных искажений определялась слева, производился маневр вправо.

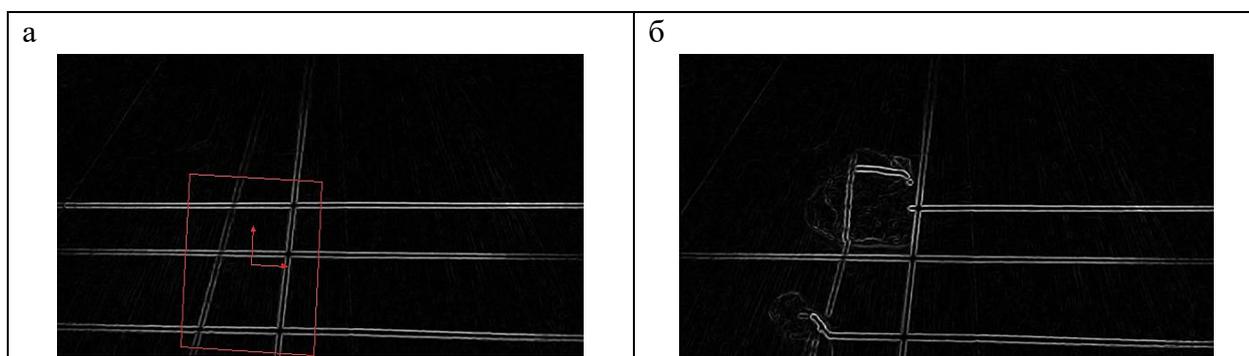
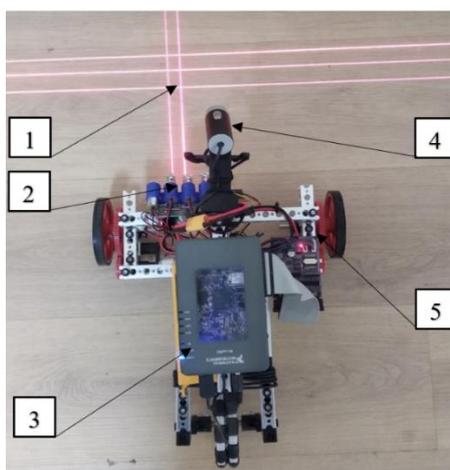


Рис. 5. Результат обработки искажения геометрии с использованием технологии машинного зрения: а – участок без препятствий; б – участок с препятствием

Программная реализация системы определения препятствия физической модели АТС (рис 6) разработана на базе роботизированного комплекта Tetrix Robotics Kit под управлением программного модуля MyRIO.



- 1 – сетка световых маркеров; 2 – лазерные излучатели; 3 – промышленный контроллер;
4 – камера; 5 – шасси

Рис. 6. Физическая модель АТС

Для получения видеосцены использовалась web камера, подключённая к MyRIO по интерфейсу USB. Алгоритм работы системы машинного зрения разработан в среде Vision Assistant. Как описано выше, в качестве проекторов сетки световых маркеров использован

комплект линейных лазерных излучателей красного цвета, закреплённых на шасси модели АТС. Внешний вид системы определения препятствий представлен на рис 6.

Алгоритм аппаратного управления моделью АТС на основе программного модуля машинного зрения обнаружения препятствий при помощи сетки световых маркеров приводится на рис. 7.

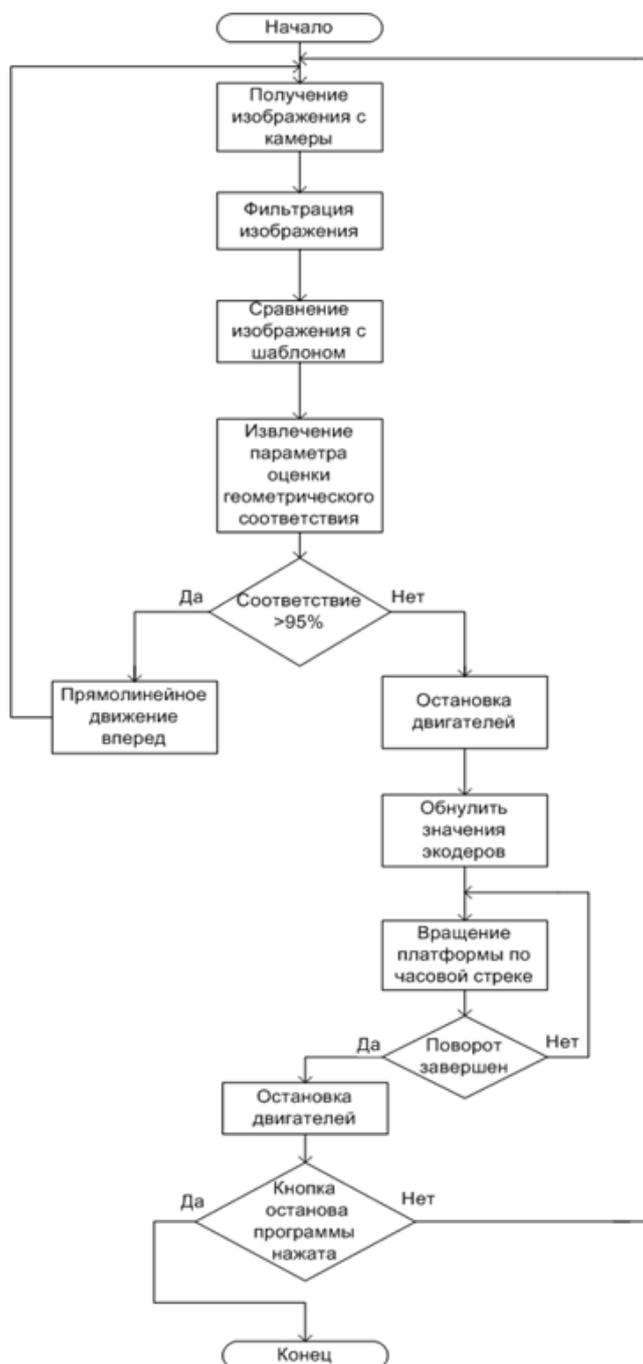


Рис. 7. Алгоритм управления автономным транспортным средством на основе машинного зрения и подсветки лазерными световыми маркерами

Выводы. Совокупность описанных методов машинного зрения решают задачу объезда препятствий АТС на основе проецируемой сетки световых маркеров на поверхность дорожного полотна перед АТС.

Определение алгоритмом машинного зрения изменений геометрии лазерной сетки световых маркеров позволяют определять препятствия и своевременно формировать

управляющий сигнал для выполнения маневра АТС, для предотвращения столкновения с препятствием на маршруте движения.

Предложенный способ может быть использован в алгоритмах управления АТС, движение которого выполняется по световым маркерам, определяющих траекторию маршрута.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках КНТП, утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. № 1144-р. по мероприятию «Разработка системы управления автономными транспортными средствами на основе проектируемой траектории движения» (Соглашение от 28.09.2022 № 075-15-2022-1199).

Список литературы

1. Применение промышленных роботов: популярные направления роботизации. – URL: <https://mentamore.com/robototekhnika/primenenie-promyshlennyx-robotov.html>
2. Мобильные интеллектуальные роботы. – URL: https://computer-museum.ru/histussr/robot_mobil.htm
3. Системы технического зрения. – URL: <https://studfile.net/preview/9410758/page:8/>
4. Оптоэлектронные преобразователи. – URL: https://studopedia.ru/9_72253_optoelektronnie-preobrazovateli.html
5. Видеодатчики систем технического зрения. – URL: <https://studfile.net/preview/2396688/page:2/>
6. Ni Vision Assistant Tutorial. – URL: <https://neurophysics.ucsd.edu/Manuals/National%20Instruments/Ni%20Vision%20Assistant%20Tutorial.pdf>
7. Color Plane Extraction. – URL: https://documentation.help/Ni-VisionAssist/ColorPlanes_Controls.html
8. Expand (Dilate) Objects in Binary Images. – URL: https://documentation.help/Ni-VisionAssist/Expand%28Dilate%29ObjectsInBinaryImgs_HowTo.html
9. Reduce (Erode) Objects in Grayscale Images. – URL: https://documentation.help/Ni-VisionAssist/ReduceObjectsInGrayscaleImages_HowTo.html

УДК 622.1:004

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ РЕШЕНИЕ МАРКШЕЙДЕРСКИХ ЗАДАЧ В ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ MICROMINE

Кряжевских А.Е., Тур К.А.

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

Аннотация. Рассмотрены работы в горно-геологической информационной системе Micromine Origin & Beyond (далее – ГГИС Micromine), направленные на автоматизированное решение маркшейдерских задач. Методики созданы и реализованы на основе плана горных работ пластового месторождения, разрабатываемого открытым способом.

Ключевые слова: ГГИС Micromine, цифровые модели поверхности, каркас угольного пласта, угольный склад, отвалы вскрышных пород, буровзрывные скважины, открытые горные работы, планирование.

Введение. В настоящее время, при текущем уровне развития компьютерных технологий, в горнодобывающей отрасли широкое применение получили горно-геологические информационные системы.

В маркшейдерском деле ГГИС пользуются интересом, в связи с их способностью автоматизировать и упростить выполнение маркшейдерских задач.

Известным представителем такого рода компьютерных программ является ГГИС Micromine. Для горнодобывающей отрасли в Кузбассе данный программный продукт является новым и малоизученным, на текущее время небольшое число предприятий используют его в своей работе.

ГГИС Micromine позволяет оперативно и с достаточным уровнем удобства решить большинство маркшейдерско-геологических задач.

Оцифровка плана горных работ пластового месторождения. Перед началом оцифровки растрового изображения осуществляется его привязка к пространственной среде отображения загруженной информации.

Выбираются элементы на плане, необходимые для создания 3D модели, и оцифровываются. У всех полилиний изменяются параметры отображения: тип, ширина и цвет.

Для дальнейшего создания поверхностей всем полилиниям присваиваются высотные отметки (рис. 1).

Создание цифровой модели поверхности угольного разреза. Цифровые модели создаются из полилиний точек в виде двух отдельных поверхностей (рис. 2): рабочего и нерабочего бортов, отвалов вскрышных пород. Иногда возникают ситуации, когда программа неправильно создает поверхность отвалов. В таком случае требуется ручное редактирование треугольников, путем перемещения их граней (рис. 3).

Имеется возможность создать 3D цветовую кодировку, которая позволяет задать поверхности переход цвета в зависимости от выбранного атрибута. Кодировка может осуществляться по высотным отметкам поверхности. Задается произвольно количество диапазонов, на которые разбивается весь разброс высотных отметок (рис. 4).

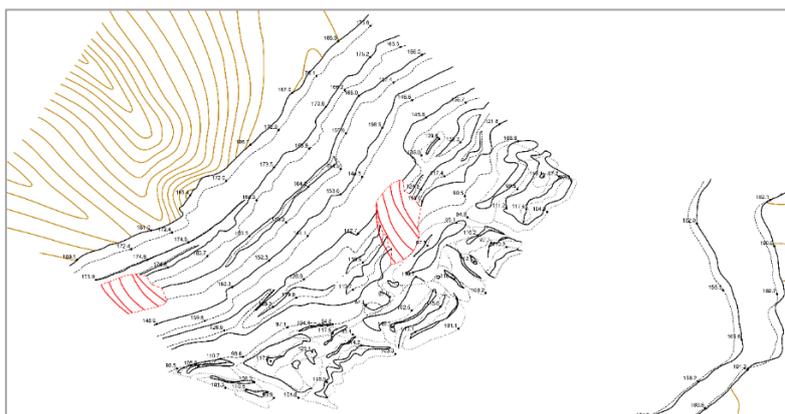


Рис. 1. Оцифрованный план горных работ

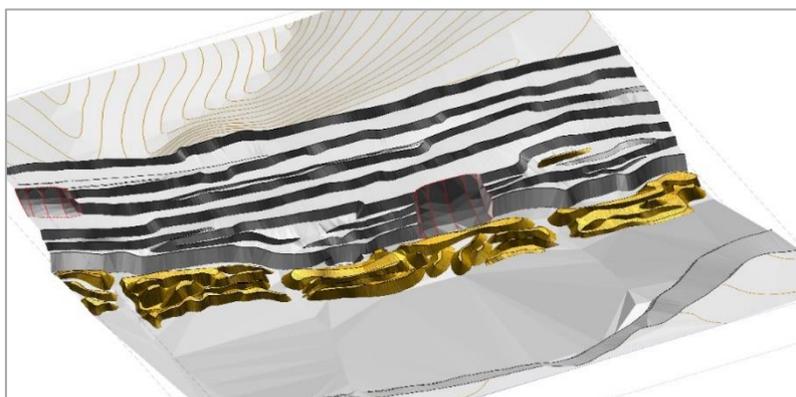


Рис. 2. Цифровая модель поверхности бортов и отвалов

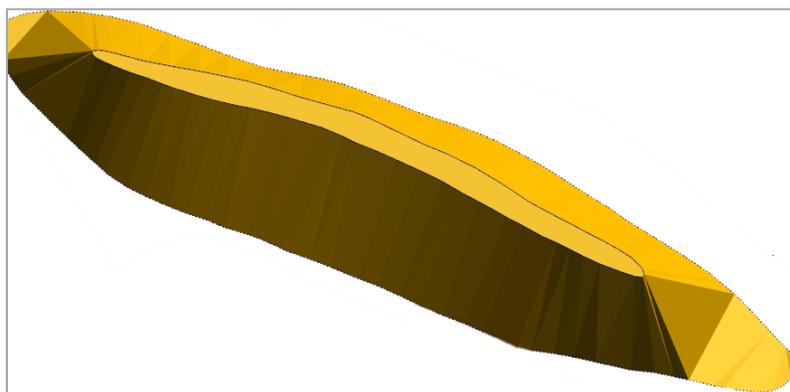


Рис. 3. Некорректное построение ЦМП

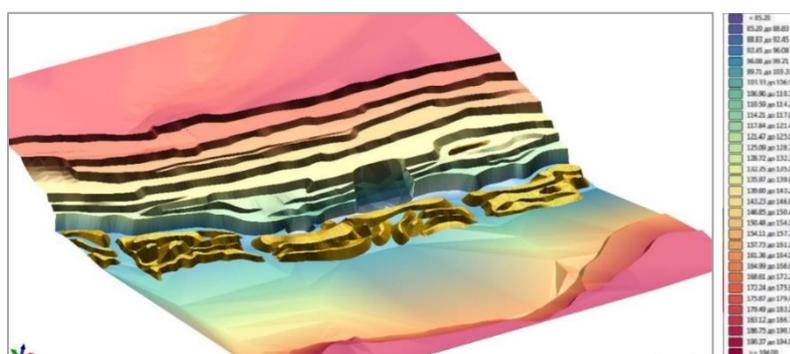


Рис. 4. Цифровая модель поверхности с 3D цветовой кодировкой

Далее накладывается растровое изображение плана горных работ на поверхность (рис. 5). Для этого изображение должно быть привязано к координатной сетке.

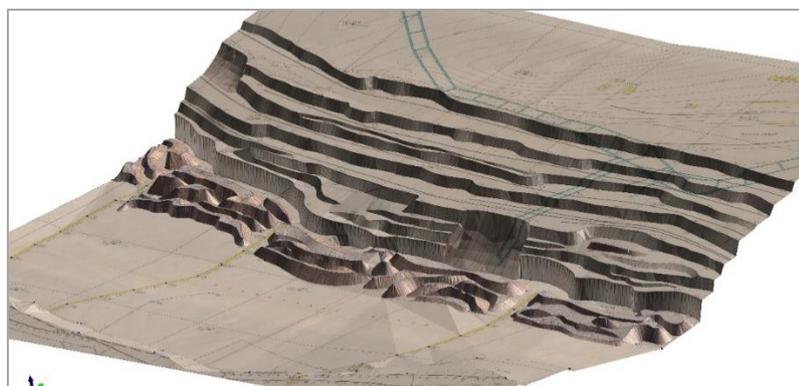


Рис. 5. Цифровая модель поверхности с наложенным растровым изображением плана

Моделирование угольного пласта с подсчетом объема полезного ископаемого. Для решения поставленной задачи в программе Microsoft Excel создается файл с данными по геологическим скважинам, приведенным на плане. В файл вносятся: номера скважин; координаты устьев; высотные отметки устьев скважин; мощности пласта; глубины до кровли и почвы пласта; высотные отметки кровли и почвы пласта.

После импорта файла в программу производится визуализация базы данных. Визуализируются устье и ось скважин, а также мощность пласта (рис. 6).

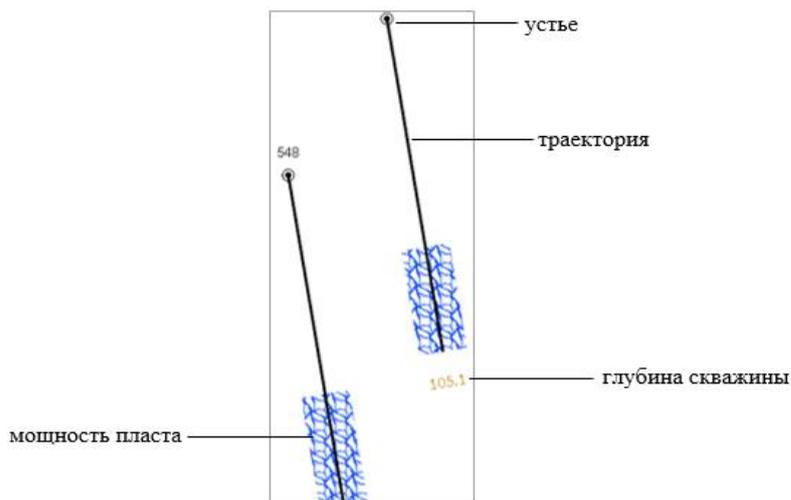


Рис. 6. Визуализация геологоразведочных скважин

Каркас угольного пласта строится двумя способами для сравнения объема полезного ископаемого в моделях.

Первый способ построения подразумевает создание поверхностей почвы и кровли на основе сеточной поверхности (GRID) (рис. 7).

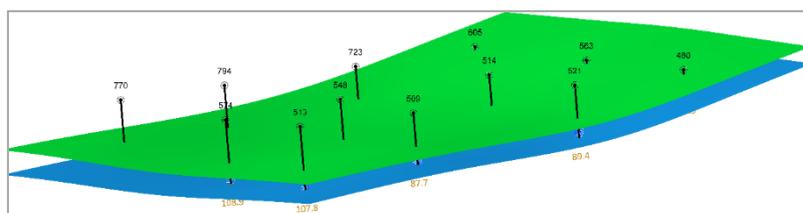


Рис 7. Сеточные поверхности почвы и кровли угольного пласта

Сеточная поверхность (GRID) позволяет построить поверхность путем определения отметок в узлах сети одним из методов интерполяции.

В качестве метода интерполяции выбирается "Сплайн тонкой пластины", он позволяет получить более плавную поверхность не искажая ее.

Следующим этапом сеточные поверхности почвы и кровли пласта преобразовываются в цифровые модели, обрезаются от добычного уступа до технической границы и объединяются в один замкнутый каркас (рис. 8).

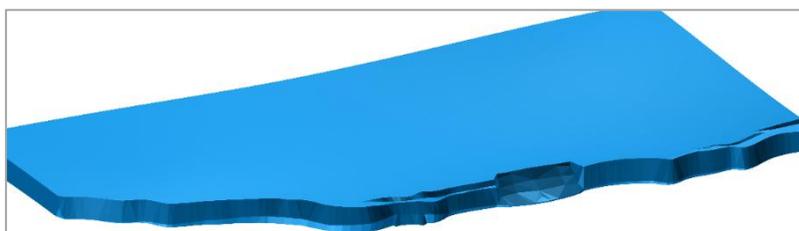


Рис. 8. Каркас угольного пласта, созданный из автоматизировано построенных поверхностей

Второй способ построения каркаса угольного пласта подразумевает его создание путем самостоятельного оконтуривания на разрезах.

Для этого намечаются разведочные линии, проходящие через устья скважин.

Создаются вертикальные разрезы по разведочным линиям и на них вручную оконтуриваются почва и кровля пласта (рис. 9).

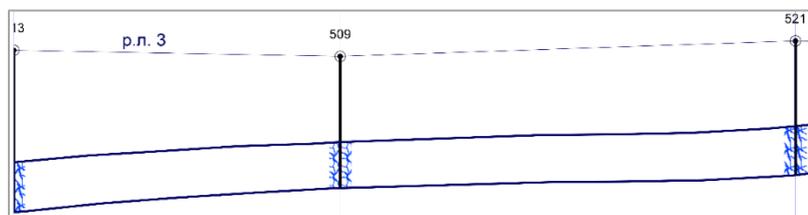


Рис. 9. Оконтуривание почвы и кровли пласта на разрезе по разведочной линии

Создается каркас между контурами пласта и обрезается по границе добычного уступа.

По результатам определения объема полезного ископаемого, заключенного в моделях, относительное расхождение между моделями составляет 0,3 %. Следовательно, автоматизированный способ определения объема дает надежные результаты.

Подсчет объемов угольного склада и отвалов вскрышных пород. Создаются цифровые модели основания и поверхности склада по отдельности на основе тахеометрических съемок основания и поверхности склада (рис. 10).

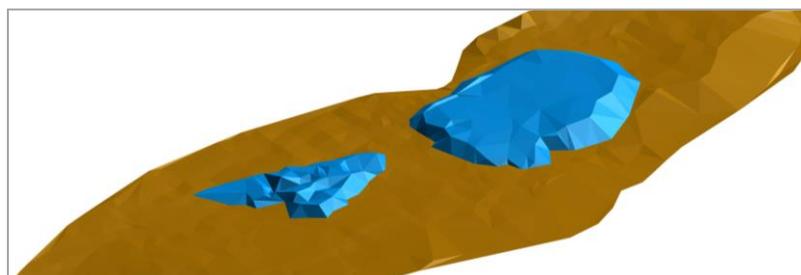


Рис. 10. ЦМД склада и его основания

Выполняется обрезка контура основания склада вдоль нижних бровок. Обрезанная часть копируется в один слой с поверхностью угольного склада, что позволяет получить замкнутые каркасы.

Рассчитывается объем (в куб. м) и вес (т) полезного ископаемого на угольном складе.

Аналогично создаются замкнутые каркасы из цифровых моделей отвалов и их основания. Рассчитывается объем отвалов вскрышных пород.

Планирование открытых горных работ. Исходя из фактического положения горных работ и планируемого на 2023 год контура борта (рис. 11), создаются замкнутые каркасные модели добычного и вскрышных уступов отдельно (рис. 12-13).

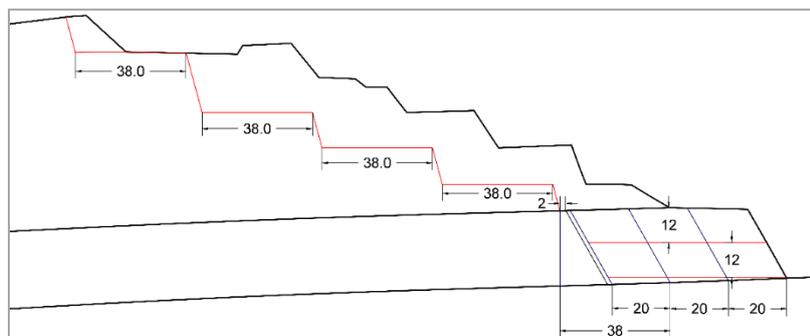


Рис. 11. Фактическое положение горных работ и планируемый на 2023 год контур борта



Рис. 12. Каркас вскрышных уступов, планируемых к экскавации в 2023 году

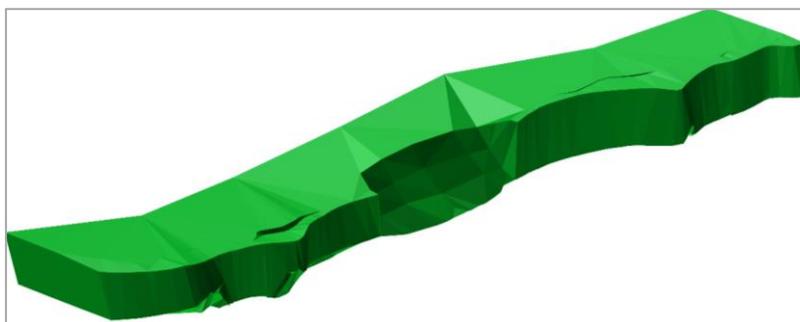


Рис. 13. Каркас добычного уступа, в котором заключен установленный объем угля

Из каркасов вскрышных и добычного уступов создаются выемочные блоки (рис. 14).
 Размер блока принимается равным ширине экскаваторной заходки.

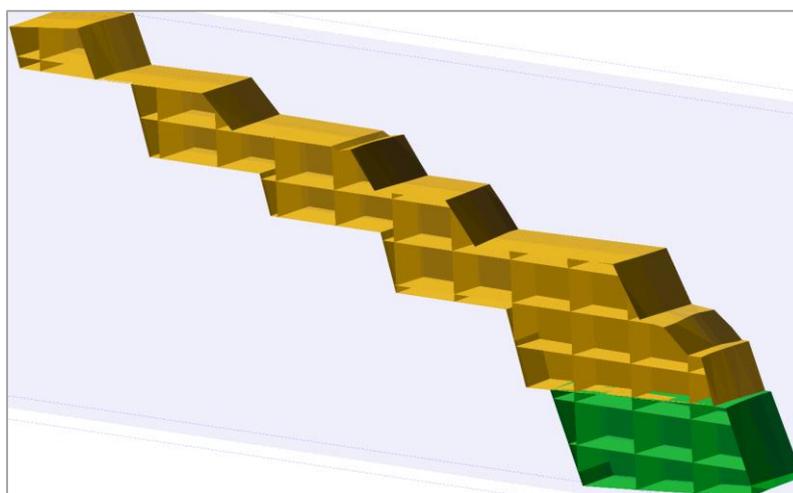


Рис. 14. Выемочные блоки в разрезе, созданные из каркасов вскрышных и добычного уступов

Создаются отдельные блочные модели, в которые записываются атрибуты: плотность, содержание, материал. Производится запись атрибутов блочной модели в выемочные блоки, т.е. создаются бины материала.

На следующем этапе создается оперативный календарный план горных работ.

Результатом создания и настройки оперативного календарного плана горных работ становится диаграмма Ганта (рис. 15), которая отображает порядок отработки каждого выемочного блока во времени.

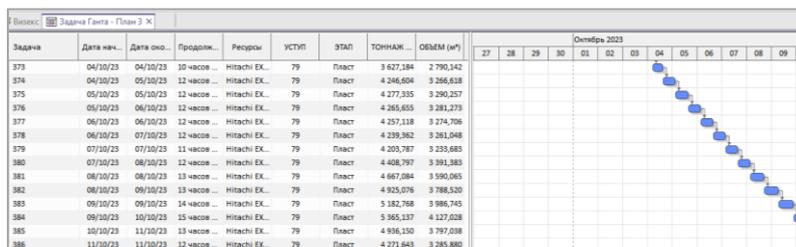


Рис. 15. Диаграмма Ганта, отображающая порядок отработки выемочных блоков

Проектирование буровзрывных скважин. Схемы скважин создаются двумя способами: по полигону и по шаблону.

Для первого способа задается граница взрываемого блока в виде полигона (рис. 16). В настройках задаются параметры схемы и скважин.

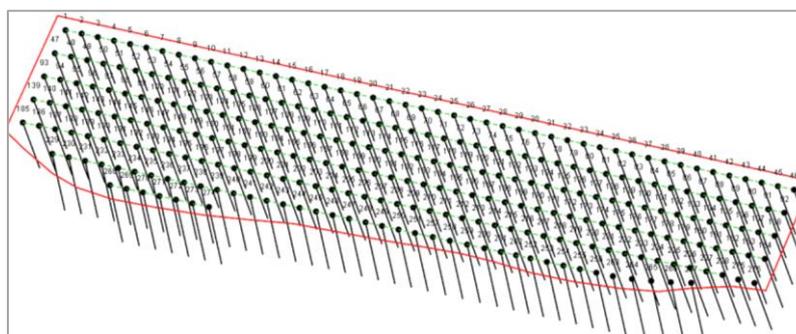


Рис. 16. Схема расположения буровзрывных скважин по полигону

При втором способе – создается сеть скважин по шаблону. Границы контура скважин задаются вручную интерактивной функцией (рис. 17).

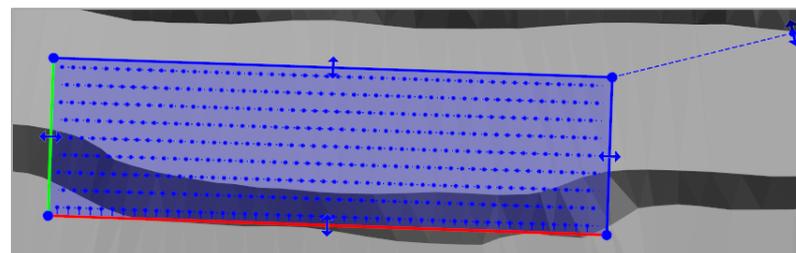


Рис. 17. Перемещение и изменение границ шаблона сети скважин БВР

Рассчитываются параметры заряда: длина заряда и забойки. Расчет выполняется исходя из удельного расхода ВВ, плотности заряжения и параметров сети скважин.

По результатам расчета выводится отчет, который экспортируется в Microsoft Excel (рис. 18).

| | A | B | C | D | E | F | G | H |
|---|------|-------|----------|----------|---------|-----|------------------|---|
| 1 | HOLE | BLOCK | FROM | TO | CODE | ID | EXPLOSIVE WEIGHT | |
| 2 | 1 | 2 | 0 | 8,831805 | Забойка | БВР | 0,0 | |
| 3 | 1 | 2 | 8,831805 | 9,96701 | ВВ | БВР | 39,2 | |
| 4 | 2 | 2 | 0 | 8,832434 | Забойка | БВР | 0,0 | |
| 5 | 2 | 2 | 8,832434 | 9,967743 | ВВ | БВР | 39,2 | |

Рис. 18. Данные расчета заряда скважин, экспортированные в Microsoft Excel

Выводы. ГГИС Micromine Origin & Beyond обладает большим потенциалом и позволяет автоматизировать и упростить выполнение маркшейдерских задач. Стоит отметить, что Micromine Origin & Beyond больше ориентирован на решение геологических задач и обладает ограниченными функциональными возможностями в области планирования открытых горных работ. Однако, у компании Micromine существуют отдельные специализированные программные продукты для планирования горных работ, которые в настоящее время внедряются на производство, в частности: Micromine Alastri и Micromine Spry.

Список литературы

1. Об утверждении Требований к подготовке, содержанию и оформлению планов и схем развития горных работ и формы заявления о согласовании планов и (или) схем развития горных работ: приказ Ростехнадзора : утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15.12.2020, № 537 : ввод в действие 01.01.2021 : зарег. в Минюсте России 29.12.2020, № 61885.
2. Кутузов Б.Н. Взрывные работы. – Москва: Недра, 1988. – 383 с.
3. Бахаева С.П. Ананенко Е.В. Планирование горных работ на разрезах : учеб. пособие. – Кемерово: КузГТУ, 2020. – 160 с.
4. Бахаева С.П. Маркшейдерские работы при открытой разработке полезных ископаемых: учеб. пособие. – Кемерово: КузГТУ, 2020. – 210 с.
5. Компьютерные технологии подсчета запасов : метод. указ. к лаб. раб. / Я.Ю. Бушуев, Федотов Г.С. ; Санкт-Петербургский горный университет. – СПб, 2018. – 99 с.
6. Геометрия недр. Решение геолого-маркшейдерских задач в среде ГГИС Micromine : лаб. практикум. – 2-е изд. перераб. и доп. / Н.П. Сапронова, В.В. Мосейкин, Г.С. Федотов. – М.: Изд. Дом НИТУ «МИСиС», 2019. – 89 с.

УДК 004.65:322.33

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЛЯЦИОННОЙ СУБД ДЛЯ СОЗДАНИЯ БАЗЫ ДАННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК УГЛЕЙ

Павлова Л.Д., Корнева А.В., Корнев Е.С.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

Аннотация. В настоящей статье обоснована актуальность формирования базы данных качественных характеристик и показателей различных марок углей. По результатам сравнительного анализа обосновано использование свободной объектно-реляционной системы управления базами данных СУБД PostgreSQL. Определен стандартизированный формат входных данных, которые будут загружаться в систему от различных угольных предприятий.

Ключевые слова: база данных, марка угля, качество угля, классификация углей, показатели, система управления базами данных.

Введение. Формирование базы данных углей и технологий их переработки актуально для добывающих и обогащательных предприятий и востребовано различными потребителями угольной продукции. Формализованное описание характеристик и показателей различных марок углей поможет регулировать качество производимой продукции, а также гарантировать соответствие выпускаемого угля стандартам и запросам потребителей.

Путем сравнительного анализа функциональных возможностей СУБД можно определить наиболее подходящую СУБД для решения поставленной задачи и определить, какие инструменты и функции доступны для работы с данными и насколько эффективно они

работают на больших объемах информации. Выбирая оптимальный вариант СУБД, можно достигнуть высокой производительности и удобства в работе с базой данных и обеспечить эффективную работу с базой данных.

Для создания базы данных углей необходимо определить качественную структуру данных, чтобы, выполнив анализ существующих форматов, можно было выбрать оптимальный вариант, который обеспечит удобный и быстрый доступ к информации и возможность ее дальнейшей обработки и анализа.

Предмет и методы исследования. Предметной областью данной работы являются угли, добываемые в России, их качественные характеристики и показатели различных марок углей.

Основными задачами проектирования базы данных являются:

- обеспечение хранения в базе данных всей необходимой информации;
- обеспечение возможности получения данных по запросам;
- сокращение избыточности и дублирования данных;
- обеспечение целостности базы данных (соответствие имеющейся в базе данных информации её внутренней логике, структуре и всем явно заданным правилам).

Схема базы данных разрабатывается на основе реляционной модели данных, в которой даталогическая модель представляется в виде набора схем отношений с указанием первичных ключей, а также «связей» между отношениями, являющимися внешними ключами.

Основное достоинство применения реляционного подхода для решения поставленной задачи заключается в том, что реляционная модель наиболее эффективно поддерживает целостность данных во всех приложениях и экземплярах базы данных в одно и то же время. В данной задаче это является необходимым условием, т.к. предусмотрен многопользовательский доступ к разрабатываемой базе данных углей.

Структура разрабатываемой базы данных углей описывается с использованием конкретной системы управления базами данных (СУБД), специфика которой может включать в себя ограничения на именование объектов базы данных, поддерживаемые типы данных, методы доступа к данным и т.п.

В настоящее время распространены два типа СУБД: реляционные (SQL) и нереляционные (NoSQL). В табл. 1 приведены типы СУБД с описанием их структуры, производительности, масштабируемости и безопасности.

Таблица 1

Типы СУБД

| Реляционные СУБД (SQL) | Нереляционные СУБД (NoSQL) |
|--|---|
| Структура | |
| Данные хранятся в табличной форме в строках (записях) и столбцах (атрибутах). Каждая запись обычно содержит значение для каждого атрибута, что приводит к четким зависимостям между различными точками данных. | Структура зависит типа хранимых данных: данные могут храниться как простые пары «ключ - значение», документы JSON или граф, состоящий из ребер и верш. Возможно хранить неструктурированные данные, такие как тексты, фотографии, видео, PDF-файлы и множество других форматов. Данные легко запрашивать, но они не всегда классифицируются по строкам и столбцам, как в реляционной базе данных. |
| Масштабируемость | |
| Базы данных масштабируются по вертикали, данные хранятся на одном сервере, масштабирование выполняется путем | Базы данных масштабируются горизонтально путем добавления в пул дополнительных серверов. |

| Реляционные СУБД (SQL) | Нереляционные СУБД (NoSQL) |
|---|---|
| добавления большего количества ресурсов (CPU, GPU, ОП). Масштабирование между несколькими серверами (горизонтальное масштабирование) затруднено, так как потребуются изменения структуры данных. | БД обмениваются данными между различными серверами, каждый из которых содержит только часть данных, уменьшая частоту запросов в секунду на каждом сервере. |
| Производительность | |
| Высокая производительность при интенсивных операциях чтения/записи с небольшими и средними наборами данных. Высокая скорость поиска данных за счет добавления индексов в поля данных для запросов и объединения таблиц. При увеличении объема данных и запросов пользователей производительность может снизиться. | Высокая производительность обеспечивает одновременный доступ большому количеству пользователей. Возможно хранить неограниченное количество наборов данных всех типов и форм. |
| Безопасность | |
| Интегрированная структура и система хранения данных обеспечивают их надежную защиту. | Имеют относительно низкую безопасность, что является негативным фактором для многих инфраструктур. |

По результатам анализа типов СУБД, исходя из их функциональности, для решения поставленной задачи целесообразно использовать реляционную СУБД. Этот выбор обоснован необходимостью хранения больших объемов четко структурированной информации.

Обсуждение результатов исследования. Наиболее распространенными реляционными базами данных являются MySQL, PostgreSQL, SQL Server. Сравнительный анализ функциональных возможностей реляционных СУБД приведен в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительный анализ функциональных возможностей реляционных СУБД

| Функциональность | MySQL | PostgreSQL | SQL Server |
|---|---|---|--|
| Изменения данных: оценивается легкость изменения данных и дефрагментации базы данных. Ключевым приоритетом является гибкость, безопасность и удобство использования систем. | | | |
| - обновление | Автоматически обновляются данные в хранилище отката. При необходимости можно вернуться к предыдущей версии. | Для обновления базы данных вставляются новый столбец и строка. Все обновленные строки имеют уникальные идентификаторы. Увеличивается размер базы данных. Более высокая удобочитаемость. | База данных имеет три ядра, которые отвечают за обновления строк. Хранилище строк обрабатывает информацию обо всех предыдущих обновлениях строк, идентификаторах и измененном содержимом. Механизм in-memory позволяет анализировать качество обновленной базы данных с помощью сборщика мусора. |

| Функциональность | MySQL | PostgreSQL | SQL Server |
|--|---|---|--|
| | | | База данных хранилища столбцов позволяет хранить обновления в столбцах. |
| <p>Вывод: SQL Server предлагает наибольшую гибкость и эффективность, поскольку позволяет отслеживать обновленные строки и столбцы, собирать ошибки и автоматизировать процесс. Разница между SQL Server и MySQL / PostgreSQL заключается в основном в настройке позиций.</p> | | | |
| - дефрагментация | Предлагает несколько подходов к дефрагментации – во время резервного копирования, создания индекса и с помощью команды Таблица OPTIMIZE. Наличие такого количества вариантов обслуживания существенно экономит время. | Позволяет сканировать все таблицы уровня данных, чтобы найти пустые строки и удалить ненужные элементы - таким образом система освобождает дисковое пространство. Метод загружает процессор и может повлиять на производительность приложения. | Предлагает эффективный сборщик мусора, но это не дает более 15-20% накладных расходов. Можно запускать сборщик мусора на постоянной основе, потому что это эффективно. |
| <p>Вывод: MySQL и SQL Server предлагают больше методов дефрагментации, чем PostgreSQL. Они меньше нагружают процессор и обеспечивают более гибкие настройки.</p> | | | |
| <p>Запросы данных: оценивается как системы кэшируют и обрабатывают запросы пользователей, какие подходы они используют при хранении данных, как разработчики могут управлять ими.</p> | | | |
| - буферный пул | предлагает масштабируемый буферный пул — разработчики могут настроить размер кэша в соответствии с рабочей нагрузкой. Кроме того, позволяет разделить кэш по сегментам для хранения различных типов данных и максимальной изоляции. | изолирует процессы, рассматривая их как отдельный процесс ОС. Каждая база данных имеет отдельную память и запускает свой собственный процесс. С одной стороны, управление и мониторинг становятся намного проще, но с другой стороны, масштабирование нескольких баз данных занимает много времени и вычислительных ресурсов. | использует буферный пул, он может быть ограничен или увеличен в соответствии с потребностями обработки. Вся работа выполняется в одном пуле, без нескольких страниц. |
| <p>Вывод: если приоритетом является экономия вычислительных ресурсов и хранилищ, то следует выбирать MySQL и SQL Server. Если необходима четкая организация и долгосрочный порядок, более подходящим является PostgreSQL с его изолированным подходом.</p> | | | |
| - временные таблицы | предлагает ограниченные функциональные | предлагает больше функциональности для временного контента. | предлагает широкие функциональные возможности для |

| Функциональность | MySQL | PostgreSQL | SQL Server |
|---|--|---|---|
| | возможности для временных таблиц. Разработчики не могут задавать переменные или создавать глобальные шаблоны. Программное обеспечение даже ограничивает количество раз, когда временная таблица может быть упомянута - не более одного раза. | Временные таблицы делятся на локальные и глобальные и настраиваются с помощью гибких переменных. | временного управления таблицами. Можно создавать локальные и глобальные временные таблицы, а также контролировать и создавать переменные. |
| <p>Вывод: временные таблицы необходимы для приложений со сложной бизнес-логикой - если программное обеспечение запускает много сложных процессов, нужно хранить несколько промежуточных результатов. В этом случае наличие широких функциональных возможностей настройки PostgreSQL или SQL Server необходимо будет на протяжении всего процесса разработки.</p> | | | |
| <p>Индексы: оценивается способ создания индексов в каждом решении, поддержка поиска с несколькими индексами и индексов с несколькими столбцами, а также частичных.</p> | | | |
| | организовал индексы в таблицах и кластерах. Можно автоматически находить и обновлять индексы в базах данных. Поиск не очень гибкий – нельзя искать несколько индексов в одном запросе. Поддерживает индексы с несколькими столбцами, что позволяет добавлять до 16 столбцов. | поддерживает организацию таблиц на основе индексов. Возможно искать много индексов в одном поиске, что позволяет найти много информации. Настройки с несколькими столбцами также более гибкие, могут включать до 32 столбцов. | предлагает автоматизированные функциональные возможности. Индексы могут объединяться в кластеры и поддерживать правильный порядок строк без ручного вмешательства. Поддерживает поиск по нескольким индексам и частичные индексы. Наличие гибких настроек индекса позволяет быстрее искать информацию и организовывать несколько данных одновременно. |
| <p>Вывод: SQL Server предлагает наиболее широкие автоматизированные функциональные возможности.</p> | | | |
| Таблицы, оптимизированные для памяти | поддерживает таблицу, хранящуюся в памяти, но не может участвовать в транзакциях. Безопасность таблицы очень уязвима. Такие таблицы используются только в целях чтения и | не поддерживает создание базы данных в памяти. | использует оптимистичную стратегию для обработки оптимизированных для памяти таблиц, что означает, что они могут участвовать в транзакциях наряду с обычными таблицами. Транзакции на основе памяти быстрее, чем |

| Функциональность | MySQL | PostgreSQL | SQL Server |
|--|--|--|---|
| | могут упростить примитивные операции. | | обычные, и это позволяет резко увеличить скорость приложения. |
| Вывод: оптимизированные для памяти таблицы лучше всего настраивать в MySQL. Это не важная функция базы данных, но хороший способ повысить производительность. | | | |
| Поддержка JSON | поддерживает файлы JSON, но не позволяет индексировать их. Функциональность JSON-файлов очень ограничена. Позволяет работать с геопространственными данными, и обработка их не так интуитивно понятна. | поддерживает JSON-файлы, а также их индексацию и частичные обновления. База данных поддерживает даже больше дополнительных данных, чем MySQL. Пользователи могут загружать определенные типы, геопространственные данные, создавать многомерные массивы и многое другое. | обеспечивает полную поддержку документов JSON, их обновлений, функциональности и обслуживания. Он имеет множество дополнительных функций для данных GPS, пользовательских типов, иерархической информации и т. д. |
| Вывод: все три решения довольно универсальны, предлагают множество функциональных возможностей для нестандартных типов данных. Однако MySQL накладывает несколько ограничений на файлы JSON, но он очень совместим с расширенными данными. | | | |
| Разделение | позволяет секционировать базы данных с функциями хэширования для распределения данных между несколькими узлами. Можно создавать определенный ключ секции, который определит расположение данных. Хэширование позволяет избежать узких мест и упростить обслуживание. | позволяет создавать разделы LIST и RANGE, где индекс раздела создается вручную. Необходимо определить дочерний и родительский столбцы, прежде чем назначать для них раздел. | предоставляет доступ к секционированию RANGE, где раздел назначается всем значениям, попадающим в определенный диапазон. Если данные находятся в пределах порогового значения, они будут перемещены в секцию. |
| Вывод: все три решения имеют функциональные возможности по разделению данных. | | | |
| Экосистема | является частью экосистемы Oracle, которая является самой большой базой данных SQL с открытым исходным кодом и простой в установке. Является надежным решением для баз данных, имеет лидирующие позиции не только среди SQL- | предлагает множество инструментов для масштабирования и оптимизации программного обеспечения. Можно выполнять кластеризацию, интеграцию ИИ, совместную работу, отслеживание проблем, улучшение отображения объектов и другие функции. | обладает высокой совместимостью с Windows и всеми ОС и инструменты Майкрософт. Под управлением ОС Windows, SQL Server лучший вариант на рынке. Дополнительные инструменты охватывают мониторинг сервера, анализ данных, парсинг |

| Функциональность | MySQL | PostgreSQL | SQL Server |
|------------------|---|--|--|
| | инструментов, но и среди всех баз данных в целом. | Процесс установки не-много сложен, так как требует дополнительных установок. | и программное обеспечение для управления безопасностью. ориентирована на большие инфраструктуры. Дороже, чем конкуренты с открытым исходным кодом, но пользователи получают доступ к часто обновляемой официальной экосистеме и активной поддержке клиентов. |

Выбор базы данных PostgreSQL обоснован ее гибкостью, целостностью, масштабируемостью и экономической эффективностью.

База данных PostgreSQL поддерживает как реляционные, так и нереляционные запросы, отличается значительными преимуществами для приложений, объединяющих в себе временные ряды, JavaScript Object Notation Binding (JSONB) и реляционные данные.

PostgreSQL обладает возможностью масштабируемости, касающейся не только объема данных, которыми база данных может управлять, но и числа одновременно работающих в ней пользователей. Кроме того, это программное обеспечение совместимо со всеми основными операционными системами, включая Linux. PostgreSQL имеет открытый код, поэтому может быть интегрирована с несколькими бесплатными дополнениями, иметь активные сообщества пользователей и постоянно обновляться.

На основе анализа входных данных, были выделен набор общих признаков для формирования структуры входных данных. В качестве основных показателей используются параметры классификации ископаемых углей, согласно ГОСТ Р 70207-2022 [7].

Входные данные в систему будут загружаться от различных угольных предприятий, поэтому необходим стандартизированный формат входных данных. Для этой цели был проведен сравнительный анализ некоторых популярных форматов данных, таких как XML, JSON, TSV и CSV. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Форматы данных

| Формат данных | Достоинства | Недостатки |
|---------------|---|---|
| XML | <ul style="list-style-type: none"> – формат является унифицированным и соответствует стандарту; – удаленное взаимодействие с другими системами легко, а обмен данными более удобен. | <ul style="list-style-type: none"> – файл XML огромен, формат файла сложен, и передача занимает полосу пропускания; – и серверу, и клиенту нужно потратить много кода для анализа XML, в результате чего код сервера и клиента становится чрезвычайно сложным и сложным в обслуживании; – способ парсинга XML между различными браузерами на клиенте несовместим, и многие коды должны быть написаны |

| Формат данных | Достоинства | Недостатки |
|---------------|--|---|
| | | повторно; – серверу и клиенту требуется больше ресурсов и времени для анализа XML. |
| JSON | <ul style="list-style-type: none"> – формат данных относительно прост, легко читается и записывается, формат сжат, а полоса пропускания мала; – легко анализируемый клиентский JavaScript может просто читать данные JSON через eval (); – поддержка нескольких языков, включая ActionScript, C, C #, ColdFusion, Java, JavaScript, Perl, PHP, Python, Ruby и другие серверные языки для облегчения анализа на стороне сервера; – поскольку формат JSON можно использовать непосредственно для кода на стороне сервера, он значительно упрощает разработку кода на сервере и клиенте, выполняет задачу без изменений и прост в обслуживании. | <ul style="list-style-type: none"> – не такой популярный как формат XML, и не такой универсальный как XML; – продвижение формата JSON в веб-службе все еще находится в зачаточном состоянии. |
| CSV | <ul style="list-style-type: none"> – формат обычного текстового файла, в котором прописывается поток текстовых данных, разделенных точкой с запятой – формат является универсальным; – с помощью csv-файлов возможно представить таблицы любых баз данных, так как синтаксис этого формата максимально прост. | <ul style="list-style-type: none"> – не единый во всех системах специальный символ, т.е. при импорте или экспорте одни системы, работающие с таблицами, могут не воспринять точку с запятой и воспринять просто запятую; – в коде csv-файла нельзя использовать текст в ячейке, разделенный на несколько строк. |
| TSV | <ul style="list-style-type: none"> – простой, широко поддерживаемый формат; – альтернатива распространенному формату CSV, поскольку не нуждается в экранировании символа запятой в середине значений. | <ul style="list-style-type: none"> – не подходит для больших объемов данных; – сложности при использовании полей различных типов данных. |

На основе выполненного анализа, способом транзакции и ввода источников входных данных характеристик углей и технологий переработки в информационную структуру выбран формат JSON, позволяющий сформировать из данных различных типов список стандартизованного формата.

Выводы. На основе проведенных исследований на этапе логического проектирования обоснован выбор реляционной модели данных в виде набора схем отношений и связей между отношениями.

Для создания базы данных углей предложено использование СУБД PostgreSQL, которая является свободной объектно-реляционной системой управления базами данных.

Сформулированы требования к реляционным базам данных, которые необходимо соблюдать при проектировании реляционной базы данных.

На основе действующих государственных стандартов в области добычи и использования угля описаны форматы входных данных сущности проектируемой базы данных углей.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых 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», утверждённой распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022г. №1144-р (Соглашение № 075-15-2022-1190 от 27.09.2022г.) в рамках НИР по теме: «Разработка информационно-технологической платформы пилотного производства «премиальных» угольных смесей».

Список литературы

1. Корниенко И.Л. Использование базы данных уникальных углей в обучении нейросетовой информационной системы для определения состава угольного концентрата / Информационно-телекоммуникационные системы и технологии : материалы всерос. науч.-практ. конф., Кемерово, 16-17 октября 2014г. – Кемерово, 2014. – С. 87.
2. Кузнецов П.Ю., Гриб Н.Н., Качаев А.В. Анализ представительности данных показателей качества углей для создания базы данных по результатам детальных геологоразведочных работ // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 6(48). – С. 137–140. DOI: 10.18454/IRJ.2016.48.081
3. Создание автоматизированной базы данных ценных элементов в товарных углях предприятий Кузнецкого бассейна / В.П. Потапов, В.И. Удовицкий, Б.Ф. Нифантов, И.В. Кандинская // Вестник КузГТУ. – 2003. – № 2(33). – С.38-41.
4. Dilip Kumar, Deepak Kumar. Dilip Kumar, Deepak Kumar. - Woodhead Publishing, 2018. – 454 с.
5. Construction of Trace Element in Coal of China Database Management System: Based on WebGIS / Liu Yang, Xue Bai, Yinjie Hu [et al.] // Sains Malaysiana. – 2017. – № 46(11). – P. 2195-2204. – DOI:10.17576/jsm-2017-4611-21
6. Shanjun Mao. Development of coal geological information technologies in China // International Journal of Coal Science & Technology, 2020, volume7, pages320-328.
7. ГОСТ Р 70207-2022 «Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим признакам». – Введ. 01.12.2022.

УДК 004:005.3

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМЫ 1С: ДОКУМЕНТООБОРОТ И СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ЗАЯВОК NAUMEN SERVICE DESK

Матюшкин Г.В., д.т.н. Кулаков С.М.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Поставлена и решена задача разработки интерфейса между системами 1С: Документооборот и Naumen Service Desk для автоматизации планирования, учета и контроля работ по выполнению заявок клиентов ИТ-провайдера. Данное нововведение позволяет устранить ручной ввод данных, требуемых для формирования плановых отчетных документов.

Ключевые слова: Система 1С: Документооборот, система Naumen Service Desk, интерфейс, REST API, схема обработки заявок, пользователи, ИТ-сервисы, отчет об инцидентах, программный модуль.

В настоящее время существует целый ряд программных средств, призванных для автоматизации процессов документооборота в организациях любой сферы деятельности. Одной из наиболее популярных программ является 1С: Документооборот (1С: ДО) [1, 2].

Программа является эффективным инструментом построения и наладки электронного документооборота, позволяющим не только автоматизировать, но и упростить многие процессы. Внедрение продукта не потребует больших временных или денежных затрат со стороны руководства, но при этом в обязательном порядке даст возможность более интенсивно развиваться на рынке.

Существенным недостатком применения базовой системы 1С: ДО для решения задач оперативного учета и контроля работ по выполнению заявок клиентов ИТ-провайдера является необходимость ручного ввода поступающих заявок. Доступным программным продуктом удобным для ручного ввода и формирования заявок (документов) службы Service-Desk (службы поддержки пользователей ИТ-провайдера), является система Naumen Service Desk (NSD). Однако ее применение без разработки специальной интерфейсной системы, соединяющей 1С: ДО и NSD, не разрешает проблемную ситуацию устранения операций ручного ввода данных.

В результате анализа указанной проблемной ситуации сформирована следующая задача разработки интерфейсного программного модуля, соединяющего систему 1С: ДО и систему обработки заявок пользователей ИТ-провайдера NSD [3], так, чтобы функции обработки заявок и формирования отчетных документов выполнялись в автоматическом режиме.

Дано:

- 1) Копия действующей базы данных 1С: ДО.
- 2) Копия действующей система обработки заявок пользователей ИТ-сервисов NSD.
- 3) Инструменты технологической платформы 1С: Предприятие.
- 4) Интервал планирования и отчетность ИТ-провайдера, $[O, \theta]$.
- 5) Множество $\{Q_k, k \in K\}$ показателей отчетности.
- 6) Портфель $S_p = \{S_i \mid i \in I(t)\}$ ИТ – сервисов провайдера, где S_i – индекс i – го сервиса, $I(t)$ – множество эксплуатируемых сервисов в t [4].
- 7) Множество запросов (заявок) (O, θ) за период планирования (отчетности).

Требуется:

Разработать программный модуль интеграции информационных систем 1С: ДО и NSD, применительно к функции обработки заявок пользователей и формирования отчетов, удовлетворяющий заданным ограничениям и обеспечивающий автоматическое формирование отчетных документов.

Решением поставленной задачи является процедура разработки программного модуля, включающая следующие основные этапы:

1. Модификация объектов базы данных 1С: ДО в соответствии с форматом системы обработки заявок NSD.
2. Загрузка данных о заявках из NSD в 1С: ДО.
3. Формирование отчетов о выполненных работ в 1С: ДО.
4. Создание механизма выгрузки «Задач» из 1С: ДО в объект типа «Заявки» в NSD.
5. Создание механизма обновления статусов задач в 1С: ДО, и истории изменения переписки по заявкам.

Процесс обработки заявок в настоящее время представлен на рис. 1.

Такая схема работы имеет следующие недостатки:

– данные заявок дублируются в нескольких подсистемах, из-за чего случаются информационные разрывы при передаче сведений, рассинхронизация во времени;

– значительные затраты времени сотрудников, связанные с ручной обработкой данных и подготовкой аналитической отчетности в MS Excel.

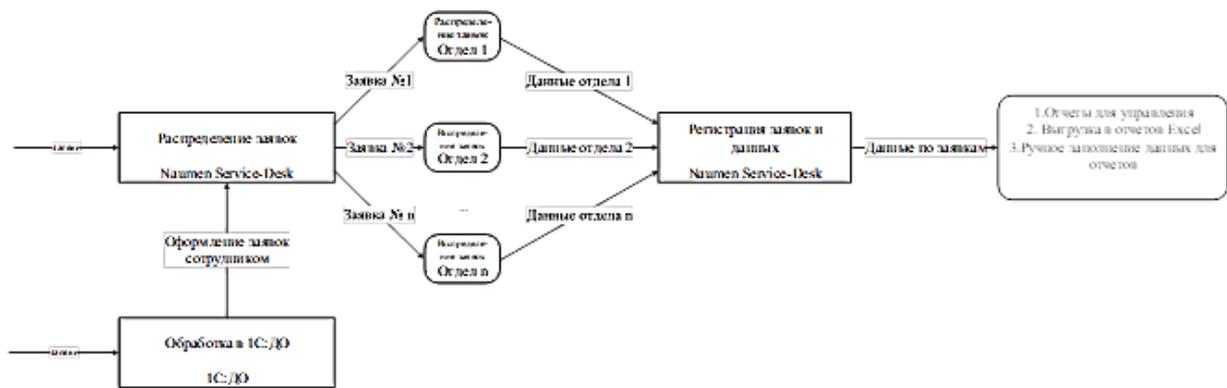


Рис. 1. Действующая схема процесса обработки заявок на предприятии

Предложен следующий способ решения, нивелирующий указанные недостатки, создание модуля интеграции системам 1С: ДО и NS-Desk. В новом комплексе информация по всем заявкам выгружается из NSD в 1С: ДО. В свою очередь, согласованные задачи с типом «Исполнить» будут автоматически выгружаться только при предварительно установленном флаге выгрузки, что позволит избежать дублирования информации, разрывов и решить задачу актуализации данных.

На основе загруженных данных из NSD в 1С: ДО автоматически формируются аналитические отчеты, исключается ручная работа сотрудников. Новая схема процесса обработки заявок представлена на рис. 2.

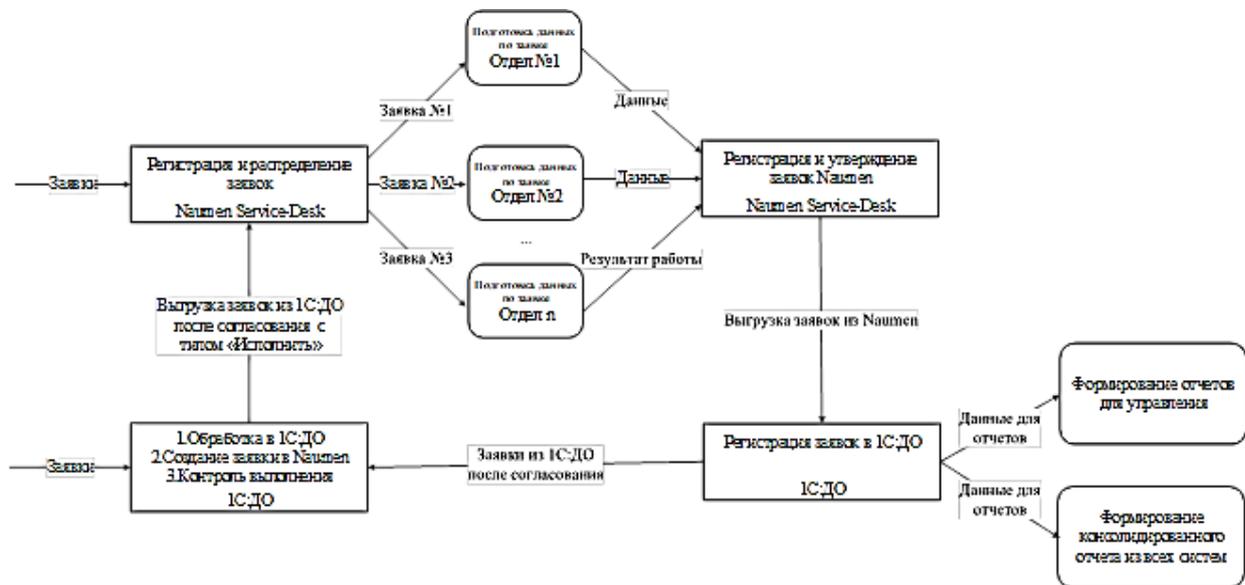


Рис. 2. Модифицированная схема процесса обработки заявок

Программная реализация модуля интеграции систем 1С: ДО и NSD. В целом разработка модуля интеграции представляет собой реализацию миграции данных, состоящая из 2-х подзадач.

1-я задача: выгрузка данных из NSD в 1С: ДО.

Выгружаются объекты: заявки и комментарии к заявкам.

Выгрузка данных происходит раз в сутки за весь период для аналитики в наименее загруженный период работы системы 1С: ДО, с 01-05 утра.

2-я задача: выгрузка данных из 1С: ДО в NSD.

Из 1С: ДО выгружаются задачи при установленном флаге выгрузки. При этом выгружаются не все заявки, а лишь с типом «Исполнить».

Также происходит актуализация данных: в 1С: ДО обновляются статусы и комментарии в задачах из системы NSD. Актуализация данных происходит в автоматическом режиме каждые 5 минут.

Интеграция между системами осуществлялась на основе REST API – это архитектурный подход, который устанавливает ограничения для API: как они должны быть устроены и какие функции поддерживать. Это позволяет стандартизировать работу программных интерфейсов, сделать их более удобными и производительными [5].

Разработка справочников. Объекты типа «Справочник» были добавлены в конфигурацию системы 1С: ДО с целью удобного сопоставления данных, поступающих из NSD. Добавлен справочник «Статусы Заявок». На рис. 3 представлена форма справочника «Типы заявок».

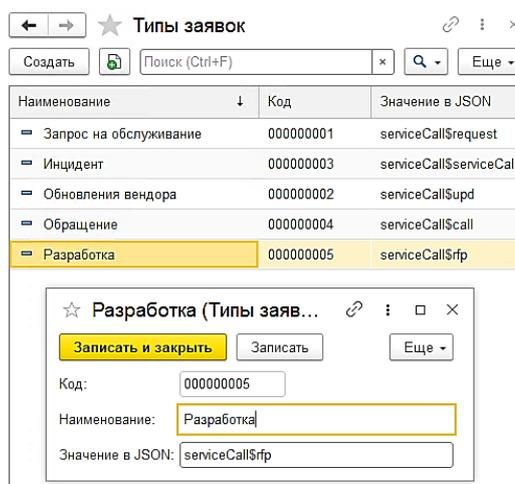


Рис. 3 Справочник «Типы заявок»

Разработка регламентных заданий. Данные из NSD загружаются по регламентному заданию, по заданному расписанию, например, раз в сутки. Регламентное задание порождает фоновое задание, которое непосредственно связано с выполнением заложенного действия без участия пользователя или программиста 1С.

Доработка механизма Исполнителя. Одним из пунктов технического задания, требуется создать механизм выгрузки Задач из 1С: ДО в объект типа «Заявки» в NSD.

Для реализации данной задачи была проделана следующая работа:

- добавлен булев реквизит «Выгружать в Naumen» в объект «Задача Исполнителя»;
- добавлена гиперссылка «Задача в Naumen», по которой открывается Заявка в системе NSD;
- разработан механизм загрузки Задач с типом «Исполнить» в систему NSD;
- создано регламентное задание «Обновление Статусов» по обновлению статуса задач и истории комментариев.

Создание статистических отчетов. Важным пунктом технического задания является создание статистических отчетов по заявкам. Отчеты отражают сводную информацию о количестве поступивших, решенных и не выполненных заявках. Также были созданы отчеты, которые отражают оценку качества выполненных работ, разработаны отчеты, отражающие данные по периоду решения и бездействия по заявкам. Отчеты формируются на основе данных, полученных посредством REST-запросов к системе NSD, вся информация отображается в виде столбиковых диаграмм и графиков.

На рис. 4 показан сводный отчет о количестве поступивших, выполненных и не решенных заявках по виду «Инцидент» в виде графика.

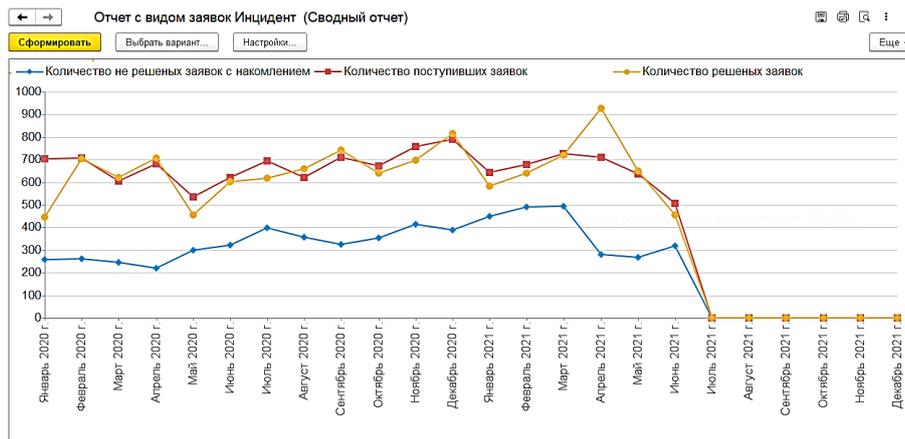


Рис. 4. Сводный отчет с типом заявок инцидент

На рис. 5 представлен сводный отчет о доле оценочных заявок «Инцидент» в гистограммы.

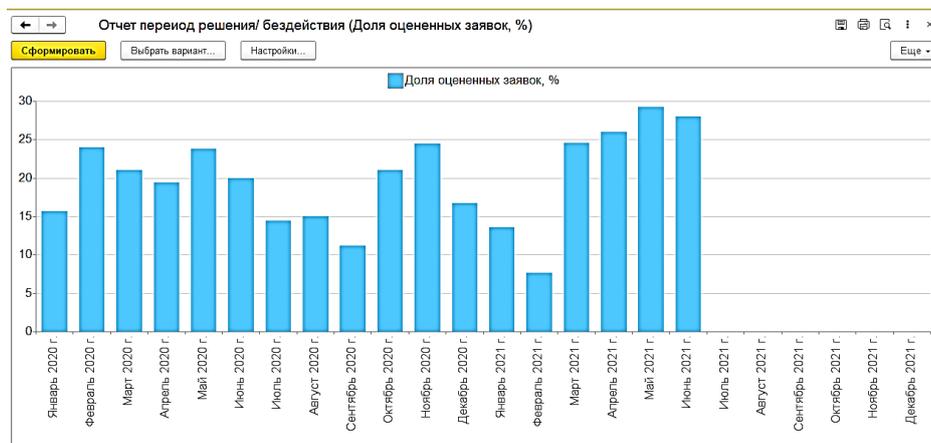


Рис. 5. Сводный отчет с типом заявок инцидент

Перспективы развития систем 1С: ДО и NSD. В качестве дальнейшего развития проекта запланирована реализация следующих видов доработок:

- в развитие схемы адресной постановки задач в NSD. Минувя первую линию поддержки, может быть поставлена задача с учетом дополнительных реквизитов в документах 1С: ДО (например, указание услуги, которая справочно выбирается из NSD, по которой систематизируются и собираются заявки, и направляются автоматическим обменом ответственным исполнителю за сервис);
- для управления заявками разработать Канбан-доску в 1С: ДО с переходом по ссылке в заявку NSD;
- создание механизма расчета премий сотрудникам ИТ-провайдера с учетом по принципу решенных и не решенных задач.

Вывод. В ходе проделанной работы был разработан модуль интеграции системы 1С: Документооборот и системы обработки заявок Naumen Service-Desk.

Внедрение данного модуля позволит повысить эффективность труда, путем исключения дублирования ручных операций в системах 1С: ДО и NSD. Позволит снизить трудозатраты, на формирование статистических отчетов.

Список литературы

1. Ощенко И. Алфавит программирования в 1С: Предприятие 8.3. – М.: БХВ-Петербург, 2015. – 499 с.

2. Радченко М.Г. Практическое пособие разработчика 1С Предприятие 8.3. Примеры и типовые приемы. – Изд-во «Фирма 1С», 2013. – 964 с.
3. Naumen Service. – URL:https://www.naumen.ru/products/service_desk/
4. Основы управления жизненным циклом сервисов систем информатики и автоматизации (лучшие практики ИТIL): учебник / В.В. Зимин, А.А. Ивушкин, С.М. Кулаков, К.А. Ивушкин. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2013. – 500 с.
5. Рошин С. Современные интернет-технологии. Семь главных трендов – М: ЛитРес, 2021. – 275 с.

УДК 004.942

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПИРОЛИЗА И ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА 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 показаны основные возможности программного комплекса T-Energy применительно к процессам горения. Представлены результаты исследования процессов пиролиза и горения углей различных марок и кокса. Получены зависимости равновесных составов продуктов горения от температуры и теоретические температуры горения.

Ключевые слова: программный комплекс, угольное топливо, пиролиз, процесс горения, равновесный состав, равновесная температура.

В статье приведены результаты исследования с использованием программного комплекса T-Energy процесса пиролиза и горения при избытке и недостатке воздуха углей разных марок и кокса.

Программный комплекс включает в себя три основных модуля: база данных и программа для определения термодинамических функций индивидуальных веществ [1]; блок расчета термодинамических свойств для химических реакций; блок расчета равновесного состава и равновесной температуры [2].

В первом модуле для любого простого вещества определяются термодинамические функции при заданной температуре: удельная теплоёмкость, приведенная энергия Гиббса, энтропия, энтальпия, энтальпия образования вещества, молярная масса. Также для каждого простого вещества можно посмотреть коэффициенты полинома, необходимого для построения графиков термодинамических функций в заданном интервале температур.

Во втором модуле пользователь имеет возможность работы с химическими реакциями. Осуществляется проверка на равенство количество молей входных веществ и продуктов реакций, и для всех химических реакций можно получить термодинамические функции, представленные в первом модуле.

Третий модуль позволяет определить равновесный состав сложной многокомпонентной гетерогенной системы.

В программе предусмотрена возможность задавать входные потоки в виде материалов с различным химическим составом, а не в виде простых веществ, как это сделано в большинстве программных продуктов, предназначенных для расчета равновесного состава, таких как Terra [3], FactSage [4, 5], Thermo-Calc [6], HSC Chemistry [7].

Также отличительной особенностью программного комплекса является возможность определения теоретической температуры равновесного состояния системы при заданных начальных условиях, которая рассчитывается на основе постоянства полной внутренней энергии системы.

Расчет теоретической температуры пиролиза производился для углей марок: бурого (2Б), длиннопламенного (Д), слабоспекающегося (СС). Такие марки углей добываются в больших объемах в Кемеровской области. Исходные данные для расчетов представлены в табл. 1 – 3.

Таблица 1

Состав углей

| Тип топлива | Содержание С в рабочей массе, % | Ad (зола), % | Vdaf (летучие), % | Wr (влага), % |
|-------------|---------------------------------|--------------|-------------------|---------------|
| 2Б | 38,3 | 6,1 | 36,4 | 19,2 |
| Д | 48,3 | 9,0 | 37,8 | 4,9 |
| СС | 65,3 | 5,9 | 22,6 | 6,2 |
| Кокс | 84,4 | 12,3 | 1,3 | 1,2 |

Таблица 2

Состав летучих

| Тип топлива | Элементный анализ на горючую массу (Vdaf), % | | | | |
|-------------|--|------|------|-------|------|
| | С | Н | N | O | S |
| 2Б | 71,12 | 3,91 | 0,99 | 22,81 | 1,16 |
| Д | 71,78 | 6,10 | 1,17 | 20,05 | 0,34 |
| СС | 86,25 | 4,83 | 2,18 | 6,59 | 0,14 |
| Кокс | 96,97 | 0,56 | 1,42 | 0,56 | 0,51 |

Таблица 3

Состав золы

| Тип топлива | Оксидный состав золы углей, % | | | | | | |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-------------------------------|------------------|------|
| | Fe ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | CaO | MgO | P ₂ O ₅ | SiO ₂ | S |
| 2Б | 10,88 | 5,70 | 47,85 | 6,23 | 0,21 | 28,41 | 0,72 |
| Д | 8,20 | 25,71 | 9,74 | 3,72 | 1,81 | 50,21 | 0,61 |
| СС | 17,74 | 26,98 | 1,22 | 1,61 | 0,51 | 51,93 | 0,02 |
| Кокс | 13,12 | 23,72 | 5,15 | 1,76 | 0,69 | 47,90 | 0,02 |

Расчет равновесной температуры пиролиза производился в диапазоне от 1000 до 3000 К с шагом 10°. Результаты расчетов показаны на рис. 1.

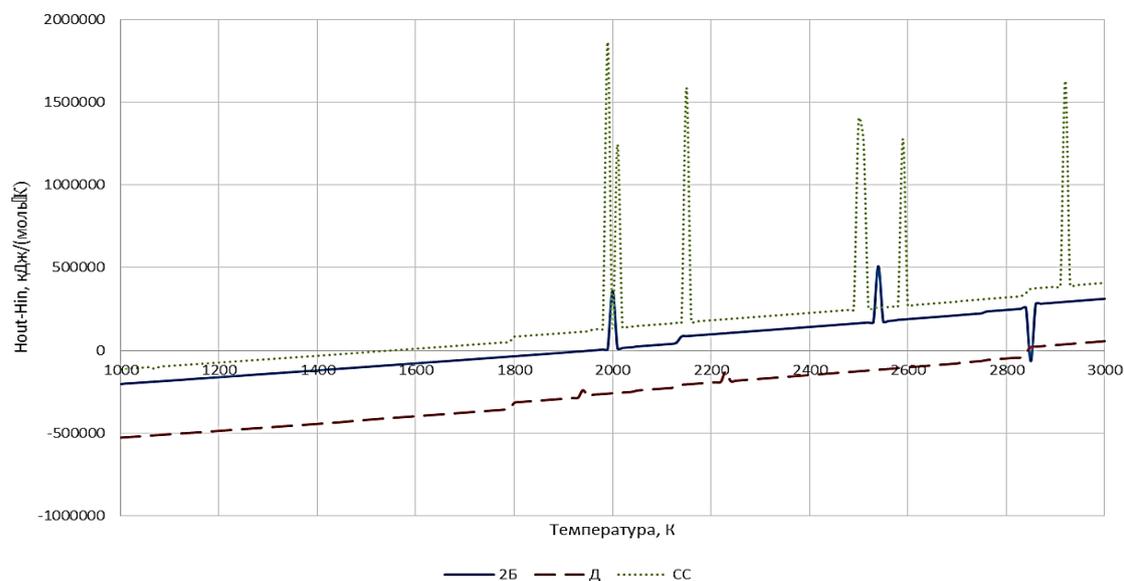


Рис. 1. Зависимость равенства энтальпий от температуры для трех марок угля

Пересечение графиков с осью абсцисс показывает равновесную температуру пиролиза углей при отсутствии воздуха. Рассчитанные равновесные температуры составили 1941 К для угля марки 2Б, 2741 К для угля марки Д и 1538 К для угля марки СС.

Также производились вычислительный эксперименты по определению равновесной температуры процессов горения углей марок 2Б, Д, СС и кокса в зависимости от количества подаваемого воздуха в диапазоне от 0 до 16 кг на 1 кг угля.

Максимальные равновесные температуры для трех марок углей и кокса были получены при расходе воздуха от 7 до 10 кг на 1 кг угля. Равновесная температура рассчитывалась с шагом в 10 градусов и составила:

- 2720 К при подаче воздуха 7 кг на 1 кг бурого угля;
- 2920 К при подаче воздуха 9 кг на 1 кг длиннопламенного угля;
- 2610 К при подаче воздуха 10 кг на 1 кг слабоспекающегося угля;
- 2410 К при подаче воздуха 10 кг на 1 кг кокса.

Результаты моделирования приведены на рис. 2, из которого следует, что максимальная температура горения достигается при сжигании длиннопламенного угля и составляет 2920 К.

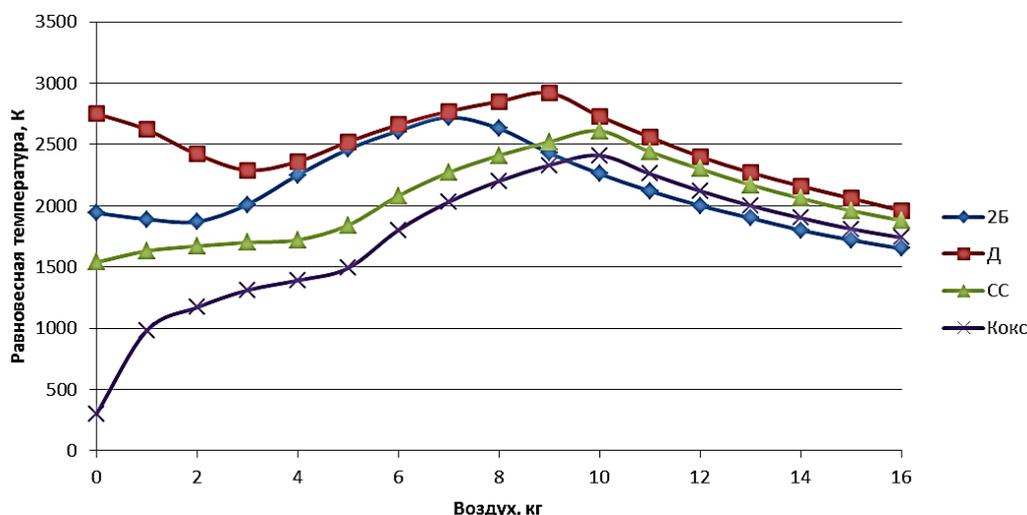


Рис. 2. Зависимость равновесной температуры горения углей марок 2Б, Д, СС и кокса от расхода воздуха

Равновесный состав продуктов горения для трех марок угля и кокса приведен в табл. 4.

Таблица 4

Равновесный состав продуктов горения углей марок 2Б, Д, СС и кокса

| Тип топлива | Т, К | Уголь, кг | Воздух, кг | Массовые доли, % | | | | | |
|-------------|------|-----------|------------|------------------|-----------------|----------------|-------|-----------------|----------------|
| | | | | H ₂ O | SO ₂ | N ₂ | CO | CO ₂ | O ₂ |
| 2Б | 2720 | 1 | 7 | 3,987 | 0,115 | 67,215 | 2,296 | 25,678 | 0 |
| Д | 2920 | 1 | 9 | 2,545 | 0,038 | 69,095 | 0,35 | 27,082 | 0 |
| СС | 2610 | 1 | 10 | 1,452 | 0,005 | 69,772 | 0 | 28,218 | 0,015 |
| Кокс | 2410 | 1 | 10 | 0,118 | 0,002 | 69,729 | 0 | 28,764 | 0,015 |

Выводы. Как следует из представленных результатов программа T-Energy позволяет рассчитать равновесную температура горения различных видов топлива, а также получать равновесные составы продуктов горения при заданной температуре.

Список литературы

1. Сеченов П.А., Рыбенко И.А. Исследование реакций горения угольного топлива с использованием компьютерной программы T-Energy // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2022. – № 8. – С. 238-240.
2. Сеченов П.А., Рыбенко И.А. Численный метод и математическая модель нахождения равновесного состава термодинамической системы программного комплекса T-Energy // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2022. – Т. 49. – № 4. – С. 104-112.
3. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. – М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2013. – 96 с.
4. FactSage thermochemical software and databases / G.W. Bale, E. Bélisle, P. Chartrand [et al.] // Calphad. – 2016. – Vol. 55. – Part 1. – P. 1–19.
5. Казаков А.А., Рябошук С.В. Основы металлургической экспертизы. Численное моделирование фазовых превращений в жидкой и затвердевающей стали: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 110 с.
6. Thermo-Calc and DICTRA enhanced materials design and processing / P. Shi, A. Engström, L. Höglund [et al.] : conference «Materials Science Forum». – 2005. – P. 475–479.
7. Агеев Н.Г., Набойченко С.С. Металлургические расчеты с использованием пакета прикладных программ HSC Chemistry : учеб. пособ.. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 124 с.

УДК 621.3.078:62-83: 622.6

**МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
СКИПОВОГО ПОДЪЕМА ЦР6x3,2/0,75 АБАКАНСКОГО РУДНИКА****д.т.н. Островляничик В.Ю., к.т.н. Кубарев В.А., Маршев Д.А., к.т.н. Поползин И.Ю.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия**

Аннотация. В статье проведен анализ существующей аналоговой системы управления электроприводом скипового подъема и предложена методика получения цифровой вычислительной модели для целей автоматического управления приводом.

Ключевые слова: шахтный подъем, подъемная установка, электропривод, система управления электроприводом, цифровая система управления.

Подъемные установки (ПУ) большой мощности выше 1,5 тыс. кВт выполняют с электроприводом постоянного тока или синхронных электродвигателей. Эксплуатируемые ПУ выполнены с применением аналоговых управляющих устройств и устарели морально и физически. Кроме того, современные цифровые системы управления (ЦСУ) имеют ряд существенных преимуществ.

Реализация ЦСУ связана с рядом проблем, связанным с особенностями. В рабочей технической документации согласно единым правилам безопасности (ЕПБ) и правилам устройства электроустановок (ПУЭ) [1,2] подъемные установки должны иметь принципиальные схемы. В цифровых системах это техническая структура, которая представляет из себя совокупность технических элементов управляющего устройства, объединенных в структуру, т.е. устанавливается взаимосвязь. Поэтому вместо принципиальной схемы могут быть представлены техническая и алгоритмическая структуры, составленная на основе математической модели.

Можно сформулировать следующую цель работы. На основании анализа действующей аналоговой системы управления составить математическую модель объекта управления, вычислительную модель и вычислительную модель управляющего устройства в

Вычислительную модель построим путем представления системы уравнений, состоящей из трех элементарных звеньев – идеального интегрирующего $y = \frac{k}{Tp} x$; суммирующего $x_1 \pm x_2 = x$; и масштабного $y = kx$. В этом случае операция интегрирования представляется в виде суммирования текущего и предыдущего значений $y = k\Delta t_i + y_{i-1}$; $y_{i-1} = k\Delta t_{i-1}$, т.е. дифференциальные уравнения решаются как система алгебраических уравнений (4) с аргументом Δt , т.е. получаем переходные процессы для выходной величины:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{зэ} = (U_{зс} - U_{този}) \frac{1}{T_{зи}p}, \\ \Delta e = U_{зэ} - U_{оэ} - U_{ост}, \\ U_{зн} = \Delta e \frac{T_{рэ}p+1}{T_{ирэ}p}, \\ \Delta U_{г} = U_{зн} - U_{ог}, \\ U_{рн} = \Delta U_{г} \frac{T_{рн}p+1}{T_{ирн}p}, \\ U_{вг} = U_{рн} \frac{k_{тп}}{T_{тп}p+1}, \\ U_{г} = U_{вг} \frac{k_{г}}{T_{г}p+1}, \\ U_{я} = U_{г}, \\ \Delta U_{я} = U_{я} - E, \\ I_{я} = \Delta U_{я} \frac{1/R_{э}}{T_{я}p+1}, \\ I_{дин} = I_{я} - I_{с}, \\ \omega = U_{т} I_{дин} \frac{k_E/R_{э}}{T_{мп}}, \\ E = k_E \omega, \\ U_{т} = \begin{cases} 0, & \text{тормоз наложен,} \\ 1, & \text{тормоз снят.} \end{cases}, \\ U_{ог} = k_u U_{г}, \\ U_{оэ} = k_u U_{я} + k_u U_{г} \frac{T_p}{\gamma T_p+1} - k_r k_i I_{я}, \\ U_{ост} = k_i k_{ост} I_{я}, \\ U_{този} = k_i k_{дт} I_{я} \frac{T_1 p+1}{T_2 p+1}. \end{array} \right. \quad (4)$$

В системе (4) приняты следующие обозначения: где $U_{зэ}$ – напряжение задания ЭДС; $U_{зс}$ – напряжение задания скорости; $U_{този}$ – напряжение токоограничения в задатчике интенсивности; Δe – сигнал рассогласования ЭДС; $U_{оэ}$ – напряжение обратной связи по ЭДС двигателя; $U_{ост}$ – напряжение жесткой обратной связи по току якоря; $U_{зн}$ – напряжение задания напряжения генератора; $\Delta U_{г}$ – сигнал рассогласования напряжения генератора; $U_{ог}$ – напряжение обратной связи по напряжению генератора; $U_{рн}$ – напряжение на выходе регулятора напряжения; $U_{вг}$ – напряжение возбуждения генератора; $U_{г}$ – напряжение генератора; $U_{я}$ – напряжение на якоре двигателя; $\Delta U_{я}$ – падение напряжения на якоре двигателя; E – противо-ЭДС двигателя; $I_{я}$ – ток якорной цепи привода; $I_{дин}$ – динамический ток; ω – угловая скорость вращения якоря двигателя; k_E – коэффициент внутренней обратной связи по ЭДС двигателя; $U_{т}$ – сигнал наложения электромагнитного тормоза; k_u – коэффициент обратной связи по напряжению; k_r – коэффициент обратной связи по току двигателя в датчике ЭДС; k_i – коэффициент обратной связи по току якорной цепи; $k_{ост}$ – коэффициент жесткой обратной связи по току; $k_{дт}$ – коэффициент токоограничения в задатчике; $T_{зи}$ – постоянная времени задатчика интенсивности; $T_{рэ}$ – постоянная времени регулятора ЭДС; $T_{ирэ}$ – постоянная времени интегрирования регулятора ЭДС; $T_{рн}$ – постоянная времени регулятора напряжения; $T_{ирн}$ – постоянная времени интегрирования регулятора напряжения; T – постоянная времени в датчике ЭДС; γ – коэффициент в датчике ЭДС; $k_{тп}$ – коэффициент усиления

возбудителя; T_{mn} – постоянная времени возбудителя; k_2 – коэффициент передачи генератора; T_2 – постоянная времени цепи возбуждения генератора; R_3 – активное сопротивление якорной цепи двигателя; $T_я$ – постоянная времени якоря; $T_м$ – механическая постоянная времени.

Очевидно, что точность при этом зависит от Δt . В [3] показано, что при $\Delta t = (5 \div 10)T_\mu$, где T_μ – минимальная постоянная времени в системе управления. Систему управления при этом можно считать непрерывной и к ней применимы все методы анализа и синтеза непрерывных линейных систем управления. Это открывает широкие перспективы использования данного метода при анализе, синтезе и реализации цифровых систем управления.

Построим вычислительную модель. Для этого первоначально преобразуем звенья математической модели. Она содержит следующие звенья:

$$\begin{aligned} y &= \frac{k}{T_p} x \rightarrow y_i = y_{i-1} + \frac{k\Delta t}{T} x_i, \\ y &= \frac{k}{T_{p+1}} \rightarrow y_i = y_{i-1} + \frac{\Delta t(kx_i - y_{i-1})}{T}, \\ y &= \frac{T_1 p + 1}{T_2 p} \Rightarrow y_i = \frac{T_1}{T_2} x_i + \frac{\Delta t}{T_2} (x_i - x_{i-1}), \\ y &= \frac{T_p}{\gamma T_{p+1}} \rightarrow y_i = y_{i-1} + \frac{(x_i - x_{i-1})T - \Delta t y_{i-1}}{\gamma T}, \\ y &= \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1} \rightarrow y_i = \frac{T_1(x_i - x_{i-1}) + \Delta t x_i + T_2 y_{i-1}}{T_2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Преобразуя систему уравнений (4) с учетом (5), получим:

$$\left\{ \begin{aligned} U_{зэi} &= U_{зэi-1} + (U_{зсi} - U_{този}) \frac{\Delta t}{T_{зи}}, \\ \Delta e_i &= U_{зэi} - U_{оэi} - U_{остi}, \\ U_{зні} &= \frac{T_{рэ}}{T_{ирэ}} \Delta e_i + \frac{\Delta t}{T_{ирэ}} (\Delta e_i - \Delta e_{i-1}), \\ \Delta U_{гi} &= U_{зні} - U_{огi}, \\ U_{рні} &= \frac{T_{рн}}{T_{ирн}} \Delta U_{гi} + \frac{\Delta t}{T_{ирн}} (\Delta U_{гi} - \Delta U_{гi-1}), \\ U_{вгi} &= U_{вгi-1} + \frac{\Delta t(k_{тп} U_{рні} - U_{вгi-1})}{T_{тп}}, \\ U_{гi} &= U_{гi-1} + \frac{\Delta t(k_{г} U_{вгi} - U_{гi-1})}{T_{г}}, \\ U_{яi} &= U_{гi}, \\ \Delta U_{яi} &= U_{яi} - E_i, \\ I_{яi} &= I_{яi-1} + \frac{\Delta t((1/R_3)\Delta U_{яi} - I_{яi-1})}{T_я}, \\ I_{динi} &= I_{яi} - I_{сi}, \\ \omega_i &= \omega_{i-1} + \frac{U_{гi} k_E \Delta t}{R_3 T_M} I_{динi}, \\ E_i &= k_E \omega_i, \\ U_{гi} &= \begin{cases} 0, & \text{тормоз наложен,} \\ 1, & \text{тормоз снят.} \end{cases}, \\ U_{огi} &= k_u U_{гi}, \\ U_{оэi} &= k_u U_{яi} + k_u \frac{\Delta t(U_{яi} - U_{яi-1})}{\gamma T} - k_r k_{i} I_{яi}, \\ U_{остi} &= k_i k_{ост} I_{яi}, \\ U_{този} &= k_i k_{дт} \frac{T_1(I_{яi} - I_{яi-1}) + \Delta t I_{яi} + T_2 U_{този-1}}{T_2}. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Методику составления вычислительной модели в виде системы алгебраических уравнений с включением в их состав решения дифференциальных уравнений можно представить следующим образом.

1. Производится декомпозиция звеньев, которые описываются дифференциальными уравнениями. Они представляются в виде совокупности идеального интегрирующего звена, масштабного и суммирующего.

2. Составляется система алгебраических уравнений в порядке, в котором выходная величина предыдущего уравнения является входной величиной для следующего.

3. Уравнения записываются так, чтобы в левой части было текущее значение выходной величины, а в правой – все остальные величины.

4. Уравнение решаются относительно аргумента t , т.е. может быть получена любая временная функция для любой выходной переменной.

Очевидно, что следует выделить управляющее устройство и объект управления.

Управляющему устройству соответствует следующая система уравнений:

$$\begin{cases} U_{зэi} = U_{зэi-1} + (U_{зсi} - U_{тозиi}) \frac{\Delta t}{T_{зэ}}, \\ \Delta e_i = U_{зэi} - U_{оэi} - U_{остi}, \\ U_{зніi} = \frac{T_{рэ}}{T_{ирэ}} \Delta e_i + \frac{\Delta t}{T_{ирэ}} (\Delta e_i - \Delta e_{i-1}), \\ \Delta U_{гi} = U_{зніi} - U_{огi}, \\ U_{рніi} = \frac{T_{рн}}{T_{ирн}} \Delta U_{гi} + \frac{\Delta t}{T_{ирн}} (\Delta U_{гi} - \Delta U_{гi-1}), \\ U_{огi} = k_u U_{гi}, \\ U_{оэi} = k_u U_{яi} + k_u \frac{\Delta t (U_{яi} - U_{яi-1})}{\gamma T} - k_r k_i I_{яi}, \\ U_{остi} = k_i k_{ост} I_{яi}, \\ U_{тозиi} = k_i k_{дт} \frac{T_1 (I_{яi} - I_{яi-1}) + \Delta t I_{яi} + T_2 U_{тозиi-1}}{T_2}. \end{cases} \quad (7)$$

Структура вычислительной модели управляющего устройства, соответствующая (7), показана на рис. 2.

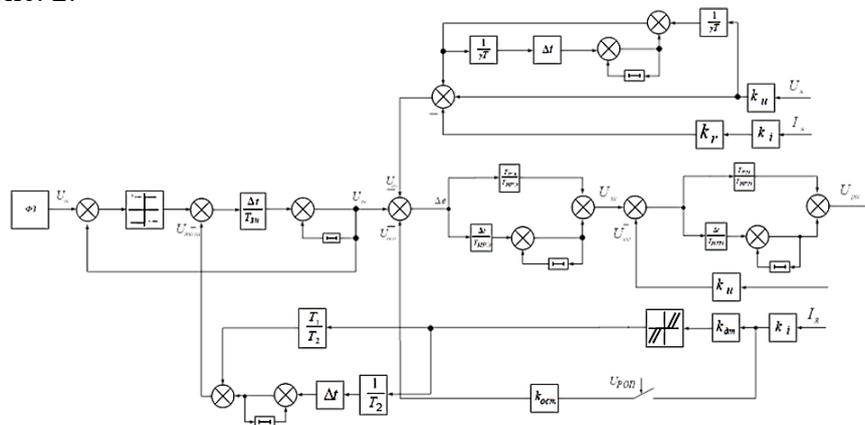


Рис. 2. Вычислительная модель управляющего устройства

Объекту управления соответствует следующая система уравнений:

$$\begin{cases} U_{вгi} = U_{вгi-1} + \frac{\Delta t (k_{тп} U_{рніi} - U_{вгi-1})}{T_{тп}}, \\ U_{гi} = U_{гi-1} + \frac{\Delta t (k_{г} U_{вгi} - U_{гi-1})}{T_{г}}, \\ U_{яi} = U_{гi}, \\ \Delta U_{яi} = U_{яi} - E_i, \\ I_{яi} = I_{яi-1} + \frac{\Delta t ((1/R_э) \Delta U_{яi} - I_{яi-1})}{T_{я}}, \\ I_{динi} = I_{яi} - I_{сi}, \\ \omega_i = \omega_{i-1} + \frac{U_{гi} k_E \Delta t}{R_э T_M} I_{динi}, \\ E_i = k_E \omega_i. \end{cases} \quad (8)$$

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ С АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ И ДВУХЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ
д.т.н. Островляничик В.Ю., к.т.н. Кубарев В.А, Маршев Д.А., к.т.н. Поползин И.Ю.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье приведена методика определения параметров системы преобразователя частоты асинхронного двигателя с фазным ротором (ПЧ-АДФР) на примере подъемного двигателя ствола «Клетевой» Абаканского рудника, по результатам которой получена математическая модель, которая позволяет исследовать статические характеристики и получать данные для синтеза системы автоматического регулирования скорости (САРС). Определены параметры двухзонного регулирования, с описанием двухканального блока разделения зон управления (БРЗУ) с условиями переключения зон управления.

Ключевые слова: асинхронный двигатель с фазным ротором, шахтная подъемная установка, двухзонное регулирование, блок разделения зон управления, частотный преобразователь.

Высоковольтные асинхронные двигатели с фазным ротором отличаются высокой жесткостью механических характеристик и применяются на шахтных подъёмных установках в качестве главного привода клетевых и скиповых подъёмов. При модернизации систем управления с внедрением частотно – регулируемого электропривода с цифровой САРС основной проблемой является, реализация движения на малых скоростях, режимы растормаживания, движение в разгрузочных кривых, где $\omega \leq 2$ рад/с, и скорости «ревизия», где $\omega \leq 5$ рад/с. Причина заключается в конструктивной особенности АДФР. Токи возбуждения и нагрузки находятся в одной и той же обмотке статора. В связи с этим частота вращения поля статора ω_s не может быть ниже $\omega_{0s_{кр}}$, т.е. $\omega_s \geq \omega_{0s_{кр}}$.

В [1, 2] установлено, что возможно определить оптимальное управление АДФР при двухзонном регулировании скорости АДФР. Первая зона – регулирование скорости изменением частоты вращения поля статора при угловой скорости ротора выше $(0,2 \div 0,4) \omega_0$, т.е. $0,2 \omega_0 < \omega < \omega_0$. При этом поток статора поддерживается на заданном уровне и постоянен. Это обеспечивается адаптивным регулятором потока [3]. ЭДС статора поддерживается на заданном уровне в соответствии с выражением $E_s = C_e \Phi \omega = K_e E_{rн}$. Из этого выражения следует, что при изменении частоты в пределах $\omega_0^n = (0,1 \div 1) \omega_0$, где $n = 0 \div 1$; ЭДС также изменяется в этих же пределах. Например: $n = 0,1$; $\omega_0^{0,1} = 0,1 \omega_0$ и $E_{rн}^{0,1} = 0,1 E_{rн}$.

Таким образом, можно сформулировать цель и задачи исследований.

Цель работы: на основании исследований статических характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором определить основные параметры, условия переключения и математическое описание процесса переключения зон управления.

Для обеспечения выполнения данной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Получить систему уравнений и структуру АДФР для исследования электромеханических характеристик и свойств объекта управления.
2. На основе анализа структуры и системы уравнений определить расчётные параметры и методику их вычисления по каталожным данным на примере подъёмного двигателя ствола «Клетевой» Абаканского рудника.
3. Построить вычислительную модель в системе Mathcad.
4. Получить семейства механических характеристик для первой зоны, и на основании совместного анализа получить условия переключения и математическое описание блока разделения зон управления.

Составим систему уравнений для анализа электромеханической и механической характеристик.

Учитывая вышеизложенное на основании [4], можно записать:

$$E_s = (w_s k_{обс} / w_r k_{обр}) E_{rH} = k_e E_{rH}, \quad (1)$$

где E_{rH} – ЭДС неподвижного ротора.

ЭДС вращающегося ротора:

$$E_r = E_{rH} s = E_{rH} - k_E \omega. \quad (2)$$

Ток в фазе ротора можно определить из выражения:

$$I_r = \frac{E_r}{\sqrt{r_r^2 + L_r^2 (\omega_0 - \omega)^2}}, \quad (3)$$

где E_r – ЭДС вращающегося ротора.

Электромагнитный момент можно определить, через мощности потерь:

$$\Delta P_{эл} = M \omega_0 s. \quad (4)$$

Учитывая, что $I_r r_r = E_a = E_{rH} \cos \varphi_r$ и $\cos \varphi_k = \frac{r_r}{\sqrt{r_r^2 + (x_{rk} s)^2}} = \frac{r_r}{\sqrt{r_r^2 + L_r^2 (\omega_0 - \omega)^2}}$, полу-

чим:

$$M_d = \Delta P_{эр} m_2 \frac{r_2}{\omega_0 \sqrt{r_r^2 + L_r^2 (\omega_0 - \omega)^2}}, \quad (5)$$

где $\Delta P_э = E_{2H} I_2$ – полная электрическая мощность, подводимая к ротору.

Выражения (1) – (5) можно представить в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} E_{rH} = \frac{E_s}{k_T}, \\ E_r = E_{rH} - k_E \omega, \\ I_r = \frac{E_r}{\sqrt{r_r^2 + L_r^2 (\omega_{НОМ} - \omega)^2}}, \\ \Delta P_э = I_r \times E_{rH}, \\ M_d = \Delta P_э \frac{m_r r_r}{\omega_{НОМ} \sqrt{r_r^2 + L_r^2 (\omega_{НОМ} - \omega)^2}}. \end{cases} \quad (6)$$

Систему уравнений можно представить в виде вычислительной модели:

$$f(E_r, Z_r, \varphi_r, I_r, \omega, M_d) = \begin{cases} E_r = E_{rH} - k_E \omega, \\ Z_r = \sqrt{r_r^2 + L_r^2 (\omega_{НОМ} - \omega)^2}, \\ I_r = \frac{E_r}{Z_r}, \\ \cos \varphi_r = \frac{r_r}{Z_r}, \\ M_d = \frac{I_r E_{rH} \cos \varphi_r m_r}{\omega_{НОМ}}. \end{cases} \quad (7)$$

В системах уравнений (6) – (7) $\sqrt{r_r^2 + L_r^2 (\omega_{НОМ} - \omega)^2} = Z_r$ – полное сопротивление цепи ротора.

Используя полученную систему уравнений (7), можно построить статические механические и электромеханические характеристики для асинхронного двигателя. Приведенная система уравнений позволяет исследовать не только электромеханическое преобразование энергии, но и получить данные для разработки САРС.

Ниже приведена методика расчёта электромеханической $I=f(\omega)$ и механической $M=f(\omega)$ характеристик. Построение механических и электромеханических характеристик приведем для высоковольтного асинхронного двигателя типа АКН2-19-33-20УХЛ4.

Из приведённых систем уравнений и структур следует определить следующие параметры: r_r – активное сопротивление фазы ротора; L_r – индуктивность фазы ротора; Z_r – полное сопротивление фазы ротора; $\cos \varphi_r = r_r / Z_r$; I_r – ток ротора; M_d – момент двигателя.

Приведем каталожные параметры АДФР типа АКН2-19-33-20УХЛ4. Номинальная мощность, $P_H=1000$ кВт; синхронная скорость вращения поля статора, $n_0=300$ об/мин;

синхронная скорость вращения поля, $\omega_0=31,4$ рад/с; номинальная скорость вращения двигателя, $n_n=300$ об/мин; номинальная скорость вращения, $\omega_n=31,4$ рад/с; номинальное линейное напряжение статора, $U_s=6000$ В; коэффициент полезного действия, $\eta=93,4\%$; косинус φ , $\cos \varphi=0,73$; номинальный ток фазы ротора, $I_{rn}=550$ А; номинальное линейное напряжение ротора, $U_{rn}=1130$ В; перегрузочная способность, $\lambda=M_{max}/M_n=2,5$; номинальное скольжение, $s_n\%=1,6$; критическое скольжение, $s_k\%=1,6$; номинальный ток фазы статора, $I_s=141$ А.

Активное сопротивление обмотки ротора:

$$r_r = R_{\Sigma RH} \cdot s_n = 0,019, \quad (8)$$

где суммарное активное сопротивление обмотки ротора при номинальном токе ротора определяется на основании учета линейности механической характеристики в рабочей зоне при $s=1$ и номинальном токе двигателя: $R_{\Sigma RH} = r_r + r_d = \frac{U_{rn}}{\sqrt{3} \cdot I_{rn}} = 1.18 \text{ Ом}$.

Номинальный момент двигателя:

$$M_n = \frac{U_{rn} \cdot I_{rn} \cdot m_r}{\sqrt{3} \cdot \omega_n} = 34890 \text{ Нм}, \quad (9)$$

где m_r – количество фаз обмотки ротора, $m_r=3$.

Определим индуктивное сопротивление короткого замыкания обмотки ротора (при $s=1$). Представим выражение (9) к удобному для анализа, учитывая, что $\omega_0 - \omega = \omega_0 s$, $P_3 = E_{rn} I_{rn}$ и $I_r = \frac{E_{rn} s}{\sqrt{r_r^2 + x_{rk}^2 s^2}}$, получим:

$$M = \frac{E_{rn}^2 m_r s}{\omega_0 (1 + \frac{x_{rk}^2}{r_r^2} s^2)}. \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что при $s=s_k$, $\frac{x_{rk}^2}{r_r^2} s^2 = 1$, откуда следует:

$$s_k = \frac{r_r}{x_{rk}}. \quad (11)$$

Из выражения (11) определим индуктивное сопротивление короткого замыкания фазы ротора: $x_{rk} = 0,247 \text{ Ом}$.

Индуктивность обмотки ротора:

$$L_r = \frac{x_{rk}}{\omega_0} = 7,876 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}. \quad (12)$$

Добавочное сопротивление ротора определяется из выражения $r_d = R_{\Sigma RH} - r_r$, где ΣR_{rd} - суммарное сопротивление ротора при $s_k=1$ $R_{\Sigma RH} = \frac{E_{rn}}{I_r}$.

Для определения добавочного сопротивления воспользуемся системой уравнения (7), из которой момент равен: $M_d = \frac{I_r E_{rn} \cos \varphi_r m_r}{\omega_0}$, где, ток ротора $I_r = \frac{E_{rn} - k_E \omega}{Z}$, при скорости $\omega=0$, $I_{rn} = \frac{E_{rn}}{Z}$, $\cos \varphi_r = \frac{R_{\Sigma RH}}{Z_r}$ и выражение для момента примет вид:

$$M_d = \frac{E_{rn}^2 \cdot R_{\Sigma RH} \cdot m_r}{\omega_0 (\sqrt{R_{\Sigma RH}^2 + L_r^2 (\omega_0 - \omega)^2})^2} = \frac{E_{rn}^2 \cdot r_{\Sigma} \cdot m_r}{\omega_0 (R_{\Sigma RH}^2 + L_r^2 (\omega_0 - \omega)^2)}. \quad (13)$$

Из выражения (13) можно получить квадратное уравнение:

$$R_{\Sigma RH}^2 - \frac{E_{rn}^2 \cdot m_r}{M_d \cdot \omega_0} R_{\Sigma RH} - L_r^2 \omega_0^2 = 0. \quad (14)$$

Подставляя известные значения для характеристики $0,1 \cdot \omega_0$ и $0,1 \cdot E_{rn}$, а именно: $\omega_{0,0,1} = 3,14$ рад/с, $E_{rn0,1} = 65,3$ В, $m_r = 3$, $M_d = 2M_n = 65760$, $L_r = 0,007876$ Гн, получим:

$$R_{\Sigma RH}^2 - \frac{65,3^2 \cdot 3}{65760 \cdot 3,14} R_{\Sigma RH} - 0,007876^2 \cdot 3,14^2 = 0.$$

Суммарное сопротивление равному $R_{\Sigma RH} = 0,051$ Ом, тогда необходимо определить добавочное сопротивление, для характеристики $0,1 \omega_0$ и $0,1 E_{rn}$, вычисляем по выражению (8):

$$\begin{aligned} r_{d0,1} &= R_{\Sigma RH} - r_r \\ r_{d0,1} &= 0,051 - 0,019 = 0,032 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Аналогичный расчет добавочных сопротивлений произведем для $0,2\omega_0$ и $0,2E_{rH}$, $0,3\omega_0$ и $0,3E_{rH}$, $0,4\omega_0$, и $0,4E_{rH}$, $0,5\omega_0$ и $0,5E_{rH}$ соответственно получим:

$$r_{d0,2}=0,083 \text{ Ом}; r_{d0,3}=0,135 \text{ Ом}; r_{d0,4}=0,185 \text{ Ом}; r_{d0,5}=0,235 \text{ Ом}.$$

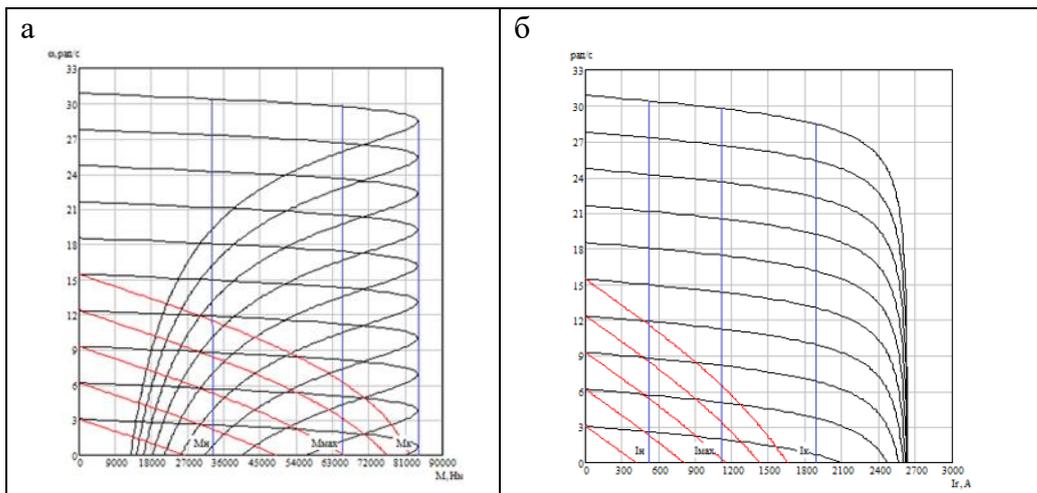
Для этих значений добавочных сопротивлений построим семейства механических $M=f(\omega)$ и электромеханических $I=f(\omega)$ характеристик для первой и второй зон при изменении частоты вращающегося поля.

При этом семейство характеристик при изменении частоты вращения поля статора $\omega_0^n = (0,1 \div 1) \cdot \omega_0$ при ЭДС неподвижного $E_{rH}^n = (0,1 \div 1)E_{rH}$, частота принимает ряд значений ω_0^n , где $n = 0,1 \dots 1\omega_0$, т.е. изменяется от 0,1 до 1 с интервалом 0,1. ЭДС ротора E_{rH} принимает такой же ряд значений в соответствии с выражением $E_{rH} = E_s/K_e = Ce\Phi_m\omega/K_e$ и условием, что магнитный поток Φ_m поддерживается постоянным.

Получим следующее семейство характеристик:

$$\begin{aligned} n = 1, \omega_0^1 &= \omega_0, E_{rH}^1 = E_{rH}, r_d = 0; n = 0,9, \omega_0^{0,9} = 0,9\omega_0, E_{rH}^{0,9} = 0,9E_{rH}, r_{d0,9} = 0; \\ n = 0,8, \omega_0^{0,8} &= 0,8\omega_0, E_{rH}^{0,8} = 0,8E_{rH}, r_{d0,8} = 0; n = 0,7, \omega_0^{0,7} = 0,7\omega_0, E_{rH}^{0,7} = 0,7E_{rH}, r_{d0,7} = 0; \\ n = 0,6, \omega_0^{0,6} &= 0,6\omega_0, E_{rH}^{0,6} = 0,6E_{rH}, r_{d0,6} = 0; n = 0,5, \omega_0^{0,5} = 0,5\omega_0, E_{rH}^{0,5} = 0,5E_{rH}, r_{d0,5} = 0; \\ n = 0,4, \omega_0^{0,4} &= 0,4\omega_0, E_{rH}^{0,4} = 0,4E_{rH}, r_{d0,4} = 0; n = 0,3, \omega_0^{0,3} = 0,3\omega_0, E_{rH}^{0,3} = 0,3E_{rH}, r_{d0,3} = 0; \\ n = 0,2, \omega_0^{0,2} &= 0,2\omega_0, E_{rH}^{0,2} = 0,2E_{rH}, r_{d0,2} = 0; n = 0,1, \omega_0^{0,1} = 0,1\omega_0, E_{rH}^{0,1} = 0,1E_{rH}, r_{d0,1} = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

На рис. 1 представлены семейства выбранных по результатам анализа характеристик при $r_{d0,3}=0,135 \text{ Ом}$. При таком значении обеспечиваются линейные характеристики на всём диапазоне управления, как в первой, так и во второй зонах. Для этого же значения сопротивления на рис. 2, приведены характеристики при управлении во второй зоне при изменении напряжения статора.



M_n, I_n – номинальный момент и ток; M_{max}, I_{max} – максимальный момент и ток;
 M_k, I_k – критический момент и ток

Рис. 1. Механические (а) и электромеханические (б) характеристики для $\omega_0^{0,1 \dots 0,9}, E_{rH}^{0,1 \dots 0,9}$ (красные); $\omega_0^{0,1 \dots 0,5}, E_{rH}^{0,1 \dots 0,5}$ при добавочном сопротивлении $r_{d0,3}=0,135 \text{ Ом}$ (черные)

По полученным данным при анализе характеристик можно составить систему нелинейных уравнений для двухканального блока разделения зон управления (БРЗУ). Система уравнений БРЗУ, описывающая управления задающим сигналом для формирования амплитуды и частоты частотного преобразователя:

$$u_s = \begin{cases} K_s |u_y|, 0 < |u_y| \leq (0,2 \div 0,3)u_{yH}; \\ u_{ySH}, |u_y| > (0,2 \div 0,3)u_{yH}; \end{cases}$$

$$u_{\omega} = \begin{cases} K_{\omega} u_y, & (0,2 \div 0,3) u_{\omega_{\text{НОМ}}} < u_y \leq u_{\omega_{\text{НОМ}}}, \\ K_{0\omega} u_y, & 0 < u_y \leq (0,2 \div 0,3) u_{\omega_{\text{НОМ}}}, \\ u_{\omega_{\text{НОМ}}}, & u_y > u_{\omega_{\text{НОМ}}}, \end{cases} \quad (16)$$

где u_y – сигнал управления; $|u_y|$ – модуль сигнала управления; u_s – сигнал управления напряжением статора; u_{ω} – сигнал управления скоростью вращения магнитного потока статора; $K_{\omega l}$ – коэффициенты усиления блока нелинейного задания скорости при скорости более $(0,2 \div 0,3) u_{\omega_{\text{НОМ}}}$; $K_{\omega 0}$ – задания скорости при задании скорости от 0 до $\pm (0,2 \div 0,3) u_{\omega_{\text{НОМ}}}$.

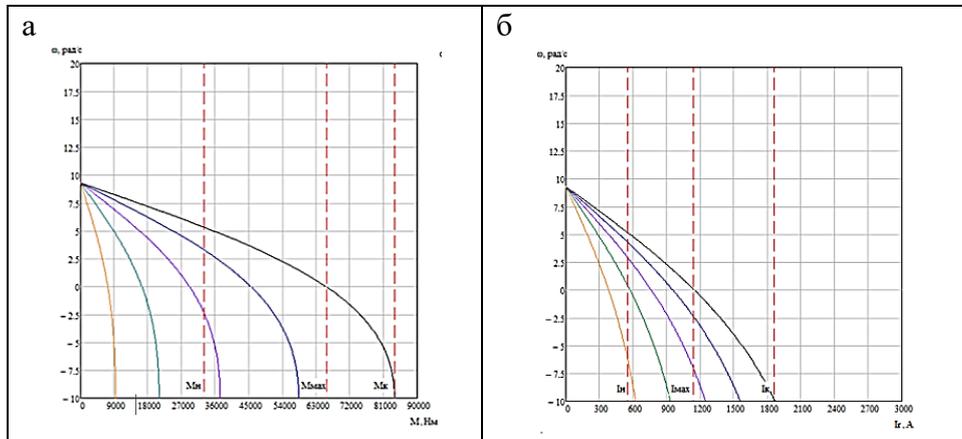


Рис. 2. Механическая (а) и электромеханическая (б) характеристики для $\omega_0^{0,3}, E_{rH}^{0,1...0,3}$ при добавочном сопротивлении $r_{d0.3}=0,135$ Ом ($\omega_0^{0,3}, E_{rH}^{0,3}$ – черная, $\omega_0^{0,3}, E_{rH}^{0,25}$ – синяя, $\omega_0^{0,3}, E_{rH}^{0,2}$ – фиолетовая, $\omega_0^{0,3}, E_{rH}^{0,15}$ – зеленая, $\omega_0^{0,3}, E_{rH}^{0,1}$ – желтая)

Структура БРЗУ в соответствии с системой уравнений (16) представлена на рис. 3.

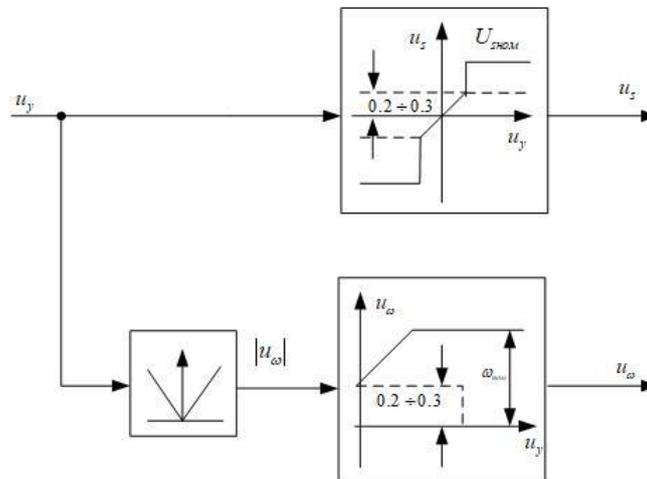


Рис. 3. Блок разделения зон управления

Выводы. Полученная модель для исследования статических характеристик АДФР позволяет исследовать не только электромеханические свойства, но и получить данные для синтеза САРС. Получена и реализована методика определения параметров системы ПЧ-АДФР на примере подъёмного двигателя ствола «Клетевой» Абаканского рудника.

На основе анализа электромеханических характеристик определены параметры двухзонного регулирования скорости АДФР.

Получено математическое описание и структура двухканального блока разделения зон управления (БРЗУ). Анализ механических характеристик позволяет определить не только условия для переключения зон управления, но и параметры регуляторов в двух контурной системе подчинённого регулирования с переменной структурой.

Список литературы

1. Исследования асинхронного электропривода с фазным ротором подъемных установок / Островляничик В.Ю., Кубарев В.А., Поползин И.Ю. Маршев Д.А // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2022. – № 8. – С. 255-261.
2. Оптимизация характеристик электропривода переменного тока подъемных установок / Островляничик В.Ю., Кубарев В.А., Поползин И.Ю. Маршев Д.А. // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2022. – № 8. – С. 248-255.
3. Синтез адаптивного управления магнитным потоком возбуждения статора асинхронного двигателя с фазным ротором / Островляничик В.Ю., Маршев Д.А., Кубарев В.А., Поползин И.Ю // Системы автоматизации AS'2022: труды всерос. науч.–практ. конф. 15-16 декабря 2022 г. – Новокузнецк, 2022. – С. 592-599
4. Электрические машины / Брускин Д.Э. [и др.]. – М. : Высшая школа, 1979. – Ч1. – 288 с.

УДК 681.518.22+681.518.5: 621.313.333

**ИЗМЕРЕНИЕ ДВИЖУЩЕГО МОМЕНТА И МАССЫ ГРУЗА В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ДВУХСКИПОВОЙ ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ
к.т.н. Поползин И.Ю.****Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия**

Аннотация. В статье проведен краткий обзор способов измерения момента асинхронных двигателей, предложен способ измерения момента для асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором, а также получены расчетные выражения, позволяющие определить массу поднимаемого груза для двухскаповых подъемных установок с асинхронным электроприводом.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, двухскаповая подъемная установка, шахтный подъем, масса груза, электромагнитный момент.

Для шахтных подъемных установок (ШПУ) важной задачей является определение массы поднимаемого груза. Это связано с задачами повышения энергоэффективности и рентабельности ШПУ, а также с задачами учета и контроля добычи полезного ископаемого.

Простейшим способом определения массы груза является взвешивание скипов. Однако этот способ обладает следующими существенными недостатками:

- необходимость организации весового поста с оборудованием для взвешивания;
- техническая сложность процесса взвешивания;
- высокая погрешность, обусловленная трудностью фиксации скипа в устойчивом положении для взвешивания;
- существенное замедление технологического процесса, и, как следствие, падение производительности ШПУ.

Вследствие приведенных причин в технологическом процессе шахтного подъема следует применять косвенные методы измерения массы груза, основанные на ее вычислении на основании какого-либо измеряемого параметра системы. При этом желательно, чтобы определение массы груза не было связано с дополнительными измерениями и установкой дополнительного оборудования. В свете вышеизложенного оптимальным видится вычисление массы поднимаемого груза на основе параметров электропривода ШПУ. При этом существует прямая связь массы поднимаемого груза и электромагнитного момента, развиваемого приводным двигателем, что обуславливает необходимость в идентификации момента приводного двигателя.

Если для двигателя постоянного тока идентификация момента является сравнительно простой задачей по причине линейной зависимости момента от силы тока якоря, то для асинхронных двигателей (АД) момент нелинейно зависит от токов ротора и статора, что осложняет его идентификацию. При этом прямое измерение момента (с помощью акселерометров и схожих механизмов), как правило, либо невозможно, либо имеет крайне низкую точность.

Существующие в настоящее время технические решения по идентификации момента асинхронного двигателя можно разделить на две группы:

1) Идентификация момента на основе измерения электрических координат АД. Примером таких решений являются [1-8]. В основе всех решений из этой группы лежит измерение токов и напряжений обмоток машины и вычисление момента, исходя из их значений. В решениях данной группы предполагается переход от реальных координат АД к координатам ее двухфазной модели и вычисление момента на основе проекций токов или потокосцеплений двухфазной модели (подобный подход используется при построении бездатчиковых систем векторного управления АД [8]). Его недостатком является необходимость выполнения объемных координатных и угловых преобразований и расчета потокосцеплений, либо использования датчиков Холла для непосредственного измерения потокосцеплений. Второй подход в рамках данной группы решений предполагает идентификацию момента на основе баланса мощности двигателя. Для определения момента в соответствии с этим подходом достаточно измерения тока и напряжения на статоре АД и его скорости, а также априорного знания КПД двигателя либо непосредственного вычисления потерь. Этот подход более удобен, поскольку предполагает меньший объем вычислений по сравнению с описанным выше. Его недостатком является несколько меньшая точность из-за невозможности точно идентифицировать потери в АД.

2) Идентификация момента на основе измерения механических координат двигателя – скорости вращения вала, углового ускорения или ЭДС тахогенератора [9, 10]. Недостатком таких способов является необходимость точного измерения механических координат АД, что затруднительно при использовании акселерометрических датчиков, а также значительная инерционность изменения механических координат.

Задача идентификации момента также может быть решена разными способами для двигателя с короткозамкнутым ротором (АДКЗ) и с фазным ротором (АДФР). Для АДФР, широко используемых в электроприводе ШПУ, идентификация момента значительно проще, поскольку прямому измерению доступен ток ротора.

Рассмотрим, как может быть идентифицирован момент АДФР. Связь момента и скорости АД определяется уравнением его механической характеристики:

$$M = \frac{3U_1^2 R'_2}{\omega_0 s [(R_1 + R'_2/s)^2 + X_K^2]}, \quad (1)$$

где M – электромагнитный момент АД; U_1 – фазное напряжение на статоре машины; R'_2 – активное сопротивление роторной цепи, приведенное к статору; ω_0 – синхронная скорость; s – скольжение; R_1 – активное сопротивление цепи статора; X_K – индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Скольжение определяется по следующему выражению:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}, \quad (2)$$

где ω – текущая скорость вращения ротора АД.

В соответствии с законом Ома для роторной цепи АД, ток фазы ротора определяется в соответствии со следующим выражением:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2/s)^2 + X_K^2}}, \quad (3)$$

где I'_2 – приведенный ток ротора АД.

Подставив (3) в (1) и проведя преобразования, получим:

$$M = \frac{3U_1^2 R_2'}{\omega_0 s [(R_1 + R_2'/s)^2 + X_K^2]} = \frac{3I_2'^2 [(R_1 + R_2'/s)^2 + X_K^2] R_2'}{\omega_0 s [(R_1 + R_2'/s)^2 + X_K^2]} = \frac{3I_2'^2 R_2'}{\omega_0 s}. \quad (4)$$

Выражение (4) описывает связь между электромагнитным моментом и приведенным током ротора АД. Для установления связи между моментом и током ротора учтем, что для АДФР (с учетом одинакового числа фаз в обмотках статора и ротора и равенства их обмоточных коэффициентов) коэффициент приведения роторных величин к статорным может быть определен как:

$$k = \frac{w_2}{w_1}, \quad (5)$$

где w_1, w_2 – соответственно, число витков в статорной и роторной обмотках, которое является постоянным и известно априорно.

С учетом (5), выражение (4) примет вид:

$$M = \frac{3I_2'^2 R_2'}{k \omega_0 s}. \quad (6)$$

Для АДКЗ измерение тока ротора невозможно. Поэтому воспользуемся следующим соображением: большую часть времени двигатель ШПУ работает в установившемся режиме с номинальной или близкой к ней скоростью и с номинальной нагрузкой. Это объясняется тем, что наибольшую часть времени технологического цикла установки сосуда движутся в стволе равномерно, а подъемный двигатель из соображений максимальной эффективности выбирается так, чтобы при этом он работал в номинальном режиме. В установившемся номинальном режиме для определения момента АДКЗ можно воспользоваться следующим выражением, которое следует из формулы для определения полезной мощности на валу АД:

$$M = \frac{3U_1 I_1 \eta_n \cos \varphi_n (1-s)}{\omega}, \quad (7)$$

где I_1 – ток фазы статора АДКЗ; η_n – номинальный КПД двигателя; $\cos \varphi_n$ – номинальный коэффициент мощности двигателя.

Таким образом, выражения (6) и (7) позволяют идентифицировать момент АД с использованием измеряемых величин. Для нахождения связи между моментом АД и массой поднимаемого в двухскиповой ШПУ груза воспользуемся уравнением М.М. Фёдорова для динамики двухскиповой ШПУ [11]:

$$m_\Sigma \frac{d^2 z}{dt^2} - (q_\Gamma - q_Y)(H - 2z)g + (m_1 - m_2)g = F, \quad (8)$$

где $m_\Sigma = \frac{J_\Sigma}{R^2}$ – суммарная приведенная масса установки; J_Σ – суммарный момент движущихся частей установки; R – радиус барабана; $F = \frac{M}{R}$ – движущее усилие привода; $z = \uparrow \varphi R$ – положение сосудов в стволе; φ – угол поворота барабана; g – ускорение свободного падения; H – высота подъема; q_z, q_Y – массы одного метра головных и уравновешивающих канатов соответственно; m_1, m_2 – массы груженого и порожнего скипов соответственно.

При равномерном движении сосудов в стволе вторая производная положения по времени (ускорение) равна 0. Кроме того, разность масс груженого m_1 и порожнего m_2 определяет массу поднимаемого груза m_Γ . С учетом этих соображений для участков равномерного движения скипов (8) примет вид:

$$-(q_Y - q_\Gamma)(H - 2z)g + m_\Gamma g = \frac{M}{R}. \quad (9)$$

Выразим из (9) массу поднимаемого груза:

$$m_\Gamma = \frac{M/R + (q_Y - q_\Gamma)(H - 2z)g}{g}. \quad (10)$$

Очевидно, что масса транспортируемого груза не зависит от положения сосудов в стволе. Таким образом, для определения массы груза достаточно произвести расчет лишь один раз за цикл подъема. Для облегчения вычислений расчет следует производить в тот момент, когда статические напряжения ветвей каната в точках набегания и сбегания равны, т.е. в момент времени, когда скипы совмещаются. В большинстве ШПУ это условие

эквивалентно достижению скипами точки $z=H/2$ (середины ствола). В точке совмещения выполняется условие $H - 2z = 0$, и (10) принимает вид:

$$m_{\Gamma} = \frac{M/R}{g}. \quad (11)$$

Подставив выражения (2) и (6) в выражение (11), получим выражение, позволяющее определить массу поднимаемого груза для привода ШПУ на основе АДФР, измеряя только скорость вращения вала двигателя и ток ротора:

$$m_{\Gamma} = \frac{3I_2^2 R_2'}{kg\omega_0 s R}. \quad (12)$$

Подставив в (11) выражение (7), получим расчетную формулу для массы груза в приводе на основе АДКЗ (либо АДФР, когда недоступно измерение тока ротора):

$$m_{\Gamma} = \frac{3U_1 I_1 \eta_{ДВ} \cos \varphi (1-s)}{\omega g R}. \quad (13)$$

Вывод. Таким образом, полученные в данной работе выражения (12) и (13) позволяют реализовать расчет массы груза в двухскиповых ШПУ с асинхронным приводом, использующий только величины, поддающиеся измерению, и заранее известные параметры подъемного оборудования, и не требующий сложных преобразований и вычислительных операций, причем вычисление может быть произведено при любом способе управления скоростью двигателя.

Список литературы

1. Пат. 4616719 США, G01L 3/00 324/107; 364/483. Method of Measuring Torque of an AC Motor / Dennis H. Braun ; заявитель и патентообладатель Eaton Corporation. – заявл. Oct. 7, 1986.
2. А.с. SU 1 631 322 А1. Устройство для измерения электромагнитного момента асинхронного двигателя / М.Я. Кривицкий, С.В. Поносов, А.В. Рот ; заявитель и патентообладатель Пермский политехнический институт. – № SU 1 631 322 А1; заявл. 09.01.89 ; – опубл. 28.02.91, Бюл. № 8. – 4 с.
3. А.с. SU 1 645 856 А1. Устройство для измерения электромагнитного момента асинхронного двигателя / М.Я. Кривицкий, С.В. Поносов, А.В. Рот ; заявитель и патентообладатель Пермский политехнический институт. – № SU 1 645 856 А1 ; заявл. 09.01.89 ; – опубл. 30.04.91, Бюл. № 16. – 4 с.
4. Rahman A., Mohiuddin A.K.M., Daud B.M. Electromagnetic Contactless Torque Transducer: Torque Measurement and Shaft Impediment Approach // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). – 2019 . – Vol. 7. – Iss 6S. – P. 298-303.
5. Irie H., Katayama T. A Simple Method for Detecting Torque of an Induction Motor with a Synchronous Rectifier Circuit // Electrical Engineering in Japan. – 1999 . – Vol. 126. – No 3. – P. 83-90.
6. Silva W.L., Lima A.M.N., Oliveira A. A Method for Measuring Torque of Squirrel-Cage Induction Motors Without Any Mechanical Sensor // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2015 . – Vol. 4. – Iss. 5. – P. 1223 – 1231.
7. Хацевский К.В., Деметьев Ю.Н., Умурзакова А.Д. Модель асинхронного электродвигателя для измерения механических координат // Омский научный вестник. – 2013. – №3 (123). – С. 200–204.
8. Островляничик В.Ю., Поползин И.Ю. Модель асинхронного двигателя для бездатчиковых информационно-управляющих систем автоматизированного электропривода // Вестник Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. – 2016. – №1(113). – С. 110 – 119.
9. Buinac R., Tomljenovic V. Determination of torque-speed characteristics of induction motor in electric machinery education // Information & Communication Technology Electronics & Microelectronics (MIPRO), 2013 : 36 International Convention. – 2013. – P. 765-769.

10. Бычков Е.В., Христич И.П. Измерение крутящего момента на валу асинхронного электродвигателя // Нефть и газ. – 1998. – № 3. – С. 107–109.

11. Шахтный подъем / В.Р. Бежок, В.И. Дворников, И.Г. Манец, В.А. Пристром; под общ. ред. Б. А. Грядущего и В. А. Корсуна. – Донецк : ООО «Юго-Восток ЛТД», 2007. – 624 с.

УДК 622.67

О ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЕЛИЧИНАМ ПРИВОДА С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КАНАТАХ

к.т.н. Кипервассер М.В., к. ф-м.н., Хаимзон Б.Б., к.т.н. Симаков В.П.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы влияния волновых процессов в канатах шахтных подъемных установок (ШПУ) на электрические величины электропривода при возникновении аварийной ситуации зависания сосуда и напуска каната. Составлено совместное описание электрической и механической подсистем ШПУ с электроприводом постоянного тока и учётом волновых процессов в канатах.

Ключевые слова: подъемный канат, шахтная подъемная установка, волновые процессы, электропривод постоянного тока.

Диагностика аварийных ситуаций для шахтных подъемных установок (ШПУ) является одной из приоритетных задач при их эксплуатации. Своевременное и точное распознавание места возникновения и характера аварийной ситуации позволяет уменьшить время срабатывания защитных устройств, снизить тяжесть последствий аварии.

При проектировании и настройке электроприводов шахтных подъемных установок, а также схем защиты, как правило, механическая часть ШПУ рассматривается как одномассовая система [1]. При таком рассмотрении учёт упругости канатов и волновых процессов в них не выполняется. Известно, что, при значительных длинах подъемных канатов динамические нагрузки в канатах, возникающие при разгоне, замедлении привода и по другим причинам, обуславливают волновой характер деформации каната и колебания внутренних напряжений в нём [2, 3]. Последнее приводит к колебаниям момента на валу, отклонению тахограммы привода от заданной и величины токов электродвигателей от расчётных значений. В свою очередь такие отклонения могут привести к некорректной работе схемы управления и защиты электропривода. В этой связи при разработке систем управления и защиты электроприводом ШПУ желательнее учитывать волновые явления в канатах ШПУ.

В [2, 4] предлагаются эквивалентные схемы разбиения головных и уравнивающих канатов на некоторое количество частей, представляющих собой массы, соединённые вязкоупругими связями. В [5] приведены результаты изучения динамических процессов в канатах шахтных подъемных установок без учета и с учетом упругости каната, получено математическое описание динамических процессов колебательного характера в канатах подъемников небольшой глубины подъема (до 150 м). В [6] получены уравнения динамического процесса для одноконцевой подъемной машины с учетом того, что канат разделен на некоторое количество распределённых масс, связанных упруго-диссипативными элементами. Это позволило определить динамические нагрузки, действующие на барабан, шкив, груз, а также на каждый отрезок каната во время пуска машины, ее работы и торможения. При больших длинах каната появляются большие погрешности в определении динамических усилий в канатах. У современных шахтных подъемов высота подъема более 1000 м, поэтому время распространения упругих волн существенно и пренебрегать им

нельзя. Движение отдельных сечений следует рассматривать более строго, а именно, учитывать, что массовые и деформационные характеристики распределены по длине упругого элемента [2, 4].

Известно, что одной из опасных аварийных ситуаций для ШПУ барабанного типа является зависание спускаемого сосуда и напуск подъёмного каната. В [7] предлагается использовать для диагностики аварийных ситуаций технологических механизмов контроль электрических величин электропривода. Учёт влияния волновых процессов для подобных ситуаций рассматривался в [8].

При составлении описания механизм подъёмной установки представляется в виде трёхмассовой системы с гибкими связями. Электропривод по схеме «генератор - двигатель» с тиристорным возбудителем генератора представляется в виде двухконтурной системы подчинённого регулирования. Регуляторы скорости и тока приняты пропорциональными. Регулирование потока двигателя не предусматривается. Структурная схема электропривода при реакции на изменение момента на валу приведена на рис. 1.

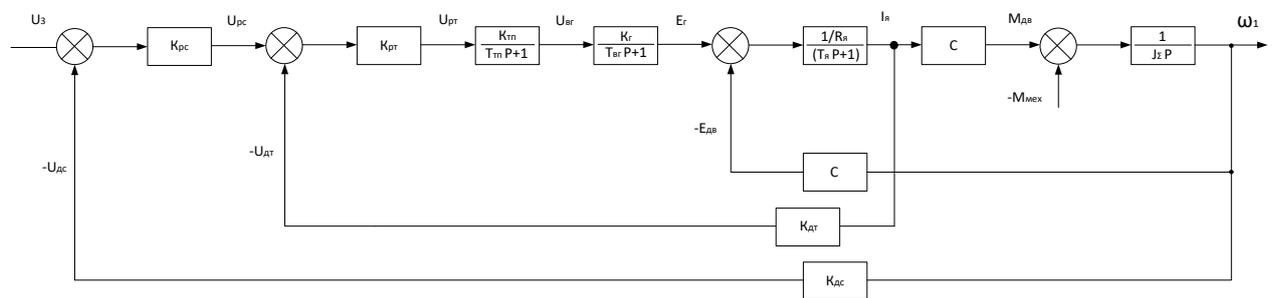


Рис. 1. Структурная схема электропривода

Система уравнений шахтного подъема является сложной системой уравнений электромеханики, включающей уравнения механики, уравнения электромагнитной подсистемы и уравнения взаимосвязи электромагнитной и механической подсистем.

Первоначально рассмотрим статическую задачу.

Обозначим массу сосуда m , площадь поперечного сечения каната S , плотность каната ρ , модуль Юнга каната E

Пусть неподвижный сосуд подвешен на канате длиной l (в ненагруженном состоянии). Обозначим x координату точки каната в ненагруженном состоянии с началом отсчета от сосуда; $u_s(x)$ – абсолютное удлинение; $\varepsilon_s(x) = \frac{du_s}{dx}$ – относительное удлинение каната; $\sigma_s(x)$ – напряжение; S – площадь сечения каната в ненагруженном состоянии; $F_s(x)$ – сила растяжения каната. Тогда координата x – координата конкретной физической точки каната. При этом $F_s(0) = mg$.

Тогда

$$F_s(x) = \rho g S x + mg. \quad (1)$$

Со стороны сосуда на якорь действует сила

$$F_s(l) = \rho g S l + mg. \quad (2)$$

Закон Гука $\sigma_s = E \varepsilon_s$, сила $F_s = \sigma_s S$. Тогда

$$\varepsilon_s(x) = \frac{du_s}{dx} = \frac{\rho g}{E} x + \frac{mg}{ES}. \quad (3)$$

Следовательно,

$$\frac{d^2 u_s}{dx^2} = \frac{\rho g}{E}. \quad (4)$$

Примем $u_s(0) = 0$. Тогда

$$u_s(x) = \frac{\rho g}{2E} x^2 + \frac{mg}{ES} x = \frac{gx}{E} \left(\frac{\rho}{2} x + \frac{m}{S} \right). \quad (5)$$

Тогда полное растяжение каната

$$u_s(l) = \frac{gl}{E} \left(\frac{\rho}{2} l + \frac{m}{S} \right). \quad (6)$$

В других величинах

$$u_s(l) = \frac{gl}{D} \left(\frac{\rho \pi d^2}{8} l + m \right). \quad (7)$$

Здесь $D = ES$; $S = \pi \frac{d^2}{4}$; d – диаметр каната.

Будем считать, что канат намотан на барабан в уже растянутом состоянии, и это состояние удерживается на валу силой трения. Тогда при равномерном вращении вала канат тоже будет двигаться без дальнейшей деформации, и сосуд будет двигаться равномерно.

Координату x будем теперь отсчитывать вдоль статически растянутого каната. Понижением плотности каната при этом можно пренебречь.

С противоположной стороны на вал наматывается канат противовеса. Соответствующая сила

$$F_{1s}(l_1) = \rho_1 g S_1 l_1 + m_1 g. \quad (8)$$

Здесь все величины с индексом 1 относятся к противовесу.

Тогда из условия равновесия

$$M_{сдв} = F_s(l)R - F_{1s}(l_1)R_1, \quad (9)$$

где $M_{сдв}$ – момент приводного электродвигателя при статическом нагружении; R – радиус барабана.

При этом канат движется со скоростью $u_s = v_3$ (скорость задания), и значит, ток в якоре и напряжение на обмотке электродвигателя определяются по формулам

$$\begin{aligned} i_{с\grave{a}} &= \frac{M_{сдв}}{C_e}; \\ E_{с\grave{r}} &= L \frac{di_{с\grave{a}}}{dt} + i_{с\grave{a}}R + C_e \frac{v_3}{R}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $E_{с\grave{r}}$, $i_{с\grave{a}}$ – э.д.с. генератора и ток якорной цепи при движении с постоянной скоростью v_3 ; $M_{сдв}$ – момент двигателя при статическом нагружении, C_e – магнитная постоянная двигателя; R, L – активное сопротивление и индуктивность якорной цепи электромашин системы «Г–Д».

Постановка динамической задачи. Примем статическое состояние растянутого каната за начальное, Тогда

$$\begin{aligned} F_n(x, t) &= F(x, t) + F_s(x), & u_n(x, t) &= u(x, t) + u_s(x), \\ \varepsilon_n(x, t) &= \varepsilon(x, t) + \varepsilon_s(x), & \sigma_n(x, t) &= \sigma(x, t) + \sigma_s(x), \\ i_{п\grave{я}}(x, t) &= i_{я}(x, t) + i_{с\grave{я}}(x), & E_{п\grave{я}}(x, t) &= E_{г}(x, t) + E_{с\grave{r}}(x), \\ v_n(x, t) &= v(x, t) + v_3(x), & M_{п\grave{дв}}(x, t) &= M_{дв}(x, t) + M_{сдв}(x). \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь индексом «п» помечены полные величины, а динамические величины не помечены.

В случае резкой (будем считать, мгновенной) остановки сосуда в момент времени 0 получим при $t > 0$

$$\frac{\partial u_n}{\partial t}(0, t) = 0 \Rightarrow \frac{\partial u}{\partial t}(0, t) = -v_3. \quad (12)$$

Вращение вала продолжится, канат продолжит разматываться, в нижней части растяжение станет уменьшаться. Волна сжатия каната (относительно равновесно растянутого состояния) пойдет вверх.

Если торможение считать не мгновенным, то естественно принять линейный закон изменения скорости нижнего конца каната (в системе отсчета, связанной с канатом):

$$\frac{\partial u}{\partial t}(0, t) = \begin{cases} -v_3 \frac{t}{t_1}, & t < t_1 \\ -v_3, & t \geq t_1 \end{cases}. \quad (13)$$

Здесь t_1 – время торможения. При $t_1 \ll \frac{l}{c}$ торможение можно считать мгновенным. Если же эти времена сравнимы, то процесс замедления следует учитывать. Также за время $\frac{l}{c}$ длина каната увеличится на $l \frac{v_3}{c}$, то есть возмущение достигнет барабана с некоторым

дополнительным запаздыванием, и общая длина каната несколько увеличится. Однако, так как $\frac{v_3}{c} \ll 1$, то этими изменениями длины и времени запаздывания можно пренебречь, и считать, что возмущение достигает барабана в момент $t_0 = \frac{l}{c}$ при длине каната l , равной длине каната в момент начала торможения.

Канат отличается от стержня тем, что его можно считать стержнем только в растянутом состоянии. Сжатию канат почти не сопротивляется, а изгибается. Когда растяжение станет равным 0, по канату пойдет волна изгиба. Но скорость волны изгиба значительно меньше скорости волны сжатия, и вначале до якоря дойдет волна сжатия. Скорость распространения волны сжатия $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$. Силы, действующие на барабан со стороны канатов сосуда и противовеса

$$F = ES\varepsilon(l), F_1 = ES\varepsilon_1(l_1). \quad (14)$$

Волна сжатия описывается волновым уравнением

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, \quad (15)$$

с начальными и граничными условиями

$$u(x, 0) = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial t}(0, t) = -v_3. \quad (16)$$

Динамические уравнения

$$\frac{J}{R} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(l, t) = F(t)R - F_1(l_1, t)R_1 - M_{дв}(t). \quad (17)$$

Для противовеса

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} = 0, \quad (18)$$

с граничными условиями

$$ES \frac{\partial u_1}{\partial x_1}(0, t) = m_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}(0, t); \quad ES \frac{\partial u_1}{\partial x_1}(l_1, t) = F_1(l_1, t). \quad (19)$$

При этом выполняется условие

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial t} u(l, t) = \frac{1}{R_1} \frac{\partial}{\partial t} u_1(l_1, t) = \omega(t). \quad (20)$$

Электрическая часть уравнений.

$$\begin{aligned} i_{я}(t) &= \frac{1}{C_e} M_{дв}(t), \quad E_2(t) = L \frac{di_{я}(t)}{dt} + R_{яц} i_{я}(t) + \frac{C_e}{R} \frac{\partial u(l, t)}{\partial t}, \\ U_{pc}(t) &= k_{pc}(U_3 - U_{oc\omega}(t)), \quad U_{пт}(t) = k_{пт}(U_{pc}(t) - U_{дт}(t)), \\ T_{тп} \frac{dU_{тп}(t)}{dt} + U_{тп}(t) &= k_{тп} U_{пт}(t), \quad T_{вг} \frac{dE_2(t)}{dt} + E_2(t) = k_2 U_{тп}(t), \\ U_{oc\omega_1}(t) &= \frac{k_{дс}}{R} \frac{\partial u(l, t)}{\partial t}, \quad U_{дт}(t) = k_{дт} i_{я}(t). \end{aligned} \quad (21)$$

где $E_2, i_{я}$ – э.д.с. и ток якоря приводного электродвигателя; $M_{дв}$ – момент двигателя; U_3 – напряжение задания на входе пропорционального регулятора скорости; $U_{oc\omega}$ – напряжение обратной связи по скорости; U_{pc}, k_{pc} – выходное напряжение и коэффициент усиления регулятора скорости; $k_{пт}, U_{пт}$ – коэффициент усиления и напряжение на выходе регулятора тока; $U_{тп}, k_{тп}, T_{тп}$ – напряжение на выходе, коэффициент усиления и постоянная времени тиристорного преобразователя; $E_2, k_2, T_{вг}$ – э. д. с., коэффициент усиления и постоянная времени генератора постоянного тока; $k_{дт}, k_{дс}$ – коэффициенты передачи датчиков тока и скорости.

Будем решать задачу с помощью преобразования Лапласа по времени. Тогда получим следующую систему уравнений и граничных условий

$$\begin{aligned} u_L''(x, p) - \frac{p^2}{c^2} u_L(x, p) &= 0, \quad pu_L(0, p) = -\frac{v_3}{t_1} \frac{1}{p^2} (1 - e^{-pt_1}), \\ \frac{J}{R} p^2 u_L(l, p) &= ESu_L'(l, p)R - E_1 S_1 u_{1L}'(l_1, p)R_1 - M_{двL}(p), \\ \frac{1}{R} pu_L(l, p) &= \frac{1}{R_1} pu_{1L}(l_1, p) = \omega_L(p), \end{aligned} \quad (22)$$

$$u''_{1L}(x, p) - \frac{p^2}{c_1^2} u_{1L}(x, p) = 0, \quad E_1 S_1 u'_{1L}(0, p) = m_1 p^2 u_{1L}(0, p).$$

$$i_{яL}(p) = \frac{1}{c_e} M_{двL}(p),$$

$$E_{гL}(p) = L p i_{яL}(p) + R_{ящ} i_{яL}(p) + \frac{C_e}{R} p u_L(l, p),$$

$$T_{тп} p U_{тпL}(p) + U_{тпL}(p) = k_{тп} U_{ггL}(p), \quad T_{вг} p E_{гL}(p) + E_{гL}(p) = k_{г} U_{тпL}(p), \quad (23)$$

$$U_{ос\omega_{1L}}(p) = \frac{k_{дс}}{R} p u_L(l, p), \quad U_{ос\omega_{1L}}(p) = \frac{k_{дс}}{R} p u_L(l, p), \quad U_{дтL}(p) = k_{дт} i_{яL}(p).$$

Вывод. Полученная система позволяет решить задачу определения отклонения электрических величин привода при зависании сосуда с учётом волновых процессов в канате. Решение возможно на интервале времени до появления изгиба каната, то есть развития собственно напуска. Для фиксации зависания сосуда достаточно проследить за поведением характеристик процесса в начальные моменты времени порядка t_1 .

Список литературы

1. Завозин Л.Ф. Шахтные подъемные установки. – М.: Изд-во «Недра», 1975. – 368 с.
2. Степанов А.Г., Корняков М.В. Динамика машин: монография. – 2-е изд., испр. и доп. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. – 412 с.
3. Шахтный подъем: науч.-произв. издание / В.Р. Бежок, В.И. Дворников, И.Г. Манец, В.А. Пристром: общ. ред. Б.А. Грядущий, В.А. Корсун. – 2-3 изд., перераб. и доп. – Киев: Альфа Реклама, 2017. – 600 с.
4. Степанов А.Г. Динамика шахтных подъёмных установок. – Пермь : УрО РАН, 1994. – 263 с.
5. Осипова Т.Н., Хорошилов О.Н., Писарцов А.С. Динамика подъемной установки с учетом упругости каната // Машинобудування. – 2017. – №19. – С. 96-102.
6. Сребная Е.Г., Кондрахин В.П. Математическое моделирование динамических процессов в одноконцевой подъемной машине канатами большой длины // Подъемно-транспортное оборудование и логистика: V регион. студ. конф., 20-21 мая 2015 г. – Донецк: ДонНТУ, 2015.
7. Об использовании метода контроля состояния машин технологических агрегатов по энергетическим параметрам привода / А.Н. Савельев, М.В. Кипервассер, Д.С. Аниканов, В.Е. Реморов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2013. – № 12. – С. 31-33.
8. Кипервассер М.В. Влияние волновых процессов в канатах шахтных подъёмных установок на электрические величины электропривода / М.В. Кипервассер, Б.Б. Хаимзон // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2022. – № 8. – С. 261-265.

УДК 621.311, 621.331

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MATHLAB/SIMULINK ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Стищенко К.П., к.т.н. Кипервассер М.В.

Сибирский государственный индустриальный университет. г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье рассматривается разработка модели на базе компьютерной программы Matlab/Simulink, позволяющей исследовать искажения токов и напряжений в

сети электроснабжения, вызванных влиянием работы тяговых полупроводниковых выпрямителей.

Ключевые слова: гармонические искажения, полупроводниковый выпрямитель, математическая модель, качество электрической энергии, гармонический состав, тяговая подстанция.

Одним из основных способов доставки угля в Российской Федерации к потребителям является железнодорожный транспорт. Увеличение объёмов перевозок, рост массы поездов ведут к повышению нагрузки на инфраструктуру электроснабжения железных дорог. Помимо устойчивого и надежного энергообеспечения тяговой нагрузки, в круг задач дистанций электроснабжения входит также энергообеспечение устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), обеспечивающих безопасность и автоматизацию перевозочного процесса.

Электрификация Западно-Сибирской железной дороги выполнена преимущественно на постоянном токе. Выпрямления тока осуществляется с помощью преобразователей, выполненных, в основном, по 6-ти и 12-ти пульсовым схемам. Процесс преобразования сопровождается генерацией несинусоидальных гармоник на сторонах переменного и выпрямленного напряжения, что в свою очередь снижает качество электрической энергии на всех уровнях системы электропотребления [1].

Особенно чувствительными к качеству электроэнергии являются потребители, в составе которых есть микроэлектронные элементы. К таким относится оборудование постов электрической централизации и СЦБ. Любой сбой или отказ указанных технических средств могут привести к тяжелым последствиям: нарушениям графика движения, аварийных ситуациям с подвижным составом, опасным условиям труда персонала [2]. С учетом изложенного, вопрос качества и устойчивости энергоснабжения потребителей, питаемых от тяговых подстанций, является актуальным.

Одним из основных показателей качества формы кривой питающего напряжения является коэффициент несинусоидальности. Значения коэффициента несинусоидальности тока различно для 12-ти пульсовых 6-ти пульсовых схем [3]. На гармонический состав кривой сетевого тока также оказывает влияние величина угла коммутации вентилей преобразователя γ . Его значение зависит от величин индуктивных сопротивлений питающей системы, понизительного и тягового трансформаторов, а также коэффициента выбранной схемы выпрямления [1].

Напряжение питающей сети на шинах присоединения преобразовательного трансформатора также имеет искажения, вызванные коммутацией в вентильных плечах выпрямителя. На интервале коммутации происходит междуфазное короткое замыкание. Отношение мощности выпрямителя к мощности короткого замыкания питающей системы характеризует степень искажения напряжения. Спектр высших гармонических составляющих напряжения повторяет спектр тока питающей сети [3].

Для изучения влияния работы полупроводниковых выпрямителей на качество электрической энергии, питающей нетяговые потребители железных дорог, в статье предлагается модель тяговой подстанции, выполненная в программной среде Matlab/Simulink.

В качестве исходной принципиальной электрической схемы для разрабатываемой модели принята упрощенная схема тяговой подстанции (рис. 1).

Модель тяговой подстанции в программной среде Matlab/Simulink выполнена на основе типовых блоков библиотеки SimPowerSystem. Питание тяговой подстанции 110 кВ выполнено типовым блоком Three-Phase Source. Понизительный трансформатор с параметрами реального ТДН-16000/110 представлен блоком Three-Phase Transformer. Тяговый трансформатор с параметрами ТРДП-12500/10, применяемый в 12-ти пульсовых схемах тяговых подстанций, представлен тремя блоками Multi-Winding Transformer с расщепленными вторичными обмотками, собранными по схемам «звезда - треугольник».

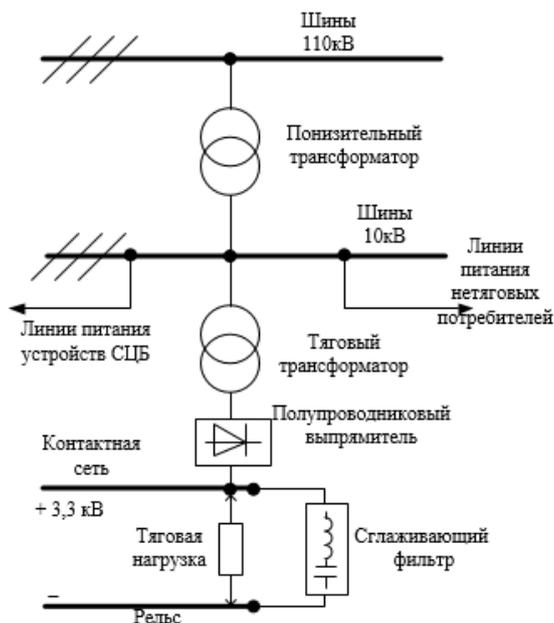


Рис. 1. Упрощенная схема тяговой подстанции постоянного тока

Выпрямительный 12-ти пульсовый агрегат, выполненный по последовательной схеме, принят как ТПЕД-3150-3,3к с номинальными значениями на стороне выпрямленного напряжения $U_{dн}=3,3$ кВ и тока $I_{dн}=3150$ А и представлен блоками Diode, собранными в две последовательные секции и подключенными к вентильным обмоткам тягового трансформатора (рис. 2). Реактор РБФАУ-6500 4,1 мГн, включенный в цепь фидера отсоса, а также однозвенный резонансно-апериодический сглаживающий фильтр смоделированы на основе блока Series RLC Branch.

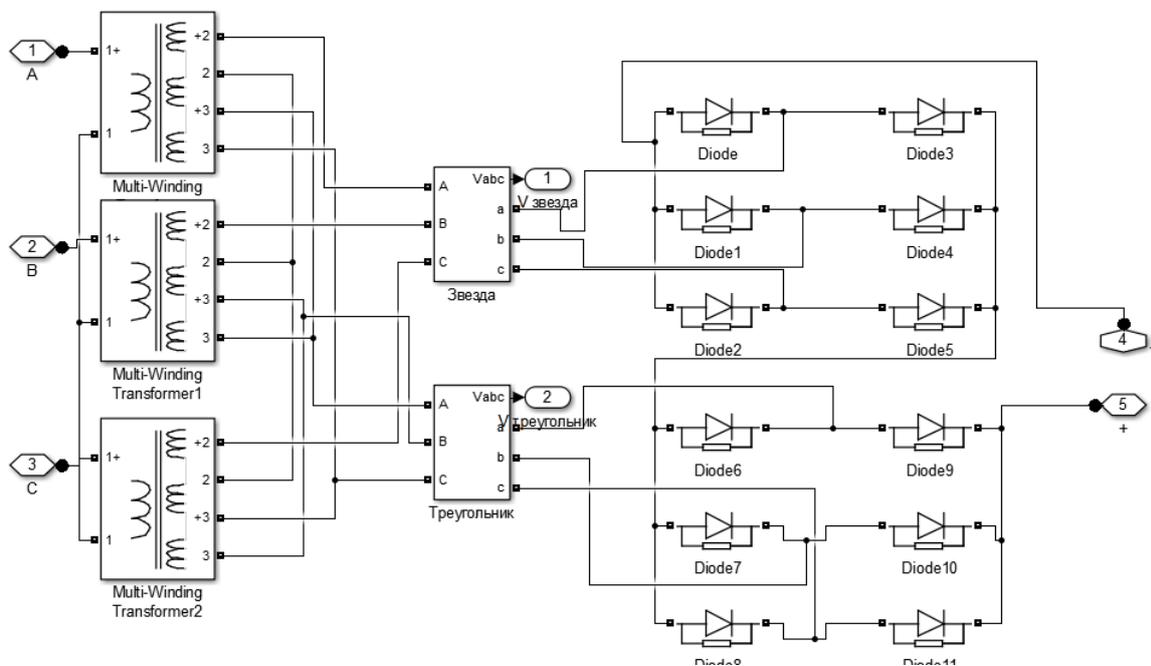


Рис. 2. Блок-схема преобразовательного агрегата

Программные средства для измерения параметров исследуемой модели представлены блоками Three-Phase Measurement, To Workspace, Voltage Measurement, Current Measurement, Display [4, 5].

Блок-схема разработанной модели представлена на рис. 3.

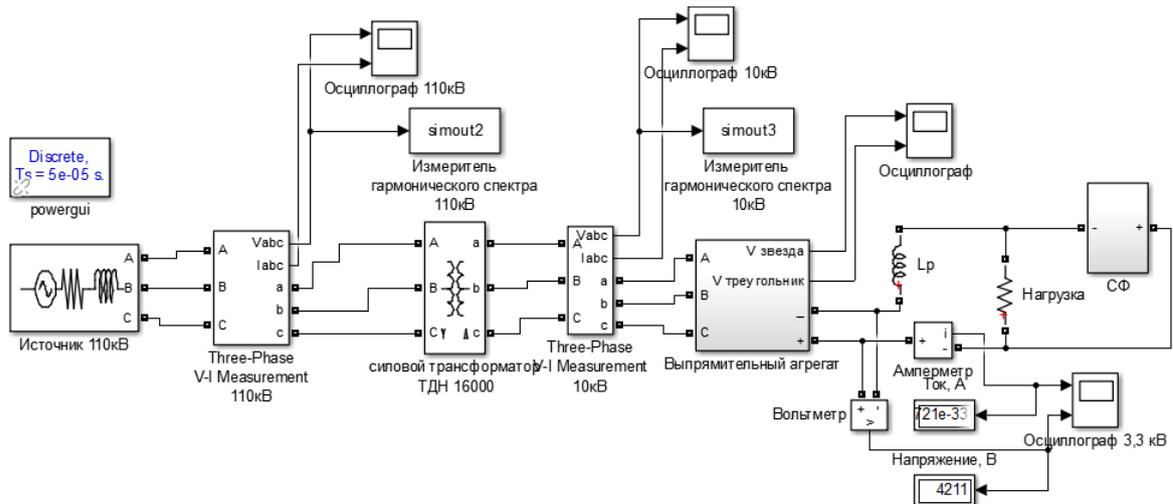


Рис. 3. Блок-схема разработанной модели тяговой подстанции постоянного тока

Расчет параметров, используемых при моделировании трансформаторов, в соответствии с требованиями моделирования в программной среде Matlab производился с учетом теоретических и методических указаний, изложенных в [4, 6, 7]. Интервал времени моделирования составлял 10 секунд.

Исследовались величины напряжений и токов на шинах 10 кВ и их гармонический состав. Исследование модели тяговой подстанции включало в себя рассмотрение 3 (трёх) режимов.

1. Исследование показателей качества электрической энергии при режиме отсутствия тяговой нагрузки, $I_d=0$, $U_d=4200$ В (рис. 4, 5).

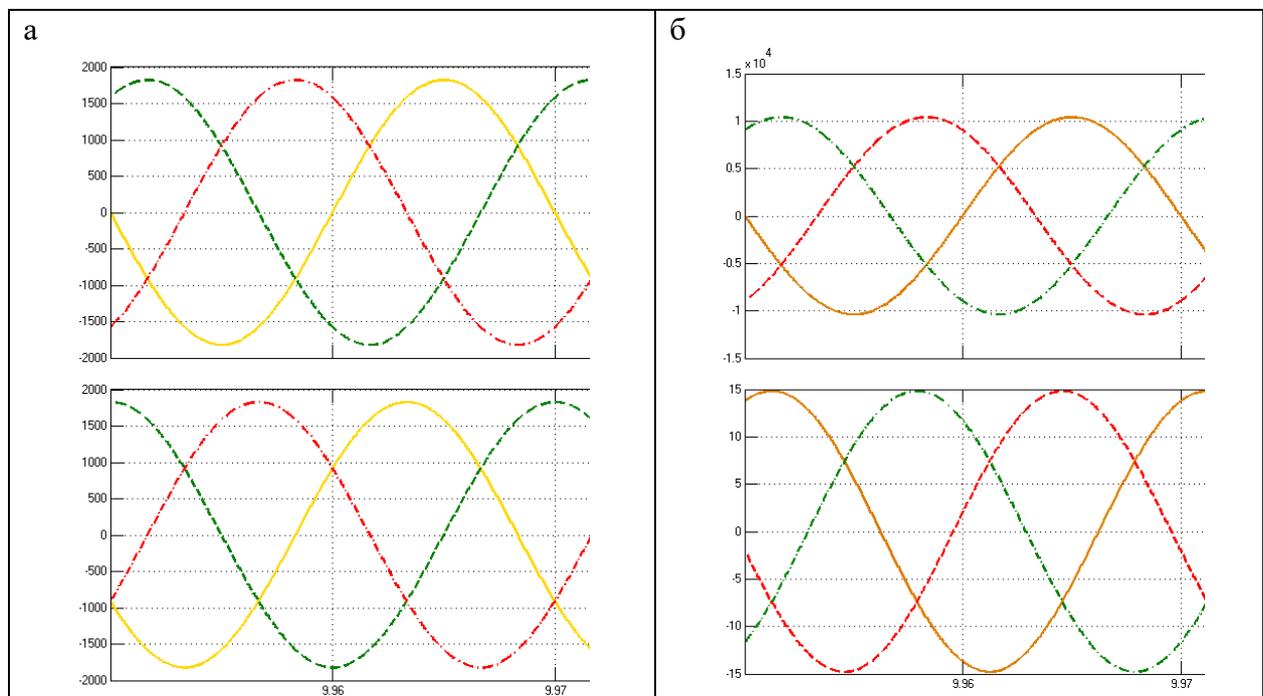


Рис. 4. Величины напряжений и токов: а) графики напряжений вентильных секций тягового трансформатора; б) графики напряжения и тока на шинах 10 кВ в режиме отсутствия тяговой нагрузки

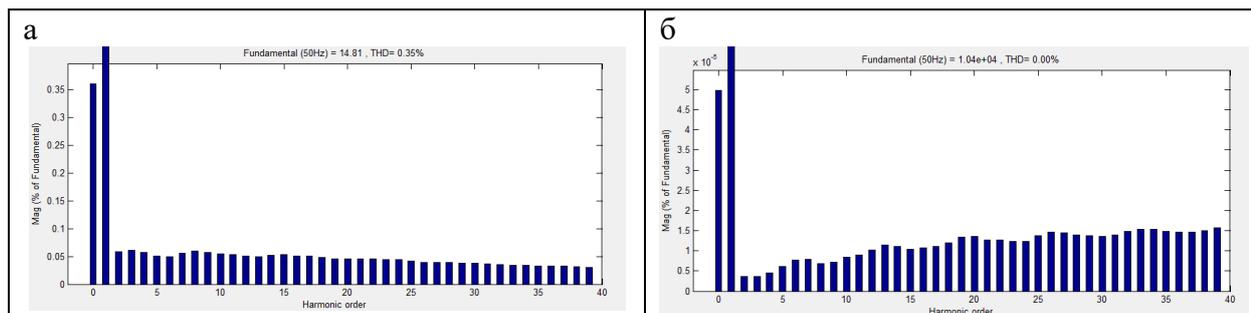


Рис. 5. Гармонический состав сигналов: а) гармонический состав тока; б) гармонический состав напряжения на шинах 10 кВ

По приведенным выше осциллограммам и спектральной диаграмме можно сделать вывод об отсутствии негативного воздействия на качество электрической энергии на шинах 10 кВ, при работе выпрямителя в режиме холостого хода.

2. Исследование показателей качества электрической энергии в режиме тяговой нагрузки при токе выпрямителя $I_d = 0,5I_N \approx 1600\text{A}$.

В режиме тяговой нагрузки, составляющей половину от номинальной, кривые тока и напряжения на шинах тяговой подстанции принимают вид, приведенный на рис 6.

На приведенных осциллограммах видно искажение формы кривых напряжения вторичных обмоток трансформатора (рис. 6, а) и сетевых тока и напряжения выпрямителя (рис. 6, б), обусловленное влиянием коммутационных процессов в вентильных «плечах».

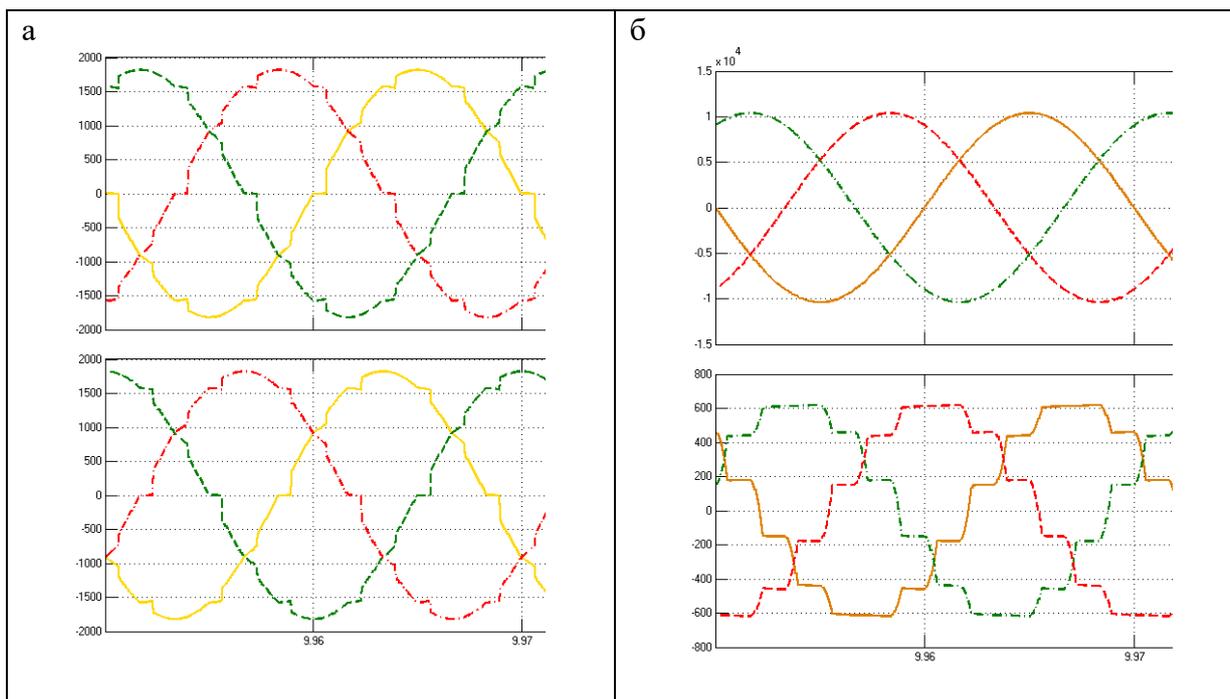


Рис. 6. Величины напряжений и токов; а) графики напряжений вентильных секций тягового трансформатора в режиме тяговой нагрузки; б) графики напряжения и тока на шинах 10 кВ

Спектральные диаграммы показывают зависимость порядкового состава гармонических составляющих от выбранной схемы выпрямления. Наблюдается преобладание канонических для 12-ти пульсовой схемы выпрямления гармоник с номерами 11,13,23,25 ... в спектральном составе кривой напряжения 10 кВ (рис. 7).

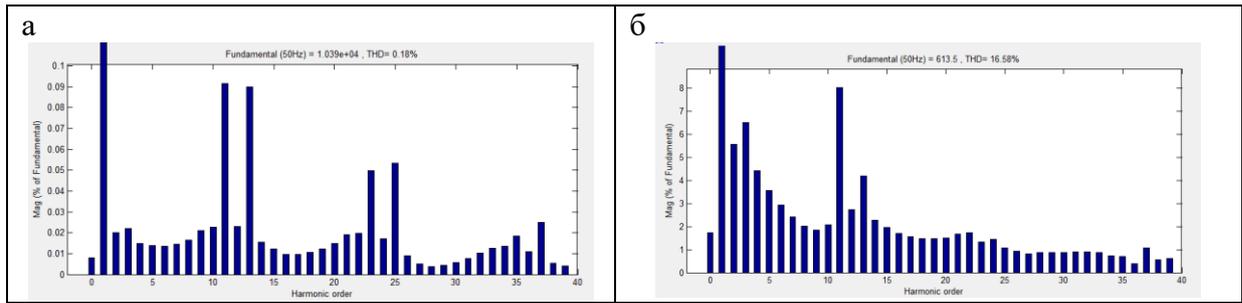


Рис. 7. Гармонический состав сигналов: а) гармонический состав напряжения; гармонический состав тока (б)

3. Исследование показателей качества электрической энергии в режиме номинальной тяговой нагрузки на выпрямителе $I_d = I_n \approx 3150A$ (рис. 8, 9).

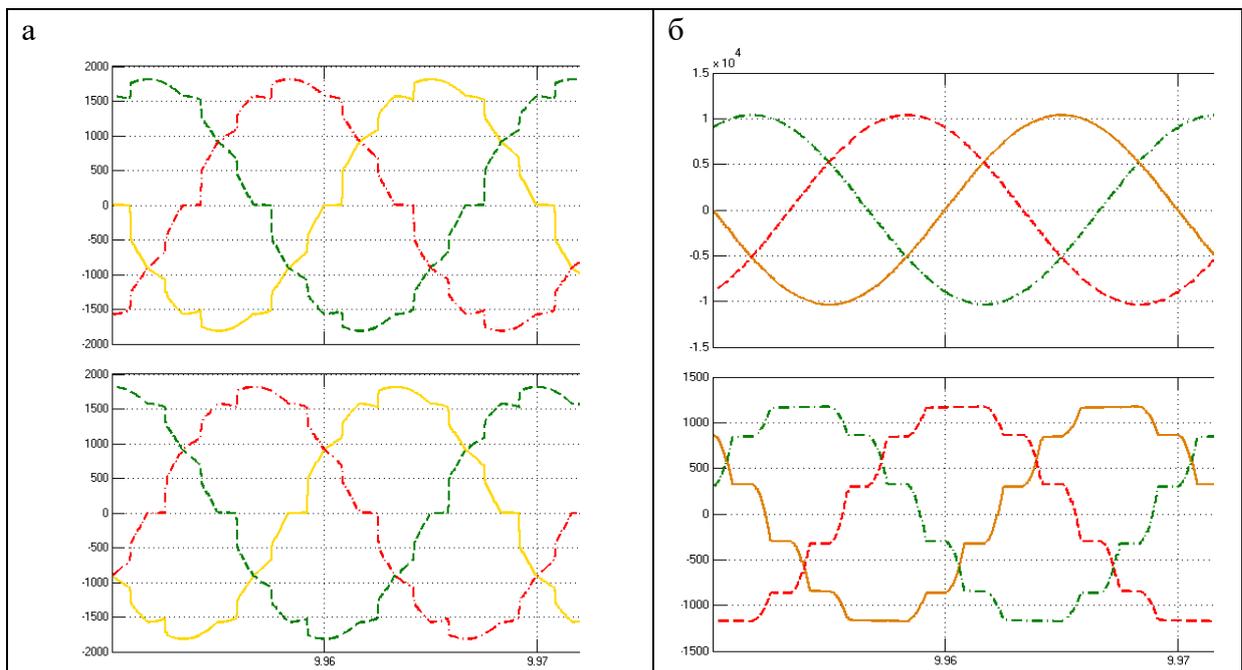


Рис. 8. Величины напряжений и токов: а) графики напряжений вентильных секций тягового трансформатора в режиме номинальной тяговой нагрузки; б) графики напряжения и тока на шинах 10 кВ

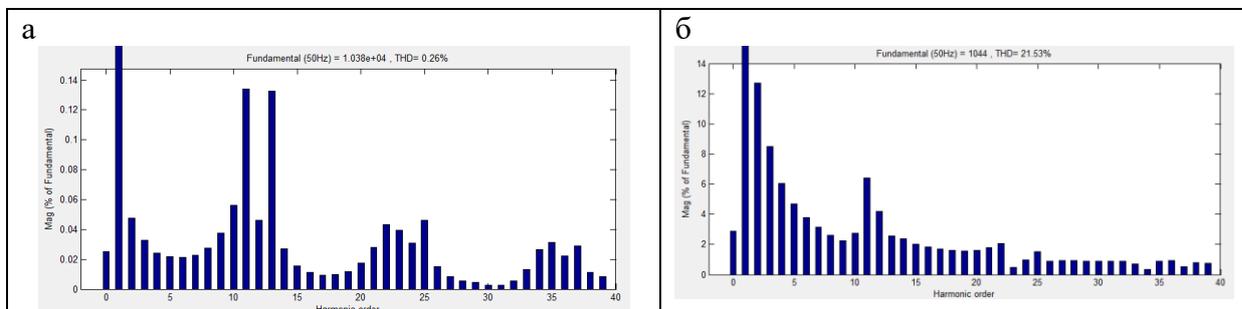


Рис. 9. Гармонический состав сигналов: а) гармонический состав напряжения; гармонический состав тока (б)

Анализ полученных данных показывает, что при токе нагрузки, равном половине номинального, суммарное наличие гармоник высших порядков в кривой питающего

напряжения 10кВ составляет 0,18% от амплитуды первой гармоники. При номинальном токе нагрузки этот показатель увеличивается до 0,26%.

Выводы. В результате проведенного исследования программной математической модели, были получены данные о величинах тока и напряжения на вентильных обмотках тягового трансформатора и питающего сетевого напряжения первичной обмотки. Анализ полученных данных подтверждает зависимость степени снижения качественных показателей электрической энергии от тяговой нагрузки выпрямителя. Продемонстрировано наличие канонических гармоник искажения 12-ти пульсового выпрямителя в спектре питающего напряжения. На основе разработанной модели возможно проведение исследований влияния тяговой нагрузки на показатели качества электроэнергии в системе электроснабжения.

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. Стищенко К.П., Кипервассер М.В. Причины и влияние искажений питающего напряжения на функционирование устройств микропроцессорной электрической централизации железнодорожного транспорта // Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) : труды всерос. науч.-практ. конф., Новокузнецк, 15 – 16 декабря 2022 г. – Новокузнецк: СибГИУ, 2022. – С. 555-559.
3. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи: учеб. для вузов железнодорожного транспорта – М.: Транспорт, 1999. – 464с.
4. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.
5. Дьяконов В.П. SIMULINK 4. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 528 с.
6. 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.
7. Расчет параметров схемы замещения трансформаторов с расщепленной обмоткой с учетом устройства регулирования напряжения под нагрузкой в обмотке высшего напряжения / А.В. Герасимук, И.Ю. Семькина, М.В. Кипервассер // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – № 2(142). – С. 52-59. – DOI 10.26730/1816-4528-2019-2-52-59.

УДК 621.314

ПРОБЛЕМЫ ВЛИЯНИЯ МОЩНОЙ РЕГУЛИРУЕМОЙ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТЯХ 0,4 кВ

Бедарев М.А., Коновалов О.В., Мамонтов Д.Н., к.т.н. Кипервассер М.В.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Рассматривается проблема ухудшения параметров качества электроэнергии в сетях 0,4 кВ, вызванная регулированием мощной активной нагрузки. Приводятся решения для снижения влияния мощной регулируемой активной нагрузки на параметры качества электроэнергии.

Ключевые слова: электрический нагреватель, колебания, дискретное регулирование, широтно-импульсное модулирование, фликер.

Одним из часто используемых способов отопления является использование электрокалориферов [1]. Установки подобного типа применяются для обогрева бытовых и производственных помещений, в том числе – на предприятиях горной промышленности. В некоторых случаях мощные электрокалориферы используются для подогрева воздуха в системах вентиляции подземных выработок. В последнем случае мощность установок может достигать нескольких сотен киловатт. Особенностью технологического процесса данных установок является необходимость регулирования температуры, а следовательно, и мощности электрических нагревателей (ЭН).

В настоящее время для объектов, обладающих значительной тепловой инерционностью, в большинстве случаев применяется дискретный широтно-импульсный (ШИМ) способ регулирования мощности. Наибольшее распространение получил способ коммутации активной нагрузки с частотой кратной частоте сети в момент перехода сетевого напряжения через ноль. Принято считать, что такой способ коммутации наиболее благоприятен по условию электромагнитной совместимости. Период коммутации зависит от необходимой точности регулирования и тепловой инерционности объекта регулирования, и может от нескольких минут приближаться к периоду напряжения питающей сети, в таких случаях применяют специальные алгоритмы (алгоритм Брезенхема) [2]. Однако при проектировании мощных нагревательных установок следует учитывать влияние циклически коммутируемой нагрузки на возникающие вследствие этого колебания (пульсации) напряжения, обусловленные импедансом питающей электросети. При достаточно частой коммутации (от нескольких секунд до минуты) в сети возникает такое явление, как фликер [3]. Также, при коммутации отдельных полупериодов сетевого напряжения, в сети, кроме фликера, возникает заметная пульсирующая постоянная составляющая, оказывающая негативное влияние на силовые трансформаторы и на другую индуктивную нагрузку.

При необходимости регулирования температуры ЭН большой мощности и имеющих малую тепловую инерционность, встает вопрос о необходимости принятия мер, снижающих циклические пульсации напряжения в питающей сети [4]. Особенно заметны пульсации при работе однофазных или пофазно-регулируемых трехфазных ЭН с ШИМ-регуляторами при питании от силовых распределительных трансформаторов 10(6)/0,4 кВ со схемой соединения обмоток Y/Y [5, 6].

Было проведено исследование воздействия на питающую сеть работы отопительного и вентиляционного оборудования на реальном объекте. В процессе обследования было проведено измерение параметров качества электрической энергии (ПКЭЭ) на вводно-распределительном устройстве (ВРУ). На рис. 1 приведен график кратковременной дозы фликера, построенный по данным измерений в течение суток. На графике наблюдается стабильное превышение предельно допустимого значения для этого параметра.

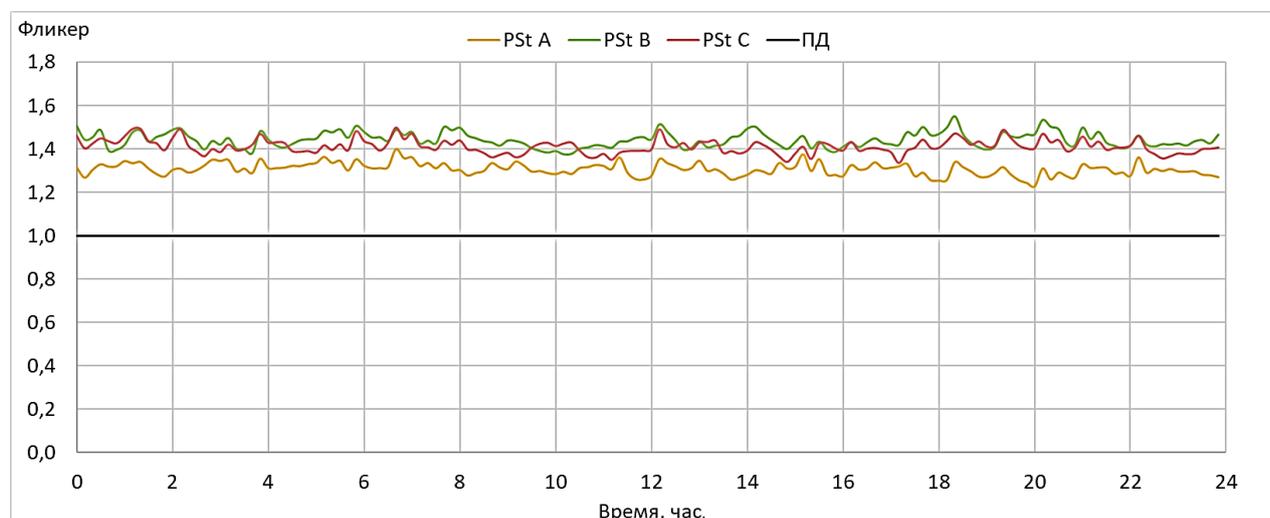


Рис. 1. График кратковременной дозы фликера

Анализ данных с усреднением на интервале в 1 минуту показывает резкопеременный характер нагрузки объекта. Также присутствует мощная асимметричная нагрузка, включающаяся с периодом около трех часов, и вызывающая значительную составляющую нулевой последовательности напряжения в питающей сети. Источником искажений являлся электронагреватель (ЭН) системы отопления мощностью 36кВт.

Анализ графика с усреднением данных на интервале 0,200 с выявил циклическое включение мощной симметричной нагрузки с периодом от нескольких минут до десяти минут (рис. 2). Источником этих искажений являлся ЭН системы горячего водоснабжения, мощностью 30 кВт. Также наблюдаются частые циклические изменения нагрузки, не отображающиеся на графике с усреднением в 1 минуту, оказывающие наибольший вклад в превышение допустимой кратковременной дозы фликера.

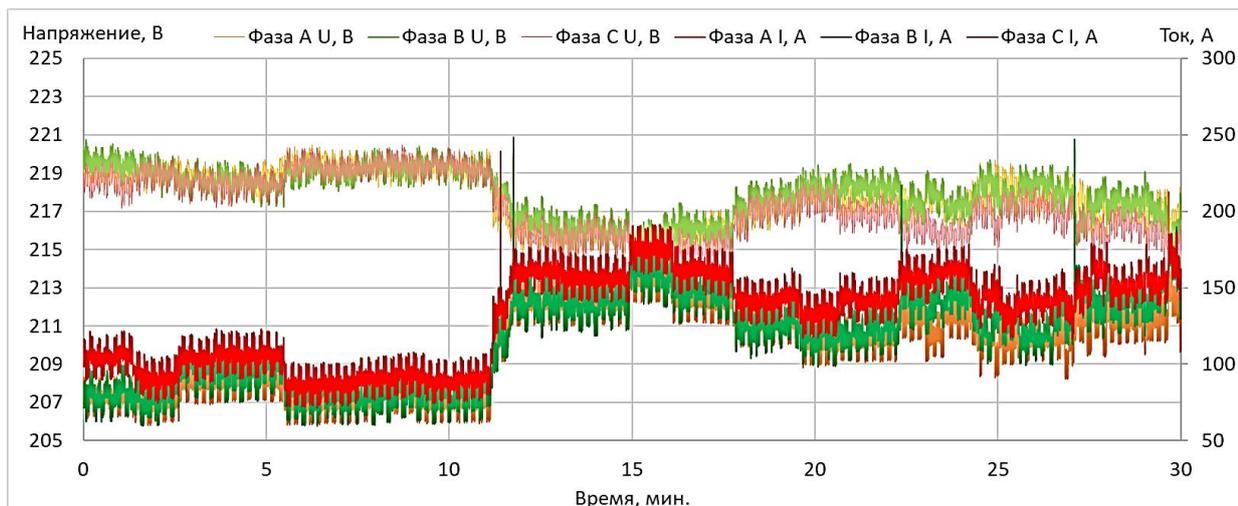


Рис. 2. График напряжения и потребляемого тока с усреднением данных на интервале 0,200 с

График с усреднением данных на интервале в 0,020 с (рис. 3) показывает наличие коротких импульсов электрических величин нагрузки. Анализ графика с усреднением данных на интервале в 0,020 с выявил циклическое включение мощной симметричной нагрузки с периодом около 6,25 с. Источником искажений является электрокалорифер приточной вентиляционной установки мощностью 27 кВт. В этой установке заданная температура приточного воздуха поддерживалась ПИД-регулятором в дискретным симисторным ШИМ - выходом, коммутирующим полную мощность калорифера одной ступенью.

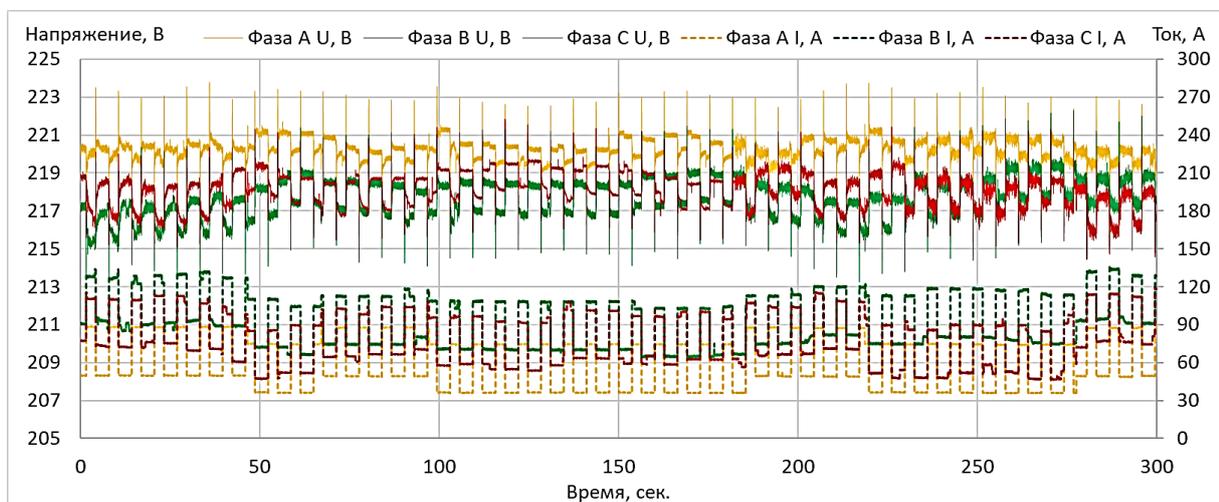


Рис. 3. График напряжения и потребляемого тока с усреднением данных на интервале 0,020 с

Влияние коммутируемой нагрузки на питающую сеть не должно вызывать превышение допустимых значений колебаний напряжения в питающей сети с определенной частотой и фликера [3]. Уменьшить воздействие коммутируемой нагрузки на колебания напряжения в питающей сети можно применив метод ступенчатого регулирования. Для этого нагрузку делят на симметричные трехфазные группы равной мощности. Для точного поддержания температуры используют ПИ или ПИД регуляторы с дискретным выходом с ШИМ-регулированием, коммутирующие одну ступень нагрузки в момент перехода тока и напряжения через ноль с периодом, кратным периоду сетевого напряжения. Остальные ступени подключаются по мере необходимости. При линейном возрастании мощности от нулевого до максимального значения каждая ступень коммутируется один раз. Такой способ в настоящее время часто применяется в системах управления ЭН как без ступени ШИМ [7], так и со ступенью ШИМ [8].

При проектировании схем управления мощных нагревательных установок применим метод двоичного регулирования. При прочих равных условиях, метод позволяет получить меньшую циклически коммутируемую мощность, тем самым сведя к минимуму воздействие коммутируемой нагрузки на питающую сеть. Таблицы последовательностей включения ступеней нагрузки приведены на рис. 4. При таком способе регулирования мощность нагрузки делят на ступени таким образом, чтобы мощность каждой следующей была в два раза больше предыдущей (рис. 4б).

| а | | | | | б | | | | |
|--|---------------------------|---|---|---|--|---------------------------|---|---|---|
| Ступенчатая регулировка мощности | | | | | Двоичная регулировка мощности | | | | |
| ЭН $P_n = 16$ кВт с одной ступенью ШИМ | | | | | ЭН $P_n = 16$ кВт с одной ступенью ШИМ | | | | |
| Выходная мощность калорифера, кВт | Коммутирующий элемент | | | | Выходная мощность калорифера, кВт | Коммутирующий элемент | | | |
| | ТТР | К | К | К | | ТТР | К | К | К |
| | Мощность групп ТЭНов, кВт | | | | | Мощность групп ТЭНов, кВт | | | |
| 0 ... 4 | ШИМ | 0 | 0 | 0 | 0 ... 2 | ШИМ | 0 | 0 | 0 |
| 4 ... 8 | ШИМ | 1 | 0 | 0 | 2 ... 4 | ШИМ | 1 | 0 | 0 |
| 8 ... 12 | ШИМ | 1 | 1 | 0 | 4 ... 6 | ШИМ | 0 | 1 | 0 |
| 12 ... 16 | ШИМ | 1 | 1 | 1 | 6 ... 8 | ШИМ | 1 | 1 | 0 |
| 0 - группа ТЭНов отключена | | | | | 0 - группа ТЭНов отключена | | | | |
| 1 - группа ТЭНов включена | | | | | 1 - группа ТЭНов включена | | | | |
| ШИМ - регулируемая мощность 0 ... 100% | | | | | ШИМ - регулируемая мощность 0 ... 100% | | | | |

Рис. 4. Таблицы последовательностей включения электронагревателей при ступенчатой (а) и при двоичной (б) регулировки мощности с одной ступенью ШИМ

При этом используется одна ступень ШИМ, мощность которой равна мощности первой контакторной ступени (рис. 5). Ступень ШИМ так же управляется ПИ или ПИД регулятором [9].

Количество коммутаций каждой ступени при линейном изменении мощности ЭН от нулевого до максимального значения обратно пропорционально мощности ступени и определяется по формуле:

$$N_{Kx} = 2^{-x+n}, \tag{1}$$

где N_{Kx} - количество коммутации ступени с номером x , n – количество ступеней.

Мощность первой контакторной ступени $P_{ст1}$ определяется по формуле:

$$P_{ст1} = \frac{P_K}{2^{n-1}}, \tag{2}$$

где P_K – суммарная мощность контакторных ступеней ЭН без учета ступени ШИМ, n – количество контакторных ступеней.

Количество контакторных ступеней n при заданных мощностях P_K и $P_{ст1}$ можно определить по формуле:

$$n = \text{Log}_2 \frac{P_K}{P_{ст1}} + 1. \tag{3}$$

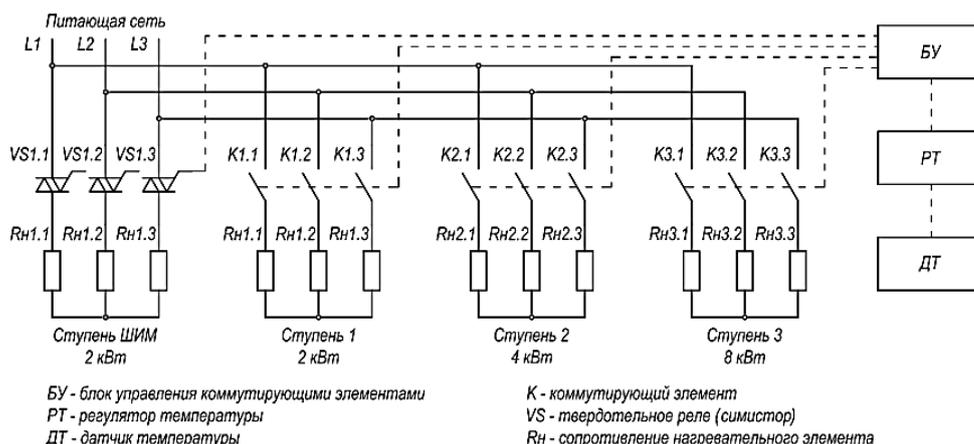


Рис. 5. Схема подключения электронагревателя мощностью 16 кВт с тремя ступенями 2, 4 и 8 кВт и одной ШИМ ступенью 2 кВт

Преимущество A от использования двоичного метода по сравнению со ступенчатым методом по значению минимальной мощности ступени можно оценить по формуле:

$$A = \frac{2^n - 1}{n}, \quad (4)$$

где n – количество контакторных ступеней.

Вывод. Метод двоичного регулирования, по сравнению со ступенчатым методом, позволяет снизить количество ступеней нагрузки без увеличения колебаний напряжения в питающей сети. Это минимизирует фликер, вызывающий зрительную утомляемость и ухудшение условий труда, возникающий во время работы регулятора мощности при значительном импедансе питающей электросети, характерном для горных предприятий с большой протяжённостью питающих линий.

Список литературы

1. Электрокалориферы к электрокалориферным установкам серии СФОЦ ПАСПОРТ КТО.800.230.10.000 ПС. – URL: https://www.delsot.ru/sites/default/files/pasport_sfoc_3.pdf
2. Ридико Л. Алгоритм Брезенхема в тиристорных регуляторах мощности // Схемотехника. – 2000. – №2. – С. 2-4.
3. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014.
4. ГОСТ 30804.3.3-2013 Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение изменений напряжения, колебаний напряжения и фликера в низковольтных системах электроснабжения общего назначения. Технические средства с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе), подключаемые к электрической сети при несоблюдении определенных условий подключения. Нормы и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2020.
5. Бедарев М.А., Коновалов О.В., Кипервассер М.В. Проблемы применения силовых трансформаторов с группой соединения обмоток Y/Y_n-0 в распределительных сетях 0,4 кв // Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) : труды всерос. науч.-практ. конф., Новокузнецк, 15–16 декабря 2022 г. – Новокузнецк: СибГИУ, 2022. – С. 571-575.
6. Герасимук А.В., Романова В.А., Кипервассер М.В. Особенности расчёта токов трёхфазного короткого замыкания за мощным силовым трансформатором в сетях электроснабжения районов ведения горных работ // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2022. – № 8. – С. 272-277.

7. Шкафы управления типа ШУК к электрокалориферным установкам серии СФОЦ. ПАСПОРТ КТО.80.506.00.000 ПС. – URL: https://www.delsot.ru/sites/default/files/pasport_shuk_3.pdf.

8. ТТС25 Симисторный регулятор мощности для электрических обогревателей. Трехфазное напряжение 230 В или 400 В, 25 А. – URL: <http://www.vec-ing.ru/data/ttc25.pdf>

9. ТТ-S4/D Шаговый регулятор. Регулирование путем двоичного или последовательного подключения 4-х групп мощности. – URL: <http://www.vec-ing.ru/data/tts4d.pdf>

УДК 622.271(73):550.814

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В ОБЕСПЕЧЕНИИ УГОЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СТРАНАХ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

^{1,2}д.т.н. Зеньков И. В., ³Мулюшкина А.А.

1 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

2 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия

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

Аннотация. В статье представлены результаты исследования состояния тепловых станций с угольной генерацией электрической энергии, полученные с использованием данных дистанционного зондирования. В ходе дистанционного мониторинга и аналитических расчетов выявлен производственный потенциал угледобывающей промышленности в странах Юго-Восточной Азии. Определена география размещения и количество тепловых электростанций, работающих на основе сжигания угля. По результатам аналитических расчетов определен суммарный производственный потенциал тепловых станций по выработке электроэнергии.

Ключевые слова: страны Юго-Восточной Азии, топливно-энергетический комплекс, угольные карьеры, тепловые электростанции, угольная генерация электроэнергии, объемы добычи и потребления угля, размещение производительных сил, дистанционное зондирование Земли.

Введение. В странах Юго-Восточной Азии к настоящему времени создан уникальный по масштабу промышленный потенциал. Развитие получили здесь такие энергоемкие отрасли как горнодобывающая, нефтедобывающая, металлургическая, машиностроительная, химическая, цементная и др. Кроме этого в этих странах имеются масштабный агропромышленный комплекс и развитая транспортная инфраструктура (автомобильные и железные дороги) и др. По данным спутниковой съемки установлено, что только в горной части в северных провинциях Мьянмы, Таиланда и Лаоса отсутствуют признаки масштабной хозяйственной деятельности общества. На очередном этапе развития нашей школы с использованием результатов спутниковой съемки решена еще одна научно-прикладная задача по исследованию современного состояния объектов топливно-энергетического комплекса и его производственного потенциала в странах Юго-Восточной Азии. Как известно, в каждой стране, входящей в этот макрорегион, имеются значительные по площади сейсмические активные горные территории. Данный природный фактор является основной причиной отказа от строительства гидро- и атомных электростанций.

География размещения угольных карьеров и тепловых электростанций в странах Юго-Восточной Азии. При выполнении научно-прикладных исследований размещения производительных сил мировой экономики мы широко пользуемся ресурсами

дистанционного зондирования Земли из космоса. Аналогичные подходы к выполнению работ используют российские и зарубежные ученые [1 – 9].

В своих исследованиях на рассматриваемой территории мы выделили две страны с масштабной добычей угля открытым способом (Индонезия и Вьетнам) и три страны с добычей угля в карьерах не более 15 млн. т в год (в порядке убывания) – Таиланд, Республика Лаос и Республика Союз Мьянма [10]. В Индонезии ежегодно добывают не менее 600 млн т угля. Примерно 30% ископаемого топлива используют в собственной экономике – в генерации электрической энергии, в химической и цементной промышленности, а 70% направляется на экспорт. Весь объем угля добывают на двух островах Суматра и Калимантан. На них уголь потребляют местные энергетические и цементные предприятия. Большой объем угля развозят в баржах класса «река-море» на острова, входящие в состав Индонезии, где он также потребляется энергетическими и цементными предприятиями. На острове Ява уголь используют на предприятиях металлургической и химической промышленности. Во Вьетнаме масштабная добыча угля подземным и открытым способом сконцентрирована практически в одной провинции Куангнинь на северо-востоке страны. Годовой объем добычи угля здесь составляет 40 – 50 млн. т. Несмотря на значительные объемы добычи угля во Вьетнаме в национальной экономике имеется потребность в импорте угля. На территории Таиланда и Лаоса работает по одному карьере в каждой стране с годовой добычей угля 15 и 8 млн. т в год соответственно (см. табл. 1). В Республике Союз Мьянма (Бирма) уголь в объеме 1,2 млн. т в год добывают в одном карьере. Этот уголь используют на тепловой электростанции и на цементном заводе. Также уголь добывают в малых карьерах в объеме 0,8 млн. т в год. Уголь, добытый в малых карьерах, используют в производстве цемента [10].

По данным спутниковой съемки в экономике Таиланда имеются многочисленные предприятия, использующие практически все марки угля. Поэтому потребность металлургических, цементных и химических заводов покрывается за счет импорта угля из Индонезии и Австралии.

Таблица 1

Объемы потребления угля по странам Юго-Восточной Азии

| Страна | Количество тепловых электростанций | Объем потребления угля*, млн. т | Собственная добыча угля, млн. т | Экспорт угля, млн. т | Импорт угля, млн. т |
|----------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------|---------------------|
| Индонезия | 79 | 220 | 600 | 380 | - |
| Таиланд | 4 | 48 | 15 | - | 36 |
| Вьетнам | 29 | 65 | 55 | 5 | 15 |
| Лаос | 1 | 8 | 8 | - | - |
| Малайзия | 7 | 50 | - | - | 50 |
| Филиппины | 15 | 45 | - | - | 45 |
| Камбоджа | 2 | 6 | - | - | 6 |
| Мьянма (Бирма) | 2 | 4 | 4 | - | - |
| Итого | 139 | 446 | 682 | 385 | 152 |

Примечание: *объем потребления угля определен для предприятий энергетической, цементной и химической промышленности

В трех странах (Малайзия, Филиппины и Камбоджа) уголь не добывают. Вместе с тем в хозяйственной деятельности уголь используется на тепловых электростанциях и цементных заводах [10].

Оценка производственного потенциала предприятий топливно-энергетического комплекса с угольной генерацией в Юго-Восточной Азии. Оценка

производственного потенциала любого угледобывающего предприятия начинается с оценки горно-геологического строения месторождения, вовлекаемого в разработку. На территории Индонезии и Вьетнама горно-геологическое строение угольных месторождений практически повсеместно имеет благоприятные характеристики для открытой разработки: горизонтальное, пологое и крутонаклонное залегание и большая мощность угольных пластов как в вертикальном сечении, так и в горизонтальном срезе; линии выхода угольных пластов под наносы имеют значительную протяженность [10]. Все это делает возможным строительство и дальнейшую высокоэффективную эксплуатацию мощных угольных карьеров по добыче угля. На открытых горных работах и в логистике угольных потоков имеются такие технологические и логистические решения, присущие странам с теплым климатом и с развитой речной сетью, как перемещение горных пород (вскрышные породы и полезное ископаемое) в карьерах и за их пределами на расстояние до 27 км с использованием конвейерного транспорта, а также транспортировка угля в баржах класса «река-море». Кроме этого, большой объем угля добывается без рыхления горной массы с использованием буровзрывного способа. Эти и другие факторы делают в этом макрорегионе высококорентабельной добычу угля открытым способом [10].

По данным спутниковой съемки в угольных карьерах в добывающих странах Юго-Восточной Азии на бурении взрывных скважин работают 86 высокопроизводительных буровых станков. В состав экскаваторно-автомобильных комплексов входят: 21 мехлопата с объемом ковша 8-10 м³, 1611 гидравлических экскаваторов с объемом ковша до 24 м³, 4543 автосамосвала общего назначения грузоподъемностью 25 – 35 т, 2310 карьерных автосамосвалов грузоподъемностью 50-260 т; 189 шарнирно-сочлененных автосамосвалов повышенной проходимости с колесной формулой 6×6 грузоподъемностью 30 т. Небольшой объем вскрышных пород на месторождении угля в Республике Лаос разрабатывается двумя роторными экскаваторами (российский аналог ЭРГ-1600). На отсыпке отвалов в Таиланде и в Лаосе используют семь отвалообразователей производительностью 3000 т/час каждый. На вспомогательных работах задействовано 983 мощных бульдозера [10].

По нашим аналитическим расчетам парк горнотранспортного оборудования может технически и технологически обеспечить объем добычи угля на уровне 682 млн. т и объем вскрышных работ не менее 3,119 млрд. т.

В диапазоне мощности от 2000 МВт и выше и объемом потребления угля не менее 10 млн. т в год работают 14 электростанций. Станции находятся вблизи густонаселенных районов с развитым промышленным потенциалом. Количество станций с суммарной мощностью от 1000 до 1999 МВт и объемом потребления угля на уровне 5 – 8 млн. т в год составляет 17 ед. Тепловые станции с мощностью энергоблоков в широком диапазоне 200 – 990 МВт и объемом потребления угля 1 – 4 млн. т в год в основном находятся вблизи береговой черты исходя из логистических соображений, поскольку доставка угля на склады производится по морю. Общее потребление угля на нужды тепловых станций в этих странах составляет 400 – 420 млн. т в год.

По данным спутниковой съемки установленное количество энергоблоков на одной станции находится в широком диапазоне от одного до десяти. На всех станциях способ удаления золы и шлака – «сухой», что предполагает дальнейшее использование этих инертных материалов в хозяйственной деятельности. Обзор космических снимков показывает положительную экологическую обстановку на территориях, прилегающих к промышленным площадкам энергетических объектов – тепловым электростанциям с полной утилизацией золошлаковых материалов [10].

Выводы. По нашей оценке в ближайшей перспективе в странах Юго-Восточной Азии с населением более 650 млн. чел. и имеющих на своей территории развитый промышленный комплекс из нескольких тысяч энергоемких производственных предприятий, угольную генерацию электрической энергии, вырабатываемой на 139 тепловых станциях, в ближайшие годы весьма проблематично будет заменить на возобновляемые источники энергии. При масштабном отказе от угольной генерации электроэнергии без соответствующей

замены на генерирующие мощности «зеленой энергетики», с весьма большой вероятностью начнутся процессы стагнации целых энергоемких отраслей с полной остановкой производственной деятельности. Поэтому, перед принятием геополитических решений необходимо решить глобальную комплексную экономическую проблему, имеющую межотраслевой и межгосударственный характер, и в первую очередь, касающуюся занятости населения.

Список литературы

1. Особенности цветения цианобактерий в центральной части Азовского моря по спутниковым данным / Н.В. Василенко, А.В. Медведева, А.А. Алескерова [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 5. – С. 166-180.
2. Раевский Б.В., Тарасенко В.В., Петров Н.В. Оценка современного состояния и динамики растительных сообществ Онежского полуострова по разновременным спутниковым снимкам Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 5. – С. 145-155.
3. The real potential of current passive satellite data to map aboveground biomass in tropical forests / Nidhi Jha, Nitin Kumar Tripathi, Nicolas Barbier [et al.] // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2021. – V. 7. – I. 3. – P. 504-520.
4. Monitoring ash dieback (*Hymenoscyphus fraxineus*) in British forests using hyperspectral remote sensing / Aland H. Y. Chan, Chloe Barnes, Tom Swinfield, David A. Coomes // Remote Sensing in Ecology and Conservation. – 2021. – V. 7. – I. 2. – P. 306-320.
5. Mapping of Aluminum Concentration in Bauxite Mining Residues Using Sentinel-2 Imagery / S. Kasmaeeyazdi, E. Mandanici, E. Balomenos [et al.] // Remote Sens. – 2021. – № 13. P. 1517. – doi.org/10.3390/rs13081517.
6. Monitoring and Evaluating Restoration Vegetation Status in Mine Region Using Remote Sensing Data / W. Wang, R. Liu, F. Gan [et al.] // Remote Sens. Monitoring Mining Activities Using Sentinel-1A InSAR Coherence in Open-Pit Coal Mines 2021. – № 13. – P. 1350. – doi.org/10.3390/rs13071350.
7. Monitoring Mining Activities Using Sentinel-1A InSAR Coherence in Open-Pit Coal Mines / L. Wang, L. Yang, W. Wang [et al.] // Remote Sens. – 2021. – № 13. – P. 4485. – doi.org/10.3390/rs13214485
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. – P. 5040. – doi.org/10.3390/rs13245040.
9. Li Q., Guo J., Wang F., Song Z. Monitoring the Characteristics of Ecological Cumulative Effect Due to Mining Disturbance Utilizing Remote Sensing // Remote Sens. – 2021. № 13. – P. 5034. – doi.org/10.3390/rs13245034
10. URL: <https://www.google.com.earth>

УДК 662.523

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

к.т.н. Кузнецова Е.С., Усова Э.А., Комарова О.В., Качурин А.С.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

Аннотация. Разработана имитационная модель дифференциальной защиты трансформатора. Применение модели позволит проводить исследования работы дифференциальной защиты трансформатора при различных параметрах сети или трансформатора.

Ключевые слова: имитационная модель, подстанция, трансформатор, дифференциальная защита, короткое замыкание, осциллограмма.

Основными видами повреждений в трансформаторах являются:

– замыкания между фазами внутри кожуха трансформатора и на наружных выводах обмоток;

– замыкания в обмотках между витками;

– замыкания на землю обмоток или их наружных выводов.

Защита трансформатора бывает основной и резервной. Основная автоматика контролирует обмотки, железо трансформатора, а также шины, провода. Резервная защита должна срабатывать на повреждения за трансформатором, из-за которых могут выйти из строя внутренние детали и проводники.

Дифференциальная защита применяется как основная быстродействующая защита трансформатора. Она защищает трансформатор, который находится в защищаемой зоне, определяемой расположением трансформаторов тока.

Дифференциальная защита осуществляет сравнение величин мгновенных значений тока и векторов направления. Принцип сравнения основан по первому закону Кирхгофа (геометрическая сумма токов, втекающих и вытекающих из узла, равна нулю в любой момент времени). За зону защиты примем защищаемый трансформатор (рис. 1).

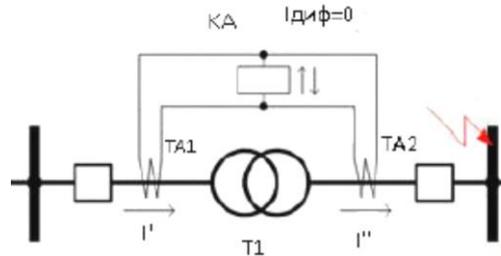


Рис. 1. Внешнее короткое замыкание

Дифференциальная защита не должна срабатывать при коротких замыканиях вне защищаемого объекта. Токи увеличиваются, а вектор направления их не изменяется. При разности токов мы получаем значение тока небаланса, меньше значения срабатывания. В нагрузочном режиме так же вектор направления не изменится.

В рассмотренном случае разница токов, протекающих в дифференциальной цепи равна нулю. В реальности же этот ток отличен от нуля и называется током небаланса.

В случае внутреннего короткого замыкания (рис. 2) ток, протекающий через трансформаторы тока, увеличивается. Но и вектор направления одного из токов относительно короткого замыкания так же изменяется. Происходит уже не разность токов, а сумма. Тогда ток в дифференциальной цепи резко возрастает, значение становится выше уставки и срабатывает защита, и формируется команда отключения выключателей.

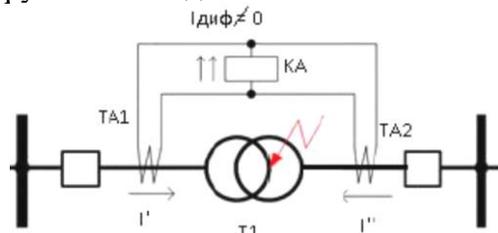
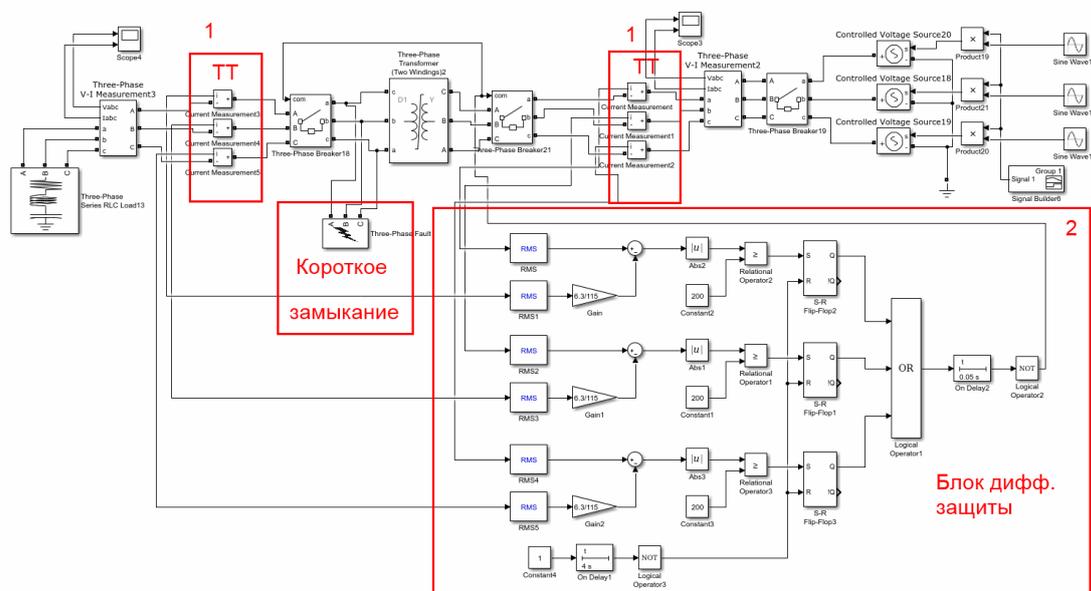


Рис.2 – Внутреннее короткое замыкание

На рис. 3 показана схема подключения блока дифференциальной защиты и логические элементы симулирующих её работу.

На сторонах ВН и НН установлено по три трансформатора тока. Мгновенной значению тока с ТТ установленного на стороне ВН, поступает на блок RMS. В блоке RMS

происходит перерасчет мгновенного значения тока в действующий. Далее сигнал поступает на блок сумматора, в котором вычисляется разность действующих токов с ТТ со стороны ВН и НН. Т.к. значения токов стороны ВН и НН отличаются кратно, то введен множитель для ТТ на стороне НН. Далее значение дифференциального тока поступает на блок сравнения, в котором дифференциальный ток сравнивается с током уставки. Если значение дифференциального тока превышает ток уставки, то на управляющие сигналы выключателей подается сигнал на отключение поврежденного трансформатора. После срабатывания защиты подается сигнал на включения АВР и сигнальной индикации.



1 – трансформаторы тока; 2 – блок дифференциальной защиты
 Рис. 3. Блок дифференциальной защиты и схема подключения

Для моделирования работы блока дифференциальной защиты используется модель изображенная на рис. 3, короткое замыкание будет происходить в точке К1.

Из осциллограмм, показанных на рис. 4, видно, что во время нормальной работы системы значение дифференциального тока равно нулю. На 6 секунде у трансформатора 1Т происходит короткое замыкание и значение дифференциального тока резко возрастает. Защита срабатывает и подает управляющий сигнал на выключатели, которые отключают поврежденный участок.

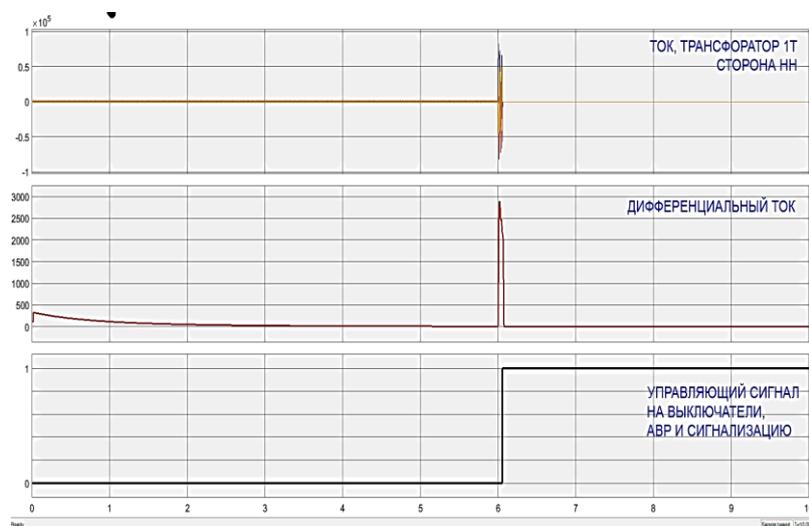


Рис. 4. Осциллограммы дифференциального тока, тока трансформатора 1Т и управляющего сигнала

Для большей наглядности на рис. 5 показан момент срабатывания защиты в увеличенном масштабе.

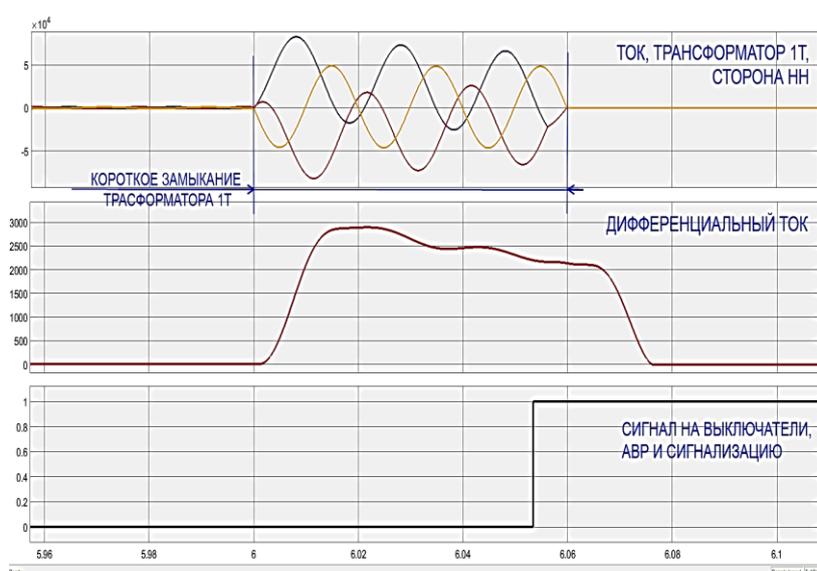


Рис. 5. Осциллограммы работы блока дифференциальной защиты

На рис. 6 показаны осциллограммы тока и напряжения трансформатора 2Т на стороне НН. Из осциллограмм видно, что после срабатывания дифференциальной защиты происходит включения АВР и нагрузка, которая была подключена к трансформатору 1Т, подключается к трансформатору 2Т и ток увеличивается.

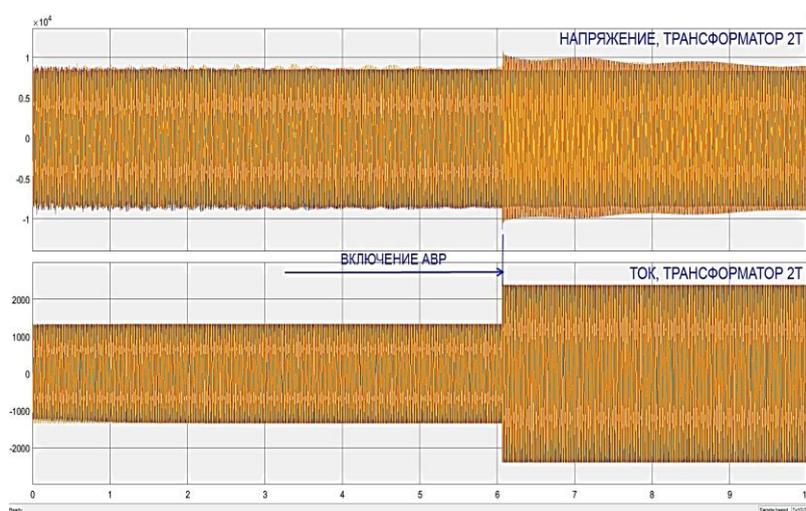


Рис. 6. Осциллограмма работы АВР

Вывод. Имитационное моделирование в среде «MATLAB-SIMULINK» позволяет рассмотреть различные режимы работы трансформаторных подстанций и действие защит при аварийных режимах.

Список литературы

1. Ершов Ю.А., Киселёв Д.Н. Моделирование устройств релейной защиты в программном комплексе MATLAB: уч. пос. – Pal-marium Academic Publishing, 2012. – 144 с.
2. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
3. Имитационное моделирование подстанции в среде «MATLAB-SIMULINK» / Кузнецова Е.С., Дурнев А.А., Пестрецов А.Е. [и др.] // Системы автоматизации (в образовании,

УДК 621.317

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

¹к.т.н. Кузнецова Е.С., ²Кузьмина С.Ю., ³Кузьмин С.А.

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

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

3 – ООО «Фаза», г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Рассмотрена структура расхода электроэнергии на горных предприятиях. Приведены пути цифрового перехода в области учета электроэнергии на промышленном предприятии. Переход на интеллектуальный учет электроэнергии позволит решить проблему разделения потребления электроэнергии на группы потребителей, а также другие задачи.

Ключевые слова: электросчётчик, неинвазивный мониторинг нагрузки, расход электроэнергии, условно-постоянные расходы, условно-переменные расходы, искусственный интеллект, цифровой переход.

Система электроснабжения горнодобывающего предприятия является динамической структурой, подвергающейся внешним воздействиям. Упорядочение учета электроэнергии и, как следствие этого, обеспечение нормального производственного режима, выравнивания графика нагрузки, круглосуточный мониторинг состояния электрохозяйства способствуют повышению энергоэффективности производства и возможности управления им на современном уровне.

Современные мировые энергетические стратегии определяют необходимость внедрения цифровых технологий во все этапы жизненного цикла электрической энергии. Внедрение интеллектуальных систем учета, управления и регулирования являются одним из направлений таких стратегий.

В стратегии научно-технологического развития Российской Федерации выделено направление «Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта».

Эффективность управления и регулирования электропотреблением определяется минимизацией аварий оборудования, снижением числа остановок технологического процесса предприятий из-за обесточивания, скоростью восстановления нормального режима энергосистемы после аварии.

Типовая структура расхода электроэнергии на горных предприятиях представлена в табл. 1.

Исследователями доказано, что основными технологиями цифрового перехода в электроэнергетической отрасли являются технологии интеллектуальных систем учета электроэнергии, которые основываются на счетчиках электроэнергии, снабженных модулями сбора, обработки, хранения, отправки и получения данных.

В отличие от традиционных счетчиков электроэнергии системы интеллектуального учета обладают более широким спектром функций:

– мониторинг объема потребления в режиме реального времени;

- возможность агрегации данных различных счетчиков в единую базу данных;
- хранение статистических данных по электрическим характеристикам;
- получение информации по перетокам электроэнергии и достоверное определение уровня технологических и коммерческих потерь в электросетях;
- выявление безучетного энергопотребления и фактов воздействия на счетчики;
- формирование энергосберегающих стратегий и оценка их реализации;
- дистанционное ограничение энергопотребления;
- разделение электропотребления на условно-постоянные и условно-переменные расходы;
- разделением общей нагрузки на нагрузки отдельных потребителей электроэнергии.

Интеллектуальные счетчики отличаются от простого AMR (автоматическое считывание показаний счетчика). Они выполняют дополнительные функции, включая считывание данных в реальном времени, отключение электроэнергии и мониторинг качества электроэнергии. Они позволяют агентствам по установлению тарифов вводить различные цены на электропотребление в зависимости от времени суток и сезона.

Таблица 1

Типовая структура расхода электроэнергии на горных предприятиях

| Типовая структура расхода электроэнергии на предприятиях с подземными горными работами | | |
|--|-----------|---|
| Участковые нормы | шахтные | компрессорные установки, вентиляционными установками, водоотливные установки, подъёмные установки, подземный транспорт (электровозный транспорт, канатная откатка, конвейерный транспорт), прочие энергоёмкие установки в подземных выработках и на поверхности |
| Общешахтная норма | | расходы электроэнергии, учтенные в участковых нормах, расходы электроэнергии вспомогательными установками предприятия (механические мастерские, насосы водоснабжения), освещение, потери электроэнергии в системе электроснабжения |
| Типовая структура расхода электроэнергии на предприятиях с открытыми горными работами | | |
| Участковые нормы | карьерные | экскавация, буровые работы, транспортирование горной массы, водоотливные установки |
| Общекарьерные нормы | | расходы электроэнергии, учтенные в участковых нормах, расходы электроэнергии на вспомогательные нужды карьера (механические мастерские, дренажные работы, освещение, потери электроэнергии в системе электроснабжения разреза |

Другой тип интеллектуальных счетчиков использует неинвазивный мониторинг нагрузки для автоматического определения количества и типа электроприемников.

Деагрегирование энергии или неинтрузивный мониторинг нагрузки изучается с 90-х годов, когда Харт (Hart 1992) предложил свой подход, основанный на обнаружении краевых изменений в сигнале мощности, их кластеризации и последующем оптимальном распределении между возможными устройствами, чтобы наилучшим образом соответствовать совокупному сигналу.

Технологии неинтрузивного мониторинга нагрузки – это метод анализа данных об общей электрической нагрузке, полученных путем измерения тока и напряжения в одной

точке, с последующим разделением общей нагрузки на нагрузки отдельных потребителей электроэнергии.

Разделение расходов на условно-постоянные и условно-переменные очень важно, так как ответственность за условно-переменные расходы чаще всего должна ложиться на технологический (электротехнологический) персонал, который формирует идеологию производства, а также непосредственно реализует технологические режимы работы технологического оборудования.

Ответственность за условно-постоянные расходы должен нести ответственный за электрохозяйство (главный энергетик) предприятия, так как именно он формирует идеологию работы вспомогательного оборудования (вентиляторы, системы воздухо- и водоснабжения), а также основных электрических вспомогательных производств. За увеличение условно-постоянных расходов несет несистемную ответственность и другой персонал производства, например, служба механиков – за неоптимальные сроки и качество ремонтов, аварийность механического оборудования; технологи – за аварийность технологического оборудования, приведшая к простоям.

Внедрение интеллектуальных систем учета электроэнергии для горных предприятий позволит получить различные срезы по профилю электрической нагрузки:

- условно-постоянные и условно-переменные расходы электроэнергии;
- расход электроэнергии наземными и подземными потребителями;
- расход электроэнергии вентиляционными установками;
- расход электроэнергии компрессорными установками;
- расход электроэнергии водоотливными установками;
- расход электроэнергии подъемными установками;
- расход электроэнергии подземным транспортом.

Выводы. Для реализации интеллектуального учета требуется разработка многоуровневого алгоритма нейронной сети, который будет проводить анализ характеристик мощности нагрузки. Система определяет потребление энергии отдельными потребителями в пределах электрической нагрузки всего производства. Используя изменения активной и реактивной мощности, появляется возможность кластерного анализа для идентификации электрического оборудования.

Для реализации интеллектуального учета электроэнергии на производстве требуются дальнейшие исследования в области искусственного интеллекта и нейронных сетей.

Список литературы

1. Романюк С.Ю., Кузнецова Е.С., Кузнецов В.А. Использование системы учета расхода электроэнергии для формирования программы энергосбережения на промышленном предприятии // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника : тр. девятой всерос. науч.-практ. конф., 25–26 ноября 2020 г. – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2020. – С. 158–164.
2. Кузьмин С.А., Кузнецова Е.С., Кузнецов В.А. Использование устройства расхода электроэнергии на производстве на промышленном предприятии // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника : тр. девятой всерос. науч.-практ. конф., 25–26 ноября 2020 г. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2020. – С. 136–144.
3. Кузьмин П.С. Неинтрузивный мониторинг нагрузки: эффекты внедрения и перспективы распространения // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2019. – Т. 10. – № 4. – С. 306–319.

ПРОМЫШЛЕННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

ВЕРОЯТНОСТЬ САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ В ЗОНЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО НАРУШЕНИЯ

д.т.н. Греков С.П., к.т.н. Головченко Е.А., Карасёва В.В.

НИИ «Респиратор» МЧС ДНР, г. Донецк, Донецкая народная республика, Россия

Аннотация. На основании ранее проведенных экспериментальных исследований параметров низкотемпературного окисления углей, с учетом кинетики адсорбции и хемосорбции кислорода, а также предоставляемых данных от угледобывающего предприятия, определена вероятность самовозгорания оставляемого угольного скопления в зоне геологического нарушения.

Ключевые слова: самовозгорание, угольное скопление, зона геологического нарушения, критерий пожароопасности, эндогенная пожароопасность.

Низкотемпературное окисление углей – это длительный процесс, по времени составляющий от 10 суток и более, изучаемый в лабораторных условиях путем определения параметров адсорбции углями кислорода и моделирования процесса с использованием математических моделей, отвечающих физическим причинам окисления углей.

Однако в условиях угольных шахт во многих случаях остается невынутой часть угля, например, при переходе очистным забоем различных типов зон геологических нарушений, что является причиной возникновения эндогенных пожаров в более чем 30 % случаев. Поэтому для своевременной профилактики самовозгорания угля в каждом конкретном случае необходимо определить эндогенную пожароопасность оставленного угольного скопления, путем использования параметров низкотемпературного окисления угля, полученных ранее в лабораторных условиях и характеристик разрабатываемого пласта, либо аналогичных по характеристике других уже заранее изученных угольных пластов.

В ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР» вопросы низкотемпературного окисления углей изучаются уже много лет. Известны фундаментальные работы В.С. Веселовского, В.Я. Альперовича, П.С. Пашковского [1], В.Г. Игишева [2]. В последние годы опубликованы работы В.Г. Агеева с соавторами [3, 4].

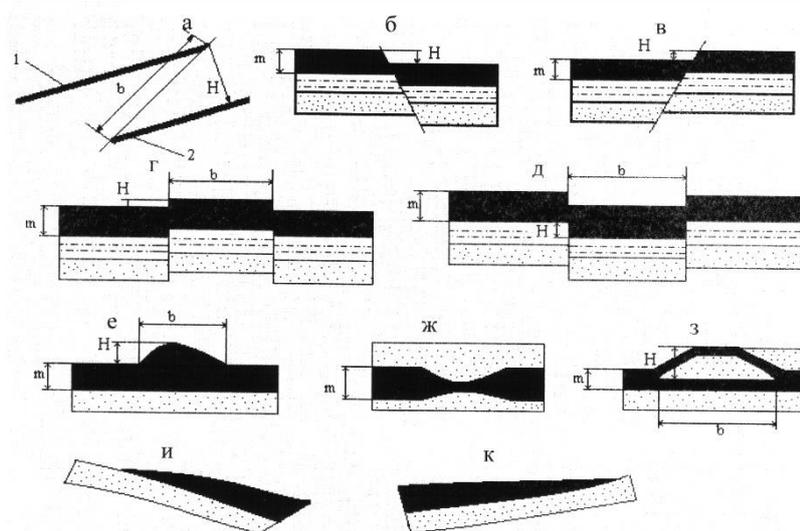
Благодаря созданным лабораторным установкам и длительным экспериментам по кинетике сорбции кислорода газонасыщенными углями различных марок и математическим моделированием процесса впервые удалось предложить метод разделения кинетики поглощенного и прореагировавшего с углем кислорода и получить численные значения параметров хемосорбции кислорода при низкотемпературном окислении [5].

На основе проведенных исследований теплоты реакции окисления и моделирования процесса хемосорбции впервые предложено новое понятие – скорость тепловыделения сорбента газонасыщенного угольного скопления [6].

С целью выявления степени влияния геологических нарушений на эндогенную пожароопасность выполнены исследования теплообменных процессов в зонах геологических нарушений [1], позволившие предложить методику расчета их эндогенной пожароопасности.

Для выполнения расчетов эндогенной пожароопасности принимали во внимание все основные типы геологических нарушений, встречающихся в Донбассе. Виды геологических нарушений, встречающиеся в шахтах Донбасса представлены на рис. 1.

При расчетах используют исходные данные, получаемые от шахты, и результаты экспериментальных исследований углей из геологических нарушений, выполняемых в лаборатории ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР».



1 – висячее крыло; 2 – лежащее крыло;

b – амплитуда смещения пласта по простиранию; m – толщина пласта; H – амплитуда смещения пласта по нормали

Рис. 1. Виды геологических нарушений, встречающиеся в шахтах Донбасса:

а, в – взброс; б – сброс; г – горст; д – грабен; е – утолщение пласта угля; ж – утончение пласта; з – раздвоение пласта; и – сдвиг; к – надвиг

Исходные данные шахты:

- плотность угля, ρ_y , т/м³;
- газоносность угля, G_d , т/м³;
- тип геологического нарушения;
- толщина (мощность) оставляемой пачки угля, m ;
- тип породы кровли пласта;
- тип породы почвы пласта;
- толщина пласта, m , м;
- выход летучих веществ, V^{daf} , %;
- объемная доля технологических потерь угля β , (при отсутствии данных может быть принята $\beta = 0,1$) [4];
- коэффициенты теплопроводности пород кровли λ_k и почвы пласта λ_n Вт/(м·К). В случае отсутствия на шахте данных используется табл. 1;

Таблица 1

Коэффициенты теплопроводности вмещающих пород

| Породы, вмещающие скопление угля | λ , Вт/(м·К) |
|----------------------------------|----------------------|
| Известняк средней крепости | 1,3 |
| Известняк и песчанистый сланец | 1,03 |
| Глинистый сланец крепкий | 0,26 |
| Глинистый и углистый сланцы | 0,19 |
| Глинистый сланец слабой крепости | 0,13 |

- длина лавы, m ;
- расстояние от места поступления воздуха в глубь угольного скопления по ходу движения утечек воздуха до места с максимально возможной температурой 1 , м, принимают равным 1 м;
- время от момента образования угольного скопления τ , сут.;
- концентрация кислорода в месте угольного скопления C_0 , моль/м³ (без учета разбавления его метаном принимают равной $9,36$ моль/м³);

– температура пород T_0 , К.

Данные лабораторных исследований углей в ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР» и теплофизические константы:

– критическая константа скорости химической реакции окисления угля $k_{кр}$, 1/с;

– дробимость угля D_p , 1;

– критическая температура самовозгорания угля $T_{кр}$, К;

– плотность воздуха $\rho_{y.}$, кг/м³;

– удельная теплоемкость воздуха, C_p , Дж/(кг·К);

– диаметр частиц угля в скоплении, d , принимается согласно данным [1, 4] равным $d=0,015$ м.

Вероятность самовозгорания угля (возникновения эндогенного пожара) P , в оставленном скоплении угля в зоне геологического нарушения определяется по формуле

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{G}{G_{кр}}\right), \quad (1)$$

где G – комплексный критерий пожароопасности скопления угля 1, определяется по формуле

$$G = \frac{\xi \cdot a_{хим} \cdot k_{ср} \cdot q_0 \cdot (S/\Pi)}{\alpha T_0} = \frac{Q_{скоп}}{\alpha T_0}, \quad (2)$$

где ξ – изменение доли реакционной поверхности во времени от начала обнажения пласта; $a_{хим}$ – концентрация кислорода, вступившего в реакцию окисления с углем, моль/м³; $k_{ср}$ – константа скорости химической реакции окисления угля 1/с; S – площадь скопления угля, м², принимаемая по данным геологической службы шахты; Π – периметр скопления угля, м, принимаемый по данным геологической службы шахты.

Представляя, что величина скопления угля в зоне геологического нарушения может быть представлена в виде параллелепипеда, в котором площадь скопления угля S , м² равняется площади сторон и определяется по формуле

$$S = m \cdot b \cdot 2 + m \cdot l \cdot 2 + l \cdot b \cdot 2, \quad (3)$$

где m – мощность оставленного скопления угля, м; b – ширина оставленного скопления угля, м; l – длина оставленного скопления, м; периметр скопления угля Π , м, равняется периметру сторон и определяется по формуле

$$\Pi = b \cdot 4 + l \cdot 4 + m \cdot 4, \quad (4)$$

q_0 – теплота реакции окисления, Дж/моль; α – коэффициент теплоотдачи скопления угля в окружающую среду, Вт/(м²·с); $Q_{скоп}$ – динамика тепловыделения из скопления угля, Дж/(м²·с); T_0 – начальная температура угля, К.

Критическое значение комплексного критерия пожароопасности скопления угля, определяется по формуле

$$G_{кр} = \frac{Q_{скоп}^{кр}}{\alpha T_0}, \quad (5)$$

где $Q_{скоп}^{кр}$ – динамика тепловыделения из скопления угля с критическими параметрами, Дж/(м²·с), определяется по формуле

$$Q_{скоп}^{кр} = Q_{скоп} \cdot (S/\Pi)_{кр}, \quad (6)$$

где $(S/\Pi)_{кр}$ – критическое значение параметра (S/Π) оставленного угольного скопления в зоне геологического нарушения, соответствующее минимальной (критической) мощности угольного скопления, способного к самовозгоранию. При расчетах площади S , м² и периметра Π , м, скопления угля, мощность оставленного угольного скопления m принимается равной 0,2 м.

Вывод. Таким образом, предложенный подход позволяет определять вероятность самовозгорания оставляемого угольного скопления в зоне геологического нарушения.

Список литературы

1. Пашковский П.С. Эндогенные пожары в угольных шахтах. – Донецк: «Ноулидж», 2013. – 794 с.

2. Игишев В.Г., Син С.А. Современное состояние проблемы борьбы с эндогенными пожарами в шахтах Кузбасса // Уголь. – 2012. – № 7. – С. 30 – 38.

3. Агеев В.Г., Пашковский П.С., Греков С.П. Эндогенная пожароопасность на различных этапах становления шахт Донбасса. – Донецк, 2018. – 147 с.

4. Агеев В.Г., Пашковский П.С., Греков С.П. Профилактика эндогенной пожароопасности: монография. – Донецк, 2020. – 592 с.

5. Греков С.П., Орликова В.П. Параметры низкотемпературного окисления угля разной степени метаморфизма // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: сб. науч. тр. – Донецк, 2022. – Вып. № 3(59). – С. 7– 17.

6. Греков С.П. Головченко Е.А. Исследование кинетики теплового эффекта окисления газонасыщенных углей Донбасса // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: сб. науч. тр. – Донецк, 2022. – Вып. № 4(59). – С. 66-74.

УДК 622.822.22:622.693.26

РАСЧЁТ ИЗОЛИНИЙ ТЕМПЕРАТУР И КОНЦЕНТРАЦИЙ ВРЕДНЫХ ГАЗОВ НА ПОРОДНОМ ОТВАЛЕ

Пашковский О.П., к.т.н. Головченко Е.А.

НИИ «Респиратор» МЧС ДНР, г. Донецк, Донецкая народная республика, Россия

Аннотация. На основании изучения нестационарных процессов переноса теплоты и массы, происходящих в горящем породном отвале, с привязкой к системе координат произведен расчёт изолиний температур и концентраций вредных газов, образующихся при горении отвальной массы на породном отвале с учетом угла откоса.

Ключевые слова: породный отвал, отвальная масса, очаги горения, температура, концентрации вредных газов.

На сегодняшний день шахтерские регионы с их предприятиями угольной промышленности классифицируются как зоны повышенной экологической опасности. Породные отвалы угледобывающих предприятий являются основным источником загрязнения окружающей среды. С ними связано самовозгорание отвальной массы терриконов, выделение в атмосферу токсичных газов и пыли, загрязнение воды и почв.

Для описания распределения ожидаемых температур и концентраций вредных газов, выделяющихся из породного отвала, используем уравнения нестационарных процессов переноса теплоты и массы в трёхмерной декартовой системе координат без учета фильтрации воздуха за пределами очага горения [1–3]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_i \left(\frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

где τ – время от начала горения, с; x, y, z – оси координат, м; C – концентрация любого вредного газа, кг/м³; a – коэффициент температуропроводности пород, м²/с; D – коэффициент диффузии вредного газа, м²/с.

Используя данные из работы [1], рассмотрим горящий породный отвал конусной формы, с очагами горения на откосах отвала. Поместим начало координат в центре определенного очага возгорания отвальной массы, расположенного на некоторой глубине L от поверхности отвала, и направим оси координат. Схема породного овала с указанием очагов горения на откосах отвала с их привязкой к системе координат x, y, z представлена на рис. 1.

Используя данную схему, представим систему уравнений (1) – (2) в сферической системе координат и получим

$$\frac{\partial[r(T - T_0)]}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2[r(T - T_0)]}{\partial r^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial[r(C - C_{i0})]}{\partial \tau} = D_i \frac{\partial^2[r(C_i - C_{i0})]}{\partial r^2}, \quad (4)$$

где r – переменный радиус, отсчитываемый от центра очага горения, м; T_0 – температура атмосферного воздуха, К; C_{i0} – концентрация i -го вредного газа в породах и воздухе до горения, кг/м³.

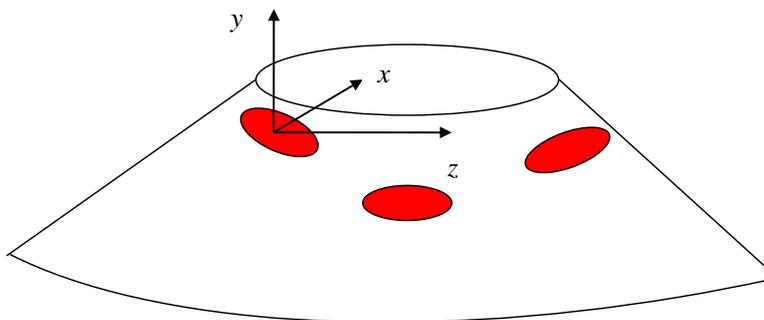


Рис. 1. Схема породного овала с указанием возможных зон горения с их привязкой к системе координат

Предположим, что очаг горения возник в начальной точке системы координат и, как указано в работе [3], действует некоторый период времени ($\tau = \tau_0$) до полного выгорания угля.

Тогда граничные условия для системы уравнений (3) и (4) можно представить в виде

$$r(T - T_0)|_{r=r_0} = r_0(T_1 - T_0); \quad r(C - C_0)|_{r=r_0} = r_0(C_1 - C_0); \quad (5)$$

$$r(T - T_0)|_{\tau=0} = 0; \quad r(C - C_0)|_{\tau=0} = 0,$$

где T_1 – средняя температура очага горения, К; C_1 – концентрация i -го вредного газа, выделяемого при горении, кг/м³; r_0 – радиус очага горения, м.

Используя преобразования в сферической системе координат, полученные для уравнений (3) и (4), а также граничные условия (5) представим распределения ожидаемых температур и концентраций вредных газов в виде интегралов вероятности

$$r(T - T_0) = r_0(T_1 - T_0) \left[1 - \Phi \left(\frac{r - r_0}{2a\sqrt{\tau}} \right) \right];$$

$$r(C_i - C_{i0}) = r_0(C_{i1} - C_{i0}) \left[1 - \Phi \left(\frac{r - r_0}{2D_i\sqrt{\tau}} \right) \right], \quad (6)$$

где Φ – интеграл вероятности.

Полученные решения (6) будут справедливы для радиуса $r \geq r_0$. При значениях $r < r_0$ внутри зоны горения принимается одинаковая температура $T = T_1$.

При длительном горении отвальной массы в очаге будет достигаться стационарное состояние и решения уравнений (6) примут вид

$$T = T_0 + \frac{r_0}{r}(T_1 - T_0); \quad C = C_0 + \frac{r_0}{r}(C_1 - C_{i0}). \quad (7)$$

Из решения уравнения (7) следует, что изолинии распределения ожидаемых температур и концентраций вредных газов будут представлять собой в горизонтальном плане отвала окружности.

Для получения изолиний распределения ожидаемых температур и концентраций вредных газов с учётом откосов отвала (объёмное распределение), воспользуемся данными авторов [4] и представим полученные решения уравнений (7) в декартовой системе координат

$$T = T_0 + \frac{r_0}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}(T_1 - T_0); \quad C_i = C_{i0} + \frac{r_0}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}(C_{i1} - C_{i0}). \quad (8)$$

Это позволит перейти к расчету изолиний распределения ожидаемых температур и концентраций вредных газов по конкретному очагу возгорания отвальной массы.

Для каждой точки фиксированной температуры по откосам отвала вместо уравнений (8) получим

$$z = \pm \sqrt{\left(r_0 \frac{T_1 - T_0}{T - T_0}\right)^2 - x^2 - y^2}; \quad z = \pm \sqrt{\left(r_0 \frac{C_{i1} - C_{i0}}{C_i - C_{i0}}\right)^2 - x^2 - y^2}. \quad (9)$$

Воспользуемся данными авторов [5] и примем во внимание уравнение линии откоса породного отвала

$$y = L + xtg\alpha, \quad (10)$$

где α – угол откоса породного отвала.

Подставим эту зависимость в решение уравнений (9) и получим формулы для расчёта изолиний распределения ожидаемых температур и концентраций вредных газов на породном отвале с учетом угла откосов

$$z = \pm \sqrt{\left(r_0 \frac{T_1 - T_0}{T - T_0}\right)^2 - x^2 - (L + xtg\alpha)^2};$$

$$z = \pm \sqrt{\left(r_0 \frac{C_{i1} - C_{i0}}{C_i - C_{i0}}\right)^2 - x^2 - (L + xtg\alpha)^2}. \quad (11)$$

Как показывают результаты проведенных расчётов, изолинии представляют собой вытянутые вдоль склона эллипсы, которые на горизонтальной площадке превращаются в окружности, а с увеличением угла откоса всё более удлиняются. Очевидно, в реальных условиях изолинии будут располагаться самым произвольным образом, что зависит от многих факторов, таких как неравномерное распределение горючих материалов в породах, неравномерная их влажность, перемещение очагов горения по склону по мере выгорания угля, слияние очагов, анизотропные свойства пород и т.д.

Вывод. Таким образом, предложенный метод расчёта позволяет строить изолинии температур и концентраций вредных газов, образующихся при горении отвальной массы на породном отвале с учетом угла откоса.

Список литературы

1. Пашковский П.С., Гусар Г.А. Определение местонахождения очагов самовозгорания угля в выработанном пространстве // Горноспасательное дело : сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 1993. – С. 89 – 94.
2. Методика расчёта концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л. : Гидрометеиздат, 1987. – 93 с.
3. Определение границ очагов тепловыделений на породных отвалах / Э.А. Попов, В.П. Засевский, Д.И. Момот, М.А. Яремчук // Горноспасательное дело : сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 1998. – С. 93 – 96.
4. Зборщик, М.П., Осокин В.В. Предотвращение экологически вредных проявлений в породах угольных месторождений. – Донецк : ДонГТУ, 1996. – 178 с.
5. Актуальные вопросы борьбы с самовозгоранием угля: сб. науч. тр. / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко. – Донецк : Арпи, 2012. – 656 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ШАХТ ПРИ ПОЖАРАХ

д.т.н. Агеев В.Г., к.т.н. Агарков А.В., Мавроди А.В.

НИИ «Респиратор» МЧС ДНР, г. Донецк, Донецкая народная республика, Россия

Аннотация. Представлены результаты математического моделирования и экспериментальных исследований теплообменных процессов в горных выработках угольных шахт при экзогенных пожарах. Установлена зависимость распределения относительных температур перед и за очагом пожара, позволяющая прогнозировать распределение температур по всей длине аварийной горной выработки с очагом пожара.

Ключевые слова: шахта, подземный пожар, теплообменные процессы, математическое моделирование, экспериментальные исследования.

Эффективная работа угольной отрасли – одна из ключевых ветвей развития экономики и обеспечения энергетической безопасности Российской Федерации [1]. Однако значительным препятствием на пути к достижению высоких показателей угледобычи, а также повышению уровня промышленной безопасности являются подземные пожары, при ликвидации которых возникают условия, опасные для жизни и здоровья горноспасателей [2].

Анализ проведенных разными авторами теоретических исследований показал, что предлагаемые ранее методы прогнозирования теплообменных процессов в горных выработках шахт при пожарах не позволяют в полном объеме осуществлять оценку распределения относительных температур перед и за очагом пожара, и, соответственно, прогнозировать распределение температуры пожарных газов по всей длине аварийной горной выработки при учете ее геометрических размеров, условий проветривания, коэффициентов теплопереноса в условиях пожара и ряда других параметров.

Соответственно, актуальное научное направление и цель настоящей статьи – математическое моделирование теплообменных процессов в горных выработках шахт при пожарах.

Рассматривая квазистационарный режим горения, когда можно пренебречь изменениями во времени, и изучить, как распределяется средняя по сечению горной выработки температура не только в очаге пожара, но и за её пределами, используем уравнение, аналогичное уравнению нестационарной конвективной диффузии газов из работы [3] в виде

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где C – концентрация газа, кг/м³; t – время с момента начала отсчета, с; u, v, w – проекции скорости воздуха на оси координат, м/с; x, y, z – продольная, вертикальная и поперечная координаты в горной выработке, м; D_x, D_y, D_z – коэффициенты турбулентной диффузии газов в направлении соответствующих координат, м²/с.

Уравнение (1) при стационарном переносе тепла в выработке примет вид [3, 4]

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q, \quad (2)$$

где T – температура в горной выработке, К; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; q – плотность источника выделения тепла, К/с.

Рассмотрим случай пожара с одним направлением движения и представим уравнение (2) в виде

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q. \quad (3)$$

Представим в конечных разностях производные в правой части и приведём уравнение (3) к виду

$$u \frac{dT}{dx} = \frac{d}{dx} \left(a \frac{dT}{dx} \right) + \alpha (T_0 - T) + q, \quad (4)$$

где α – удельный коэффициент теплообмена со стенками горной выработки, 1/с; T_0 – температура при нормальных условиях, К.

Здесь источник тепловыделения задаётся только в зоне горения и зависит от x :

$$q(x) = q_0, \text{ если } x_1 < x < x_2, \quad (5)$$

где x_1 и x_2 – начало и конец зоны горения, м.

За пределами зоны горения источник тепловыделения равен нулю.

Примем в уравнении (4) за константу $a = \text{const}$. Тогда получим

$$u \frac{dT}{dx} = a \frac{d^2T}{dx^2} + \alpha(T_0 - T) + q. \quad (6)$$

Характеристическое уравнение для поиска показателей степени у экспонент, эквивалентное уравнению (6) без источника, представим в виде

$$m^2 - \frac{\tilde{u}}{a} m - \frac{\bar{a}}{a} = 0, \quad (7)$$

где \tilde{u} – средняя скорость воздушного потока, м/с.

Корни равны

$$m_{1,2} = \frac{u_0}{2a} \pm \sqrt{\left(\frac{u_0}{2a}\right)^2 + \frac{\bar{a}}{a}} = 0. \quad (8)$$

где U_0 – начальная скорость, м/с; \bar{a} – коэффициент теплообмена со стенками горной выработки, 1/с.

Таким образом, решение уравнения (6) за пределами зоны горения будет иметь вид

$$T(x) = T_0 + A_1 \exp(m_1 x) + A_2 \exp(m_2 x), \quad (9)$$

где A_1 и A_2 – константы интегрирования.

Так как температура по всей длине зоны горения принята одинаковой, то $A_1 = A_2 = T_1$. Здесь T_1 – температура в зоне горения.

Примем начало отсчёта в начале зоны горения. Поскольку при $x \rightarrow \infty$ температура стремится к температуре окружающего воздуха T_0 , то перед зоной горения, когда $x < 0$, необходимо коэффициент m_1 взять со знаком «плюс» перед корнем.

Тогда средняя по сечению выработки температура перед зоной горения может быть определена при m_1 по формуле

$$T(x) = T_0 + (T_1 - T_0) \exp\left[\left(\frac{\tilde{u}}{2a} + \sqrt{\frac{\tilde{u}^2}{4a^2} + \frac{\bar{a}}{a}}\right) x\right]. \quad (10)$$

За зоной горения необходимо принять коэффициент m_2 . Тогда среднюю по сечению горной выработки температуру за зоной горения определим по формуле

$$T(x) = T_0 + (T_1 - T_0) \exp\left[\left(\frac{\tilde{u}}{2a} - \sqrt{\frac{\tilde{u}^2}{4a^2} + \frac{\bar{a}}{a}}\right) x\right]. \quad (11)$$

Таким образом, задав исходные параметры, можно по формулам (10) и (11) находить распределение температур по всей длине горной выработки с очагом пожара.

Дополняя показатель степени у экспоненты до разности квадратов, преобразуем формулу (11) к виду

$$T(x) = T_0 + (T_1 - T_0) \exp\left[-\frac{\bar{a}x}{\tilde{u}/2 + \sqrt{\tilde{u}^2/4 + \bar{a}a}}\right]. \quad (12)$$

Преимущество полученной формулы в том, что она позволяет осуществлять расчёты при малых значениях коэффициента температуропроводности. Так, полагая, что $a = 0$, вместо формулы (12) получим

$$T(x) = T_0 + (T_1 - T_0) \exp(-\bar{a}x/\tilde{u}). \quad (13)$$

Формула (13) находится в полном соответствии с формулой, предложенной в работе И.Н. Зинченко [5].

Поскольку достаточно исследовано поле температур за очагом пожара, наибольший интерес представляет исследование поля температур перед очагом пожара. Из анализа формул (10) и (11) следует, что если за очагом пожара температура почти не зависит от коэффициента температуропроводности, то перед очагом пожара длина температурного

«шлейфа» существенно от него зависит. Так, при коэффициенте температуропроводности, равном нулю, длина «шлейфа» равна нулю.

На рис. 1 представлено распределение относительных температур воздуха перед и за очагом пожара в горной выработке, сечением 4 м^2 , при скорости движения воздуха $1,0 \text{ м/с}$.

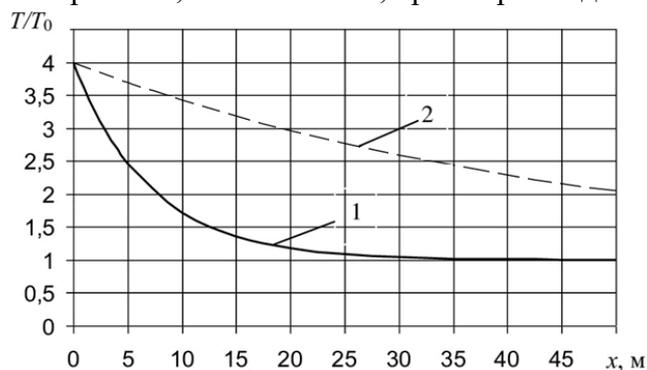


Рис. 1. Распределение относительных температур воздуха перед (сплошная линия) и за (прерывистая линия) очагом пожара в горной выработке шахты

Расчёты осуществлялись по формулам (10) и (11). Как видно из рис. 1, температура по потоку в 50 м от очага пожара составляет 342°C , т.е. третью часть от максимальной.

Длина температурного шлейфа против потока сравнивалась с данными, полученными ранее в работе [5], когда длина шлейфа доходила до 30 м при скорости движения воздуха 1 м/с и коэффициенте температуропроводности $a = 4 \text{ м}^2/\text{с}$ за счёт лучистого теплообмена. В этом месте средняя по сечению температура по данным расчёта достигает 40°C при нормальной температуре 27°C . Об этом говорят и другие данные в работе [5], когда при скорости $0,6 \text{ м/с}$ в опытной штольне, сечением 4 м^2 , дым и температура были такими, что из штольни пришлось уйти. Это касается только средней по сечению выработки температуры. Сам же шлейф газов во встречном потоке газов под кровлей должен иметь ещё большую температуру.

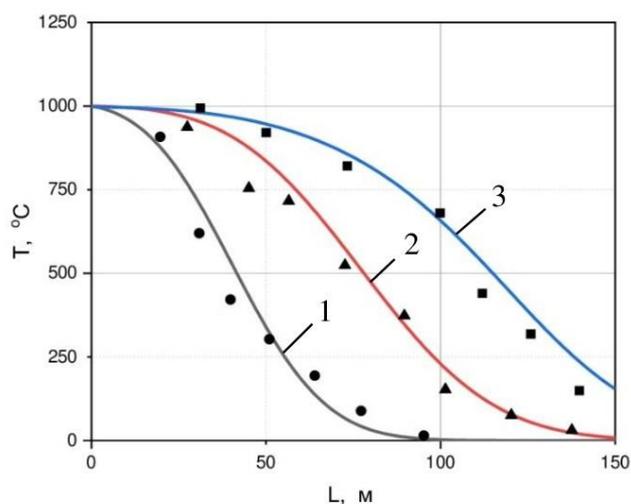
Для определения достоверности результатов теоретических исследований использованы экспериментальные данные, полученные при изучении динамики развития экзогенного пожара в подземных условиях штольни ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР» [6].

Штольня представляет собой проветриваемую горизонтальную выработку, длиной 181 м и сечением $4,2 \text{ м}^2$, с наклонным выходом на поверхность и диффузором, вентиляторной установкой, насосной камерой с водосборником, электрораспределительным пунктом и помещением для измерительной аппаратуры.

При проведении экспериментальных исследований в штольне устанавливались деревянные неполные крепежные рамы (состоящие из верхняка и двух стоек), боковые стенки и кровля выработки затягивались обаполами. Для загорания крепи поджигали сложенные в начале выработки костры. Всего было проведено 10 экспериментов. Температура газов изменялась с течением времени и определялась по показаниям термопар, установленных в 23 замерных станциях по длине штольни с шагом установки — $5 \dots 10 \text{ м}$, а также по высоте штольни в трех точках (у кровли, почвы и в центре выработки).

Результаты экспериментов обработаны в программе Microsoft Excel. Установлены зависимости распределения температуры пожарных газов, которые позволяют определять характер и кинетику их распространения по выработке. Было выполнено сравнение результатов измерений средней температуры в выработке при наличии очага пожара с результатами теоретического расчета. Кинетика теплопереноса была проанализирована численно при использовании точного решения уравнения температуропроводности.

Для удобства сравнения результаты экспериментальных исследований (зависимости) и результаты расчета (маркеры ●, ▲, ■) представлены в виде профилей распределения температуры пожарных газов по длине выработки на рис. 2.



1 – через 1 ч с момента возгорания; 2 – через 2 ч; 3 – через 3 ч
Рис. 2. Динамика температуры пожарных газов по длине выработки

Как видно на рис. 2, полученные расчетным методом результаты аналогичны экспериментальным данным распределения температуры пожарных газов по длине штольни. Сравнение данных показало, что максимальная относительная погрешность не превышает 14 %.

Вывод. Таким образом, представлены результаты математического моделирования теплообменных процессов в горных выработках шахт при пожарах и сравнения полученных результатов с данными экспериментальных исследований. Установлена зависимость распределения относительных температур перед и за очагом пожара в горной выработке, которая позволяет прогнозировать распределение температур газов по всей длине выработки аварийного участка шахты с очагом пожара.

В дальнейших научных работах планируется выполнить исследования нестационарного распределения температуры и концентраций пожарных газов в трехмерном виде по длине и сечению горных выработок шахт при экзогенных пожарах.

Список литературы

1. Яновский А.Б. Основные тенденции и перспективы развития угольной промышленности России // Уголь. – 2017. – № 8. – 10-14.
2. Федоренко Е.И., Кобылкин С.С. Проблема подземных пожаров и их тушение на больших глубинах в угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 8. – С. 197-207.
3. Пузач С.В. Математическое моделирование газодинамики и тепломассообмена при решении задач пожаровзрывобезопасности: монография. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2002. – 149 с.
4. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло-и массообмена. – М.: Наука, 1984. – 288 с.
5. Зинченко И.Н. Численное моделирование распространения тепла или газа по горным выработкам при их внезапных выделениях // Горноспасательное дело. – 1993. – С. 60-65.
6. Симонов А.М., Агарков А.В. Экспериментальные исследования дистанционного контроля шахтной среды в условиях штольни и подземного полигона // Вестник Академии гражданской защиты. – 2021. – № 2(26). – С. 74-83.

ПОТЕРИ РАСХОДА АЗОТА ПРИ ИЗОЛЯЦИИ И ТУШЕНИИ ПОДЗЕМНЫХ ПОЖАРОВ

Коврижкин О.И.

Оперативный военизированный горноспасательный отряд МЧС ДНР, г. Донецк,
Донецкая народная республика, Россия

Аннотация. По результатам теоретических исследований получены зависимости по определению потерь расхода азота при транспортировании его к изолированному участку и заполнении изолированного участка. Также рассмотрены проблемы по устранению потерь на утечки азота и притечки воздуха при помощи шлюзовых камер. Дополнительно изучены зависимости поглощения газообразного азота углем и горными породами.

Ключевые слова: газообразный азот, инертный газ, подземный пожар, горная выработка, шлюзовая камера.

Введение. Наметившаяся тенденция углубления горных работ и энерговооруженности труда увеличивает вероятность возникновения, продолжительность и трудоемкость ликвидации подземных пожаров. Один из наиболее перспективных способов предупреждения, локализации и тушения пожаров в шахтах – инертизация воздуха аварийного участка, под которой понимается искусственное снижение концентрации кислорода в горных выработках путем подачи инертного газа (азота).

Основные преимущества азота по сравнению с другими инертными газами: возможность получения низких температур подаваемого газа и его низкая поглощаемость. Так, по сравнению с CO_2 азот поглощается слабее: углем – в 3-8 раз, породой – в 4-6 раз и шахтной водой – в 30 раз. Благодаря удельному весу, близкому к удельному весу воздуха, азот равномерно распределяется в горных выработках и выработанном пространстве.

Постановка проблемы. Газообразный азот по своим физическим свойствам близок к воздуху, что позволяет ему в отличие от углекислого газа легко распространяться по всему изолированному объему горной выработки.

Первоначально использовался жидкий азот и установки для его газификации. Но этой технологии присущи существенные недостатки:

- необходимость применения сложного и дорогостоящего криогенного оборудования;
- сложность и дороговизна транспортирования и хранения;
- значительные потери;
- большие расходы энергии на газификацию и т.д.

Более перспективный и приемлемый в шахтных условиях способ получения газообразного азота непосредственно на шахте с помощью газоразделительных станций (устройств, разделяющих воздух на его составляющие). Научные основы этой технологии разработаны НИИГД «Респиратор», на их основе создана передвижная установка АМГП-15/0,7СУ1.

Основные элементы установки – мембранные газоразделительные аппараты, которые составляют единый блок (батарею). Аппараты работают по методу мембранного деления, суть которого состоит в разной скорости прохождения газов через плоскую полимерную перегородку за счет перепада парциальных давлений.

Воздух сжимается компрессором до рабочего давления и подается в блок очистки, где отделяются капельная влага и масло, потом он поступает в фильтр-адсорбер, где отделяются пары масла. Очищенный воздух поступает в мембранный блок, где за счет перепада парциальных давлений кислород проникает под мембрану и выбрасывается в атмосферу,

азот подают потребителю. С помощью регулирующего вентиля осуществляется изменение расхода и концентрации азота.

Азотно-компрессорная станция устанавливается на поверхности шахты и соединяется специально проложенным или технологическим шахтным трубопроводом с аварийным участком [1].

Подача газообразного азота осуществляется со стороны откаточного или вентиляционных горизонтов, через проемы в изолирующих перемычках, а также по буровым скважинам, пробуренным с поверхности в изолированный пожарный участок.

Анализ последних публикаций. Отработкой и внедрением средств борьбы с подземными пожарами с помощью газообразного азота занимались такие специалисты горноспасательного дела, как В.Г. Игишев, В.М. Портола, О.Э. Толкачев, Ю.В. Булгаков и др. [2-3].

Изложение основного материала. Эффективность ликвидации подземного пожара во многом зависит от правильного выбора параметров подачи азота, несоблюдение которых не позволит потушить пожар и может привести к тяжелым последствиям.

При ведении работ по тушению подземных пожаров способом изоляции или комбинированным на его основе имеют место взрывы метановоздушных смесей, вследствие чего горноспасатели получают травмы разного рода и тяжести [4].

Вопросы причин возникновения и предупреждения таких взрывов детально не рассмотрены в нормативно-технических документах [5], а применяемые тактические приемы не соответствуют возможностям современной азотной техники и реальным параметрам подачи азота в изолированный объем.

Кроме того, имеет место значительный расход азота при заполнении изолируемого объема. Только при запуске азота в количестве 4-6 изолированных объемов его концентрация достигает требуемой величины.

Так, ни в одном случае при подаче азота не была достигнута взрывобезопасная обстановка в наиболее опасном по взрыву месте – вентиляционном штреке. Низкое содержание азота может быть объяснено поглощением его углем и породой.

При подаче азота наблюдаются значительные потери азота, что дополнительно требует исследования и учета. Потери расхода азота состоят из потерь при транспортировании его к изолированному участку и заполнении изолированного участка.

Потери азота при его транспортировании. Сеть трубопроводов для транспортирования газообразного азота в горных выработках от поверхности к месту его истечения из трубопровода состоит из магистральных и участковых линий.

Время подачи азота может достигать 50-70 часов и более, в связи с чем трубы и их соединения подвергаются значительным нагрузкам и вибрациям, что может привести к их разгерметизации и утечкам азота.

Для расчета параметров подачи газообразного азота по трубопроводу с поверхности до аварийного участка применяется метод замены фактических длин приведенными. Под приведенной длиной понимается условная длина трубопровода диаметром 150 мм, которая обладает той же пропускной способностью, как и рассматриваемый трубопровод переменного диаметра.

Указанный диаметр (150 мм) является оптимальным по следующим причинам: наибольшая распространенность в горных выработках шахт; пропускная способность позволяет подать необходимый объем азота (до 150 м³/мин) на значительные расстояния (до 5000 м) при минимальном давлении (1,0 МПа), создаваемом в применяемой установке.

Для приведения различных диаметров трубопровода к необходимому применяют формулу Б.Н. Лобаева

$$p_n^2 - p_k^2 = 1100 \frac{\lambda}{d^5} q_{N_2}^2 l_p, \quad (1)$$

где p_n – абсолютное давление в начале расчетного участка трубопровода, МПа; p_k – абсолютное давление в конце расчетного участка трубопровода, МПа; d – внутренний диаметр

трубопровода, м; λ – коэффициент сопротивления трению; q_{N_2} – расход газообразного азота, м³/мин; l_p – расчетная длина участка трубопровода постоянного диаметра, м,

$$l_p = 1,2l_\phi, \quad (2)$$

где l_ϕ – фактическая длина участка трубопровода постоянного диаметра, м; 1,2 – коэффициент, учитывающий потери напора на местные сопротивления.

По данным работы [6] определены количество трубопроводов различной длины по шахтам Донбасса и потери расхода в них при транспортировании азота. Это позволило рассчитать коэффициент потерь азота $k_i^{\text{пот}}$, который зависит от длины трубопровода

$$k_i^{\text{пот}} = \begin{cases} 1,1, & \text{если } 0 < l_{np} < 400, \\ 1,2, & \text{если } 400 < l_{np} < 5000, \\ 1,3, & \text{если } l_{np} > 5000, \end{cases} \quad (3)$$

где l_{np} – приведенная длина, м, трубопровода диаметром 150 мм, эквивалентная длине трубопровода, состоящего из участков различных длин и диаметров, определяют по формуле

$$l_{np} = \sum_{i=1}^n l_i k_i, \quad (4)$$

где l_i – длина i -го участка трубопровода, м; k_i – коэффициент приведения трубы i -го участка трубопровода к трубе диаметром 150 мм.

Зная значение коэффициента $k_i^{\text{пот}}$ можно определить фактический расход азота на входе в аварийный изолированный участок $q_{N_2}^{(2)}$, м³/мин

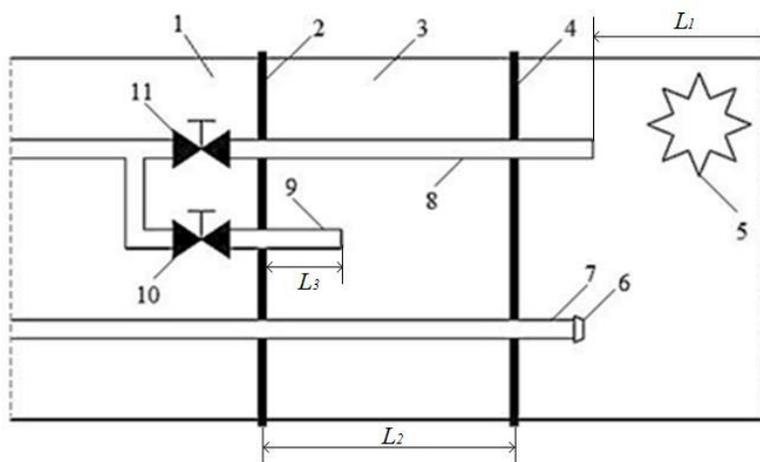
$$q_{N_2}^{(2)} = \frac{q_{N_2}^{(1)}}{k_i^{\text{пот}}}, \quad (5)$$

где $q_{N_2}^{(1)}$ – фактический выход азота из станции, м³/мин. Определяют по формуле

$$q_{N_2}^{(1)} = q_{N_2}^{(0)}(1 - \alpha_{O_2}), \quad (6)$$

где $q_{N_2}^{(0)}$ – производительность станции, м³/мин; α_{O_2} – остаточное содержание кислорода в перемате на выходе из станции, доли.

Для снижения потерь на утечки азота и притечки воздуха в месте выдачи газообразного азота в аварийную выработку (участок) сооружают шлюз-камеру, схема которой приведена на рис 1.



1 – тупиковая выработка; 2, 4 – изолирующие перемычки; 3 – шлюзовая камера; 5 – очаг пожара; 6 – закрытая крышка технологической трубы; 7 – технологическая труба; 8 – трубопровод; 9 – патрубок; 10, 11 – задвижки

Рис. 1. Технологическая схема шлюз-камеры при подаче газообразного азота в призабойное пространство аварийной тупиковой выработки

Расстояние от места выпуска газообразного азота из трубопровода до забоя L_1 , м, не должно превышать:

– при инертзации $L_1 \leq 20$ м;

– при тушении пожаров $L_1 \leq 1000$ м.

Расстояние между перемычками L_2 , м определяется по выражению:

$$L_2 = \frac{0,004 P_{\text{тр}} l_p d^2}{S_{\text{выр}}}, \quad (7)$$

где 0,004 – расчетно-эмпирический коэффициент, Па^{-1} ; $P_{\text{тр}}$ – давление газообразного азота в трубопроводе (разница выходного давления и общих потерь по трубопроводу), Па; $S_{\text{выр}}$ – площадь поперечного сечения аварийной выработки, м^2 .

Наличие шлюз-камеры между изолирующими перемычками 1 и 2 устраняет утечки газообразного азота из призабойного пространства и нежелательные притечки воздуха. Патрубок 6 (рис. 1) прокладывается за перемычку № 2 на расстояние, которое превышает половину длины камеры, $L_3 \geq 0,5 L_2$.

Заполнение азотом горных выработок сопровождается его поглощением, которое достигает значительных величин по сравнению с израсходованным количеством и требует учета, что отражено в работах [7, 8].

Потери на поглощение. В общем случае изменение объемной доли азота в изолируемой части выработки будет иметь вид

$$V \frac{dC_{N_2}}{d\tau} = \frac{q_{N_2}^{(0)}(1-\alpha_{O_2})}{k_{\text{пот}}} - q_{N_2}^{\text{II}}, \quad (8)$$

где V – изолируемый объем, м^3 ; C_{N_2} – объемная доля азота, %; τ – текущее время, мин; $q_{N_2}^{\text{II}}$ – интенсивность поглощения азота на поверхности угольного пласта и вмещающих пород, $\text{м}^3/\text{мин}$.

Интенсивность поглощения определяют уравнением сорбции без насыщения (закон Генри)

$$q_{N_2}^{\text{II}} = K_{\text{п}} C_{N_2}, \quad (9)$$

где $K_{\text{п}}$ – коэффициент пропорциональности, равный интенсивности поглощения при $C_{N_2}=1$, $\text{м}^3/\text{мин}$.

При начальном условии

$$C_{N_2}(\tau=0) = C_{N_2}^{(0)} = 0,79, \quad (10)$$

где $C_{N_2}^{(0)}$ – объемная доля азота в воздухе в начальный момент времени, %.

Интегрируя уравнение (6) при условии (7), находим выражение для времени подачи азота $\tau_{\text{п}}$, мин

$$\tau_{\text{п}} = \frac{1}{V} \frac{\ln\left(\frac{q_{N_2}^{(0)}}{k} (1-\alpha_{O_2}) - C_{N_2}^{(0)}\right)}{\ln\left(\frac{q_{N_2}^{(0)}}{k} (1-\alpha_{O_2}) - C_{N_2}\right)}. \quad (11)$$

Выводы. В связи с перечисленными свойствами азота рекомендуется применять его в следующих случаях:

– при ликвидации пожаров в коротких горизонтальных выработках (длиной до 50 м) или любой длины восстающих горных выработок в случае запуска за изоляционную перемычку;

– при ликвидации пожаров в горизонтальных тупиковых выработках любой длины при подаче азота в тупиковую часть по трубопроводу (например, через вентиляционную трубу);

– при изоляции пожарных участков любых объемов с различным углом залегания пластов с подачей азота через нижний штрек;

– при ликвидации пожаров в горных выработках участков и выработанных пространств, не поддающихся активному тушению путем снижения концентрации кислорода до 2 % и качественной изоляцией.

Следует отметить, что при снижении на пожарном участке концентрации кислорода до 12 % путем замещения азотом, метановоздушная смесь становится взрывобезопасной; при снижении концентрации кислорода до 8 % прекращается пламенное горение древесины, метана и других горючих материалов; при концентрации кислорода до 2 % и ниже

останавливаются все процессы горения (тление древесины, горение угольного пласта и т.п.). Поэтому важно знать реальный расход подаваемого азота, т.е. учитывать все возможные потери при транспортировании и заполнении.

Список литературы

1. Костенко В.К., Костенко Т.В. Совершенствование технологии инертизации воздуха в горных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № S2. – С. 198 – 204.
2. Портола В.А., Галсанов Н.Л. Оценка эффективности тушения скопления угля различными хладагентами // Вестник КузГТУ. – 2014. – № 2. – С. 181 – 185.
3. Ефимов В.И., Вибе Ю.В. Борьба с подземными пожарами путем инертизации выработанных пространств на шахтах ООО «Объединение «Прокопьевскуголь» // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2013. – № 2. – С. 29 – 41.
4. Голинько В.И., Алексеенко С.А., Смоланов И.Н. Аварийно-спасательные работы в шахтах. – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2011. – 480 с.
5. Управление газовым режимом на выемочных участках угольных шахт / Ю.В. Шувалов, В.Н. Бобровников, А.А. Эннс, А.П. Веселов // Безопасность труда в промышленности. – 2000. – № 6. – С. 42 – 43.
6. Коврижкин О.И. Методика расчета подачи газообразного азота в изолированную тупиковую горную выработку // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2021. – № 3(58). – С. 32 – 40.
7. Брюханов А.М. Формирование взрывоопасной среды в виде слоевых скоплений метана после внезапного выброса угольного массива и газа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 13. – С. 137 – 144.
8. Ермолаев А.М. Вопросы борьбы со слоевыми и местными скоплениями метана в тупиковых выработках // Вестник НЦ ВостНИИ. – Кемерово, 2018. – № 1. – С. 63 – 68.

УДК 622.279.34

СПОСОБ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ УВЛАЖЕНИЯ ПЛАСТА НА ИЗМЕНЕНИЯ ГАЗОКИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИРОДНОГО УГЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИННОВАЦИОННОГО ГОРНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДА

к.т.н. Плаксин М.С., Родин Р.И., Рябцев А.А., Альков В.И.
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
г. Кемерово, Россия

Аннотация. Особое внимание в статье уделяется современному представлению о формах существования метана в угле и значимости растворенного метана в процессах десорбции угля. Отмечается влияние увлажнения пласта на изменение его газокинетических свойств и приводится инновационный горно-экспериментальный метод отбора проб, который возможно применить для оценки влияния увлажнения пласта на изменения газокинетических свойств угольного пласта.

Ключевые слова: газокинетические свойства угольного пласта, твердый углегазовый раствор, десорбция газа, увлажнение угля, отбор проб.

Получение данных о газокинетических свойствах угольных пластов (газоносность, скорость газовыделения при разрушении, удельная энергия выделяющегося газа) является основой для расчетов при проектировании режимов проветриваний шахт и оценки параметров газодинамической безопасности. Актуальность задачи исследования газокинетических

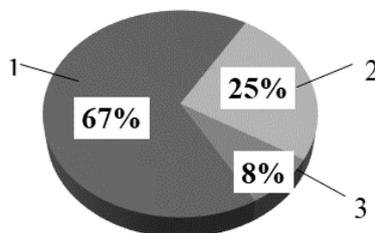
свойств значительно возросла при широком внедрении в практику горных работ высокопроизводительных технологий добычи угля. В динамично изменяющихся горнотехнологических условиях недостаточно оценки газокинетических свойств угольных пластов на основе геологоразведочных данных из-за весьма редкой сетки, пробуренных с поверхности скважин. В настоящее время набирают популярность работы, направленные на разработку новых методов по снижению влияния газового фактора на производительность труда при отработке пласта, а также количественной оценки влияния данных методов на изменение газокинетических характеристик пласта. Не менее важную роль в данном вопросе имеет применяемый подход и представления о видах состояния метана в угольном пласте. Отходят на второй план устаревшие представления о газоносности пласта как системе «сорбат-сорбент» [1], разрабатываются новые модели состояний многокомпонентного геоматериала, в т.ч. и весьма оригинальные: генерация метана в угольных пластах [2, 3], синтез радикалов при разрушении угля [4], кристаллогидратная форма существования метана [5].

Исследования процессов десорбции [6-9] позволяют создавать способы управления метановыделением угольных пластов с целью повышения безопасности ведения горных работ в условиях высокопроизводительных и высокогазоносных выемочных участков угольных шахт. На практике такие исследования позволяют рассчитывать и оценивать эффективность разрабатываемых дегазационных мероприятий, а также определять газовый потенциал подготавливаемого к отработке месторождения (природную газоносность угля).

Структура газоносности угольного пласта. Ископаемый уголь является сложным для изучения объектом, и выполнение оценки его газоносности, а также газокинетических характеристик, исходя только из теории сорбции, может привести к значительной ошибке, особенно если объектом исследования являются высокогазоносные угольные пласты. Необходимо учитывать состояние метана в угольном пласте, находящегося в условиях всестороннего сжатия, а снижение газоносности пласта (газовыделение) определять в зависимости от снижения напряжений в массиве.

Эттингер И.Л., обсуждая в работе [10] вопрос о том, в каком состоянии метан находится в угольных пластах и правомочно ли понятие «углеметановый раствор», указывал: «Представление о твердых растворах метана в угольных пластах – это не терминологическая замена слова «абсорбция» на слова «твердый раствор», так как физическая структура твердого «углеметанового раствора» включает в себя и характеристику элементов структуры, и их морфологию, т.е. взаимное расположение, и, наконец, характеристику механизма движения частиц растворенного вещества».

Согласно гипотезе твердого углегазового раствора [11] и на основании закона сохранения массы газа, природная газоносность пласта определяется как сумма сорбированного, свободного и растворенного метана (рис.1).



1 – растворённый; 2 – сорбированный; 3 – свободный

Рис. 1. Структура газоносности угольного пласта по формам существования метана на глубине 300 м Чертинского месторождения Кузбасса

Содержание растворенного метана в пласте определяется по выражению

$$x_p = \frac{\sigma_d A (x - x_s - x_c)}{\sigma_0 (A - x_s)},$$

где x_p – содержание растворенного метана, м³/т; x – природная газоносность пласта, м³/т; x_s – сорбционная метаноёмкость угля, м³/т; x_c – содержание свободного метана, м³/т; σ_d –

действующие напряжения в пласте, МПа [12]; σ_0 – напряжения в пласте (определяются как сумма литологического и гидростатического давления), МПа; A – предельная газоносность пласта, м³/т.

Экспериментальная оценка влияния водонасыщения на газокинетические характеристики угля. В работе [13] описан эксперимент, выполненный с пробами природного угля, результаты которого подтверждают отличие процессов десорбции для сухого и увлажненного угля. При этом выводы и интерпретация результатов автором недостаточно раскрыты. Однако же авторами данной статьи представлена собственная интерпретация результатов эксперимента с точки зрения имеющихся современных научных знаний о системе «уголь-газ».

Три пробы угля по 0,65 кг были помещены в герметичные контейнеры. В первом контейнере уголь оставался сухим (природная влажность пробы), во второй контейнер была залита вода, а в третьем контейнере уголь увлажнялся под давлением 5 атм в течение суток. Далее колбы были подключены к измерительным пипеткам и при температуре примерно 18 °С начались замеры метановыделения из угля. Замеры выполнялись до прекращения выделения метана.

Результаты эксперимента представлены на рис. 2-3.

На рис. 2 отражено, насколько жидкость блокирует процесс десорбции газа из пробы увлажненного угля. Скорость газовой выделении из сухого угля даже на начальном этапе более чем в 4 раза превышает газовой выделении из влажного угля, далее отношение скоростей только увеличивается. Срок «активного» газоистощения из сухого угля более чем в 2 раза превышает газовой выделении из влажного угля.

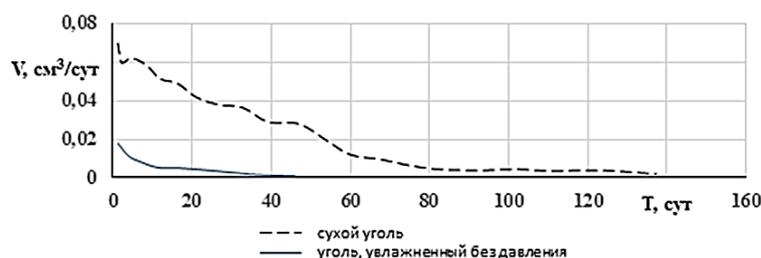


Рис. 2. Изменение скорости газоотдачи из проб угля

Влияние процесса нагнетания давления воды в пробу под давлением 5 атм оказывает ощутимое влияние на процесс газоистощения по сравнению с увлажненным углем без давления (рис. 3), но менее значительное по сравнению с газовой выделении из проб увлажненного и сухого угля (рис. 2).

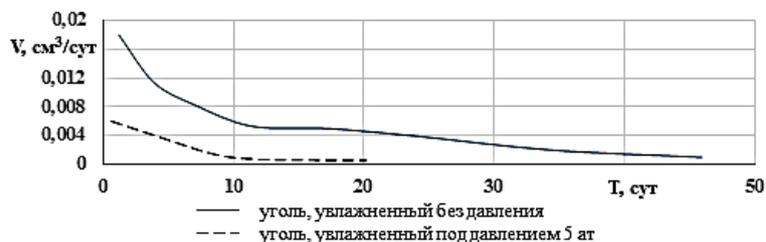
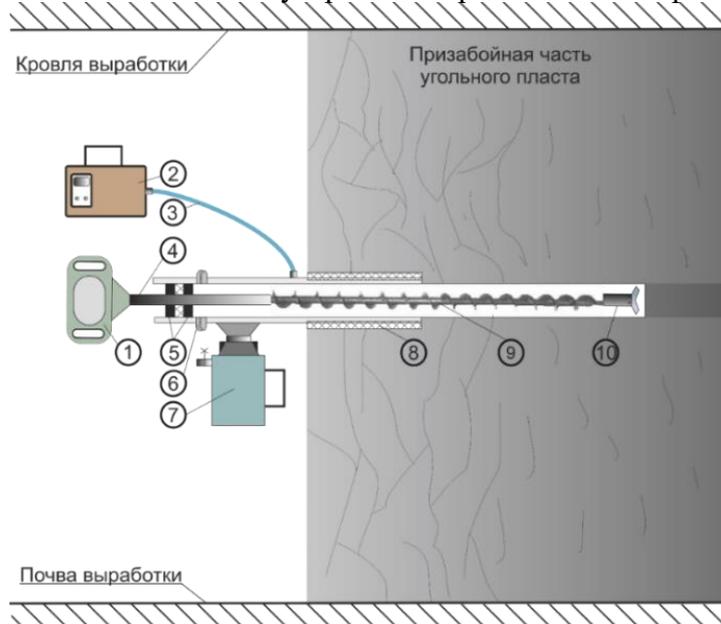


Рис. 3. Изменение скорости газоотдачи из проб увлажнённого угля

Влияние, оказываемое нагнетаемой в уголь водой на газовой выделении из него, бесспорно, другое дело, количественные характеристики. Вода, нагнетаемая под высоким давлением в пласт, приводит к купированию ультра- и микропор и блокировке абсорбированного (растворенного) метана в угле, что в теории позволяет значительную часть метана транспортировать в составе отбитого угля за пределы выемочного участка.

Способ оценки изменения газокинетических характеристик угля в призабойной части пласта. Авторами настоящей статьи разработано и изготовлено устройство для отбора проб угольного штыба в изолированном (от атмосферы выработки) режиме, к возможностям которого можно отнести оценку эффективности мероприятий по увлажнению угольного пласта. Принципиальная схема устройства представлена на рис.4.



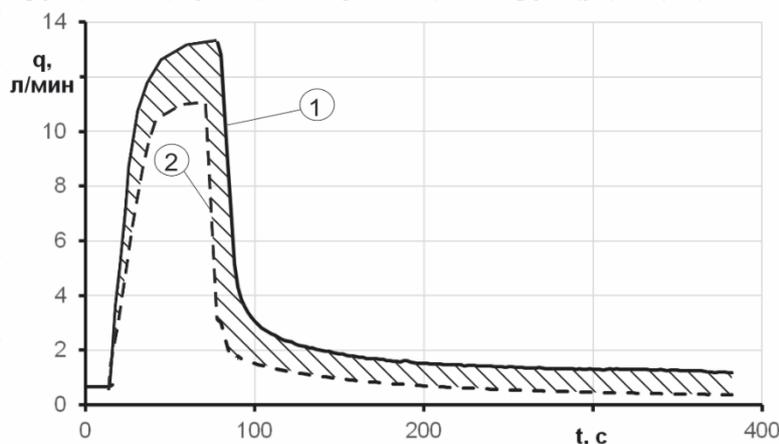
- 1 – сверло бурильное; 2 – расходомер; 3 – пневмомагистраль; 4 – литая штанга;
 5 – уплотнитель; 6 – быстроразъемное соединение; 7 – штыбоприемник (колба);
 8 – уплотнитель; 9 – штанга буровая; 10 – забурник

Рис. 4. Принципиальная схема устройства для оперативного измерения газоносности угля

Отбор проб для определения газокинетических свойств пласта выполняется при бурении шпуров в забой проводимой подготовительной выработки с применением устройства для оперативного измерения газоносности угля.

Отбор проб выполняется при поинтервальном бурении шпуров через каждый метр с отбором и герметизацией угольных проб в специально разработанные штыбоприемники, а также с фиксацией параметров газовыделения во время бурения.

Результат измерения может быть представлен виде графика изменения расхода газа, замеренного при бурении интервала контрольного шпура (рис. 5).



- 1 – газовыделение по сухому углю; 2 – газовыделение по влажному углю

Рис. 5. Изменение скорости газовыделения с метрового интервала шпура с момента начала бурения (время бурения не более 60 секунд)

Процесс измерения газовыделения можно условно разделить на 3 этапа: этап бурения (не более 60 секунд); этап с момента окончания бурения до герметизации (этап активного газоистощения со стенок шпура и штофа); этап после герметизации – ступенчатые выпуски метана в лабораторных условиях. Эффективность увлажнения пласта в призабойной зоне количественно оценивается по площади заштрихованного участка на рис. 5.

Таким образом, планируется, что данный способ позволит оценить процесс газовыделения из угля под принципиально новым углом зрения и дополнить научный задел в области исследования газокинетических свойств природного угля.

Вывод. Представленный способ на основе инновационного горно-экспериментального метода отбора проб угля в его природном состоянии позволит количественно оценить эффективность мероприятий по увлажнению в призабойной части угольного пласта.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-20075, <https://rscf.ru/project/22-27-20075/> и гранта Кемеровской области – Кузбасса.

Список литературы

1. Эттингер И.Л. Физическая химия газоносного угольного пласта. – М.: Наука, 1981. – 104 с.
2. Булат А.Ф., Минеев С.П., Пруткова А.А. Генерирование сорбированного метана, обусловленное релаксационным механизмом деформирования молекулярной структуры угля // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – № 1. – 2016. – С. 91 – 99.
3. Бобин В.А. Структурная трансформация газонасыщенного угольного вещества: Дальнейшее развитие физической химии газоносного угольного пласта. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014.
4. Малинникова О.Н., Фейт Г.Н. Эффект образования метана и дополнительной сорбции при разрушении газонасыщенного угля в условиях объемного напряженного состояния // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – Вып. 8. – С. 196 – 200.
5. Метан и выбросоопасность угольных пластов / С.А. Шепелева, В.В. Дырдин, Т.Л. Ким [и др.]. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2015. – 180 с.
6. Эмиссия метана при добыче угля в России / О.В. Тайлаков, А.Н. Кормин, М.Л. Гитарский, В.О. Тайлаков // Институт прикладной геофизики: сборник. – Москва, 2009. – С. 216 – 227.
7. Козырева Е.Н., Шинкевич М.В. Особенности газогемеханических процессов на выемочном участке шахты // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2010. – № 2. – С. 28 – 35.
8. Усовершенствованная технология предварительной дегазации угольных пластов на основе их гидроразрыва / Е.В. Мазаник, А.В. Понизов, А.П. Садов, С.В. Сластунов // Знание. – 2016. – № 5-1(34). – С.111 – 116.
9. Deformation and gas flow characteristics of coal-like materials under triaxial stress conditions / W. Gang, W. Wenrui, W. Pengfei [et al.] // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2017. – V. 91. – P. 72 – 80.
10. Эттингер И.Л. Растворы метана в угольных пластах // Химия твердого топлива. – 1984. – № 4. – С. 28 – 35.
11. Свойства органического вещества угля образовывать с газами метастабильные однофазные системы по типу твердых растворов / А.Д. Алексеев, А.Т. Айруни, И.В. Зверев [и др.] // Научное открытие: диплом № 9. – М.: РАЕН, – 1994. – 3 с.
12. Шинкевич М.В. Газовыделение из отработываемого пласта с учётом геомеханических процессов во вмещающем массиве // Горный информационно – аналитический бюллетень. – 2013. – Отд. вып. № 6. – С. 278 – 285.

13. Хашин В.Н. Увлажнение угольных пластов на шахтах Прокопьевского месторождения Кузбасса // Методы нагнетания воды в угольные пласты: сб. труд. всесоюз. науч.-техн. совещ., 3-4 июля 1963 г., Кемерово. – М.: Недра, 1965. – С. 122 – 129.

УДК 622.868:622.81:004.942

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УДАРНОЙ ВОЗДУШНОЙ ВОЛНЫ ПО ВЫРАБОТКАМ И ЕЁ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ИНЖЕНЕРНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ

¹к.т.н. Говорухин Ю.М., ^{1,2}д.т.н. Домрачев А.Н., ¹к.т.н. Криволапов В.Г.,
^{1,3}д.т.н. Палеев Д.Ю.

1 – Национальный горноспасательный центр, г. Новокузнецк, Россия

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

3 – Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия

Аннотация. Выполнено газодинамическое моделирование процесса распространения ударной воздушной волны по горным выработкам. Численное моделирование проведено для трёхмерной и одномерной постановки задачи. Получены значения давлений во фронте ударной воздушной волны на расстоянии равном пяти длинам исходной зоны загорания при взрывах газозвушной смеси и угольной пыли. Подтверждена работоспособность формулы Крюссара – Измайлова для определения давлений отражения волны от перемычки для условий давлений, развиваемых при взрывах в подземных выработках шахт.

Ключевые слова: горные выработки, численное моделирование, взрыв газозвушной смеси и угольной пыли, ударная воздушная волна, изолирующие взрывоустойчивые перемычки, избыточное давление, взаимодействие.

Введение. При изоляции пожарного участка из-за нарушения проветривания существует опасность формирования зон взрывоопасных скоплений рудничных газов вблизи источника высокой температуры [1, 6, 10, 15]. При взрыве газозвушной смеси (далее – ГВС) и угольной пыли формируется фронт ударной воздушной волны (волны сжатия, далее – УВВ). С целью определения оптимальных параметров изолирующих взрывоустойчивых перемычек необходимо знать величину избыточного давления во фронте УВВ, подходящей к ним, а также величину давления отражения от них. В связи с этим выполнено моделирование соответствующих газодинамических процессов.

Математическая постановка задачи. Для проведения исследования использованы: открытая C++ библиотека OpenFOAM (The OpenFOAM Foundation Ltd.) [5-8, 12, 13, 21, 22], программа «Ударная волна» [1, 9, 15, 16], а также аналитический метод, разработанный для проектирования защитных сооружений гражданской обороны в подземных горных выработках [2, 14, 20], и ориентированный на расчёт максимального избыточного давления, оказываемого УВВ затекания на инженерные сооружения. Аналитический метод адаптирован А.М. Чеховских и В.М. Плотниковым по результатам экспериментальных исследований для условий взрывов ГВС и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт [3, 4, 18, 19].

При использовании пакета OpenFOAM решается следующая система трёхмерных осреднённых уравнений для сжимаемого газа:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i + \bar{\rho} \widetilde{u_j' u_i'}) + \delta_{ij} \bar{p} - \bar{\tau}_{ji} = 0, \quad (2)$$

$$\bar{\tau}_{ji} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \mu \frac{\partial u_m}{\partial x_m}, \quad (3)$$

$$\bar{\tau}_{t,ij} \equiv -\bar{\rho} \widetilde{u_j'' u_i''} = \mu_t \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \mu_t \frac{\partial \tilde{u}_m}{\partial x_m} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \bar{\rho} k, \quad (4)$$

$$k = \frac{1}{2} \widetilde{u_i'' u_i''}, \quad \mu_t = C_\mu \bar{\rho} \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{E}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{H} + \bar{\rho} \widetilde{u_j'' H''} + \bar{q}_j - \tilde{u}_i \bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} u_i'' - \bar{\rho} u_i'' (\widetilde{\tau_{ij}/\rho})'' \right] = 0, \quad (6)$$

$$\bar{\rho} \widetilde{u_j'' H''} = \bar{\rho} \widetilde{u_j'' h''} + \bar{\rho} \tilde{u}_k \widetilde{u_j'' u_k''} + \frac{1}{2} \bar{\rho} \widetilde{u_j'' u_k''^2}, \quad \frac{1}{2} \bar{\rho} \widetilde{u_j'' u_k''^2} = -\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j}, \quad (7)$$

$$\widetilde{u_j'' h''} = -\frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} = -\frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} = -\lambda_t \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} = q_{t,j}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - [1 + \varphi(M_t)] \bar{\rho} \varepsilon, \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\bar{\rho} \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} + \mu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \varepsilon), \quad (10)$$

$$\tilde{E} = \tilde{e} + \frac{\tilde{u}_t^2}{2}, \quad \bar{q}_j = -\lambda \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j}, \quad \bar{p} = \bar{\rho} R_\gamma \tilde{T}, \quad R_\gamma = R/M, \quad (11)$$

где $\bar{\rho}$ – осреднённая плотность воздуха, кг/м³; t – время, с; \tilde{u}_i – средние массовые значения компонент вектора скорости по соответствующим осям декартовой системы координат (далее – ДСК), м/с (для $i, j, k, m = 1, 2, 3$); u_i'' – пульсационная составляющая вектора скорости по соответствующим осям ДСК, м/с; δ_{ij} – символ Кронекера; \bar{p} – осреднённое давление среды, Па; $\bar{\tau}_{ij}$ – осреднённый тензор вязких напряжений, Па; $\bar{\tau}_{t,ij}$ – тензор напряжений Рейнольдса; μ – молекулярная динамическая вязкость воздуха, Па·с; μ_t – турбулентная динамическая вязкость воздуха, Па·с; k – кинетическая энергия турбулентности, м²/с²; ε – скорость диссипации турбулентной кинетической энергии, м²/с³; \tilde{E} – среднее массовое значение полной энергии газа, Дж; \tilde{H} и H'' – среднее массовое значение полной энтальпии и её пульсационная составляющая; \bar{q}_j – осреднённый тепловой поток, Вт; \tilde{h} и h'' – среднее массовое значение энтальпии и её пульсационная составляющая, Дж; Pr_t – турбулентное число Прандтля; \tilde{T} – среднее массовое значение температуры среды, К; $q_{t,j}$ – дополнительный (турбулентный) тепловой поток, Вт; P_k – генерация турбулентной кинетической энергии; $\varphi(M_t)$ – функция, учитывающая влияние сжимаемости газа; $C_\mu=0,09$, $\sigma_k=1$, $\sigma_\varepsilon=1,3$, $C_{\varepsilon 1}=1,44$, $C_{\varepsilon 2}=1,92$ – числовые константы; \tilde{e} – осреднённая внутренняя энергия газа, Дж; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); R_γ – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг·К); R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К); M – молекулярная масса, кг/кмоль; c_v – теплоёмкость при постоянной объёме, Дж/К; c_p – теплоёмкость при постоянном давлении, Дж/К; γ – показатель адиабаты.

Применение данной системы уравнений обусловлено сложностью ударно-волновых процессов, протекающих в выработках, в т. ч. при взаимодействии с перемычками, а также необходимостью учёта турбулентности и шероховатости стенок с точки зрения диссипации энергии. Процесс рассматривается адиабатическим. Интегрирование дифференциальных уравнений основывается на методе контрольных объёмов (далее – метод МКО). Для связи уравнений по скорости и давлению применён алгоритм PIMPLE (комбинация алгоритмов PISO и SIMPLE метода Патанкара [17]). При работе с OpenFOAM C++ библиотекой и обработке результатов моделирования использованы GNU/Linux, командная оболочка bash, Vim, GCC, Xfig и пакет LibreOffice Calc.

При использовании программы «Ударная волна» шахта представляется как пространственная сеть протяжённых выработок с сопряжениями, имеющими координаты x , y , z . Сеть выработок интерпретируется как пространственная система каналов с N прямолинейными участками, концы которых сопряжены с другими каналами, участками изменения конфигурации и сечения. При этом на прямолинейном участке выработки для расчёта пространства УВВ используются одномерные уравнения газовой динамики, в которых учтены процессы силового и теплового взаимодействия газового потока со стенками:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho S) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u S) = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f S) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_f u S) = 0, \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u S) + \frac{\partial}{\partial x}[(\rho u^2 + p)S] = -\tau_{тр}\Pi + p \frac{\partial S}{\partial x}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E S) + \frac{\partial}{\partial x}[(\rho E u + p u)S] = q\Pi, \quad (15)$$

$$E = c_v T + \frac{u^2}{2}, \quad p = \rho R T, \quad (16)$$

$$\tau_{тр} = \frac{1}{8} c_f \rho u^2, \quad c_f = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}}, \quad (17)$$

$$q = \alpha(T_s - T), \quad Nu = 0,022 Re^{0,8} Pr^{0,47} B, \quad Pr = \frac{\mu c}{\lambda_g}, \quad Nu = \frac{\alpha D_{эКВ}}{\lambda_g}, \quad (18)$$

$$B = \begin{cases} \exp\left(\frac{(l/\delta)_{opt}}{(l/\delta)}\right), & \frac{l}{\delta} > \left(\frac{l}{\delta}\right)_{opt} \\ \exp\left(\frac{(l/\delta)}{(l/\delta)_{opt}}\right), & \frac{l}{\delta} < \left(\frac{l}{\delta}\right)_{opt} \end{cases} \quad \left(\frac{l}{\delta}\right)_{opt} = 13, \quad (19)$$

где t – время, с; x – координата, м; ρ – плотность воздуха, кг/м³; ρ_f – плотность продуктов взрыва, кг/м³; p – давление, Па; T – температура, К; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К); u – скорость, м/с; E – полная энергия, Дж/кг; S – площадь поперечного сечения выработки, м²; Π – её периметр, м; $\tau_{тр}$ – сила трения о стенки выработки, Па/м; q – тепловой поток в стенки выработки, Вт; c_v – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К); c_f – коэффициент сопротивления, м⁻¹; Re – число Рейнольдса; Nu – число Нуссельта; Pr – число Прандтля; λ_g – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К); c – теплоёмкость, Дж/(кг·К); B – поправочный коэффициент, который учитывает влияние шероховатости стенок на процесс теплообмена; l – характерное расстояние между выступами шероховатости, м; δ – характерная величина выступа шероховатости, м.

Трёхмерные уравнения газовой динамики при движении потока на сопряжениях:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (20)$$

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_f u_i) = 0, \quad (21)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j + p \delta_{ij}) = 0, \quad (22)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i E + u_i p) = 0, \quad (23)$$

$$E = c_v T + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2}, \quad p = \rho R T, \quad (24)$$

где u_i – компоненты вектора скорости, м/с.

Уравнения аналитического метода для проектирования защитных сооружений гражданской обороны в подземных горных выработках:

$$\Delta P_x = \Delta P_{фн} e^{-K_3 \frac{x}{R_{гидр}}}, \quad (25)$$

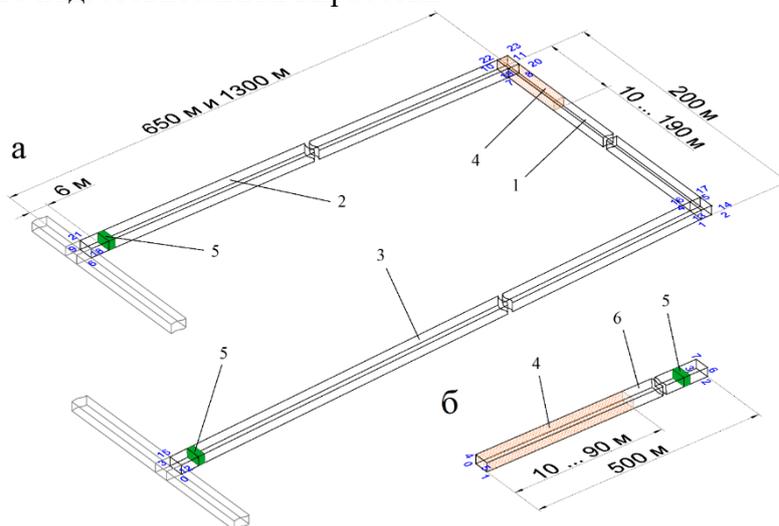
$$\Delta P_{пр} = K_{зат} \Delta P_{н}, \quad (26)$$

$$\Delta P_{отр} = 2\Delta P_{ф} + 6\Delta P_{ф}^2 / (\Delta P_{ф} + 7,2 \cdot P_0), \quad (27)$$

где ΔP_x – затухание избыточного давления во фронте УВВ на прямолинейном участке выработки, МПа; $\Delta P_{фн}$ – избыточное давление в месте отрыва УВВ от продуктов взрыва на прямолинейном участке выработки, либо в начальном её сечении после местного сопротивления, МПа; K_3 – коэффициент затухания, зависящий от коэффициента аэродинамического сопротивления выработки; x – расстояние от зоны отрыва УВВ от продуктов взрыва, либо начала выработки до поворота, её сужения и других изменений, м; $R_{гидр}$ – гидравлический радиус выработки, м; $\Delta P_{пр}$ – избыточное давление УВВ, после прохождения местного сопротивления, МПа; $K_{зат}$ – коэффициент затекания, учитывающий ослабление или увеличение интенсивности УВВ после прохождения сопряжений и углов поворота выработок; $\Delta P_{н}$ – начальное избыточное давление УВВ перед местным сопротивлением, МПа; $\Delta P_{отр}$ – давление отражения УВВ (максимальная нагрузка) при расположении преграды

перпендикулярно направлению её распространению, МПа; ΔP_{ϕ} – избыточное давление во фронте УВВ, подходящей к перемычке, МПа; P_0 – атмосферное давление, МПа.

Геометрия расчётной области, начальные и граничные условия. Для исследования процессов распространения УВВ от зоны взрыва и её взаимодействия с перемычками создано три базовых модели. Две модели выемочного участка с протяжённостью оконтуривающих штреков 650 м (далее – модель 1) и 1300 м (далее – модель 2) и одна – подготовительной выработки (длина – 500 м, далее – модель 3), приведённые на рис. 1. Модели предполагают возведение перемычек на устьях оконтуривающих выемочный столб горных выработок и на устье подготовительной выработки.



- 1 – очистной забой; 2 и 3 – вентиляционный и конвейерный штреки; 4 – зона взрыва (исходная зона загазования); 5 – изолирующие взрывоустойчивые перемычки;
б – подготовительная выработка

Рис. 1. Базовые модели выемочного участка (а) и подготовительной выработки (б), созданные для исследования ударно-волновых процессов

Модели выемочного участка составлены из 5, а подготовительной выработки – 1 блочного суперэлемента, каждый из которых декомпозируется на гексаэдры. Для снижения стоимости вычислений использованы приёмы оптимизации геометрии расчётной области, что не снижает адекватности результатов, т. к. они не имеют влияния на те свойства объекта исследования, которые исследуются. Числами синего цвета обозначены вершины суперэлементов. Максимальный размер ячейки – 0,25 м. Глубина декомпозиции расчётных областей, соответственно, 1422960 (модель 1), 2670960 (модель 2) и 140000 (модель 3) шестигранников. Оранжевым цветом показана зона взрыва (исходная зона загазования).

В табл. 1 приведены основные геометрические параметры моделей и аэродинамические характеристики выработок.

Для программы «Ударная волна» модель построена по соответствующим осевым линиям выработок, глубина декомпозиции расчётной области составляет 4 м. Численное моделирование методом МКО и в программе «Ударная волна» проведено для условий, указанных в табл. 2.

Настройка моделей в части начальных условий выполнена на основе результатов исследований, полученных в СПбГПУ (д.ф.-м.н. Л.Г. Лойцянский), а также в РосНИИГД, ФИЦ УУХ СО РАН, НИ ТГУ (д.т.н. Д.Ю. Палеев, д.ф.-м.н. И.М. Васенин, д.ф.-м.н. Э.Р. Шрагер, д.ф.-м.н. А.Ю. Крайнов и др.) [1, 11, 15]. Исходное давление в зоне взрыва определено для условий взрыва ГВС и угольной пыли.

Протяжённость зоны загазования (табл. 2) выбрана исходя из условия $V_3 \geq 5V_0$ (где V_3 – зона действия УВВ, оторвавшейся от продуктов взрыва; V_0 – длина исходной зоны загазования) [3, 4, 14, 18, 19]. Таким образом, в выработке до места установки инженерного сооружения формируется фронт УВВ.

Таблица 1

Геометрические параметры моделей и аэродинамические характеристики

| № п/п | Наименование параметра | Обозначение | Ед. изм. | Значение | | |
|-------|--|---------------------|----------------------------------|-------------------|------------|----------------------------|
| | | | | выемочный участок | | подготовительная выработка |
| | | | | очистной забой | выработки | |
| 1 | Ширина | w | м | 3,5 | 5,0 | 5,0 |
| 2 | Высота | h | м | 3,0 | 3,0 | 3,5 |
| 3 | Площадь сечения | S | м ² | 10,5 | 15,0 | 17,5 |
| 4 | Периметр | P | м | 13,0 | 16,0 | 17,0 |
| 5 | Длина | $l_{2,6}$ | м | 200 | 650 и 1300 | 500 |
| 6 | Относительная шероховатость стенок выработок | $\varepsilon_{ш}$ | - | 0,03095 | 0,02667 | 0,02429 |
| 7 | Коэффициент аэродинамического сопротивления | $\alpha \cdot 10^3$ | Н·с ² /м ⁴ | 8,6976 | 8,1737 | 7,8806 |
| 8 | Расстояние от устья горной выработки до места возведения перемычки | $l_{п}$ | м | 6,0 | | |
| 9 | Толщина перемычки | $w_{п}$ | м | 2,0 | | |

Таблица 2

Начальные условия, для которых выполнено моделирование

| Модель 1 | | | Модель 2 | | | Модель 3 | | |
|----------|-----------|------------------------|----------|-----------|------------------------|----------|-----------|------------------------|
| $L, м$ | \bar{L} | $\Delta P_{ф.зв}, МПа$ | $L, м$ | \bar{L} | $\Delta P_{ф.зв}, МПа$ | $L, м$ | \bar{L} | $\Delta P_{ф.зв}, МПа$ |
| 10 | 3,10 | 0,22 | 10 | 3,10 | 0,22 | 10 | 2,43 | 0,21 |
| 30 | 9,3 | 0,33 | 30 | 9,3 | 0,33 | 30 | 7,29 | 0,29 |
| 50 | 15,5 | 0,45 | 50 | 15,5 | 0,45 | 50 | 12,14 | 0,38 |
| 70 | 21,7 | 0,58 | 70 | 21,7 | 0,58 | 70 | 17,00 | 0,48 |
| 90 | 27,9 | 0,71 | 90 | 27,9 | 0,71 | 90 | 21,86 | 0,58 |
| 110 | 34,1 | 0,86 | 110 | 34,1 | 0,86 | | | |
| | | | 130 | 40,2 | 1,02 | | | |
| | | | 150 | 46,4 | 1,20 | | | |
| | | | 170 | 52,6 | 1,38 | | | |
| | | | 190 | 58,8 | 1,58 | | | |

Примечание: L – длина зоны загазования, м; \bar{L} – приведённая длина подземной горной выработки; $\Delta P_{ф.зв}$ – избыточное давление в зоне взрыва, МПа.

Как видно из рис. 1, зона загазования задана от сопряжения очистного забоя с вентиляционным штреком и её протяжённость менее длины очистного забоя (модели 1 и 2), а также от забоя подготовительной выработки (модель 3). Для моделей 1 и 2 в программе «Ударная волна» зона загазования не включает сопряжение выработок ввиду специфики построения топологии шахтной вентиляционной сети (далее – ШВС).

Граничные условия поставлены в зависимости геометрических параметров выработок и их взаимного расположения (табл. 1, рис. 1) [1, 15]. Если граница стенка или изолирующая взрывоустойчивая перемычка, то относительно скорости используются условия не протекания и прилипания: $\partial u_i / \partial n = 0, u_i = 0$. Если выработка выходит на поверхность, на этой границе предполагается постоянство давления, плотности, температуры и скорости потока: $p = p_{атм}, \rho = \rho_{атм}, T = T_{атм}, \partial u_i / \partial x_i = 0$. Если выработка граничит с областью ветвления, в качестве граничных условий используются значения потоков массы, импульса и энергии,

определяемые из решения задачи о распаде произвольного разрыва в параметрах газа: $M = M_1, I = I_1, E = E_1$.

Обработка результатов моделирования и выводы. Динамика избыточного давления во фронте ударной воздушной волны на прямолинейных участках подземных горных выработок.

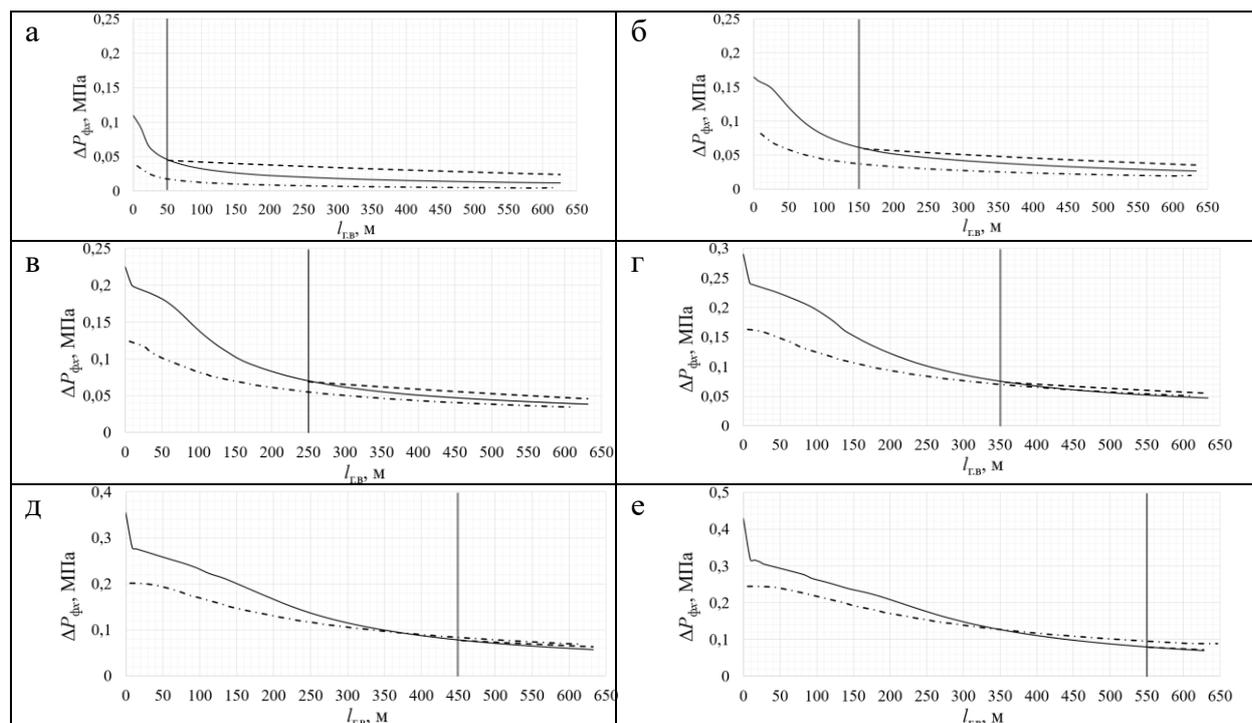
На рис. 2-4 приведены результаты моделирования в части динамики избыточного давления во фронте УВВ $\Delta P_{фв}$, МПа, вдоль вентиляционного штрека (модели 1 и 2), а также вдоль подготовительной выработки (модель 3). На приведённых рисунках использованы следующие обозначения результатов решения газодинамических задач:

сплошная линия – полученные методом МКО с использованием C++ библиотеки (трёхмерная постановка);

штрихпунктирная линия – полученные в программе «Ударная волна» (одномерная постановка);

пунктирная линия – расчёт динамики избыточного давления по аналитической методике, предложенной для проектирования защитных сооружений гражданской обороны (формула 25). В качестве начального избыточного давления $\Delta P_{фн}$ использовано давление, полученное в ходе газодинамического расчёта методом МКО;

двойная сплошная вертикальная линия – зона отрыва УВВ от продуктов взрыва по (на расстоянии от сопряжения с очистным забоем равном пяти длинам исходной зоны загазования $5V_0$).

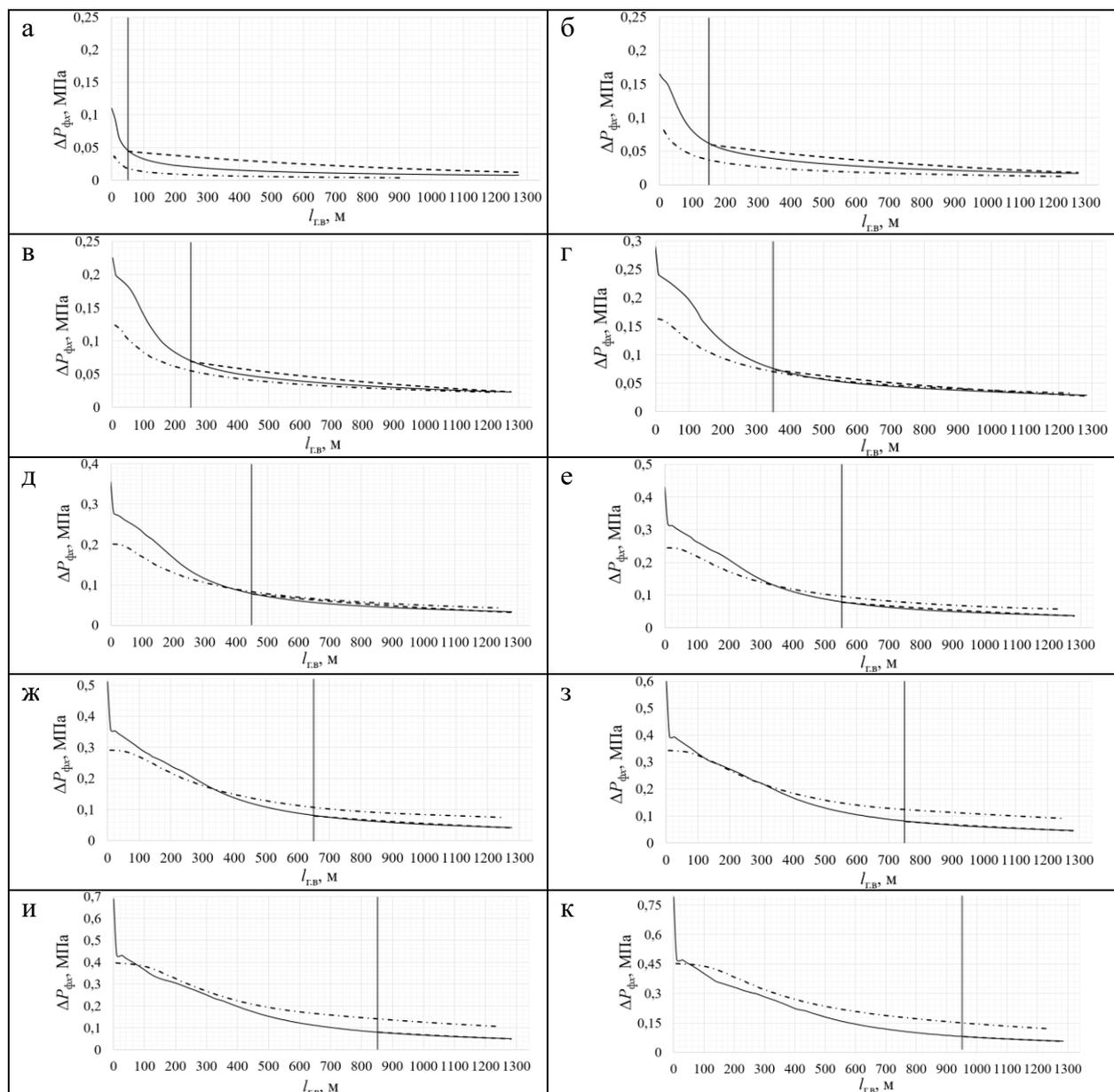


а – $\Delta P_{ф.зв} = 0,22$ МПа; б – $\Delta P_{ф.зв} = 0,33$ МПа; в – $\Delta P_{ф.зв} = 0,45$ МПа; г – $\Delta P_{ф.зв} = 0,58$ МПа; д – $\Delta P_{ф.зв} = 0,71$ МПа; е – $\Delta P_{ф.зв} = 0,86$ МПа

Рис. 2. Динамика избыточного давления во фронте УВВ на прямолинейном участке вентиляционного штрека (модель 1)

Как видно из приведённых рис. 2-4 результаты газодинамического расчёта в программе «Ударная волна» и с использованием C++ библиотеки OpenFOAM на участках $V_3 \geq 5V_0$ сопоставимы между собой, а аналитический метод гражданской обороны аналогично характеризует затухание УВВ. Для моделей 1 и 2 различие между результатами на начальном участке вентиляционного штрека обусловлено спецификой построения топологии ШВС и невозможностью использования сопряжений в качестве частей зоны загазования в

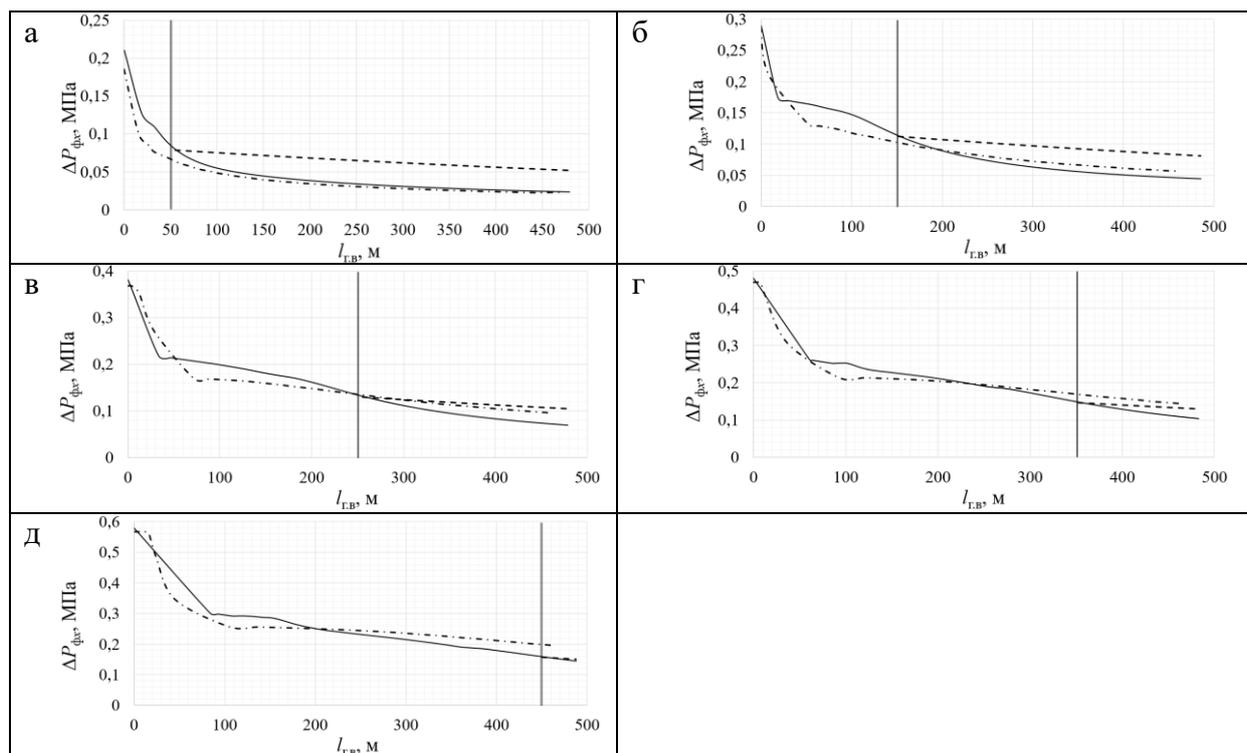
программе «Ударная волна» и наличием дополнительных эффектов отражения при протекании сложного ударно волнового процесса в сопряжении.



а – $\Delta P_{ф.зв} = 0,22$ МПа; б – $\Delta P_{ф.зв} = 0,33$ МПа; в – $\Delta P_{ф.зв} = 0,45$ МПа; г – $\Delta P_{ф.зв} = 0,58$ МПа;
 д – $\Delta P_{ф.зв} = 0,71$ МПа; е – $\Delta P_{ф.зв} = 0,86$ МПа ж – $\Delta P_{ф.зв} = 1,02$ МПа; з – $\Delta P_{ф.зв} = 1,20$ МПа;
 и – $\Delta P_{ф.зв} = 1,38$ МПа; к – $\Delta P_{ф.зв} = 1,58$ МПа

Рис. 3. Динамика избыточного давления во фронте УВВ на прямолинейном участке вентиляционного штрека (модель 2)

При небольших зонах загазования и, соответственно, исходных избыточных давлений, возникающих в результате процесса взрыва, значения давлений в зоне сформированной УВВ, полученных с использованием C++ библиотеки, превышают значения давлений, полученных в программе «Ударная волна». При повышении избыточного давления в исходной зоне загазования картина меняется на противоположную. Для модели 3, для построения которой не использовались какие-либо дополнительные сопряжения отмечается более точная сопоставимость результатов трёхмерного и одномерного моделирования.



а – $\Delta P_{ф.зв} = 0,21$ МПа; б – $\Delta P_{ф.зв} = 0,29$ МПа; в – $\Delta P_{ф.зв} = 0,38$ МПа; г – $\Delta P_{ф.зв} = 0,48$ МПа;
 д – $\Delta P_{ф.зв} = 0,58$ МПа

Рис. 4. Динамика избыточного давления во фронте УВВ на прямолинейном участке подготовительной выработки (модель 3)

Зона отрыва характеризуется окончанием процессов горения, формированием УВВ и её отрывом от продуктов взрыва. С данной зоны начинается физический процесс затухания УВВ, по мере которого она переходит в волну сжатия. В связи с этим важным является определение начальных давлений в этой зоне. В табл. 3 и 4 приведены значения полученных избыточных давлений УВВ в зоне отрыва (а – результаты, полученные методом МКО для трёхмерной постановки задачи, б – в программе «Ударная волна»), а на рис. 5 соответствующие им графики.

Таблица 3

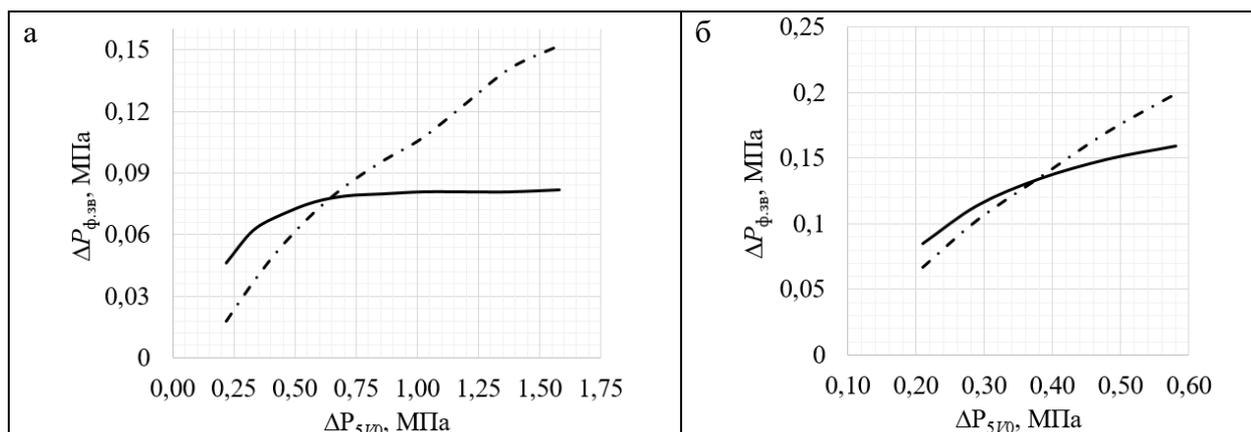
Избыточное давления ΔP_{5V0} , МПа, на расстоянии от зоны взрыва, равном пяти длинам исходной зоны загазования, для моделей 1 и 2

| $\Delta P_{ф.зв}$, МПа | | 0,220 | 0,330 | 0,450 | 0,580 | 0,710 | 0,860 | 1,020 | 1,200 | 1,380 | 1,580 |
|-------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Модель 1 | | | | | | | | | | | |
| ΔP_{5V0} , МПа | а | 0,046 | 0,062 | 0,070 | 0,076 | 0,078 | 0,080 | - | - | - | - |
| | б | 0,018 | 0,037 | 0,055 | 0,070 | 0,083 | 0,095 | - | - | - | - |
| Модель 2 | | | | | | | | | | | |
| ΔP_{5V0} , МПа | а | 0,046 | 0,062 | 0,070 | 0,076 | 0,079 | 0,080 | 0,081 | 0,081 | 0,081 | 0,082 |
| | б | 0,018 | 0,037 | 0,055 | 0,071 | 0,084 | 0,096 | 0,107 | 0,124 | 0,141 | 0,152 |

Таблица 4

Избыточное давления ΔP_{5V0} , МПа, на расстоянии от зоны взрыва, равном пяти длинам исходной зоны загазования, для модели 3

| Модель 3 | | | | | | |
|-------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\Delta P_{ф.зв}$, МПа | | 0,210 | 0,290 | 0,380 | 0,480 | 0,580 |
| ΔP_{5V0} , МПа | а | 0,085 | 0,114 | 0,134 | 0,149 | 0,159 |
| | б | 0,067 | 0,103 | 0,135 | 0,170 | 0,199 |



а – для моделей 1 и 2; б – для модели 3

сплошная линия – результаты, полученные при использовании C++ библиотеки методом МКО; штрихпунктирная – в программе «Ударная волна»

Рис. 5. Значения полученных избыточных давлений УВВ в зоне отрыва

Как видно из рис. 5 избыточное давление в зоне отрыва, при использовании газодинамического метода в трёхмерной постановке задачи (OpenFOAM), при повышении избыточного давления в исходной зоне загазования, плавно возрастает и стабилизируется возле некоторого приблизительно постоянного значения: для выемочного участка, когда существует возможность расширения продуктов взрыва в, как минимум, две стороны, – 0,08 МПа; для подготовительной выработки – 0,16 МПа. Результаты, полученные в программе «Ударная волна», показывают рост со следующими максимальными значениями: выемочный участок – 0,15 МПа; подготовительная выработка – 0,20 МПа.

Таким образом, исходя из анализа полученных результатов, при взрывах ГВС и угольной пыли и при определении параметров изолирующих взрывоустойчивых перемычек, предлагается использовать полученные максимальные избыточные давления с двукратным коэффициентом запаса прочности, т. е.: для выемочного участка – 0,30 МПа; для подготовительных выработок – 0,40 МПа.

Максимальное избыточное давление при отражении УВВ от изолирующих взрывоустойчивых перемычек. Воздействие УВВ на перемычки определяется двумя основными параметрами: избыточным давлением отражения $\Delta P_{отр}$ фронта УВВ от преграды и величиной времени действия избыточного давления τ_t (фазой сжатия) на неё. Согласно результатам исследований, приведённым в [3, 4, 15], УВВ в горных выработках имеют большую длину и воздействуют на перемычку более 1 с, что можно охарактеризовать как гидростатическое, а не динамическое, воздействие на инженерное сооружение.

Давление во фронте отражённой волны возможно определить по формуле Крюссара – Измайлова (27). Данная формула базируется на соотношении для расчёта давления во фронте УВВ, нормально отражённой от абсолютно жёсткой преграды и получена по результатам исследований, приведённых [20]. Эта зависимость показывает приемлемую для практики точность при $\Delta P_{ф} \leq 4,0$ МПа.

Посредством газодинамических расчётов с использованием численных методов выполнена проверка работоспособности данной формулы в области определения давлений, развиваемых в горных выработках угольных шахт при взрывах ГВС и угольной пыли, в зоне действия УВВ, оторвавшейся от продуктов взрыва. В табл. 5 приведено сравнение результатов численного моделирования процессов взаимодействия УВВ с инженерным сооружением со значениями, полученными по формуле Крюссара – Измайлова (27). В качестве избыточного давления во фронте УВВ, подходящей к перемычке использован параметр $\Delta P_{ф}$, МПа, соответствующего результата моделирования. Как видно из табл. 5, максимальное расхождение не превышает 10 %.

Сравнение результатов численного моделирования процессов отражения УВВ от перемычки со значениями, полученными по формуле Крюссара – Измайлова (27)

| Газодинамический метод (трёхмерная постановка с использованием C++-библиотеки OpenFOAM) | | | | | Газодинамический метод (одномерная постановка задачи с использованием программы «Ударная волна») | | | | |
|---|------------------------|-----------------------|--------------|--------------|--|------------------------|-----------------------|--------------|--------------|
| t, c | $\Delta P_{\phi}, MPa$ | $\Delta P_{отр}, MPa$ | Формула (27) | $\Delta, \%$ | t, c | $\Delta P_{\phi}, MPa$ | $\Delta P_{отр}, MPa$ | Формула (27) | $\Delta, \%$ |
| Модель 1 | | | | | | | | | |
| 1,700 | 0,011 | 0,023 | 0,024 | 2,86 | 1,691 | 0,005 | 0,011 | 0,011 | 3,32 |
| 1,575 | 0,027 | 0,058 | 0,059 | 1,63 | 1,572 | 0,020 | 0,041 | 0,043 | 2,62 |
| 1,475 | 0,038 | 0,086 | 0,088 | 2,28 | 1,446 | 0,034 | 0,078 | 0,078 | 0,24 |
| 1,400 | 0,047 | 0,110 | 0,112 | 1,74 | 1,346 | 0,051 | 0,121 | 0,123 | 1,18 |
| 1,325 | 0,057 | 0,137 | 0,140 | 2,10 | 1,273 | 0,069 | 0,171 | 0,173 | 1,44 |
| 1,250 | 0,070 | 0,165 | 0,178 | 7,12 | 1,197 | 0,089 | 0,230 | 0,236 | 2,60 |
| Модель 2 | | | | | | | | | |
| 3,525 | 0,008 | 0,015 | 0,016 | 5,37 | - | - | - | - | - |
| 3,325 | 0,017 | 0,035 | 0,036 | 1,91 | 3,228 | 0,013 | 0,028 | 0,026 | 3,66 |
| 3,175 | 0,023 | 0,050 | 0,051 | 1,72 | 3,053 | 0,023 | 0,051 | 0,050 | 2,03 |
| 3,075 | 0,029 | 0,063 | 0,064 | 1,27 | 2,900 | 0,033 | 0,075 | 0,074 | 1,35 |
| 2,975 | 0,033 | 0,074 | 0,075 | 1,30 | 2,754 | 0,043 | 0,102 | 0,101 | 0,89 |
| 2,875 | 0,037 | 0,084 | 0,086 | 2,59 | 2,621 | 0,057 | 0,139 | 0,138 | 1,61 |
| 2,775 | 0,042 | 0,095 | 0,097 | 2,38 | 2,495 | 0,075 | 0,192 | 0,192 | 0,66 |
| 2,700 | 0,047 | 0,108 | 0,110 | 1,62 | 2,350 | 0,091 | 0,242 | 0,244 | 1,31 |
| 2,625 | 0,052 | 0,122 | 0,124 | 1,77 | 2,229 | 0,106 | 0,289 | 0,292 | 2,38 |
| 2,550 | 0,057 | 0,137 | 0,139 | 1,84 | 2,103 | 0,122 | 0,341 | 0,349 | 5,29 |
| Модель 3 | | | | | | | | | |
| 1,200 | 0,023 | 0,048 | 0,051 | 5,45 | 1,133 | 0,023 | 0,049 | 0,050 | 3,17 |
| 1,050 | 0,044 | 0,102 | 0,104 | 2,43 | 0,951 | 0,057 | 0,135 | 0,138 | 2,05 |
| 0,900 | 0,070 | 0,159 | 0,176 | 9,63 | 0,825 | 0,096 | 0,249 | 0,260 | 5,91 |
| 0,800 | 0,104 | 0,275 | 0,286 | 3,56 | 0,726 | 0,144 | 0,408 | 0,431 | 5,33 |
| 0,725 | 0,144 | 0,401 | 0,432 | 7,26 | 0,648 | 0,195 | 0,617 | 0,640 | 3,49 |

Примечание: t – время подхода фронта УВВ к перемычке после начала расчёта, с; ΔP_{ϕ} – избыточное давление во фронте УВВ, подходящей к перемычке, МПа; $\Delta P_{отр}$ – избыточное давление отражения УВВ от преграды, МПа; Δ – расхождение результатов численного моделирования со значением, полученным по формуле Крюссара – Измайлова (27), %.

Вывод. По результатам численного моделирования процессов распространения УВВ по подземным горным выработкам предлагается, при определении параметров изолирующих взрывоустойчивых перемычек, использовать максимальные избыточные давления на расстоянии, равном пяти исходным зонам загазования при взрывах ГВС и угольной пыли: для выемочного участка – 0,30 МПа; для подготовительных выработок – 0,40 МПа. Подтверждена работоспособность формулы Крюссара – Измайлова в области определения давлений, развиваемых в горных выработках угольных шахт, в зоне действия УВВ, оторвавшейся от продуктов взрыва.

Список литературы

1. О введении в действие Методики газодинамического расчёта параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли : распоряж. Ростехнадзора от 27.04.2004, № Р-

7. – URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=331468#019248400577640212>

2. СНиП 2.01.54-84. Защитные сооружения гражданской обороны в подземных горных выработках / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2001. – 20 с.

3. Устав ВГСЧ по организации и ведению горно-спасательных работ (Устав ВГСЧ). – М.: Недра, 1986. – 254 с.

4. Устав военизированной горноспасательной части (ВГСЧ) по организации и ведению горноспасательных работ на предприятиях угольной и сланцевой промышленности. – М., 1997. – 201 с.

5. 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.

6. Моделирование газодинамических процессов при изоляции выработок аварийных участков с использованием гидрозатворов / Ю.М. Говорухин, В.Г. Криволапов, М.Г. Коряга, Д.Ю. Палеев // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – № 6. – С.376-380.

7. Говорухин Ю.М., Криволапов В.Г., Палеев Д.Ю. Использование CFD-пакетов при решении задач вентиляции шахт и подготовке горных инженеров // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2019. – № 5. – С. 453-458.

8. 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.

9. Говорухин Ю.М., Криволапов В.Г., Палеев Д.Ю. О способе внесения в модель топологии объёмов загазования в закреплённом пространстве выемочных участков при расчётах взрывобезопасных расстояний // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – № 6. – С. 373-375.

10. Криволапов В.Г., Говорухин Ю.М. Взаимодействие ударно-воздушной волны с водяными заслонами при возведении изолирующих противопожарных перемычек // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов : сб. науч. статей. / Под общей редакцией В.Н. Фрянова. – 2007. – С. 198-203.

11. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

12. Миньков Л.Л. Моисеева К.М. Численное решение задач гидродинамики с помощью вычислительного пакета Ansys Fluent: учеб. пособие. – Томск: СТУ, 2017. – 122 с.

13. Молчанов А.М. Математическое моделирование задач газодинамики и теплообмена. – М.: Издательство МАИ, 2013. – 208 с.

14. Мясников А.А., Миллер Ю.А., Комаров Н.Е. Вентиляционные сооружения в угольных шахтах. – М.: Недра, 1983. – 270 с.

15. 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.

16. 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.

17. Патанкар С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 312 с.

18. Плотников В.М. Обеспечивается ли безопасность труда горноспасателей при угрозе взрыва газа и пыли в угольных шахтах? // Безопасность труда в промышленности. – 1992. – № 1. – С. 29-33.

19. Чеховских А.М., Гладков Ю.А. О выборе безопасных мест ведения горноспасательных работ при угрозе взрыва газов и пыли в шахтах // Безопасность труда в промышленности. – 1992. – № 1. – С. 33-34.

20. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. – Л.: Судпромгиз, 1961. – 312 с.
21. 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.
22. 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 622.868:622.81

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТОЛЩИНЫ ИЗОЛИРУЮЩИХ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВЫХ ПЕРЕМЫЧЕК

¹к.т.н. Говорухин Ю.М., ^{1,2}д.т.н. Домрачев А.Н., ¹к.т.н. Криволапов В.Г.,
^{1,3}д.т.н. Палеев Д.Ю.

1 – Национальный горноспасательный центр, г. Новокузнецк, Россия

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

3 – Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия

Аннотация. Сформирована методика расчёта толщины изолирующих взрывоустойчивых перемычек, возводимых при изоляции пожарных участков, на основе действующих на них избыточных давлений во фронте падающей и отражённой ударной воздушной волны.

Ключевые слова: горные выработки, взрыв газовоздушной смеси и угольной пыли, ударная воздушная волна, давление, взаимодействие, перемычка.

С целью обеспечения промышленной безопасности и предотвращения разрушения действующих горных выработок ударной воздушной волной (далее – УВВ), образующейся при взрывах газовоздушных смесей (далее – ГВС) и угольной пыли, возводятся изолирующие взрывоустойчивые перемычки, способные воспринимать без разрушения повышенные ударные воздействия. Согласно требованиям федеральных норм и правил в области промышленной безопасности [1, 2] данные инженерные сооружения на горных предприятиях опасных по газу и/или пыли возводятся при изоляции:

- действующих пожаров;
- газодренажных выработок и выработанных пространств выемочных участков, проветриваемых по схемам с изолированным отводом метана с помощью газоотсасывающих установок;
- горных выработок на шахтах, разрабатывающих пласты угля, склонные к самовозгоранию.

Это обусловлено тем, что в изолируемых пространствах, вследствие сокращения расхода воздуха на объектах проветривания или полного прекращения их проветривания, существует угроза формирования зон взрывоопасных скоплений газов (метана, оксида углерода, предельных и непредельных углеводородов) вблизи источников высокой температуры [8, 9]. При потенциальной опасности возникновения взрыва основным параметром, определяющим взрывоустойчивость перемычки, является её толщина. В связи с этим авторами предлагается следующая методика для расчёта данного параметра от действующих на них избыточных давлений.

Место установки перемычки не должно быть от зоны взрыва ближе пяти длин исходной зоны загазования, которую можно определить согласно [7, 10]. Желательно в зону

изоляции включать все существующие местные сопротивления (обрушения, загромождения и т. п.), так как это будет снижать избыточное давление во фронте набегающей УВВ.

Затухание избыточного давления во фронте УВВ ΔP_x , МПа, возможно оценить по формуле, предложенной для проектирования защитных сооружений гражданской обороны в подземных горных выработках [3-6, 11-13, 15, 16]

$$\Delta P_x = \Delta P_{\text{фн}} e^{-K_3 \frac{x}{R_{\text{гидр}}}}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{фн}}$ – избыточное давление в месте отрыва УВВ от продуктов взрыва на прямолинейном участке выработки, либо в начальном её сечении после местного сопротивления, МПа. Согласно исследованиям, выполненным авторами, оно составляет 0,30 МПа при взрывах в выработках выемочного участка, а для подготовительных выработок – 0,40 МПа; K_3 – коэффициент затухания, зависимый от коэффициента аэродинамического сопротивления выработки (принимается согласно табличным значениям, приведённым в [4-6]); x – расстояние от начала выработки до поворота, её сужения и других изменений, м; $R_{\text{гидр}}$ – гидравлический радиус выработки, м.

Давление УВВ после прохождения местных сопротивлений выработок $\Delta P_{\text{пр}}$, МПа, определяется по формуле

$$\Delta P_{\text{пр}} = K_{\text{зат}} \Delta P_{\text{н}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{зат}}$ – коэффициент затекания, учитывающий ослабление или увеличение интенсивности УВВ после прохождения сопряжений и углов поворота выработок (принимается согласно [4-6]); $\Delta P_{\text{н}}$ – начальное давление УВВ распространяющейся по местным сопротивлениям в выработках, МПа.

Давление отражения УВВ от инженерного сооружения при расположении преграды перпендикулярно направлению её распространения $\Delta P_{\text{отр}}$, МПа, определяется по формуле Крюссара – Измайлова [4-6, 11, 14]

$$\Delta P_{\text{отр}} = 2\Delta P_{\text{ф}} + \frac{6\Delta P_{\text{ф}}^2}{\Delta P_{\text{ф}} + 7,2 \cdot P_0}, \quad (3)$$

где $\Delta P_{\text{ф}}$ – избыточное давление во фронте УВВ, подходящей к перемычке, МПа; P_0 – атмосферное давление, МПа.

Также давления $\Delta P_{\text{ф}}$ и $\Delta P_{\text{отр}}$ возможно определить с использованием специализированного программного обеспечения на основе трёхмерной топологии сети выработок.

В источниках [4, 11] указывается, что для определения толщины перемычки необходимо использовать квазистатическую нагрузку $\Delta P_{\text{э}}$, МПа, эквивалентную полному давлению, определяемую по формуле

$$\Delta P_{\text{э}} = \Delta P_{\text{отр}} \cdot k_{\text{д}}, \quad (4)$$

где $k_{\text{д}}$ – коэффициент динамичности.

Значения коэффициента динамичности для преград, подвергающихся ударным воздействиям при взрывах, выбираются в диапазоне от 1 до 2. При этом, чем меньше длительность ударного импульса, тем большее значение коэффициента динамичности должно быть использовано для вычисления эквивалентной нагрузки. Данные значения получены опытным путём в результате исследований, выполненных при проведении атмосферных и подводных взрывов [16]. В подземных горных выработках же УВВ приобретают большую длину и оказывают воздействие на перемычку более 1 с [12]. Это можно охарактеризовать как гидростатическое, а не динамическое, воздействие на изолирующую взрывоустойчивую перемычку. Таким образом, для условий подземных горных выработок можно принять $k_{\text{д}} = 1$.

Изолирующая взрывоустойчивая безврубная перемычка рассчитывается как шарнирно опёртая плита прямоугольной формы высотой h , м, и шириной w , м, равных соответствующим параметрам горной выработки.

Минимальная толщина m_1 , м, обеспечивающая прочность при изгибе плиты монолитной перемычки под действием эквивалентного давления, при $h < w$ определяется по формуле

$$m_1 = h \sqrt{\frac{\Delta P_3}{4R_{\text{раст}}k_3} \frac{3-2\cdot(h/w)^2}{h/w}}, \quad (5)$$

а при $h > w$ формула имеет вид

$$m_1 = w \sqrt{\frac{\Delta P_3}{4R_{\text{раст}}k_3} \frac{3-2\cdot(w/h)^2}{w/h}}, \quad (6)$$

где $R_{\text{раст}}$ – нормативное сопротивление на растяжение при изгибе, МПа; k_3 – коэффициент запаса прочности для материала перемычки (изменяется в пределах 0,8 – 1,0).

Минимальная толщина m_2 , м, обеспечивающая прочность закрепления плиты перемычки по контуру, при $R_{\text{адг}} < R_{\text{сдв}}$ определяется по формуле

$$m_2 = \frac{\Delta P_3 \cdot wh}{2(w+h)R_{\text{адг}}k_3}, \quad (7)$$

где $R_{\text{адг}}$ – нормативная адгезионная прочность, МПа; $R_{\text{сдв}}$ – нормативное сопротивление при сдвиге, МПа, $R_{\text{сдв}} = 0,24R_{\text{сж}}$; $R_{\text{сж}}$ – нормативное сопротивление при сжатии, МПа.

При $R_{\text{адг}} > R_{\text{сдв}}$ в формуле (7) $R_{\text{адг}}$ заменяется на $R_{\text{сдв}}$.

Минимальная толщина безврубовой перемычки m , м, принимается равной максимальному значению из двух расчётных величин m_1 и m_2 по формуле

$$m = \max\{m_1, m_2\}. \quad (8)$$

Вывод. По результатам исследований, выполненных авторами, предложена методика расчёта параметров изолирующих взрывоустойчивых перемычек, возводимых в подземных горных выработках при изоляции пожарных участков. Данная методика позволяет определять величину избыточного давления при взаимодействии УВВ с инженерными сооружениями и выполнить расчёт минимально необходимой толщины перемычки в зависимости от материала её изготовления.

Список литературы

1. Инструкция по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах, на которых ведутся горные работы : приказ Ростехнадзора от 11.12.2020 № 520 : зарег. в Минюсте России 21.12.2020 № 61628. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_372027
2. Инструкция по аэрологической безопасности угольных шахт : приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 № 506 : зарег. в Минюсте России 29.12.2020 № 61918. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_372974
3. О введении в действие Методики газодинамического расчёта параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли : распоряж. Ростехнадзора от 27.04.2004 № Р-7. – URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=331468#019248400577640212>
4. СНиП 2.01.54-84. Защитные сооружения гражданской обороны в подземных горных выработках / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2001. – 20 с.
5. Устав ВГСЧ по организации и ведению горно-спасательных работ. – М.: Недра, 1986. – 254 с.
6. Устав военизированной горноспасательной части (ВГСЧ) по организации и ведению горноспасательных работ на предприятиях угольной и сланцевой промышленности. – М., 1997. – 201 с.
7. О методе оценки объёмов загазования взрывоопасной метановоздушной смесью горных выработок угольных шахт / Ю.М. Говорухин, А.Н. Домрачев, В.Г. Криволапов, Д.Ю. Палеев // Безопасность технологических процессов и производств: тр. III междунар. науч.-практ. конф. 26 мая 2021 г., Екатеринбург / отв. редактор В.А. Елохин; Урал гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2021. – С. 13-18.
8. Моделирование газодинамических процессов при изоляции выработок аварийных участков с использованием гидрозатворов / Ю.М. Говорухин, В.Г. Криволапов, М.Г. Коряга, Д.Ю. Палеев // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – № 6. – С. 376-380.

9. Говорухин Ю.М., Криволапов В.Г., Палеев Д.Ю. Анализ существующих алгоритмов оценки дебитов метана из разрабатываемых пологих пластов с целью определения структуры газового баланса выемочных участков // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2019. – № 5. – С. 445-448.

10. 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 // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – № 6. – С. 373-375.

11. Мясников А.А., Миллер Ю.А., Комаров Н.Е. Вентиляционные сооружения в угольных шахтах. – М.: Недра, 1983. – 270 с.

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. Плотников В.М. Обеспечивается ли безопасность труда горноспасателей при угрозе взрыва газа и пыли в угольных шахтах? // Безопасность труда в промышленности. – 1992. – № 1. – С.29-33.

14. Савенко С.К., Гурин А.А., Малый П.С. Ударные воздушные волны в подземных горных выработках. – М.: Недра, 1973. – 152 с.

15. Чеховских А.М., Гладков Ю.А. О выборе безопасных мест ведения горноспасательных работ при угрозе взрыва газов и пыли в шахтах // Безопасность труда в промышленности. – 1992. – № 1. – С.33-34.

16. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. – Л.: Судпромгиз, 1961. – 312 с.

УДК 550.83.045

КОНТРОЛЬ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ ЕСТЕСТВЕННОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Малышков С.Ю., к.т.н. Гордеев В.Ф., Поливач В.И.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
г. Томск, Россия

Аннотация. Для обеспечения промышленной и экологической безопасности горных предприятий, контроля геомеханических процессов и прогноза оползней в работе предложен метод естественного импульсного электромагнитного поля Земли. Дано обоснование возможности его применения для этих целей и результаты внедрения систем мониторинга экзогенных процессов на промышленных объектах.

Ключевые слова: геомеханические процессы, естественное импульсное электромагнитное поле Земли.

В приказе Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13.11.2020 №439 «ФНП ПБ правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» установлены требования - по результатам инженерно-геологического изучения массива горных пород для объектов горной промышленности составлять геомеханическую модель месторождения (участка недр), в которой, наряду с другими, отражается:

- основные и второстепенные структуры (разломы, напластование, складчатость, системы трещин);
- физические и деформационные характеристики пород и массива;
- параметры природного поля напряжений.

Причем, по мере развития открытых горных работ, но не реже одного раза в год,

геомеханическая модель месторождения должна уточняться на основе инженерно-геологического изучения массива горных пород.

В Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН для решения перечисленных задач предложена [1] пассивная информационно-измерительная технология анализа параметров пространственно-временной структуры естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ), регистрируемого в диапазоне очень низких частот (ОНЧ). Применяемый радиоволновый метод основан на использовании физического механизма явления электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) – способности диэлектрических материалов излучать электромагнитные сигналы при механическом воздействии на них [2]. Образование микро и макротрещин в диэлектриках сопровождается образованием зарядов на бортах трещин за счет явлений электроадгезии, электризации при раскалывании. Эти заряды создают электрическое поле высокой напряженности, в котором возможен пробой газовой фазы, заполняющей полость микротрещины [3]. Регистрируемая интенсивность сигналов ЭМЭ зависит от свойств, внутренней структуры излучающего материала и степени механического воздействия на него, поэтому является структурно-зависимой характеристикой и сочетает в себе возможности электромагнитных и сейсмоакустических методов контроля.

ЭМЭ возникает в процессе образования и релаксации зарядов на плоскостях трещин при изменении напряженного состояния массива горных пород. Она возникает как при изменении сплошности материалов-диэлектриков, так и при разрыве, заполненных электролитом капилляров. В горных породах источниками естественных электромагнитных полей являются неоднородности структуры грунтов, разнонапряжённые структуры, трещины и микротрещины. В результате механоэлектрических преобразований под действием деформационных волн из нижней мантии, приливных сил, микросейсмических колебаний, ветровой и техногенной нагрузки на этих источниках возникают импульсные электромагнитные поля, которые и создают естественный электромагнитный фон литосферного происхождения. Характерной особенностью временной динамики, регистрируемой в постоянной точке наблюдения интенсивности литосферной составляющей ЕИЭМПЗ, являются явно выраженный суточный и сезонный ход, которой обусловлен вращением Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца [4].

В переменном поле тектонических и экзогенных напряжений (сжатие – растяжение) породы, содержащие минералы-диэлектрики, благодаря механоэлектрическим преобразованиям, излучают электромагнитные импульсы, интенсивность и амплитудно-частотный состав которых определяется структурными, прочностными и деформационными свойствами этих пород. В глинистых грунтах, кроме растрескивания и деформации частиц минерального скелета, в формировании импульсов электромагнитных полей принимают участие и двойные электрические слои. Интенсивная фильтрация жидкости в порах и трещинах также сопровождается поляризацией и возникновением ЕИЭМПЗ. Тектонические подвижки, приуроченные к межблоковым дислокационным зонам, даже самые медленные и малоамплитудные, всегда сопровождаются нарушением структурных связей и образованием микро и макротрещин в твердой фазе горных пород и изменением концентрации ионов диффузного слоя в жидкой фазе горных пород. Эти процессы приводят к появлению импульсного электромагнитного излучения. Непрерывное инструментальное наблюдение за процессом формирования и пространственно-временной динамикой регистрируемых распределенной системой регистраторов взаимно-ортогональных составляющих поля электромагнитного излучения позволяет контролировать векторное поле напряженно-деформированного состояния горного массива.

Алгоритм выделения пространственных аномалий ЕИЭМПЗ, связанных со свойствами грунтов в месте регистрации, из пространственно-временных вариаций предполагает применение вариационных регистраторов поля. Одним или несколькими регистраторами выполняются измерения параметров ЕИЭМПЗ по заранее заданным профилям в пределах исследуемой территории, а один или несколько регистраторов устанавливаются

стационарно в месте, не затронутом опасными геологическими процессами на расстоянии не более длины волны от объекта исследований (10–100 км) для регистрации фоновых значений ЕИЭМПЗ. В качестве информативного признака при проведении геофизических работ используется коэффициент, который рассчитывается по формуле

$$K = \begin{cases} \frac{Nm}{Nv} - 1, & \text{если } Nm \geq Nv, \\ 0 - \frac{Nv}{Nm} + 1, & \text{если } Nm \leq Nv. \end{cases} \quad (1),$$

где K – коэффициент, отражающий свойства горных пород в месте регистрации; N_v – интенсивность ЕИЭМПЗ, зарегистрированная вариационным регистратором; N_m – интенсивность ЕИЭМПЗ, зарегистрированная маршрутным регистратором.

При таком способе обработки положительные и отрицательные аномалии в структуре ЕИЭМПЗ могут изменяться в одинаковом диапазоне с одинаковым коэффициентом пропорциональности.

На рис. 1 приведен пример прогноза активизации оползня в месте перехода магистрального газопровода Уренгой-Помары-Ужгород через реку Кама автоматизированной системой контроля опасных геологических процессов методом ЕИЭМПЗ. На этом участке газопровода установлено 11 регистраторов ЕИЭМПЗ на активном оползне. Двенадцатый регистратор используется для регистрации фоновых значений поля и установлен на участке за пределами контролируемого склона.

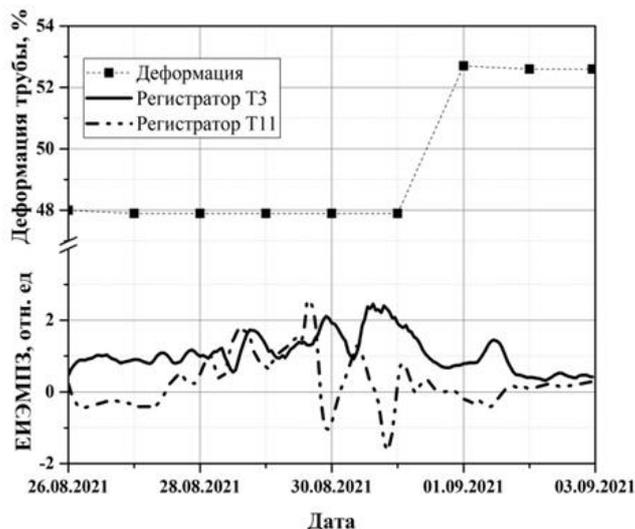


Рис. 1. Пример прогноза срыва блока горных пород в результате активизации оползня

В нижней части графика приведены временные ряды аномального ЕИЭМПЗ, рассчитанного по формуле 1 для двух регистраторов Т3 и Т11, расположенных в пределах активного оползня на трассе газопровода. Регистраторы территориально разнесены друг от друга на расстояние около 30 м, с перепадом высот в местах установки на 5 метров. В верхней части графика приведен временной ряд значений деформации трубы. Деформации мерились интеллектуальными вставками методом тензометрии. Расстояние от интеллектуальной вставки до регистраторов составляло около 30 м. Срыв блока горных пород зафиксирован скачком деформации газовой трубы в момент времени, попадающий в интервал с 31 августа по 1 сентября. Изменение напряженно-деформированного состояния горных пород (НДС ГП) система контроля начала регистрировать более, чем за 5 суток до экзогенного события. Причем на последнем этапе подготовки разрушения регистратором Т11 зафиксировано интенсивное трещинообразование, которое проявилось скачкообразным изменением характера деформаций. На этом склоне контроль экзогенных процессов ведется с 2006 года. За время работы системы не было ни одной аварии, связанной с повреждением газопровода из-за подвижек грунта благодаря своевременному принятию управленческих решений по данным прогноза.

В геомеханическую модель участка недр при освоении угольных месторождений должна включаться информация о геологических разломах. Наибольшую потенциальную опасность промышленным объектам представляют активные тектонические нарушения, сохранившие подвижность. Они могут усиливать сейсмический эффект землетрясений. Часто в зонах активных разломов наблюдается эмиссия агрессивных газов, которые могут негативно влиять на инфраструктуру объекта. На рис. 2 приведен пример обнаружения активного геологического разлома в пределах подземного хранилища газов. В процессе эксплуатации хранилища было выявлено несоответствие закаченного количества газа с запасенными объемами и в наблюдательных скважинах за пределами хранилища были обнаружены следы углеводородов. На графике тонкой линией построены фактические значения аномального ЕИЭМПЗ, жирной кривой – значения, сглаженные скользящим окном по пяти измерениям. Разлом выделяется аномалией поля, превышающей фоновые значения в 10 раз. Он сохраняет подвижность и по нему могут мигрировать углеводороды.

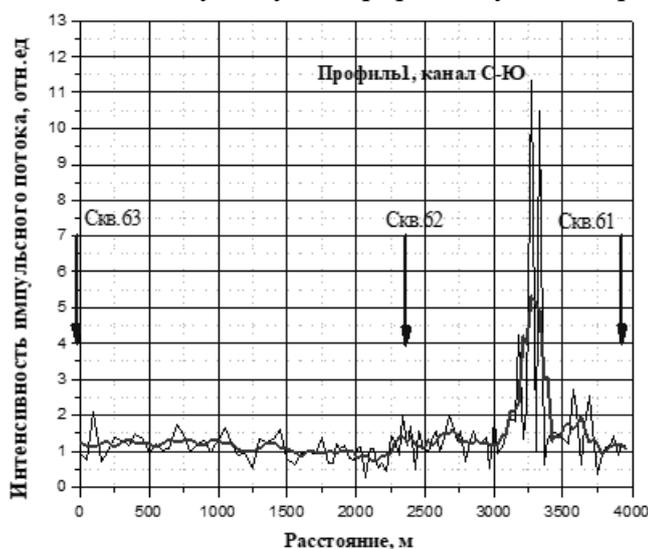


Рис. 2. Пример картирования активного геологического разлома

Метод ЕИЭМПЗ также применялся для картирования активных геологических разломов при обосновании мест для строительства объектов атомной промышленности [5] в России и за ее пределами, поиска участков с опасными геологическими процессами на магистральных газопроводах и объектах городской инфраструктуры. Результаты фундаментальных исследований и накопленный опыт практического использования позволили рекомендовать метод ЕИЭМПЗ для составления геомеханических моделей месторождений при добыче угля открытым способом.

В 2022 году проведены предпроектные исследования применимости метода ЕИЭМПЗ для возможности контроля геомеханических процессов на трех угольных разрезах в Кузбассе. Тестовые измерения параметров электромагнитного поля ОНЧ диапазона в непосредственной близости от работающей карьерной техники показал, что уровень техногенного электромагнитного излучения не выше 30% от фоновых значений. Это намного меньше возможных аномалий при активизации геодинамических процессов, что доказывает возможность применения метода ЕИЭМПЗ в условиях производства горных работ открытым способом. Во время тестовых полевых измерений ЕИЭМПЗ в пределах угольных разрезов активных геодинамических структур, представляющих реальную угрозу эксплуатации инженерных сооружений выявлено не было. Но работы проводились на участках, где грунты находятся в устойчивом состоянии или уже состоялась разгрузка напряжений в результате подвижек, а метод позволяет фиксировать только изменение НДС горных пород в процессе активизации экзогенных процессов.

На рис. 3 представлены пространственные вариации ЕИЭМПЗ на участке, где по данным службы мониторинга предприятия накануне обследования зафиксировано

изменение НДС ГП по данным георадарного обследования. Методом ЕИЭМПЗ подтверждена зона сжатия горных пород, но значения коэффициентов, отражающих состояние горных пород небольшие. Активизация экзогенных процессов в ближайшие дни была спрогнозирована, как маловероятная. Дальнейшие визуальные и инструментальные наблюдения не выявили активизации экзогенных процессов на этом участке.

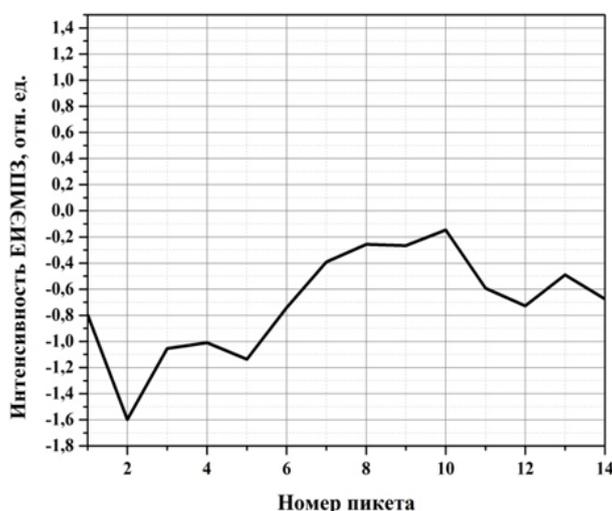


Рис. 3. Вариации ЕИЭМПЗ по профилю в зоне сжатия горных пород

Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 10.11.2020 г. № 436 "Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности при разработке угольных месторождений открытым способом" комплексы технических, технологических, инженерных и информационных систем должны быть объединены в многофункциональную систему безопасности (далее - МФСБ). МФСБ должна предусматривать контроль геомеханических и сейсмических процессов.

В настоящее время компанией ООО «Ди Эй Групп» разработаны проекты МФСБ для угольных разрезов АО ХК «СДС-Уголь», в которых для контроля геомеханических процессов включен метод ЕИЭМПЗ. Предложенный метод разрешен нормативно-разрешительной документацией ведения инженерных изысканий для строительства [6] для оценки НДС ГП и оконтуривания зон трещиноватости. Метод позволяет картировать активные разломы и тектонические нарушения, участки с наиболее опасными геологическими процессами, определять степень их опасности для проектируемых или расположенных на них инженерных сооружений.

Для своевременного прогноза экзогенных процессов необходим непрерывный или периодический контроль склоновых геодинамических процессов. Для прогноза оползневых процессов в целях безопасного ведения горных работ на объектах АО ХК «СДС-Уголь» проектом предусмотрено на каждом предприятии холдинга создать систему мониторинга ЕИЭМПЗ, состоящую из пяти портативных и двух вариационного регистраторов. То, что предприятия угольной промышленности разнесены на значительные расстояния друг от друга делают возможным объединение вариационных, работающих в режиме непрерывного мониторинга, регистраторов в единую сеть для прогноза тектонических землетрясений. Подготовка эндогенного события сопровождается изменением НДС ГП на огромных территориях. При катастрофических землетрясениях предвестники фиксируются на удалении более 1000 км от эпицентра [7]. Изменение напряжений сопровождается изменением вида типичных вариаций ЕИЭМПЗ, которые определяются, главным образом, периодичностью вращения Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца.

Вывод. Задача прогноза времени, энергии и координат предстоящего события сводится к решению задачи обнаружения территории с нарушенными проявлениями типичной

ритмичности в ЕИЭМПЗ, отслеживания меняющихся размеров этой территории, как меры энергии будущего события. Для прогноза землетрясений может применяться метод, изложенный в патенте на изобретение [8].

Список литературы

1. Развитие пассивной радиоволновой информационно-измерительной технологии мониторинга динамических процессов взаимодействия литосферы, криосферы и атмосферы / В.Ф. Гордеев, С.Ю. Малышков, В.А. Крутиков [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35. – № 2. – С. 105–109. – DOI: 10.15372/AOO20220204.
2. Воробьев А.А. О возможности электрических разрядов в недрах Земли // Известия АН СССР. Серия геология и геофизика. – 1970. – № 12. – С. 3–14.
3. Беляев Л.М., Мартышев Ю.Н., Набатов В.В. Исследование свечения при разрушении минералов. Времена высвечивания // Физика щелочно-галлоидных кристаллов: сб. статей. – Изд-во Латв. ун-та, 1962. – С. 179 – 182.
4. Малышков Ю.П., Малышков С.Ю. Периодические вариации геофизических полей и сейсмичности, их возможная связь с движением ядра земли // Геология и геофизика. – 2009. – № 2. – С. 152–172.
5. Оценка влияния нагнетания жидких радиоактивных отходов на изменение напряженно-деформированного состояния массива горных пород / С.Ю. Малышков, О.Н. Кокорев, В.Ф. Гордеев [и др.] // Разведка и охрана недр. – 2023. – № 4. – С. 43-48. – DOI: 10.53085/0034-026X_2023_04_43.
6. СП-11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. – М.: ПНИИИС Госстроя России, 1997.
7. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. – М.: ИФЗ АН СССР, 1991. – 219 с.
8. Патент РФ № 2238575. Способ прогноза землетрясений / Ю.П. Малышков, К.Б. Джумабаев, С.Ю. Малышков [и др.]. – опубл. 20.10.2004, Бюл. № 29.

УДК 627.8.01:711

ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ РАЗРЕЗА «АНГРЕНСКИЙ», КАК ОБЪЕКТЫ ПРОМЫШЛЕННО-ОХРАННОГО ЗНАЧЕНИЯ

¹к.т.н. Якубов С.И., ²д.т.н. Прошунин Ю.Е., ³к.т.н. Юнусова Ф.Р., ³Фирлина Г.Л.,

³Фаёз Омонуллахонов Фаррух угли, ³Атоев Ақобир Авар угли

1 – Институт общей и неорганической химии Академии наук

Республики Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан

2 – Сибирский государственный индустриальный университет,

г. Новокузнецк, Россия

3 – НИУ Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства, г. Ташкент, Узбекистан

Аннотация. Добыча угля на Ангренском бурогольном месторождении осуществляется открытым и подземным способами, используется также технология подземной газификации углей. Учитывая значительные сезонные перепады уровня грунтовых вод и расположение части месторождения под руслом реки, использован комплекс гидротехнических сооружений: охранную плотину, подземный тоннель, обводной канал, систему трубопроводов.

Ключевые слова: Добыча угля, охранная плотина, подземный перепускной тоннель, обводной канал, водобойные гасители энергии, сейсмический мониторинг, оползневые процессы, технологический мониторинг добычных процессов.

Долина, в которой расположено Ангренское бурогольное месторождение имеет ширину около 10 км. и пять террас, причем верхние возвышаются над поймой на 200 м. В разрезе Ангренского месторождения сверху вниз залегают лессы и галечники, алевропелиты, песчаники, известняки, мергели, каолины, алевролиты, уголь. Колебания уровня грунтовых вод по сезонам года составляют более 10 м. Уникальное по качеству и запасам бурых углей Ангренское месторождение расположено в 110 км к востоку от Ташкента, и занимает площадь около 70 км² [1 - 3].

Объектами настоящего исследования являются гидротехнические сооружения, эксплуатируемые на угольном разрезе «Ангренский»: охранная плотина, водопонижающие дренажные колодцы с погружными насосами, подземный обводной тоннель, обводной канал с водобойными гасителями энергии, насосная станция, транспортный трубопровод, сливное сооружение – гидроотвал. В качестве методов исследования использованы – методы априорного анализа изучения функционирования объектов исследования, визуального наблюдения за их состоянием в течение длительного времени.

Активная разработка бурогольного месторождения была начата в годы второй мировой войны из-за потребности в топливе для оборонной промышленности [1, 4]. Следует отметить, что месторождения угля имеют сложный геодинамический характер, так как ограничивающие месторождение Чаткальский и Кураминский хребты постоянно смещаются навстречу друг другу [5], что существенно усложняет технологические процессы в зависимости от технологических и экологических проблем. Следует отметить важное стратегическое расположение Ангренского месторождения: здесь имеются автомобильная и железнодорожная дороги, связывающие с его с Ферганской долиной; проложены международный газопровод и линии электропередачи напряжением 500 кВ.

В пределах месторождения отмечаются древние оползни, захватившие в своем смещении юрские, меловые, палеогеновые отложения, а местами даже четвертичные отложения. Оползни усложняют добычу полезных ископаемых и наносят значительный материальный ущерб. Поэтому знания и опыт, полученные в процессе борьбы с этими опасными явлениями, имеют большое народнохозяйственное значение [6].

Серьезные экологические и техногенные проблемные вопросы представляют собой техногенные, техногенно-природные оползни на бортах Ангренского разреза и, особенно, Атчинский (Загасан-Атчинский) оползень, уникальный по своим масштабам и возможным аварийным последствиям. Его объем составляет около одного млрд м³. До сих пор в мировой практике не было такого опыта борьбы с оползневыми процессами, который был получен в процессе работ по его стабилизации [6].

Оползень образовался в результате техногенного (промышленного) воздействие на левобережные склоны долины реки Ахангаран в пределах Ангренского бурогольного месторождения (рис. 1).

Техногенная нагрузка на эту площадь значительна, так как здесь успешно функционирует крупные горнодобывающие предприятия [4, 5]:

- разрез «Ангренский» (глубина около 300 м);
- шахта №9 (глубина 200-250 м);
- угольные разрезы «Апартак» и «Наугарзанский»;
- карьер горелых пород (глиежей);
- станция подземной газификации угля «Подземгаз».

Кроме этого, на месторождении расположены: производственно-технологическое управление добычей угля, энергетическое хозяйство железнодорожного транспорта, ремонтная база тяжелого грузового транспорта, гражданский железнодорожный вокзал, цементный завод, дробильно-сортировочная фабрика вторичных каолинов, закрытые и законсервированные шахты № 1, 3, 8. Месторождение является крупнейшим транспортным узлом, где пересекаются важнейшие железнодорожные и автодорожные пути. Все указанные сооружения размещены на левобережье долины реки Ахангаран.



Рис. 1. Схема расположения гидротехнических сооружений разреза «Ангренский»: плотины, подземного туннеля, обводного канала, водосливного гидроотвала, дренажных скважин

Вверх по течению находится основное гидротехническое сооружение - плотина высотой до 100 метров и водохранилище (рис. 2, 3).



Рис. 2. Вид на плотину

Традиционными гидротехническими сооружениями являются: плотины; здания гидроэлектростанций; водосбросные; водоспускные и водовыпускные сооружения; туннели и каналы; насосные станции, судоходные шлюзы и судоподъемники; сооружения, предназначенные для защиты от наводнений и разрушений берегов водохранилищ, берегов и дна русел рек. Обычно гидротехнические сооружения предназначены для использования водных ресурсов (рек, озёр, морей, грунтовых вод) или для борьбы с разрушительным действием водной стихии.

В частном случае, на примере угольного разреза «Ангренский», гидротехнические сооружения используются в качестве защитно-охранных, производственно-технологических, временно локализирующих сооружений для стратегически важных объектов угольного разреза.

Плотина (рис. 3) служит для снижения напора воды и предохраняет от затопления угольный разрез и другие объекты, подземный тоннель позволяет отвести часть воды реки Ахангаран, не нанося ущерба надстроенным производственным объектам, обводной канал используется для вывода потока воды из подземного тоннеля и снижения его энергии, карьерная насосная станция откачивает избыток сточных вод и атмосферных осадков за пределы территории разреза «Ангренский», гидроотвал предназначен для слива карьерных

сточных вод и атмосферных осадков и для осаждения взвешенных частиц угля, каолина, песка и других минеральных включений [7 - 9].



Рис. 3. Вид на плотину

Уровень воды в водохранилище колеблется в широких пределах и сброс сверх нормы осуществляется по трехкилометровому подземному тоннелю и далее по обводному каналу протяженностью более 6,5 км, с водобойными гасителями энергии (рис. 4).

Водобойные гасители энергии на обводном канале сооружены на различных расстояниях в зависимости от уровня водонапора, в общем количестве 8 блоков.



Рис. 4. Обводной канал с водобойными гасителями энергии

Часть водных потоков просачивается подземными потоками в бассейн угольного карьера, где собирается со сточными и осадочными потоками. В зависимости от уровня воды и интенсивности водопритоков откачивается агрегатами насосной станции (рис. 5).

Насосная станция работает в непрерывном режиме, расход воды регулируется в зависимости от объема водопритоков. Насосные агрегаты при паводках на максимальной производительности способны откачивать до 20 млн. м³ воды. Основное количество водопритоков и осадков перекачивается по трубопроводам (диаметр трубопровода равен 1000 мм). Кроме карьерных вод по трубопроводному транспорту перекачивается шахтные воды угольной шахты № 9.

Ниже шахты № 9 и станции «Подземгаз» на левом склоне долины большая площадь отведена под отвалы вскрышных пород и водосливные сооружения—гидроотвалы. Гидроотвалы имеют общую площадь около 2 км² и расположены в 13 км от разреза «Ангренский» (рис. 6).



Рис. 5. Насосная станция разреза «Ангренский»

Более 5 км² полезной площади гидроотвала, в результате складирования вскрышных пород разреза «Ангренский» были рекультивированы и выведены из гидроотвального хозяйства.

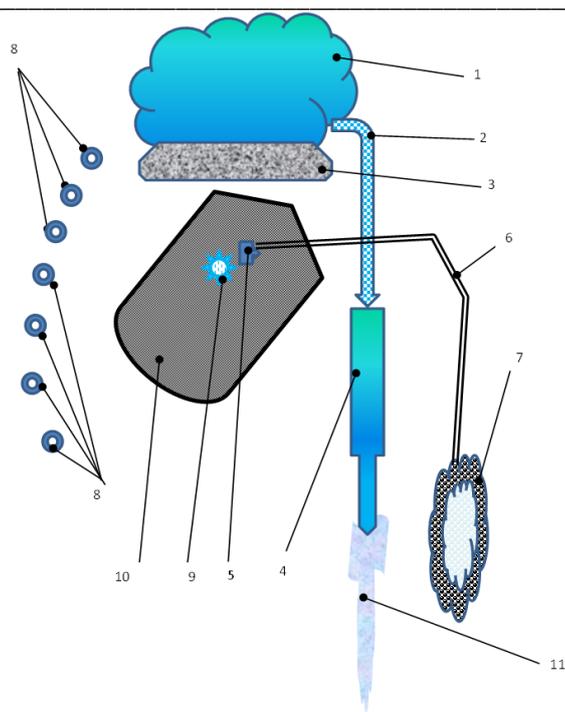


Рис. 6. Гидротехнические сооружения – водосливные карты «гидроотвала»

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод, что каждое звено системы гидротехнических объектов играет важную роль в функционировании угольного разреза «Ангренский», а также в повышении устойчивости горных массивов на оползнеопасных участках. На рис. 7 приведена упрощенная технологическая блок-схема разреза «Ангренский» с точки зрения производственно-технологических, временно локализирующих и природоохранных аспектов (рис. 7).

В настоящее время, как на левом, так и на правом бортах разреза имеются оползневые участки — Атчинский, Наугарзанский, Центральный, Северный, Южный, Загасанский, Шахтный, Старая «Подстанция», Верхнетуркский, Таньгатоптинский, оползни на склонах долины реки Джигиристан, а также массив «Коканд». Из них наиболее значимыми и опасными оползнями являются Атчинский, Наугарзанский, Южный, Северный, Центральный [6]. По бортам разреза Ангренский имеются многочисленные мелкие оползни техногенного происхождения.

В период деятельности угледобывающих предприятий произошли деформации земной поверхности, изменились гидрогеологические условия и свойства горных пород. Площадь оползней в конце 40-х годов (в начальный период освоения месторождения) не превышала 2 км². В результате активизации древних и образования новых оползневых очагов площадь оползней с 1950 по 1980 годы (при глубине отработки до 140 м) увеличилась соответственно с 4 км² до 15 км² (при глубине 250-300 метров). В настоящее время оползни скольжения развиваются на 9 участках, расположенных в зонах инженерных сооружений.



1 – водохранилище на русле реки Ахангаран; 2 – подземный обводной тоннель водных потоков реки Ахангаран; 3 – охранный плотина между водохранилищем и угольным разрезом; 4 – обводной канал (с водоотбойными гасителями энергии водных потоков реки Ахангаран); 5 – насосная станция для карьерных сточных вод; 6 – трубопроводный транспорт карьерных сточных вод; 7 – водосливное сооружение карьерных сточных вод – гидроотвал; 8 – водопонижающие дренажные скважины с водоподъемными насосами; 9 – водосборное сооружение карьерных сточных вод разреза «Ангренский»; 10 – технологическая площадь угольного разреза «Ангренский»; 11 – естественное русло реки Ахангаран

Рис. 7. Схема расположения основных гидротехнических сооружений разреза «Ангренский»

Была проведена огромная работа по изучению и мониторингу Атчинского оползня. По единой программе работали объединения «Узбекгидрогеология», «Средазуголь», институты «УкрНИИпроект», «Карагандагипрошахт». Дополнительно специалистами проводятся нивелировочные измерения.

Для установления влияния колебаний уровня подземных вод на развитие оползня по шести родникам и по 15-20 скважинам в мелопалеогеновых породах и тектонитах с цикличностью 3-6 раз в месяц проводились многолетние режимные наблюдения. Сейсмические воздействия на интенсивности движения оползня с 1976 г. регистрируются Ангренской станцией института сейсмологии АН Узбекистана. Полученные данные позволили разработать модели механизма образования оползня, спрогнозировать его развитие и разработать мероприятия по стабилизации оползневого процесса. Были определены обоснованные объемы отсыпки контрфорса для стабилизации оползня, разработаны профилактические мероприятия.

В заключение можно отметить, что в настоящее время организация работ по контролю состояния оползневых процессов и проведению необходимых защитных мероприятий основана на осуществлении системы мониторинга – наблюдения, прогноза, контроля за опасными геологическими процессами и изменениями состояния геологической среды [7-9].

Вышеприведенные аналитические и априорные суждения позволили сформулировать следующие задачи:

– первой задачей и исходным звеном мониторинга этой системы являются наблюдения по специально спланированной системе. Цель - оперативное получение полной и

достоверной информации о характере, масштабе, интенсивности взаимодействия инженерных сооружений с геологической средой, для своевременного выявления признаков возникновения неблагоприятных процессов;

– вторая задача и очередное звено системы мониторинга – научно обоснованный прогноз;

– третьей задачей и важнейшим звеном мониторинга является оценка состояния геологической среды и выработка рекомендаций для принятия решений;

– четвертой задачей и последним звеном системы мониторинга является управление деятельностью по нейтрализации возможных катастрофических последствий изменения геологической среды.

– конечной задачей и резюмирующим звеном является синтез системы мониторинга [7-9] и системы функционирования горно-технического комплекса в единую интегрированную контрольно-управленческую систему АИС ЦДК (автоматизированная информационная система централизованной диспетчерского контроля) угольной отрасли.

Выводы. Таким образом, гидротехнические сооружения: плотина, подземный тоннель, обводной канал, водобойные гасители энергии напора, карьерная насосная станция, водоперемещающие трубопроводы, водосливные гидроотвалы и дренажные скважины с глубинными насосами составляют единую систему, мониторинг которой является важнейшим элементом комплекса мер по защите от катастрофических последствий оползневых процессов.

Кроме этого, мониторинг позволяет дать техническую и технологическую оценку состояния основных технологических гидротехнических объектов в сложном взаимодействии с функционированием производственного процесса добычи угля.

Эта глубоко продуманная и научно обоснованная система непрерывного получения информации о состоянии и изменении геологической среды в оползневом районе позволяет вырабатывать четкие своевременные решения по предупреждению катастрофических последствий оползневых сдвижений. С другой стороны, накапливаются уникальный, как для отечественной науки, так и для мировой практики опыт борьбы с оползневыми явлениями.

Список литературы

1. Лелеко А.И. Угольная промышленность Узбекистана: этапы развития // Научно-технический и производственный журнал «Вестник Узбекистана». – 1998. – № 1. – С. 3-6.
2. Энергетическое топливо СССР. Справочник. – М. Энергоатомиздат, 1991. – 184 с.
3. О геодинамической модели напряженного состояния массива горных пород ангреноского бурогоугольного месторождения / Б.Р. Раимжанов, Т.Р. Абдужалилов, С.И. Якубов, И.П. Сидорова // РНТК «Горно-металлургический комплекс: достижения, проблемы и перспективы инновационного развития». – г. Навои, 2016. – С. 7.
4. Хурсанов Х.П. Угольная промышленность Узбекистана: этапы становления, пути развития и перспективы // Горный вестник Узбекистана. – 2008. – № 1. – С. 3-9.
5. Якубов С.И., Сидорова И.П., Раимжанов Б.Р. Изучение оползневых явлений - один из проблемных вопросов при добыче угля на разрезе «Ангреноский» // Горный информационно – аналитический бюллетень. – 2017. – № 6. – С. 370-375.
6. Школлер М.Б. Современные энерготехнологические процессы глубокой переработки твердых топлив. – Новокузнецк: НОУ РЦПП ЕВРАЗ-Сибирь, 2013. – 287 с.
7. Современные методы и технологии в области безопасности плотин и других гидротехнических сооружений / Н. Эрназаров, М. Бакиев, Ш. Талипов, З. Ирисбаев. – Ташкент: Госводхознадзор. – 2016. – 158 с.
8. Беспалов А.Г. Гидротехнические сооружения / А.Г. Беспалов, А.Л. Сальников, О.Н. Беспалова, С.А. Давыдова. – М.: КноРус; Астрахань: Астраханский государственный университет. – 2016. – 93 с.
9. Мониторинг дамб и плотин. – «СМИС Эксперт». – URL: <https://smis-expert.com/monitoring-damb-i-plotin/>

УДК: 622:504.7:338.2

**ИНИЦИАТИВЫ РОССИЙСКИХ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ КОМПАНИЙ
ПО СНИЖЕНИЮ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ****Нагайцев И.А., д.э.н. Петрова Т.В.****Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия**

Аннотация. В статье рассматриваются факторы, влияющие на изменение климата и возможные последствия. Приведены действия России в рамках выполнения обязательств Парижского соглашения по снижению выбросов парниковых газов, данные об объемах выбросов парниковых газов в России, наибольшая часть из которых приходится на энергетический сектор, включающий выбросы от сжигания ископаемого топлива и добычи углеводородов. Особое внимание уделено выбросам одного из парниковых газов - метана при подземной добыче в угледобывающей отрасли: показаны инициативы компаний отрасли по снижению выбросов парниковых газов, в том числе метана, статистика выбросов парниковых газов этих компаний.

Ключевые слова: парниковые газы, климатические изменения, выбросы метана, угледобывающая отрасль.

Введение. Парниковые газы (ПГ), основными из которых являются углекислый газ (CO₂), метан (CH₄), оксид азота (N₂O) и фторсодержащие газы (ПФУ), обладают способностью задерживать тепловое излучение планеты и при большом скоплении в атмосфере Земли способствуют ее нагреву. К источникам выбросов ПГ относятся:

– антропогенные выбросы ПГ. Они составляют большую часть выбросов ПГ и являются, согласно современной точке зрения, основной причиной нагревания атмосферы (создания парникового эффекта). За последние 200 лет антропогенные выбросы ПГ увеличивались за счет бурного роста промышленности, использующей ископаемые углеводороды: нефть, газ и уголь, а также за счет вырубки лесов и развития сельского хозяйства;

– естественные выбросы ПГ. Они составляют меньшую часть выбросов ПГ в атмосфере Земли. Наибольшими источниками выбросов ПГ являются крупные лесные пожары, испарения мирового океана, извержения вулканов.

Последствиями нагревания атмосферы за счет большого скопления парниковых газов становятся климатические изменения, которые обуславливают природные катаклизмы: повышение уровня мирового океана, в результате таяния ледников; уменьшение или увеличение количества осадков, что повлечет за собой наводнения и засухи; увеличение непригодных для жизни территорий; гибель экосистем - из-за быстро меняющихся условий окружающей среды отдельные виды животного и растительного мира не смогут адаптироваться к ним и погибнут.

В целях борьбы с изменением климата и его негативными последствиями в 2015 году было принято Парижское соглашение, целью которого является укрепление глобальных мер по борьбе с климатическими изменениями с тем, чтобы удержать повышение глобальной температуры в XXI веке в пределах 2°C и попытаться даже снизить этот показатель до 1,5°C. В рамках этого соглашения страны и их объединения разрабатывают и внедряют различные механизмы по сокращению антропогенных выбросов парниковых газов. К ним относятся: системы торговли квотами на выбросы ПГ (СТК), углеродный налог и другие меры по снижению выбросов ПГ.

Россия ратифицировала Парижское соглашение в 2019 году и взяла обязательство сократить выбросы ПГ до 70 % к 2030 году (относительно базового 1990 года) с учетом

максимально возможной поглощающей способности лесов и иных экосистем и при условии устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития России.

Для выполнения обязательств в 2021 году утверждена Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года [1]; принят Федеральный закон № 296 «Об ограничении выбросов парниковых газов» [2], целью которого является создание условий для устойчивого и сбалансированного развития экономики России при снижении уровня выбросов парниковых газов; с сентября 2022 года реализуется пилотный проект СТК на Сахалине в рамках исполнения Федерального закона № 34 «О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации» [3].

Вышеприведенные меры показывают высокую заинтересованность России в достижении целей Парижского соглашения путем снижения выбросов парниковых газов, при условии устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития страны.

Антропогенные выбросы ПГ в России. Основной объем антропогенных выбросов парниковых газов приходится на выбросы в энергетическом секторе, это выбросы при добыче и сжигании всех видов ископаемого топлива. Меньший объем выбросов приходится на сельское хозяйство, отходы и производство углеродоемкой продукции, в том числе производство продукции из минерального сырья, химическая промышленность, металлургия, использование растворителей и неэнергетических продуктов из топлива, электронная промышленность, использование фторированных заменителей озоноразрушающих веществ, производство и использование другой продукции. Структура выбросов ПГ 2020 года в РФ представлена на рис. 1. По сравнению с базовым 1990 годом выбросы парниковых газов сократились на 35 %. Этот результат указывает на положительную динамику действий страны в рамках климатической повестки, но не является достижением поставленных целей.

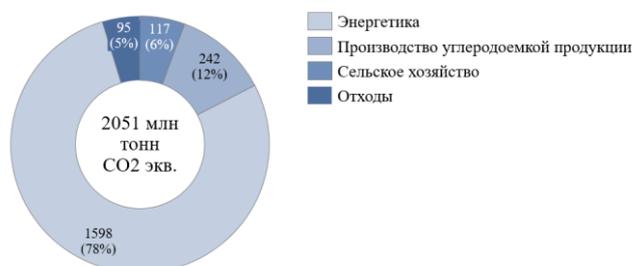


Рис. 1. Структура выбросов ПГ России в 2020 году, млн тонн СО₂ экв. [4]

По основным секторам с наибольшими антропогенными выбросами парниковых газов наблюдается как незначительный спад (энергетика), так и рост выбросов (производство углеродоемкой продукции, сельское хозяйство, отходы). Выбросы ПГ 2017-2020 годов по секторам приведены на рис. 2.



Рис. 2. Выбросы ПГ по секторам 2017-2020, млн тонн СО₂ экв. [4]

Структура выбросов ПГ в энергетическом секторе, включающих выбросы от сжигания ископаемого топлива, потерь и технологических выбросов топливных продуктов в

атмосферу от добычи твердых топлив и от деятельности, связанной с нефтью и газом приведена на рис. 3.



Рис. 3. Структура выбросов ПГ энергетического сектора 2020 года, млн тонн CO₂ экв. [4]

Выбросы метана в угольной отрасли. Большой объем выбросов парниковых газов в России приходится на процессы, связанные с добычей, транспортировкой, переработкой и сжиганием углеводородов, включая уголь, который добывается открытым и подземным способами на 109 разрезах и 52 угольных шахтах. Из угледобывающих регионов самым крупным производителем и поставщиком угля является Кемеровская область – Кузбасс, где добывается более половины угля в стране (в январе-сентябре 2022 года добыто более половины (50,8%) всего угля в стране, 57,1% углей коксующихся марок) и являющегося крупнейшим экспортером российского угля (57,1%) [5].

Наибольшие выбросы парниковых газов при добыче угля связаны с выбросами метана при подземном способе его добычи [6]. В связи с тем, что метан, являясь взрывоопасным газом, несет большую угрозу для жизни работников, для обеспечения безопасности ведения горных работ предусматриваются мероприятия по вентиляции и дегазации. Целью мероприятий является снижение концентрации метана до допустимой для безопасного ведения горных работ. Метан, выбрасываемый в атмосферу в процессе вентиляции и дегазации, в большой мере способствует наступлению климатических изменений, так как его влияние на изменение климата в 25 раз выше, чем у углекислого газа [7, 8].

Инициативы Российских угледобывающих компаний по снижению выбросов парниковых газов. Большие доли добычи угля в РФ приходятся на АО «СУЭК», ООО «ММК-УГОЛЬ», АО «Воркутауголь», ПАО «Южный Кузбасс», ПАО «Распадская угольная компания»,

Компания СУЭК, одна из крупных интегрированных энергетических компаний мира с добывающими, генерирующими и логистическими мощностями (в том числе 25 угольных шахт и разрезов, 10 обогатительных фабрик и установок, 27 ТЭС, 5 портов) в своем отчете об устойчивом развитии одной из целей ставит снижение выбросов парниковых газов. В 2021 году снижение выбросов ПГ компании в угольном сегменте составило 27 %. Компания занимается реализацией проектов по утилизации метана с генерацией электроэнергии. За 2021 год утилизировано около 0,139 млн. т CO₂ экв. установками на шахтах «С.М. Кирова» и «Комсомolec». Помимо технологий, связанных с утилизацией метана, компания модернизирует и строит угольные станции с высоким коэффициентом полезного действия (КПД) и реализует проекты по замещению котельных объектами когенерации (электростанции с совместной выработкой тепла и электроэнергии). Динамика объемов выбросов ПГ компании СУЭК приведена на рис. 4 а.

Группа ПАО «ММК» - один из крупнейших мировых производителей стали с активами, представляющими собой крупный металлургический комплекс с полным производственным циклом, начиная с подготовки железорудного сырья и заканчивая глубокой переработкой черных металлов. В структуре ММК находится ООО «ММК-УГОЛЬ» (2 шахты, обогатительная фабрика, цех сервиса и логистики). Одной из своих целей экологической программы до 2025 года компания ставит снижение выбросов парниковых газов. Динамика выбросов ПГ компании ММК приведена на рис. 4 б. Компания ММК стремится снизить выбросы ПГ: одним из реализуемых проектов компании является Строительство комплекса

коксовой батареи № 12 с завершением реализации в 2023 году. Инвестиции в проект составляют 66,9 млрд. руб. с эффектом 1,112 млн. т CO₂ экв.

Металлургическая и горнодобывающая компания Северсталь, включающая железорудные горнодобывающие активы, металлургический комбинат и угольные мощности АО «Воркутауголь» (4 шахты, 1 угольный разрез, центральная обогатительная фабрика, механический завод и транспортное предприятие). Одной из целей компании является сокращение на 10% выбросов ПГ к 2030 году (от уровня 2020 года). Для достижения этой цели в инвестиционную программу включено несколько специальных проектов, включая техническое перевооружение производственных мощностей и освоение новейших технологий на всех предприятиях компании. Выделение активов по добыче коксующегося угля АО «Воркутауголь» из структуры компании позволило снизить выбросы ПГ компании на 14,3 %. Еще одной инициативой компании является снижение потребления коксующегося угля, основного источника выбросов ПГ. Динамика выбросов ПГ «Северстали» представлены на рис. 4 в.

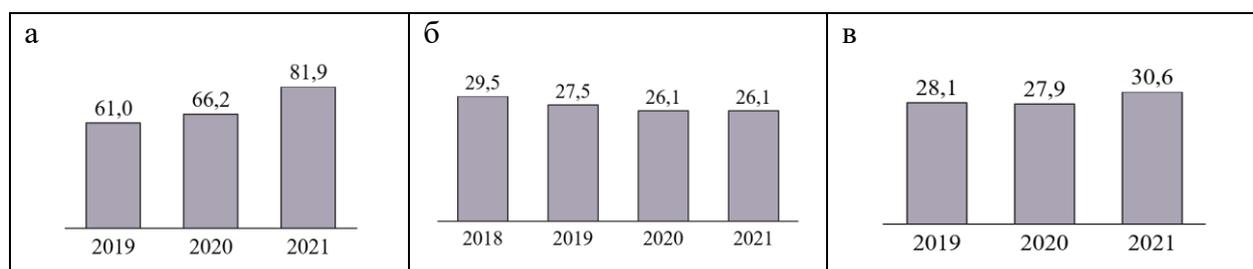


Рис. 4. Объемы прямых выбросов ПГ, млн тонн CO₂ экв.: компании СУЭК [9] (а); компании ММК, [10] (б); компании Северсталь, [11] (в)

В 2021 году суммарные выбросы парниковых газов Северстали увеличились на 2,77 млн. т CO₂ экв. (9,9%) в результате увеличения объема производства и ввода в эксплуатацию коксовой батареи № 11 и доменной печи № 3. Среди приоритетных направлений компании по снижению выбросов ПГ можно выделить:

- модернизация и повышение энергоэффективности технологического оборудования;
- повышение полноты использования вторичных источников энергии (доменный газ, коксовый газ и избыточное тепло);
- развитие технологии производства стали;
- повышение качества сырья и топлива;
- использование сырья и отходов вторичных ресурсов.

Компания Мечел, объединяющая более 20 промышленных предприятий по производству угля ПАО «Южный Кузбасс» (3 шахты, 4 угольных разреза, 4 обогатительные фабрики, автотранспортное предприятие), железной руды, стали, проката, ферросплавов, тепловой и электрической энергии, также признаёт важность климатической повестки и снижения негативного воздействия на климат. В Отчёте об устойчивом развитии за 2021 год Мечел раскрывает данные в части энергоэффективности энергетического сегмента Группы, но не представляет данные о выбросах парниковых газов. В планах компании провести количественную оценку выбросов парниковых газов и представить результаты в будущих отчётах об устойчивом развитии [12].

Распадская угольная компания (РУК) является лидером российского рынка и одним из крупных международных экспортёров коксующегося угля (8 шахт, 2 разреза, 3 обогатительные фабрики, вспомогательные предприятия). Компания внимательно относится к вопросам охраны окружающей среды, осознает необходимость снижения выбросов парниковых газов для борьбы с изменением климата, ежегодно публикует информацию о выбросах ПГ и достижении целей по их снижению. Выбросы ПГ компании в динамике приведены на рис. 5, структура выбросов ПГ за 2022 год - на рис. 6.

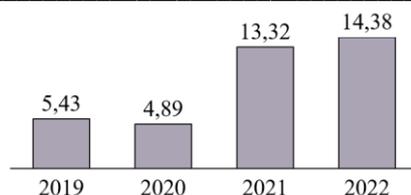


Рис. 5. Выбросы парниковых газов Распадской угольной компании, млн тонн CO₂ экв. [13]

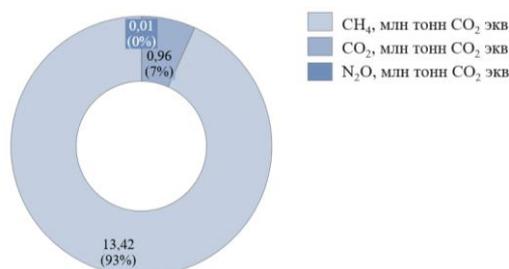


Рис. 6. Структура выбросов парниковых газов Распадской угольной компании в 2022 году, млн тонн CO₂ экв. [13]

Из графика видно, что выбросы ПГ в 2021 году увеличились по сравнению с 2020 годом более чем в два раза, произошло это из-за расширения периметра расчета выбросов ПГ. В периметр расчета были добавлены предприятия Новокузнецкой площадки.

Из графика следует, что 93 % выбросов ПГ в 2022 году - это выбросы метана. Выбросы метана делятся на источники:

- вентиляция: выбросы с низкой концентрацией метана (до 0,75% CH₄);
- дегазация: выбросы с высокой концентрацией метана (от 25% CH₄);
- газоправление: выбросы с низкой концентрацией метана (до 3,5% CH₄).

Менеджмент компании ставит перед собой цели по снижению выбросов метана от дегазации. Для этого разработана программа по утилизации метана, выбрасываемого при дегазации, в рамках которой запланировано на среднесрочную перспективу внедрение факельных установок утилизации метана, с капитальными затратами по всей программе около 1 млрд. руб. В рамках реализации программы в 2021 году запущены две факельные установки по утилизации метана на шахте «Алардинская» и две установки на шахте «Ерунаковская-VIII». Экологический эффект за 2021 – 2022 годах представлен на рис. 7.

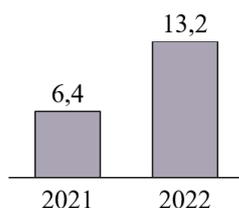


Рис. 7. Утилизация метана за РУК в 2021-2022 годы, тыс. тонн CH₄ [13]

За 2021 год снижение выбросов ПГ за счет сжигания метана на факельных установках составило 0,16 млн тонн CO₂ экв., за 2022 год - 0,33 млн тонн CO₂ экв.

В настоящее время в компании рассматривается возможность использования альтернативных технологий снижения выбросов ПГ и попутного получения тепла и электроэнергии за счет утилизации метана газопоршневыми установками и котельным оборудованием, устанавливаемых на площадках дегазационных установок.

Компания – один из лидеров российского рынка и один из крупных международных экспортеров коксующегося угля. Распределение реализации концентрата представлено на рис. 8.

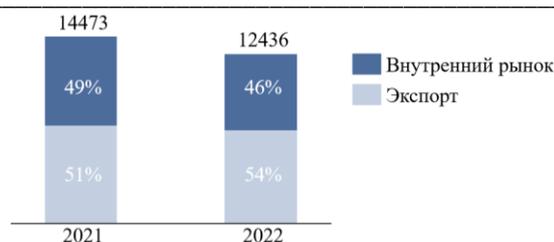


Рис. 8. Реализация концентрата 2021-2022 год, тыс. т [14]

Для поддержания конкурентоспособности продукции компании на зарубежных рынках ей необходимо соответствовать действующим и планируемым к реализации законам, и трендам стран-импортеров угольной продукции. В частности, Китай, являющийся страной с самыми большими антропогенными выбросами парниковых газов, поддерживает политику климатической повестки с целью достижения к 2060 году углеродной нейтральности. Для ее реализации Китай внедряет различные механизмы углеродного регулирования и поддержания проектов, снижающих выбросы парниковых газов. В 2021 году страна утвердила план действий по достижению пиковых значений выбросов ПГ к 2030 году, который предусматривает укрепление импорта и экспорта энергосберегающих и экологически чистых продуктов и услуг [15].

Выводы. Приведенные в работе действия России на пути к снижению антропогенных выбросов ПГ отражают актуальность и необходимость научных исследований направлений учета, улавливания и снижения выбросов парниковых газов в наиболее углеродоемких отраслях. Анализ выбросов ПГ России показывает, что наибольшие выбросы парниковых газов фиксируются в энергетическом секторе в основном за счет выбросов от сжигания всех видов ископаемого топлива, также велики выбросы при добыче полезных ископаемых.

Результаты анализа динамики выбросов парниковых газов горно-металлургической отрасли и инициатив компаний по снижению выбросов ПГ, за счет реализации проектов внедрения низкоуглеродных технологий, модернизации оборудования, повышения энергоэффективности подтверждают высокую заинтересованность в участии в климатической повестке добывающих компаний. Однако следует отметить, что существует ряд сдерживающих факторов: отсутствие углеродного регулирования и инициатив, направленных на поддержку проектов по снижению выбросов парниковых газов в стране, а также высокие капитальные затраты на оборудование и его модернизацию и неопределенный период окупаемости затрат.

Список литературы

1. Стратегия социально экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года // Правительство Российской Федерации. – 2021. – 34 с.
2. Об ограничении выбросов парниковых газов : федер. закон от 02.07.2021г., № 296-ФЗ. – 2021. – 20 с.
3. О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации : федер. закон от 06.03.2022, № 34-ФЗ. – 2022. – 24 с.
4. Охрана окружающей среды в России. 2022: стат. сб. / Росстат. – М., 2022. – 115 с.
5. Петренко И.Е. Итоги работы угольной промышленности России за январь-сентябрь 2022 года // Уголь. – 2022. – № 12. – С. 7-21.
6. Уткаев Е.А. Цифровая платформа оценки выбросов парниковых газов при угледобыче // Вестник НЦ Востнии. – 2022. – №4. – С. 63-70.
7. Нагайцев И.А., Петрова Т.В. Направления развития технологий сокращения выбросов парниковых газов для предотвращения климатических изменений // Экономика. Право. Инновации. – 2022. – № 4. – С. 21–29.

8. Нагайцев И.А. Организационные механизмы снижения выбросов парниковых газов // Наука и просвещение. Экономика в теории и на практике: актуальные вопросы и современные аспекты. – 2022. – С. 60-65.

9. Отчет об устойчивом развитии СУЭК. – 2021. – 180 с. – URL: https://www.suek.ru/upload/pdf/1674202400944472628_SUEK_2022_AnurepOUR_WWW_ver1.pdf

10. Устойчивое развитие ММК. – 2021. – URL: <https://mmk.ru/ru/sustainability/>

11. Годовой отчет 2021 Северсталь. – 2021 – 126 с. – URL: https://severstal.com/upload/iblock/258/SR_Severstal_2021_RU.pdf

12. Отчет об устойчивом развитии Мечел. – 2021. – 145 с. – URL: <https://www.mechel.ru/upload/iblock/84b/khhkddfg9q2ud6q81ekvijfa1rhf46j4.pdf>

13. Годовой обзор ПАО «Распадская». – 2021. – 181 с. – URL: https://files.raspadskaya.com/files/ru/Raspadskaya_AR2021_RUS_final.pdf

14. ПАО «Распадская». Финансовые результаты за 2022 год. – 11 с. – URL: https://files.raspadskaya.com/files/ru/reports/RASP_FY_2022_financial_results_presentation_RUS_final.pdf

15. План действий по пику выбросов углерода до 2030 года // Государственный совет. – 2021. – URL: https://www.mee.gov.cn/zcwj/gwywj/202110/t20211026_957879.shtml

УДК 662.749

К ВОПРОСУ О ПЕРСПЕКТИВАХ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ КАМЕННЫХ И БУРЫХ УГЛЕЙ

д.т.н. Прошунин Ю.Е., д.т.н. Мурко В.И.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Рассмотрены мировые и отечественные тенденции добычи угля, использования его в энергетике, металлургии и химической промышленности. Показаны перспективы технологий глубокой переработки углей в Кузбассе и предложены направления её развития с учетом географического расположения региона. Представлены предложения по воссозданию прикладной науки для развития угольной промышленности и углехимии.

Ключевые слова: добыча угля, использование угля в энергетике и металлургии, низкоуглеродная энергетика, глубокая переработка угля, инновационная система, прикладная наука, ВНИИГидроуголь, ВУХИН.

Несмотря на многочисленные декларации о наступающем господстве в энергетике и промышленности возобновляемых источников энергии (ВИЭ), снижения добычи угля в мире не наблюдается. Напротив, присутствует стабильный рост. Так, с 2016г. по 2022г. мировая добыча выросла на 10,6% и достигла 8318,2 млн. тонн). Более того, аналитики Международного энергетического агентства (International Energy Agency, IEA) прогнозируют небольшой, но устойчивый рост спроса на уголь на мировом рынке в ближайшие годы [1-3].

Наметившиеся тенденции увеличения доли ВИЭ в энергетике ряда ведущих стран мира могут существенно изменить свой вектор в связи с суровой зимой 2020-21 годов. Следует также отметить, что по прогнозам Международного энергетического агентства с 2023г. ожидается закономерное снижение доли ВИЭ в энергетике из-за истечения срока действия государственных стимулирующих мер [1, 4].

Указанные обстоятельства и известные достоинства угля, такие, как значительность запасов, дешевизна, доступность, удобство аккумуляирования, насыщенность

инфраструктуры позволяют предположить, что в обозримом будущем значительного снижения доли угля в энергетике ожидать не приходится.

Для прогноза изменения спроса на рынке угля рассмотрим, в каком положении находятся крупнейшие потребители угля. По данным British Petroleum, опубликованным в ежегодном Статистическом обзоре мировой энергетике 2022 (Statistical Review of World Energy 2022) [1] с 2016г. по 2021 г. выработка электроэнергии в мире выросла на 14,7% до 28 466 млрд. кВт·ч.

При этом большая часть электроэнергии (36%) получена из угля, а угольная генерация электричества в мире в 2022г. выросла на 9% до 10,35 тыс. ТВт·ч. Доля угля в энергетическом балансе мира (2021 г.) составила 26%, уступая лишь нефти (31%). В целом в настоящее время из ископаемых видов топлива вырабатывается 82% получаемой первичной энергии. Следует отметить, что, хотя доля угля в мировом энергобалансе может снижаться, но физические объемы его потребления продолжают расти из-за динамичного роста мирового энергопотребления [1, 3].

Снижение добычи угля в ряде ведущих европейских стран, таких, как Германия и Великобритания, объясняется весьма прозаически: истощение месторождений каменных углей сделало нерентабельной их добычу подземным методом. Поэтому, закрыв свои шахты, Германия продолжает открытую добычу бурых углей (135 млн. тонн в год), используя их для выработки тепло- и электроэнергии, открывая два новых предприятия открытой добычи и ввозя при этом коксующиеся угли для получения металлургического кокса из-за рубежа. Такие страны ЕС, как Франция, Италия, Германия, а также Великобритания, открывают новые и расконсервируют выведенные в резерв угольные ТЭС. США в 2021 г. увеличили добычу углей на 20% по сравнению с 2020 г. В Германии доля угля в общей структуре генерации в 2021 г. выросла до 30% по сравнению с 20% в 2020 году [1, 5].

Активно увеличивается добыча угля в Азиатских странах, где бурно развивающаяся промышленность требует значительного количества недорогого и доступного природного энергоносителя. Так, добыча угля в Индонезии выросла в 2022г. до 582 млн. тонн (на 9,3% по сравнению с 2021 годом), в Индии – до 1,021 млрд. тонн (рост - 10,9%), в Китае – до 4,358 млрд. тонн (рост - 6,9%, 52,4% мировой добычи). Китай широко использует сжигание и газификацию водоугольного топлива (ВУТ) (около 130 млн. тонн в год) для производства электроэнергии, а в 2022г. ввел в эксплуатацию угольные электростанции мощностью 50 ГВт и планирует в 2023-24 годах дополнительно ввести в эксплуатацию угольные электростанции мощностью 56 ГВт [1].

Согласно данным Всемирной ассоциации, стали (World Steel Association, WSA) с 2015 по 2021 годы производство стали выросло на 16,6% до 1,951 млрд. тонн. Кстати, Япония, которую никто не может упрекнуть в недостатке высоких технологий, практически не имея собственных месторождений угля и железной руды, по выплавке стали занимает третье место в мире, уступая лишь Китаю и Индии [1, 3].

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

Получение чугуна невозможно без наличия качественного, отвечающего жестким современным требованиям кокса, выполняющего тройную функцию в доменной печи: источника тепла, восстановителя и разрыхлителя. Причем снижение расхода кокса от нормальных 500 кг/т чугуна за счет вдувания пылеугольного топлива выдвигает еще более жесткие требования к качеству каменноугольного кокса. А это означает, что в обозримом будущем без угля просто не обойтись и снижения потребления угля в ближайшие десятилетия ожидать не приходится [1, 3, 5].

Кемеровская область установила в 2018г. абсолютный рекорд: добыча твердого топлива составила 255,3 млн. тонн. В 2022г. добыто 223,6 млн. тонн угля, из них 126,2 млн. тонн (56,4% рядовых углей) и 53,0 млн. тонн (23,7% рядовых углей) было подвергнуто первичной переработке: обогащению и сортировке соответственно. Всего Кемеровской

областью – Кузбассом было отгружено 180,9 млн. тонн конечным потребителям: 120,2 – на экспорт; 31,8 – для производства металлургического кокса; 17,9 – для тепловых электростанций и 3,7 – для предприятий ЖКХ и населения [2, 5].

Некоторое снижение добычи объясняется значительной зависимостью угледобывающей отрасли от экспорта углей и конъюнктуры внешнего рынка. В отличие от РСФСР с ее развитой промышленностью, полностью направлявшей добытый уголь на внутренний рынок (например, в 1988г. ни одной тонны из 425 млн. добытого угля не было направлено за рубеж) в балансе России экспорт углей имеет определяющее значение: около 50%. Еще значительнее величина экспорта для Кемеровской области - Кузбасса: примерно 66% в 2022г.

В последние годы такие угледобывающие компании, как УК «Колмар» (добыча в Южной Якутии) и ЭльгаУголь (добыча на Эльгинском месторождении в Восточной Якутии) стремительно наращивают объемы добываемого угля, причем наиболее ценного коксующегося угля. Так, например, в 2022г. компанией ЭльгаУголь получено 20 млн. тонн угля, в планах на 2023г. – 26 млн. тонн, а в перспективе – наращивание добычи до 45 млн. тонн. До 20 млн. тонн в год планирует поднять добычу угля УК «Колмар». Практически весь добываемый в Якутии высококачественный коксующийся уголь отправляется за рубеж.

А если учесть, что в среднем качество доменного кокса, получаемого на российских предприятиях, намного ниже, чем в Европейских странах и США, причем одна из главных причин этого – неустойчивость и нестабильность сырьевой базы коксования как с количественной, так и с качественной стороны. Состояние сырьевой базы российской коксохимии не позволяет производить кокс, качество которого соответствовало бы международному уровню и требованиям доменщиков в условиях применения пылеугольного топлива для доменных печей из-за дефицита отдельных марок коксующихся углей и, самое главное, значительного произвола в формировании сырьевых баз фабрик, обогащающих коксующиеся угли.

При этом наше государство, считая, что «рука рынка» сама все исправит фактически пускает взаимодействие между угледобывающими и металлургическими компаниями на самотек. Между тем, за рубежом ведущие капиталистические страны жестко контролируют деятельность национальных компаний, с одной стороны оказывая им необходимую помощь, а с другой стороны вынуждая компании соблюдать интересы государства.

Наиболее характерный пример – Япония, страна, практически не имеющая месторождений железной руды, коксующихся и энергетических углей, и тем не менее занимающая третье место по выплавке стали в мире. Успешность ее в этом отношении во многом объясняется тем, что закупками сырьевых материалов за рубежом занимается одна единственная государственная компания, устранив ненужную конкуренцию между сталеплавильными компаниями.

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

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

Во-первых, это противоречие интересов владельцев лицензий на добычу каменных углей, которые стремятся расположить свое предприятие поближе к муниципальным образованияам, уже имеющейся инфраструктуре (автодорогам, железнодорожным путям, линиям электропередачи и т.д.) и местных жителей, желающих иметь комфортные условия для жизни и досуга.

Во-вторых, на перспективы развития отечественной энергетики, в первую очередь, угольной, может существенно повлиять состоявшаяся ратификация Россией Парижских соглашений по климату от 12.12.2015г., которые предусматривают фиксацию величины выбросов двуокси углерода на существующем, очень невысоком уровне и регулярное дальнейшее ее снижение, что будет существенно препятствовать развитию реального сектора экономики нашей страны.

Фактически ратификация Россией Парижских соглашений по климату приведет к сокращению, в первую очередь, доли угля в энергетике, так как CO_2 из угля выделяется на 50-60% на единицу вырабатываемого тепла больше, чем при использовании природного газа. И это даже учитывая, что в России доля угля в энергетике и так относительно невелика - составляет менее 13% [5].

Приведенные данные показывают значительный потенциал увеличения использования углей в энергетике в нашем регионе. Конечно, увеличение доли тепло- и электроэнергетики необходимо осуществлять исключительно на основе использования современных экологически и экономически эффективных технологий. Так, при реконструкции действующих и вводе в эксплуатацию новых энергогенерирующих установок, целесообразно использовать внутрицикловую газификацию или еще более перспективное внутрицикловое полукоксование. Следует также шире вовлекать в энергетику высококачественные экологичные бурые угли месторождений Канско-Ачинского бассейна, расположенные в Кемеровской области и Красноярском крае [5-8].

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

Следует обратить внимание, что себестоимость тепло- и электроэнергии при применении твердого топлива существенно ниже и значительно менее подвержена резким ценовым колебаниям, чем при использовании твердого и газообразного топлив. Таким образом, при использовании современных технологий, применение каменных и бурых углей в энергетике становится вполне конкурентоспособным, особенно, если внимательно рассмотреть сложившуюся ситуацию в отечественной газо- и нефтедобыче [5-8].

Развитие углехимии позволит не только разгрузить железнодорожную инфраструктуру, но и существенно увеличить эффективность угольной промышленности. Добавленная стоимость продуктов переработки угля достигает 100-500%. Это отразится на уровне заработных плат в регионе, повысит платежеспособность населения.

О развитии глубокой переработки углей в Кузбассе говорят не первое десятилетие. В 2012 году в регионе сформирован кластер «Комплексная переработка угля и техногенных отходов». В 2018 году в регионе был создан Федеральный исследовательский центр угля и углехимии РАН, для функционирования которого выделяются бюджетные ассигнования на выполнение научно-исследовательских работ в изучаемой сфере.

В 2020 году Научно-образовательным центром «Кузбасс» разработана и утверждена правительством Кузбасса комплексная научно-техническая программа полного инновационного цикла (КНТП) «Чистый уголь – Зеленый Кузбасс». В мае 2022 года Программа была утверждена Правительством РФ. В КНТП «Чистый уголь – Зеленый Кузбасс» вошли 15 крупных проектов, общее финансирование составит 3,6 млрд рублей, в том числе 2 млрд – средства частных инвесторов, а 1,6 млрд – федеральные средства. Реализация программы должна начаться в текущем году и будет проходить до 2026 года [5].

В стратегии социально-экономического развития Кемеровской области – Кузбасса на период до 2035 года, утвержденной в конце 2020 г., руководствуясь «зеленой» методологией, изменили парадигму создания в регионе углехимического кластера - и теперь она звучит как «экологизация угольной отрасли на основе развития углехимического комплекса». В состав данного приоритета развития вошла экологизация угольной отрасли,

производство жидкого топлива, развитие углехимического кластера, диверсификация спектра углехимических продуктов и внедрение НИОКР и мирового опыта.

Однако, за последние 10 лет практически все крупные заявленные проекты по глубокой переработке угля не реализованы: например, проекты энергохимических комплексов «Серафимовский» и «Менчерецкий», а создание Караканского угольно-энергетического кластера на базе одноименного угольного месторождения так и остановилось на стадии проекта.

В чем же причина такого положения? На наш взгляд, одним из основных факторов отсутствия перспектив успешного развития угольной промышленности в указанных выше направлениях (глубокая и энерготехнологическая переработка угля, экологизация угольной промышленности и др.) является ликвидация в 90-е годы прошлого века организаций прикладной угольной науки как в России, так и в Кузбассе.

В СССР инновационная экономика существовала в виде связки: академическая наука – прикладная наука – промышленность. Основной задачей академической науки являлось накопление новых знаний. Задача прикладной науки (научно-исследовательских и проектных институтов) – разработка технологий, нового оборудования, технологических заданий на проектирование, выполнение проектных и пуско-наладочных работ, разработка рекомендаций по совершенствованию технологических параметров и аппаратурного оформления процессов. Полученные технологии централизованно тиражировались на многих предприятиях отрасли.

Подобная практика позволяла с относительно небольшими затратами широко использовать и распространять полученный опыт, знания и инновационные технологии. К сожалению, в настоящее время существовавшая система оказалась практически полностью разрушенной. Если академическая наука, в основном, сохранилась, то прикладная, не получая государственной поддержки, влечет жалкое существование, а многие институты просто закрыты. Функции прикладных институтов в обозримом будущем не смогут выполнять ни академические институты, ни высшие учебные заведения, которые просто не имеют ни опыта такой работы, ни специалистов, способных ее выполнять, ни соответствующей инфраструктуры.

Прикладная горная наука в СССР была представлена следующими известными в стране и за рубежом институтами: институт горного дела им. А.А. Скочинского (г. Люберцы, Московская область), институт горючих ископаемых (г. Москва), институт обогащения твердых горючих ископаемых (г. Люберцы, Московская область), ЦНИИУголь (г. Москва), ВНИИПИГидротрубопровод (г. Москва), ВНИИГидроуголь (г. Новокузнецк), ВУХИН (г.г. Новокузнецк и Екатеринбург), ВНИИОСуголь (г. Пермь), КатэкНИИУголь (г. Красноярск), ДальвостНИИпроектуголь (г. Владивосток), КузНИИШахтострой (г. Кемерово), КузНИИУглеобогащение (г. Прокопьевск) и многие другие. Большая часть этих организаций уже не существует.

Наличие подобных институтов позволяло не только выполнять исследования, разработку новых процессов и оборудования для угольной промышленности, но и доводить свои разработки до внедрения на соответствующих промышленных предприятиях. В качестве примера можно привести структуру известного в России и за рубежом Всесоюзного научно-исследовательского и проектно-конструкторского института добычи угля гидравлическим способом (ВНИИГидроуголь).

Институт в своем составе имел:

- научную часть, представленную 12 лабораториями;
- проектную часть;
- шахтно-монтажное управление;
- экспериментальные мастерские;
- завод экспериментального оборудования (ныне Кузнецкий экспериментальный завод);

– завод опытного и опытно-промышленного оборудования «Гидромаш» (ныне ООО «Завод Гидромаш»).

Именно наличие в составе института указанных подразделений позволяло создавать и осваивать в промышленном варианте новые технологические и технические решения. Достаточно сказать, что в институте были разработаны технологические решения по гидравлической добыче угля на более чем 10 гидрошахтах и гидроучастках, разработаны проекты углеобогащительных и обезвоживающих фабрик, созданы уникальные образцы оборудования: гидромониторы, гидроотбойные машины и механогидравлические комбайны, дробильно-сортировочное оборудование, углесосы и высоконапорные насосы, быстроразъемные соединения, осадительно-фильтрующие центрифуги и тонкослойные осветлители, и многое другое оборудование, некоторые образцы которого до сих пор выпускаются на ООО «Завод Гидромаш».

В институте трудились известные в стране ученые-угольщики: Мучник В.С., Юрин П.И., Цяпко Н.Ф., Голланд Э.Б., Теодорович Б.А., Одинокоев Б.П., Щербина Г.С., Костовецкий С.П., Тютиков Г.Т., Стефанюк Б.М., Волченко В.А., Вежан Г. И., Скакун В.Д., Тарновский О.Г. и многие другие.

Важным моментом в развитии угольной промышленности является разработка нормативной документации для создания новых шахт, обогащительных фабрик и соответствующего оборудования. В настоящее время фактическое отсутствие такой документации привело к тому, что, например, углеобогащительные фабрики проектируются по временным нормам технологического проектирования (ВНТП), разработанным в 1992 году, которые в свою очередь выполнены на основании ВНТП 1972 года. Естественно, указанные нормы ни в коей мере не соответствуют современному уровню развития угольной промышленности ни в стране, ни в мире.

В течение 85 лет ведущие ученые Восточного углехимического научно-исследовательского института (г. Екатеринбург, г. Новокузнецк) закладывали основополагающие принципы теории коксования. Эти принципы положены в основу функционирующих в России коксохимических производств. Институт имел в своем составе научные и проектные подразделения, экспериментальные мастерские и опытный завод.

Финансирование инновационной экономики очень серьезная проблема, так как Россия может всерьез рассчитывать, видимо, только на внутренние источники финансирования, а изыскать их сложно, так как малый и средний бизнес не имеют средств для развития серьезных инновационных проектов, а крупный бизнес мероприятия, связанные с долгосрочным вложением денежных средств, просто не интересуют.

Очень важный вопрос – вопрос об источниках финансирования мер по реализации намеченной политики, который практически не рассматривается. Расчет на то, что необходимые средства можно получить путем государственной поддержки лишь приоритетных научных направлений и прорывных технологий (т.е., по существу, за счет отказа в праве на такую поддержку остальным направлениям, сложившимся в процессе развития науки), означает в нынешних условиях установку на ликвидацию большинства научных направлений, не вошедших в число приоритетных, определяемых весьма произвольно. Осуществление подобного подхода может привести к подрыву системной целостности научного комплекса, а, следовательно, к разрушению и той базы, на основе которой только и возможно формирование передового отряда науки в виде отдельных приоритетных на данный момент направлений научного поиска.

В соответствии с современными научными взглядами экономическое развитие человечества происходит в виде смены технологических укладов – характерных исторических этапов, каждый из которых связан с расширением использования определенных научно-технических достижений и характеризуется единым техническим уровнем составляющих его производств, связанных потоками качественно однородных ресурсов, опирающихся на общие ресурсы квалифицированной рабочей силы и общий научно-технический потенциал. Период доминирования технологического уклада длится в течение примерно 50 лет. Первая

фаза технологического уклада – его зарождение и становление – имеет такую же продолжительность и требует значительных денежных вложений практически без всякой отдачи.

Нужно четко представлять себе, что сначала существует стадия накопления знаний, в которую нужно вкладывать большие денежные средства, часто без всякой экономической отдачи, и только потом, через 10-30 лет на этой основе создаются инновации. Например, сначала в России нужно создавать нанонауку и только потом нанотехнологии.

Можно использовать опыт иностранных государств, сохранив все ценное, что было создано в СССР и России в предыдущие годы. В США, например, также существовала и существует инновационная экономика, основанная на государственной поддержке, особенно на ранних, наиболее рискованных, так называемых посевных, этапах развития инноваций (пример – Майкрософт), далее, как правило, вступают в действие «бизнес-ангелы», венчурные и коммерческие организации. В России инновационной экономике также не обойтись без государственной поддержки.

Стоит учесть положительный опыт Японии после Второй мировой войны, присваивавшей статус «предприятие-младенец» многим своим предприятиям и не открывавшей рынок для свободного импорта товаров соответствующего вида, пока определенный сектор промышленности не достигнет нужной степени развития. Для России такая последовательность действий еще более актуальна, так как к естественному отставанию ряда отраслей от мирового уровня добавляются еще и объективные сложности, связанные с повышенной долей энергетической составляющей в себестоимости продукции вследствие расположения большей части страны в зоне относительно холодного климата. Эти сложности вполне могут привести к тому, что определенный протекционизм для защиты своих производителей должен будет сохраняться даже после ввода в эксплуатацию предприятий, выпускающих инновационную продукцию на современном оборудовании.

Хотелось бы высказать свои мысли, возможно, далеко не бесспорные, о построении инновационной угледобывающей и углеперерабатывающей промышленности. Построить ее можно только создав научно-обоснованную целостную систему нормативно-правового регулирования, касающуюся всех основных сфер деятельности инновационного процесса: научной, инженерной, производственной, экономической, финансовой, налоговой и т.д. Это очень трудоемкая задача, требующая серьезной кропотливой работы высококвалифицированных специалистов. Без ее решения все попытки перевода угледобывающей и углеперерабатывающей промышленности на инновационные рельсы будут, по-прежнему, хаотичными и разобщенными. Сначала общая модель действующей инновационной экономики и лишь потом решение частных вопросов: разработка системы федеральных законов и подзаконных актов, формирующих законодательство в соответствии с принятой моделью, создание организаций и учреждений различных форм собственности.

Первым и важнейшим этапом подготовки создания научно-обоснованной целостной системы нормативно-правового регулирования является разработка и утверждение государственной инновационной политики, которая фактически должна представлять собой комплексную всеобъемлющую программу построения современной инновационной угледобывающей и углеперерабатывающей промышленности.

Вывод. Следует постепенно возрождать структуру институтов прикладного направления, решительно поднимать престиж научно-исследовательских и проектных организаций, а также субъектов инновационной деятельности. В обязательном порядке сохранять и развивать отечественные научные школы. Рассмотреть возможность создания и поддержки временных научных коллективов для разработки и внедрения инновационных технологий, возможно, в рамках такой организационной формы, как общественные организации.

Список литературы

1. Statistical Review of World Energy // British petroleum edition. – 2022. – № 71 – 58 p.
2. Энергетический бюллетень. Аналитический центр при правительстве РФ : январь 2022. – №108 – 15 с.

3. Фролов А.В., Тонкаев Р.У. Мировая энергетика // ИнфоТЭК. – URL: <https://itek.ru>
4. Энергетический бюллетень. Аналитический центр при правительстве РФ : январь 2022. – № 104 – 22 с.
5. Мурко В.И., Прошунин Ю.Е. Перспективы и необходимые условия развития угольной промышленности Кузбасса // Научно-инновационный центр современного развития: материалы I всерос. науч. – практ. конф. : сб. науч. статей. – 2023. – С. 30 – 35.

УДК 622.831.3:622.33

К ВОПРОСУ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ НА ВЕЛИЧИНУ КОЭФФИЦИЕНТА ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ УГЛЕСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

д.т.н. Прошунин Ю.Е., Гельгенберг И.О.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Разработаны конструкция установки по определению величины коэффициента внешнего трения углесодержащих материалов и соответствующая методика проведения экспериментальных исследований. Установлены основные закономерности влияния температуры нагрева поверхности и рабочей влажности концентратов коксующихся углей на величину коэффициента внешнего трения.

Ключевые слова: концентрат коксующихся углей, экспериментальная установка, коэффициент внешнего трения, рабочая влажность, поверхность, температура нагрева, закономерности изменения.

При перевозке и последующей разгрузке углей с повышенным содержанием влаги (более 8% для каменных и более 30% для бурых углей) в зимний период возникают серьезные затруднения, связанные с их смерзанием и примерзанием к стенкам и днищу железнодорожных полувагонов [1-4]. В последнее время в связи с увеличивающейся отправкой каменных углей на экспорт (более 50% годовой отечественной добычи) через восточные порты, суровый климат делает эту проблему еще более актуальной.

И хотя в течение десятилетий накоплен богатый опыт использования различных технических и профилактических мероприятий, таких как:

- снижение влаги каменных углей до 5-6% термической сушкой после обогащения;
- предварительное замораживание угля на открытых площадках перед погрузкой его в вагоны;
- смачивание углей продуктами дистилляции каменноугольной смолы в количестве 1-2%;
- смачивание стенок полувагонов углеводородными жидкостями – продуктами переработки нефти и каменноугольной смолы;
- использование гаражей для размораживания углей различных конструкций в местах разгрузки полувагонов;
- оснащение вагоноопрокидывателей мощными вибраторами и дробильно-фрезерными машинами;

тем не менее, проблема не может считаться окончательно решенной [1-3,5,6].

Одним из наиболее перспективных направлений [1-3,5-8] снижения негативных эффектов смерзания углей является организация обогрева конической части бункеров. При этом используются: электрокабельный обогрев, обогрев корпусными обогревателями, различные виды подачи теплоносителя в пространство между двойными стенками. Тем не менее, остается нерешенной задача установления температурного режима бункера, к которому угли – сложные органические вещества, склонные к окислению и самовозгоранию, особенно требовательны.

В работе [9] приведены результаты исследований по влиянию температуры стальной поверхности в диапазоне 20-180°C на значение коэффициента внешнего трения влажного угля. Показано, что вопреки установившемуся мнению о целесообразности подогрева футеровки емкостей до температур, больших 100°C [1-3, 7,8], значение физико-механической характеристики не только не снижается, но даже несколько возрастает.

В качестве объекта исследования выбраны концентраты коксующихся углей КХП ЗСМК (г. Новокузнецк). Марочный состав исходной смеси: ЦОФ ЗСМК (К, КС, ОС, КСН) - 59%, ЦОФ «Кузнецкая», I секция (ГЖ, Ж) - 21%, ЦОФ «Кузнецкая», II секция (ГЖ, Ж) - 20%. Технологические свойства смеси концентратов приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Качественные характеристики исходной смеси концентратов ЗСМК | | | | | | | | | | |
|--|-------|-----------|--------------------------|------|--|------|------|-------|-------|------|
| Технический анализ, % | | | Пластометр. показат., мм | | Гранулометрический состав (%) по классам, мм | | | | | |
| W_t^a | A^d | V^{daf} | X | Y | > 6 | 3-6 | 1-3 | 0,5-1 | < 0,5 | 0-3 |
| 2.16 | 8.00 | 27.0 | 34.2 | 15.2 | 6,0 | 11,0 | 27,7 | 25,7 | 29,6 | 83,0 |

Содержание класса менее 3 мм в исходной смеси концентратов составило 83%.

С целью углубленного изучения влияния температуры поверхности на величину коэффициента внешнего трения угольных концентратов различной влажности разработана установка (рис. 1), используемая в комплексе с прибором линейного плоского сдвига.

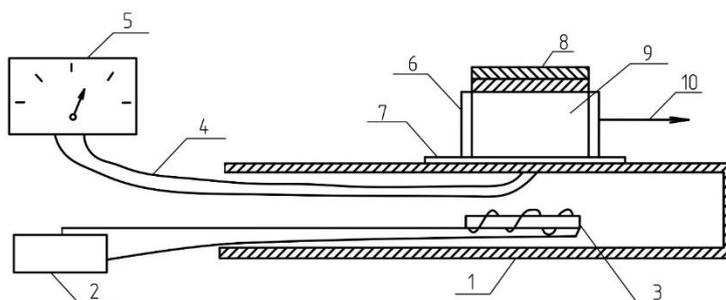


Рис. 1. Принципиальная схема установки для определения коэффициента внешнего трения при различных температурах нагрева поверхности

Внутри полой стальной пластины 1 (изготовлена из обработанной стали ст.3) находится регулируемый реостатом 2 нагревательный элемент сопротивления 3, позволяющий осуществить нагрев внешней части до 200°C, термопара 4, соединенная с показывающим прибором 5. При достижении требуемой температуры поверхности на нее устанавливается срезной элемент 6, расположенный на листе жаропрочного асбеста 7, в котором находится уплотненный заданным давлением 8 (σ_n – нормальное уплотняющее напряжение, ось абсцисс) исследуемый материал 9. После удаления асбеста и определенной выдержки производится сдвиг и фиксируется усилие 10, при котором достигается установившееся усилие среза элемента (τ – касательное напряжение, ось ординат) (первая точка паспорта прочности).

Для получения следующей точки линии предела текучести готовится следующий образец. При этом угольный концентрат уплотняется тем же заданным давлением, далее часть нагрузки снимается, и после удаления асбеста и определенной выдержки производится сдвиг и фиксируется усилие 10, при котором достигается установившееся усилие среза элемента. Для получения следующих точек (как правило, четырех – шести) повторяется полностью весь цикл операций. Обработкой полученных данных методом наименьших квадратов [10] получаем математическое выражение паспорта прочности угольного концентрата в виде: $\tau = \text{tg}\varphi_w * \sigma_n$, где $\text{tg}\varphi_w$ – коэффициент внешнего трения.

На рис. 2 приведены зависимости, полученные при величине уплотняющего давления – 8 кПа. Касательные напряжения определялись при σ_n , равном 8, 6, 4, 2 и 1 кПа. Рабочая влажность концентрата (W_{tr}) 1 – 0,5%; 2 – 10%; 3 – 7%.

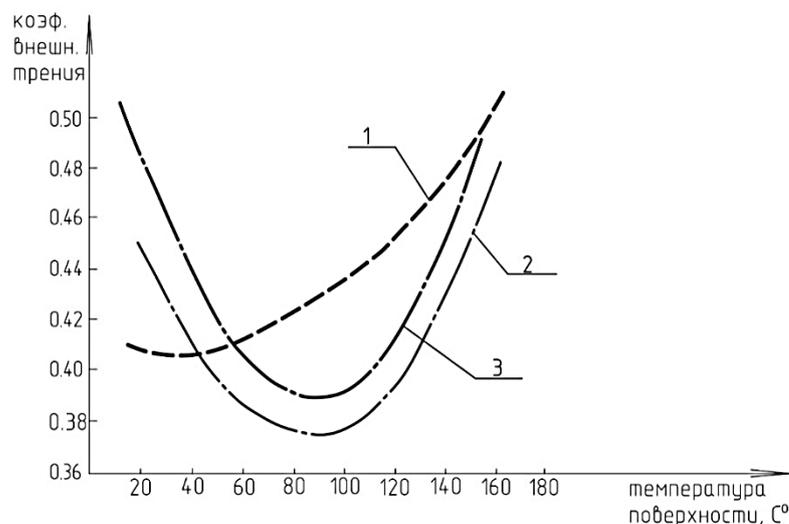


Рис. 2. Зависимость коэффициента внешнего трения от температуры нагретой поверхности ($\tau = 70$ с)

При времени выдержки 70 секунд для угольных шихт с влажностью 7 и 10 % в диапазоне температуры поверхности 20-80°C значение коэффициента внешнего трения снижается, что может быть объяснено снижением вязкости водной прослойки. При дальнейшем повышении температуры начинается рост исследуемой характеристики из-за активизации коллоидно-химических процессов и возможного образования кристаллических мостиков [3, 9]. Для сухой смеси угольных концентратов ($W_{tr}^I = 0,5\%$) температура поверхности практически не влияет на величину коэффициента внешнего трения и лишь при температуре примерно 130°C его значение увеличивается, что объясняется полным исчезновением влаги (в том числе адгезионной) и возникновением более прочных связей стальной поверхности с ювенильной поверхностью угольных частиц.

Вывод. На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что подогрев футеровки целесообразно осуществлять до температуры не более 80-90°C.

Список литературы

1. Михайлов Н.М., Шарков А.Т. Физические свойства топлива и борьба с затруднениями на топливоподаче электростанций / Н.М. Михайлов, А.Т. Шарков. – М.: Энергия, 1972. – 264 с.
2. Лурье З.С. Бункерные устройства углеобогатительных и брикетных фабрик / З.С. Лурье. – М.: Недра, 1972. – 208 с.
3. Белосельский Б.С., Барышев В.И. Низкосортные энергетические топлива. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 136 с.
4. Школлер М.Б. Современные энерготехнологические процессы глубокой переработки твердых топлив. – Новокузнецк: НОУ РЦПП ЕВРАЗ-Сибирь, 2013. – 287 с.
5. Учитель А.Д., Кормер М.В., Лялюк В.П. Проблемы транспортировки угольных концентратов в период отрицательных температур окружающей среды // Кокс и химия. – 2013. – № 5. – С. 13-19.
6. Секачев Д.Е., Рахутин М.Г. Проблемы восстановления сыпучести угольного топлива в осенне-весенний и зимний периоды в угольных терминалах // Уголь. – 2019. – № 11. – С. 54-57.

7. Харлампович Г.Д., Кауфман А.А. Технология коксохимического производства. – М.: Металлургия, 1995. – 384 с.

8. Лейбович Р.Е., Яковлева Е.И., Филатов А.Б. Технология коксохимического производства. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.

9. Зимон А.Д., Андрианов Е.И. Аутогезия сыпучих материалов / А.Д. Зимон, Е.И. Андрианов. – М.: Металлургия, 1978. – 288 с.

10. Ахназарова С.Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1978. – 320 с.

УДК 622.271(73):550.814

УПРАВЛЕНИЕ ГОРНЫМИ РАБОТАМИ И ПРОЦЕССАМИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ЭКОЛОГИИ НА УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗАХ ВЬЕТНАМА

^{1,2}д.т.н. Зеньков И.В., ³Мулюшкина А.А.

1 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

2 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия

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

Аннотация. В статье представлены промежуточные результаты открытой разработки месторождений угля на северо-востоке Вьетнама. 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 произведена оценка работ по восстановительной экологии на породных отвалах.

Ключевые слова: Вьетнам, провинция Куангнинь, месторождения угля, открытые горные работы, горнотранспортное оборудование, восстановление нарушенных земель, восстановительная экология, дистанционное зондирование.

Введение. В Юго-Восточной Азии Вьетнам находится на втором месте по объему добычи угля после Индонезии. За всю историю угледобычи производство открытых горных работ во Вьетнаме сконцентрировано на северо-востоке страны. Здесь главным образом разрабатывают угленасыщенные участки месторождений антрацитов для отправки последнего в основном на экспорт. На очередном этапе нашей совместной работы было принято решение о проведении исследования угледобывающего сектора Вьетнама с использованием результатов спутниковой съемки. С появлением технологий дистанционного зондирования Земли из космоса спектр прикладных исследований значительно расширился, о чем свидетельствуют работы российских и зарубежных исследователей [1 – 8].

Исследование открытых горных работ на месторождениях угля на территории Вьетнама. По данным дистанционного зондирования добыча угля открытым способом осуществляется в трех провинциях: Тхайнгуен, Лангшон и Куангнинь [9]. В первых двух объем добычи угля, по нашей оценке, не превышает 3 млн. т в год, в то время как в провинции Куангнинь имеется возможность ежегодно добывать не менее 50 млн. т угля. В план наших исследований включен угледобывающий сектор провинции Куангнинь. Открытые горные работы здесь масштабно производятся с конца 1990-х гг. В последние годы масштабная добыча угля производится в прибрежной полосе шириной до 7 км вдоль залива Ха Лонг. В этом секторе площадь территории под карьерами, отвалами, инфраструктурными объектами угледобывающего сектора по данным спутниковой съемки составляет 15800 га. В настоящее

время здесь работают пять крупных карьеров и четыре добычных участка. Последние отрабатывают запасы угля на локальных участках разрабатываемых месторождений [9].

Горно-геологическое строение угольных пластов характеризуется практически вертикальными углами расположения в углевмещающей толще. Пласты угля имеют сложное строение. Горизонтальная суммарная мощность свит пластов достигает 1200 м. В этих условиях системы разработки пластов исключительно углубочные одно- или двухбортовые. Глубина карьеров изменяется в диапазоне от 110 до 230 м, а с учетом отработки нагорной части достигает 475 м. Размеры карьеров в плане достигают размеров 2×2 км. Весь объем горных пород за исключением пород четвертичного возраста подлежит рыхлению с применением буровзрывных работ. На бурении взрывных скважин работают 27 высокопроизводительных буровых станков. Скважины бурят по диагональной сетке с размерами 5×6 м. Объем горных пород в одном взрывном блоке не более 100 тыс. м³ [9].

В восточной части исследуемого сектора угленасыщенный участок с размерами в плане 3×7,2 км отрабатывается четырьмя сближенными карьерами. В этих карьерах углубка горных пород не производится. В то же время на водоотливе работают от трех до шести мощных насосов. В карьерах производят разноску бортов как по внешнему периметру, так и в направлении соединения бортов в смежных карьерах. Вскрывающие трассы обустроены таким образом, что при движении автосамосвалов к нижнему уступу направление их движения на противоположное меняется до семи раз. Длина прямых отрезков трассы не более 400 м. Основной объем вскрышных пород (примерно 85 %) размещают во внешних отвалах, а остальной – в отработанных карьерах. Расстояние транспортировки вскрышных пород не превышает 2,5 км. Уголь транспортируют до поверхностных складов, откуда он поступает на обогащение по «сухому методу». В ходе отработки месторождений угля имеют случаи перемещения ранее отсыпанных породных отвалов, поскольку под ними находятся промышленные запасы угля [9].

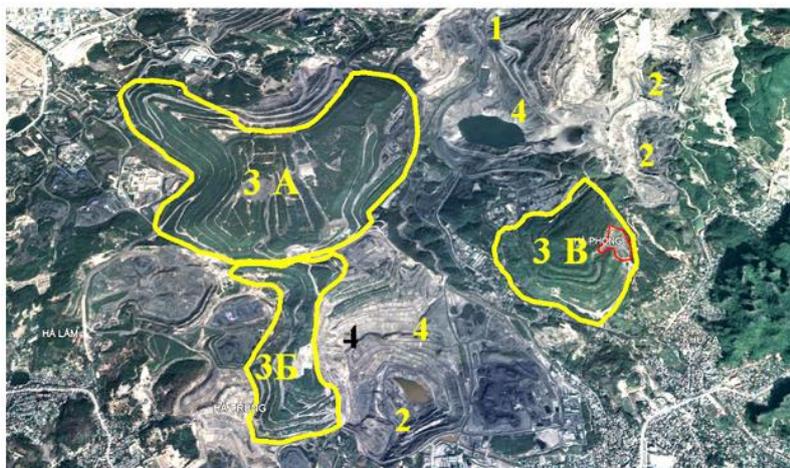
Выемка горных пород производится в основном гидравлическими экскаваторами типа «прямая лопата» и «обратная лопата» с емкостью ковша от 2,5 до 10 м³. В последние годы была произведена замена карьерных экскаваторов с канатным приводом рабочего оборудования и емкостью ковша 5 м³ на более мощные модели с ковшом 10 м³ в количестве 18 единиц. Всего на выемке горных пород задействовано 172 экскаватора. Транспортировку горной массы производят автосамосвалами общего назначения с колесной формулой 6×4 грузоподъемностью 30 т и карьерными автосамосвалами грузоподъемностью 50–90 т. В секторах карьеров, в которых находятся обводненные горные породы с низкой несущей способностью, работают шарнирно-сочлененные автосамосвалы повышенной проходимости грузоподъемностью 30 т. Парк всех автосамосвалов насчитывает 527 ед. [9].

По нашей оценке, технологически возможный (с резервом 30%) годовой объем добычи угля открытым способом составляет 55 млн. т. При этом необходимо выполнять объем вскрышных работ не менее 75 млн. т. Отметим, что в последние годы 37% парка горнотранспортного оборудования находится на промышленных площадках вблизи работающих карьеров. Отметим, что в ходе развития предприятий угледобывающей промышленности было создано более пяти тысяч рабочих мест.

Оценка результатов работ по восстановительной экологии на территории разрабатываемых месторождений угля. Для понимания и оценки экологической ответственности собственников угледобывающих предприятий были выбраны три внешних породных отвала общей площадью 480 га (рис. 1). Контуры отвалов в плане показаны линиями желтого цвета. На каждом из них работы по восстановительной экологии начались в 2008 г. и продолжались до 2018 г. включительно. За этот период была сформирована экологически приемлемая архитектура отвалов: произведено выколачивание откосов, в конструкцию откосов вписаны горизонтальные площадки шириной четыре метра для проезда спецтехники с целью производства работ по посадке саженцев деревьев и последующего ухода за ними.

Внешний отвал с условным обозначением «А», площадь которого максимальная, имеет высоту 250 м и разделен на 10 ярусов. Откосы ярусов отвала сформированы

бульдозерами под углом 18° . Аналогичную конструкцию приоткосной части имеют два других отвала («Б» и «В»). Расстояние между рядами саженцев при высадке составило 2,5 м. Экологически эффективным результатом работ по созданию лесонасаждений явилось полное смыкание крон через пять лет после высадки деревьев [9].



1 – действующий карьер; 2 – участок доработки запасов угля; 3 – внешние породные отвалы с результатами работ по восстановительной экологии; 4 – внутренние породные отвалы в отработанных карьерах

Рис. 1. Фрагмент космоснимка территории провинции Куангнинь с открытыми горными работами на месторождениях угля

На наш взгляд, максимальное смыкание крон деревьев позволит в максимальной степени снизить вынос минеральной пыли с поверхности отвалов в периоды интенсивного движения атмосферного воздуха. Такое расположение отвалов на местности позволяет практически при любой ориентации направления движения воздуха остановить ветровой перенос минеральной пыли, сдуваемой с поверхностей бортов рабочих и нерабочих карьеров, других породных отвалов, находящихся в стадии отсыпки, с промышленных площадок.

Кроме того, на наш взгляд, породные отвалы, на которых проведены работы по восстановительной экологии, имеют большое рекреационное значение, поскольку в окрестностях в 1,5–2 км от места добычи угля находится жилая застройка, многочисленные туристические отели и небольшие дома отдыха, предназначенные в основном для проживания в них иностранных туристов. По нашей оценке, результаты работ по восстановительной экологии на породных отвалах, отсыпанных в ходе открытой разработки месторождений угля в этой провинции, в мировом угледобывающем секторе могут явиться эталоном для стран с полным отсутствием экологической ответственности перед обществом и окружающей природной средой.

Выводы. По результатам спутниковой съемки определены состав горнотранспортного оборудования, работающего в угольных карьерах на территории Вьетнама, а также объем вскрышных работ и объем добычи угля. По нашей оценке, добыча угля в карьерах характеризуется небольшими коэффициентами вскрыши на уровне 1,5 т/т. Исходя из технологий производства горных работ, производительности горной техники, продолжительности и количества рабочих смен в сутках, объем перерабатываемой горной массы (вскрышные породы и уголь) находится на уровне 120–130 млн. т.

Вывод. В целом, по данным дистанционного мониторинга, в последние годы на территории Вьетнама наблюдается повышательный тренд в объемах добычи угля. Параллельно с этим необходимо отметить, что собственники угольных предприятий ответственно подходят к работам по восстановительной экологии на территории присутствия – на разрабатываемых месторождениях угля.

Список литературы

1. Хвостиков С.А., Барталев С.А. Возможности применения данных спутникового мониторинга для моделирования динамики развития природных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 5. – С. 9-27.
2. 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.
3. 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.
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. Remote Sensing of Aerosols at Night with the CoSQM Sky Brightness Data / C. Marseille, M. Aubé, A. Barreto, A. Simoneau // Remote Sensing. – 2021. – V. 13(22). – 4623.
6. Chalov S, Prokopeva K, Habel M. North to South Variations in the Suspended Sediment Transport Budget within Large Siberian River Deltas Revealed by Remote Sensing Data // Remote Sensing. – 2021. – V. 13(22). – 4549.
7. A General Framework of Remote Sensing Epipolar Image Generation / X. Wang, F. Wang, Y. Xiang, H. You // Remote Sensing. – 2021. – V. 13(22). – 4539.
8. Monitoring Mining Activities Using Sentinel-1A InSAR Coherence in Open-Pit Coal Mines / L. Wang, L. Yang, W. Wang [et al.] // Remote Sensing. – 2021. – V. 13(21). – 4485.
9. URL: <https://www.google.com.earth>.

УДК 622.271:[551.4:004.9]

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТНЫХ ОТМЕТОК МЕСТНОСТИ ПРИ АНАЛИЗЕ ТЕХНОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ РЕЛЬЕФА**д.г.-м.н. Гутак Я.М., Андропова В.С.****Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия**

Аннотация. В данной статье рассмотрен способ оценки погрешностей высотных отметок при переводе разных географических систем координат в единую прямоугольную систему координат, для получения сведений о динамике рельефа при ведении открытых горных работ.

Ключевые слова: координаты, высотные отметки, Гугл Планета Земля, ГГИС Microtime, открытые горные работы, техногенные рельефы, преобразование систем координат, изменение рельефа.

При анализе техногенных изменений рельефа местности в местах ведения открытых горных работ предлагается использовать два вида материалов: топографическую карту местности, сделанную до начала добычных работ и аэро- или космоснимок территории на определенный интервал времени. При этом исследование напрямую зависит от корректности определения высотных отметок на снимке и их сопоставимости с данными исходного рельефа с топокарты. Такая работа была проведена для территории углераза «Распадский» в окрестностях г. Междуреченск. Информация о высотных отметках изучаемой

территории были получены с топографической карты изучаемого района 1958 г. издания и геоинформационной системы (ГИС).

ГИС Google Планета Земля предоставляет географические координаты точек в системе EPSG:4326 WGS 84, а их высотные отметки, обоснованные миссией STRM. STRM – это международный исследовательский проект по созданию цифровой модели высот Земли с помощью радарной топографической съёмки. Полученная цифровая модель охватывает 80% земной суши. SRTM состояла из специальной радиолокационной системы, которая в феврале 2000 года осуществляла съёмку с борта шаттла «Индевор» во время 11-дневной миссии STS-99. Полученная благодаря съёмке информация предназначена для использования в научных и гражданских приложениях, в том числе и ГИС Гугл Планета Земля. Она является высотной «подложкой», на основании которой происходит визуализация рельефа в используемой ГИС [1, 2].

Выбранная в качестве исходной топографическая карта изучаемой местности предоставляет географические координаты точек в системе EPSG:4284 Pulkovo 1942 и Балтийской системы высот по состоянию на 1958 год.

Для обработки данных и получения результатов в работе используется ГГИС Micromine. Функционал этой программы позволяет провести некоторые исследования в области сравнения исходного и преобразованного рельефа, при выполнении нескольких важных условий.

Первым важным условием для сравнения высотных отметок карты и снимка стало приведение данных к прямоугольной системе координат. В ГГИС Micromine это реализовано в функции «Преобразование систем координат», что позволяет делать переход между системами координат автоматически.

Вторым важным условием является выбор единой прямоугольной системы координат Гаусса-Крюгера, к которой необходимо привести исходные данные с двух источников с разными видами географических координат. Для этого необходимо определить действующую зону EPSG для исследуемой территории. (EPSG — это общедоступный реестр геодезических данных, систем пространственной привязки, земных эллипсоидов, преобразований координат и связанных единиц измерения, созданный членом Европейской группы нефтяных исследований (EPSG) в 1985 году). Каждому объекту присваивается код EPSG между 1024–32767 вместе со стандартным машиночитаемым общеизвестным текстом [3, 4].

Выбор действующей зоны прямоугольной системы координат Гаусса-Крюгера был произведен онлайн-конвертером широты и долготы координат <https://epsg.io/>.

Для определения действующей зоны Гаусса-Крюгера в окрестностях разреза «Распадский» для данных, полученных с ГИС Google Планета Земля, было выбрано несколько точек, данные которых были занесены в онлайн-конвертер. В нашем случае исследуемая территория находится в зоне «EPSG:2505 Pulkovo 1942 / Gauss-Kruger SM 87E». В последующем сопоставлении географических координат информация о координатах ГИС Google Планета Земля (WGS-84) и информация о координатах с топографической карты (СК-42) была сведена к зоне прямоугольной системы Гаусса-Крюгера с шифром «EPSG:2505 Pulkovo 1942 / Gauss-Kruger SM 87E».

Третьим важным моментом является возможность сравнения высотных отметок между данными, полученными при проведении миссии SRTM, и Балтийской системой координат и вычисление погрешности между показаниями. Известно, что для разных топографических листов и разной разновидности рельефа – погрешность в изменении высот тоже разная. Наименьшей высотной погрешностью обладают равнинные рельефы, наибольшей – рельефы, характеризующиеся значительным перепадом высот [5, 6]. Для сравнения высотных отметок, необходимым действием является выяснение сдвига координатных секторов по осям ХУ.

В ходе работы, высотная погрешность для данного полигона высчитывалась следующим образом.

В ГИС Google Планета Земля были выбраны 52 точки с географическими координатами и высотами и прошедшие в ГГИС Micromine преобразование координат в выбранную прямоугольную систему. Принцип выбора контрольных точек заключался в том, чтобы они находились на неизменном горными работами рельефе, то есть вне зоны действующего углераза. После необходимых преобразований эти точки легли на топографическую карту, координаты которой были ранее адаптированы для выбранной прямоугольной системы. Анализ результатов наложения контрольных точек на топографическую карту свидетельствуют о соответствующем расположении их на местности, что показано на рис. 1.

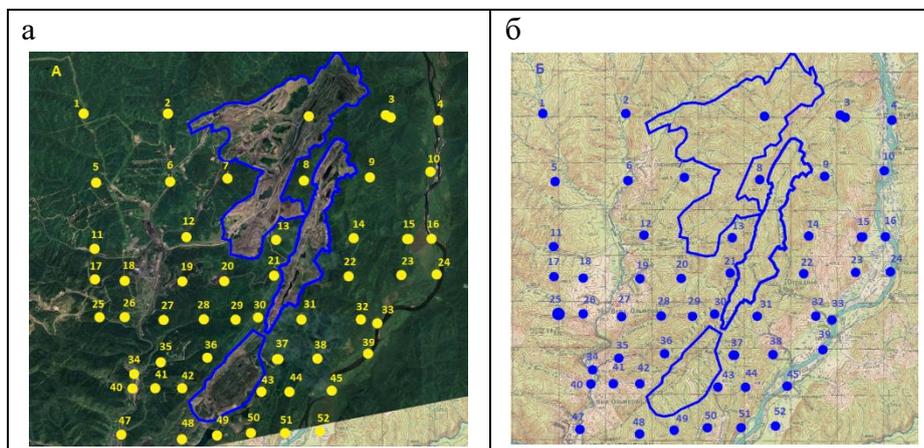


Рис. 1. Контрольные точки, выбранные в ГИС Google Планета Земля (а); положение преобразованных контрольных точек на топографической карте (б)

Процесс сопоставления высотных отметок для вычисления погрешности проводился с использованием уже ранее выбранных точек и вычисления высотных отметок на топографической карте по изолиниям и показателям высот с миссии SRTM в табл. 1.

Анализ данных показывает, что показатели высотных отметок разнятся. Однако для определения основных направлений изменения исторического рельефа этого вполне достаточно.

Таблица 1

| № точки | Абсолютная высота по топокарте 1958 г. | Высота, определенная по данным SRTM 2000 г. | Разница определений |
|---------|--|---|---------------------|
| 1 | 300 | 297 | -3 |
| 2 | 340 | 309 | -31 |
| 3 | 460 | 472 | +12 |
| 4 | 420 | 423 | +3 |
| 5 | 280 | 275 | -5 |
| 6 | 360 | 353 | -7 |
| 7 | 280 | 275 | -5 |
| 8 | 380 | 367 | -13 |
| 9 | 490 | 477 | -13 |
| 10 | 420 | 394 | -26 |
| 11 | 280 | 274 | -6 |
| 12 | 360 | 332 | -28 |
| 13 | 340 | 331 | -9 |
| 14 | 520 | 497 | -23 |
| 15 | 520 | 482 | 38 |
| 16 | 340 | 313 | -27 |
| 17 | 270 | 266 | -4 |

| № точки | Абсолютная высота по топокарте 1958 г. | Высота, определенная по данным SRTM 2000 г. | Разница определений |
|---------|--|---|---------------------|
| 18 | 440 | 439 | -1 |
| 19 | 300 | 316 | +16 |
| 20 | 300 | 321 | +21 |
| 21 | 480 | 494 | +14 |
| 22 | 480 | 498 | +18 |
| 23 | 400 | 415 | +15 |
| 24 | 320 | 342 | +22 |
| 25 | 268 | 265 | 3 |
| 26 | 300 | 298 | -2 |
| 27 | 340 | 331 | -9 |
| 28 | 380 | 376 | -4 |
| 29 | 440 | 424 | -16 |
| 30 | 540 | 555 | +15 |
| 31 | 560 | 531 | -29 |
| 32 | 480 | 371 | -9 |
| 33 | 280 | 295 | +15 |
| 34 | 268 | 258 | -10 |
| 35 | 255 | 252 | -3 |
| 36 | 300 | 317 | +17 |
| 37 | 560 | 572 | +12 |
| 38 | 340 | 331 | -9 |
| 39 | 360 | 342 | -18 |
| 40 | 256 | 264 | +8 |
| 41 | 251 | 252 | +1 |
| 43 | 340 | 331 | -9 |
| 44 | 440 | 446 | +6 |
| 45 | 340 | 332 | -8 |
| 46 | 400 | 425 | +25 |
| 47 | 257 | 255 | -3 |
| 48 | 260 | 245 | -15 |
| 49 | 340 | 354 | +14 |
| 50 | 300 | 297 | -3 |
| 51 | 380 | 372 | -8 |
| 52 | 260 | 253 | -7 |
| 53 | 260 | 257 | -3 |

Нужно отметить, что при преобразовании различных географических координат в прямоугольные координаты одной системы, наблюдается смещение вдоль осей XYZ. На первый взгляд контрольные точки с ГИС Google Планета Земля ложатся соответственно своему местоположению на топографическую карту. Но при большей детализации наблюдаются расхождения (рис. 2).

Был отстроен неизменный открытыми горными работами участок, захватывающий речную сеть и прилегающую местность. По оцифрованным изолиниям с топографической карты построена и визуализирована в ГГИС Micromine цифровая модель поверхности, которая существовала в 1957 году. Такая же модель территории на 2000 год построена по облаку точек полученных из ГИС Google Планета Земля.

При анализе слоев наблюдается схождение вершин возвышенностей и углублений, что представлено на рис. 3.

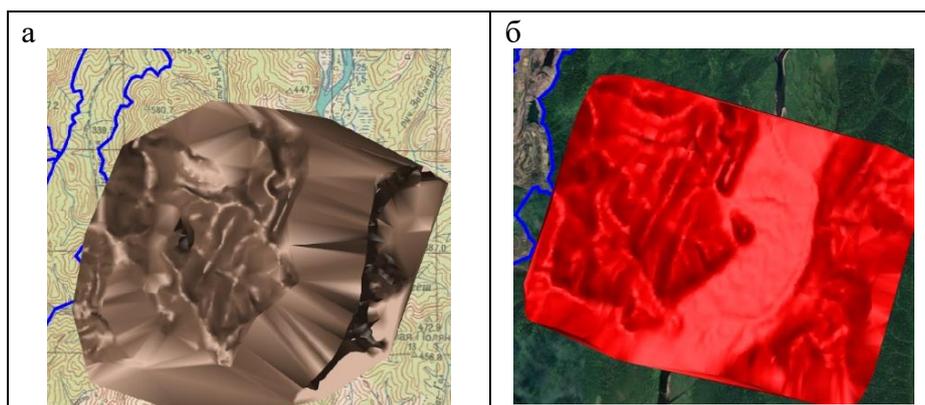


Рис. 2. Построение цифровых моделей поверхности: а – 1957 год; б – 2000 год

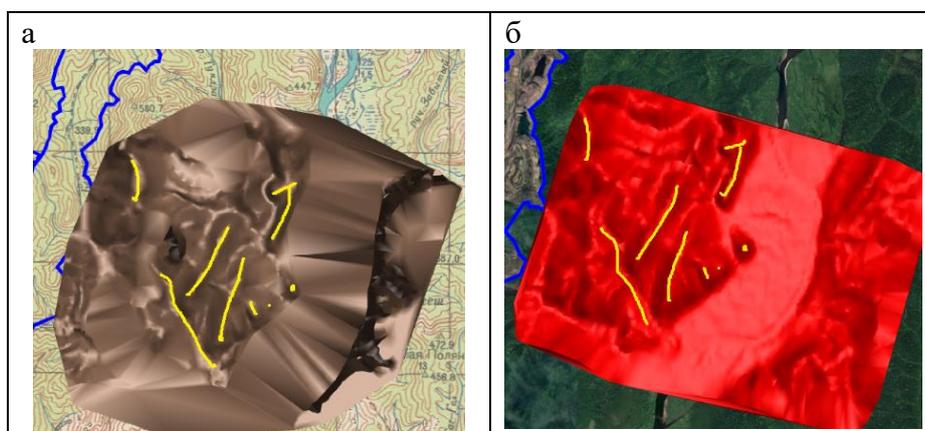


Рис. 3. Сопоставление вершин и низин цифровых моделей поверхности:
а – 1957 год; б – 2000 год

Существование сдвига по осям XYZ подтверждается также и сравнением моделей водотоков, представленных на рис. 4. Так же данные сведены в одну прямоугольную систему координат и водотоки с топографической карты 1957 года, наложены на цифровую модель поверхности, построенную по данным миссии SRTM.

Вывод. На рисунке прослеживается закономерность сдвига. Цифровая модель поверхности сдвинута на север относительно модели водотоков в среднем на 60 метров. Такая погрешность, несомненно, является большой для геодезических измерений, но для оценки такого явления, как направленность техногенного изменения рельефа в местах ведения открытых горных работ ею можно пренебречь.

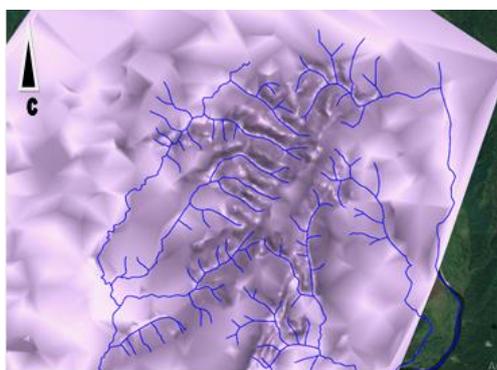


Рис. 4. Схема водотоков до ведения открытых горных работ 1957 год, на цифровой модели поверхности 2000 года

Список литературы

1. Nikolakopoulos K.G., Kamaratakis E.K., Chrysoulakis N. SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece // International Journal of Remote Sensing. – 2006. – Vol. 27. – № 21. – P. 4819-4838.
2. Географические информационные системы и дистанционное зондирование // GISLAB. – URL: <https://gis-lab.info/qa/srtm.html>
3. Cain Jim. Coordinate Reference Systems (Best Practices for Assignment, Manipulation and Conversion in GIS Systems: ESRI Petroleum GIS Conference, 2013. – URL: https://proceedings.esri.com/library/userconf/petrol13/papers/petrol_10.pdf
4. EPSG Geodetic Parameter Dataset : Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/EPSSG_Geodetic_Parameter_Dataset
5. Kolecka N., Kozak J. : Assessment of the Accuracy of SRTM C- and X-Band High Mountain Elevation Data: a Case Study of the Polish Tatra Mountains // Pure and Applied Geophysics. – 2014. – № 17. – P. 897-917.
6. Анализ возникновения погрешностей при создании и обновлении цифровых топографических карт / В.Ф. Ярцева, Е.Н. Хмырова, О.Г. Бесимбаева, Р.В. Сияк // Вестник СГУГиТ. – 2015. – №2 (30).

УДК 338.1:658.012(571.17)

**РЕТРОСПЕКТИВНАЯ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЭК КУЗБАССА
к.э.н. Новоселов С.В., г. Кемерово, Россия**

Аннотация. В статье показана динамика антропогенного загрязнения за период 2011-2021гг. и вероятностный прогноз антропогенной нагрузки на экологию Кузбасса до 2035г. по целям Энергетической стратегии РФ до 2035 года. Предлагается создание «Методики определения условно-оптимальных параметров антропогенной нагрузки по основным загрязнителям для территорий Кузбасса и отраслевым антропогенным объектам».

Ключевые слова: система, стратегия, антропогенный объект, загрязнение окружающей среды, прогноз, ущерб, системный метод, условно-оптимальный объем производства.

Современное развитие Кемеровской области – Кузбасса логично рассматривать как сложную эколого-экономическую систему, где основным элементом, обеспечивающим стабильное развитие, является топливно-энергетический комплекс (ТЭК) Кузбасса. В свою очередь в ТЭК Кузбасса угольная отрасль занимает ведущее место, т.к. более 50% добычи углей Российской Федерации производится в регионе. С другой стороны, интенсивная производственно-хозяйственная деятельность наносит непоправимый ущерб экологии региона, что требует кардинального изменения отношения к природе, пока это не поздно. В Кузбассе согласно Стратегии социально-экономического развития до 2035г. [1] реализуется переход отраслей и организаций региона на принципы «зеленой» экономики», согласно пункта 2.2.1.7. этой стратегии, по инициативе Губернатора Кузбасса С.Е. Цивилева внедряется региональный экологический стандарт развития угольной отрасли: «Чистый уголь – зеленый Кузбасс», как отмечается в источнике [2] – это масштабный комплекс мероприятий, который призван изменить облик и экологического состояния всего региона. Для чего будут решаться задачи: реализация экологического стандарта Кузбасса, в том числе на основе стратегической инициативы «Чистый уголь - зеленый Кузбасс», повышение эффективности использования природных ресурсов, формирование рынка экологических работ и услуг, создание зеленых рабочих мест на предприятиях региона.

Самым эффективным методом управления в принципе является системный метод, т.к. такое управление направлено на гармоничное развитие управляемой системы. В большинстве случаев практики, управление не системно, особенно в рыночно -конкурентных условиях, когда каждый участник производственно-хозяйственной деятельности стремится достичь максимальных своих временных интересов, не учитывая интересов других систем, поэтому в условиях рынка, как закономерность возникают периодически кризисы перепроизводства. Вопросы гармонизации соотношения спроса и предложения в рыночных условиях будут постоянными, поэтому для снижения рисков в региональных масштабах надо управлять системно, учитывая и регулируя параметры развития каждого элемента региональной системы Кузбасса – это отрасли, социум, экология.

В принципе функции системного управления возлагаются на Министерство экономического развития Кузбасса при формировании системы стратегического планирования социально-экономического развития Кемеровской области - Кузбасса. Опираясь на систему стратегического планирования, можно внедрить в практику основные положения рекомендуемой «Системной экологической стратегии Кузбасса», которая бы определяла приоритет экологии над промышленными интересами, превентивное выполнение экологических требований, а потом согласно ГОСТ и правил выполнения производственно-хозяйственной деятельности. За последнее время отдельные элементы «Экологической стратегии» уже освещены в ряде работ кузбасских ученых [3-7] и др., их надо систематизировать, объединить усилия научных организаций АГН, СО РАН, МАНЭБ, под эгидой Министерства природных ресурсов и экологии Кемеровской области – Кузбасса .

Гармонизация интересов участников бизнес-процессов видится в определении ограничений по объемам производства в той или иной отрасли региональной экономики для конкретных территорий. Это может быть оптимальный предел техногенной нагрузки в регионе, или ограничение по экологической емкости территории, или другой норматив, главное, чтобы это была обоснованная цифра – параметры легче контролировать. Например, уже известный по теории экономической безопасности критерий, предложенный проф. В.К. Сенчаговым, измеряемый в т-год/км² [8], или можно применять в менее масштабных единицах для технологий, антропогенных процессов: т-ч/км², г-с/м³ и др.

Никто не станет отрицать тот факт, что экологические проблемы приняли планетарный характер, и они иницируются в регионах, на антропогенных объектах. В Кузбассе предлагается ряд программ: региональная программа по развитию угольной промышленности в Кемеровской области с целью упорядочения добычи угля и разработки плана восстановления нарушенных территорий; стратегия сохранения биоразнообразия Кемеровской области; проведение экологической оценки программы социально-экономического развития Кемеровской области с учетом социальной структуры и биологической ценности территорий, что отражено в источнике [3].

Кроме того, предлагаются отдельные мероприятия по стабилизации экологического состояния территорий, например карбоновые фермы [4], и др. природоохранные мероприятия по аккумуляции углекислого газа, рекультивация земель как снятие и хранение природного слоя почвы (ПСП) в буртах [5]. В первом приближении определены стоимостные параметры экологических затрат. Так, стоимость работ по рекультивации нарушенных земель угольной промышленностью в среднем составляет 250 тыс. руб./га, если нарушено около 150 тыс.га, то потребуются около 37 млрд. руб. , это почти 1/6 часть доходов бюджета Кемеровской области, согласно бюджетному посланию, Губернатора Кемеровской области , С.Е. Цивилева, который озвучил доходы бюджета в 203,9 млрд. рублей на 2023 год [9]. Следует учесть, что необходимо обновление лесов, т.к. 1га леса в период интенсивного роста аккумулирует в год 3-4 т СО₂, то при внутреннем сжигании угля порядка 10 млн. т требуется 3-3,5 га молодых активно растущих насаждений [6].

Динамика антропогенного загрязнения в Кемеровской области за 2011-2021 гг. и авторский прогноз антропогенной нагрузки до 2035г. приведены на рис. 1.

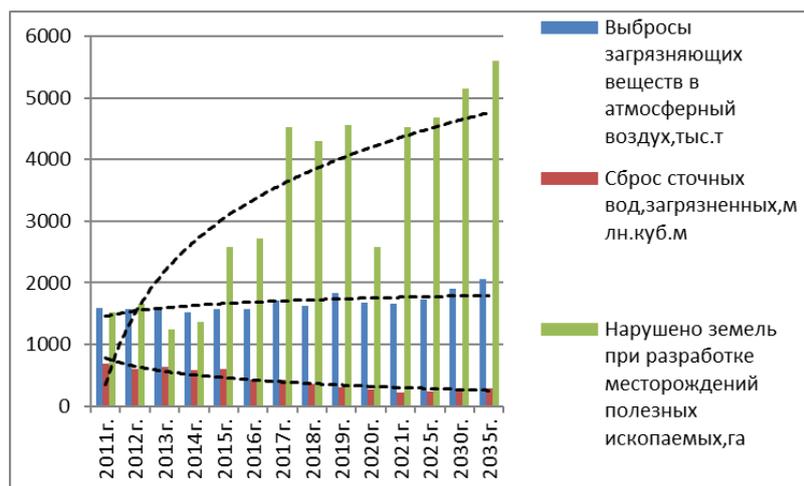


Рис. 1. Динамика антропогенного загрязнения в Кемеровской области за 2011-2021 гг.

Из диаграммы, рис. 1, фактически видно неравномерное нарушение земель, устойчивый выброс загрязняющих веществ в атмосферный воздух, и значительное снижение уровня сброса загрязненных вод за период 2011-2021 гг. Прогноз антропогенного давления на экологию при учете средних относительных параметров ущерба на тонну добычи, на период до 2035 года, показывает увеличение техногенной нагрузки по всем видам, при прогнозных объемах добычи 252 млн. т/год в 2025 году, 278 млн. т в 2030 г., и 302 млн. т в 2035г. [10]. Особенно выделяется рост нарушенных земель до 5600 га в 2035г., конечно же если добыча достигнет 302 млн. т (по Энергетической стратегии 2035 – стратегический ориентир составляет 297млн. т/год). Вывод: надо или ограничивать объемы добычи, или повышать эффективность природоохранных мероприятий, тем самым снижая относительный показатель ущерба на 1 тонну добычи, до минимальных параметров.

В табл. 1 приведены прогнозные тренды антропогенной нагрузки в Кузбассе на период до 2035г. Как видно из расчетов, достоверность прогноза нарушенных земель и выбросов в атмосферу, находится соответственно в пределах 0,576-0,675 и 0,328-0,459 (средняя и низкая), сброс сточных вод относительно достоверен 0,8-0,958, однако надо учитывать, что это упрощенные модели, а математику надо проверять логикой.

Таблица 1

Прогнозные тренды антропогенной нагрузки в Кузбассе на период до 2035г.

| Показатель | Линия прогнозного тренда | | |
|--------------------------------|---|------------------------|----------------------------------|
| | Логарифмическая | Экспонента | Полиномиальная |
| Нарушение земель, га | $y = 1396\ln(x) + 649,4$ | $y = 1195, e^{0,127x}$ | $y = -17,41x^2 + 540,5x + 428,7$ |
| Выбросы в атмосферу, тыс. т | $y = 67,79\ln(x) + 1520$ | $y = 1524, e^{0,010x}$ | $y = 0,724x^2 + 9,082x + 1540$ |
| Сброс сточных вод, млн. куб. м | $y = -197\ln(x) + 779,0$ | $y = 862,0e^{-0,11x}$ | $y = -1,496x^2 - 30,29x + 716,1$ |
| | Величина достоверности аппроксимации R ² | | |
| Нарушение земель, га | 0,576 | 0,675 | 0,658 |
| Выбросы в атмосферу, тыс. т | 0,328 | 0,459 | 0,453 |
| Сброс сточных вод, млн. куб. м | 0,8 | 0,935 | 0,958 |

Рассмотрим ситуацию по объемам антропогенного воздействия от стационарных источников Кемеровской области за период 2017-2021гг. (табл. 2).

Таблица 2

Динамика выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников по видам экономической деятельности

| Вид экономической деятельности | Выброшено в атмосферный воздух загрязняющих веществ, тыс. т | | | | | Доля загрязняющих веществ, % |
|--|---|----------|----------|----------|----------|------------------------------|
| | 2017г. | 2018г. | 2019г. | 2020г. | 2021г. | |
| Всего по области | 1487,648 | 1383,065 | 1760,071 | 1611,817 | 1603,214 | 100 |
| Добыча полезных ископаемых | 920,813 | 838,676 | 1157,466 | 970,417 | 1085,216 | 67,7 |
| Обрабатывающие производства | 320,563 | 307,236 | 366,078 | 414,815 | 299,207 | 18,7 |
| Обеспечение электрической энергией, газом и паром, кондиционирование воздуха | 218,26 | 167,527 | 203,151 | 146,486 | 173,329 | 10,8 |
| Транспортировка и хранение | 8,577 | 41,003 | 5,904 | 5,576 | 8,014 | 0,5 |
| Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство | 2,83 | 4,033 | 3,703 | 4,329 | 3,376 | 0,2 |
| Другие виды деятельности | 16,739 | 23,59 | 23,769 | 70,014 | 34,072 | 2,1 |

Как видно из табл. 2, большую долю загрязнений в атмосферный воздух вносит добыча полезных ископаемых 67,7% [11], но если мы будем рассматривать по объемам сброса загрязненных вод в поверхностные водные объекты Кузбасса, то угольная промышленность является не главным загрязнителем 16,07%, уступая химической промышленности 31,98%, металлургии 18,06% и др. (рис. 2).

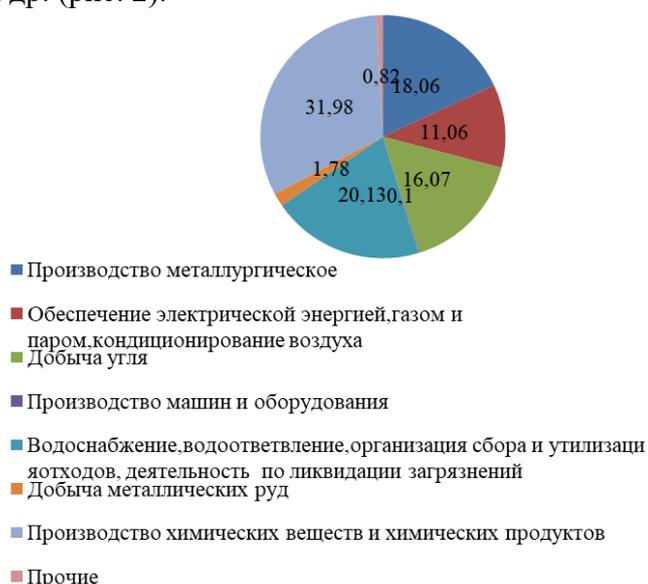


Рис. 2. Доля сброса загрязненных вод в общем объеме загрязненных сточных вод, сброшенных в поверхностные водные объекты Кемеровской области-Кузбасса в 2021 году

При другом подходе, рассматривая структуру не в процентах, а по объему забора воды в Кемеровской области в 2021 году, он составил 1606,75 млн. м³, мы получим внушительные цифры, миллионы кубических метров на ведущие отрасли Кузбасса. Следовательно, если оценивать всю антропогенную нагрузку в стоимостном выражении по тарифам, то получаем миллиарды рублей за использование природных ресурсов, и это по ценам (тарифам, нормам) установленных человеком. «Действительную» же плату, за экологию, определить весьма сложно, вопрос очень спорный, т.к. все – могут загрязнять окружающую среду, но создать экологически девственную территорию – никто, т.к. она «бесценна», и по логике действительная плата будет гораздо выше, особенно если учитывать стратегически, на десятилетия вперед, при жестком ограничении ресурсов, с накопленными и латентными загрязнениями. Актуальнейшим исследовательским направлением остается тема дисконтирования экологического ущерба.

На основе результатов федерального государственного экологического надзора на территории Кемеровской области-Кузбасса за период 2016-2021 гг. [12], автором были рассчитаны новые показатели: эффективность одной проверки по возмещению ущерба, абсолютное отставание возмещения от предъявленного ущерба, относительное отставание возмещения от предъявленного ущерба, темп роста этих показателей за период (табл. 3).

Таблица 3

Сведения о результатах федерального государственного экологического надзора на территории Кемеровской области-Кузбасса за период 2016-2021 гг.

| Показатель надзорной деятельности | 2016г. | 2017г. | 2018г. | 2019г. | 2020г. | 2021г. | Темп роста |
|--|--------|---------|----------|----------|----------|----------|------------|
| Произведено проверок предприятий -природопользователей | 781 | 558 | 401 | 337 | 232 | 252 | 0,32 |
| Наложено штрафов, тыс. руб. | 35017 | 16556 | 17553,1 | 44566,3 | 69816,3 | 40190 | 1,14 |
| Взыскано штрафов, тыс. руб. | 30622 | 13889,4 | 16393,66 | 20220,5 | 35660,5 | 28656 | 0,93 |
| Предъявлено ущербов с возмещением вреда на сумму, тыс. руб. | 293517 | 6680105 | 106147,6 | 19419,1 | 130812,9 | 395977,5 | 1,34 |
| Возмещено ущерба на сумму, тыс. руб. | 16873 | 32516 | 8569,574 | 185191,1 | 21349,03 | 5236,6 | 0,31 |
| Эффективность проверки по возмещению ущерба, тыс. руб./проверка | 21,604 | 58,272 | 21,370 | 549,528 | 92,021 | 20,780 | 0,96 |
| Абсолютное отставание возмещения от предъявленного ущерба, тыс. руб. | 276644 | 6647589 | 97577,99 | -165772 | 109463,8 | 390740,9 | 1,41 |
| Относительное отставание возмещения от предъявленного ущерба, разы | 17,39 | 205,44 | 12,38 | 0,104* | 6,12 | 75,61 | 4,34 |

*- превышение возмещения над предъявленным ущербом (почти в 10 раз)

Анализируя данные табл. 3 можно сделать выводы об эффективном федеральном государственном экологическом надзоре на территории Кемеровской области за период 2016-2021 гг., т.к. при уменьшении числа проверок почти в 3 раза эффективность проверок в

среднем за последние три года выросла на порядок. Однако, учитывая факты реального загрязнения окружающей среды Кемеровской области по вышеприведенной информации, в аспекте природоохранной деятельности Кузбасса надо еще много работать, особенно, если к вопросу охраны природы подходить с системных позиций. Образно можно объяснить: «вход-процесс-выход», или «вход: 1 рубль, затраченный на экологию – процесс – экологические мероприятия – выход 3 рубля экологического эффекта (как минимум)».

Вывод. Резюмируя, можно, рекомендовать: проведение системных научно-исследовательских работ по определению условно-оптимальных параметров производства для отраслей, компаний, предельных антропогенных нагрузок на территорию, как в оперативном плане, среднесрочной перспективе, так и для стратегических горизонтов. В более формализованном виде предлагается разработка: «Методики определения условно-оптимальных параметров антропогенной нагрузки по основным загрязнителям для территорий Кузбасса и отраслевых антропогенных объектов».

Список литературы

1. Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Кемеровской области-Кузбасса на период до 2035 года: закон Кемеровской обл.-Кузбасса от 28 декабря 2018г., № 122-ОЗ. – URL:<https://docs.cntd.ru/document/550305101>
2. Мясков А.В., Алексеев Г.Ф. Стратегическое преобразование угольной отрасли Кузбасса // Экономика промышленности. – 2020. – Том 13. – № 3. – С. 318-327.
3. Манаков Ю.А., Куприянов А.Н., Копытов А.И. Добыча каменного угля в Кузбассе в аспекте устойчивого развития региона // Уголь. – 2018. – № 9 (1110). – С. 89-94.
4. Уфимцев В.И., Куприянов А.Н. Карбоновые фермы – отвалы угольных предприятий Кузбасса // Уголь. – 2021. – № 11 (1148). – С. 56-60.
5. Реконструкция почвенно-растительного слоя на поверхности отвалов в Кузбассе / А.Н. Куприянов, Ю.А. Манаков, О.А. Куприянов, Д.А. Шатилов // Уголь. – 2021. – № 2. – С. 46-52
6. Добыча угля в Кузбассе и новые экотехнологии / А.И. Копытов, О.А. Куприянов, Ю.А. Манаков, А.Н. Куприянов // ЭКО. – 2021. – № 6(564). – С. 67-76.
7. Новоселов С.В. Системная оценка антропогенной нагрузки на окружающую среду региона от деятельности ТЭК (на примере Кузбасса) // Экологические проблемы промышленно развитых и ресурсодобывающих регионов: пути решения: сб. трудов II всерос. молод. науч.-практ. конф. – 2017. – С. 218.
8. Сенчагов В.К. Экономическая безопасность России: общий курс / Под ред В.К. Сенчагова. – 2-е изд. – М.: Дело, 2005. – 896 с.
9. Сайт vesti 42.ru. – URL: <https://news/byudzhethnoe-poslanie-gubernatora>
10. Новоселов С.В., Оганесян А.С. Проблемы, риски и прогнозы развития угольной промышленности Кемеровской области до 2035 года // Уголь. – 2021. – № 2. – С. 38-41.
11. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области-Кузбасса в 2021 году // Администрация Правительства Кузбасса, Министерство природных ресурсов и экологии Кузбасса. – Кемерово, 2022. – 492 с.
12. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области - Кузбасса в 2020 г. // Администрация Правительства Кузбасса, Министерство природных ресурсов и экологии Кузбасса, Южно-Сибирское межрегиональное управление Росприроднадзора. – Кемерово, 2021. – 240 с.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ АСПЕКТ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ РОССИИ И КУЗБАССА**к.э.н. Новоселов С.В., г. Кемерово, Россия**

Аннотация. В статье приведена динамика травматизма в угольной промышленности России за период 2005-2021 гг., дана авторская оценка. По официальной информации сделана косвенная оценка состояния промышленной безопасности в Кузбассе за 2021-2022 гг. Доказывается значимость роли специальности «Организация промышленности» (по отраслям) для снижения влияния человеческого фактора на аварийность.

Ключевые слова: травматизм, организация производственных процессов, человеческий фактор, риск-менеджмент, система, многофункциональная система безопасности, уровень безопасности, концепция.

Современный период развития общества характеризуется радикальными изменениями в всех сферах человеческой деятельности. Не исключением является и угольная промышленность России, которая за два десятилетия сделала качественный рывок, как в аспекте производительности труда, так и по уровню безопасности ведения горных работ. Введены новые правила безопасности [1]. Настоящие Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» разработаны в соответствии с требованиями Федерального закона от 21 июля 1997 г. N 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (Собрание законодательства Российской Федерации, 1997, N 30, ст. 3588; 2018, N 31, ст. 4860) и включают ряд важных новшеств, а именно: в горных выработках шахты, надшахтных зданиях и сооружениях должен быть оборудован комплекс систем и средств, обеспечивающий организацию и осуществление безопасности ведения горных работ, контроль и управление технологическими и производственными процессами в нормальных и аварийных условиях. Системы и средства данного комплекса должны быть объединены в многофункциональной системе безопасности (МФСБ).

Не умаляя роли Систем управления промышленной безопасностью (СУПБ; согласно ФЗ-116), Систем управления охраной труда (СУОТ согласно ГОСТ 12.0.230.5-2018) и МФСБ на угольных шахтах сейчас актуален аспект организации производства в целом, так и организации технологических процессов, создания эффективных систем управления промышленной безопасностью и производственного контроля.

Почему востребован именно производственный организатор, а не производственный менеджер, да потому, что угольной отрасли требуются горные инженеры, имеющие знание специальных технических и организационных дисциплин, не теории управления на которую опирается менеджмент (он хорош для офисов), для шахты нужен точный инженерный расчет, не лозунговая мотивация опирающаяся на психологический менеджмент и менеджмент-маркетинг, хотя никто не отрицает нужности данных дисциплин, для общего образования. Шахта это опасный производственный объект, где все базируется на инструкциях, нормах, стандартах, паспортах, правилах безопасности и нарядах, которые должны выдаваться не в угоду частных интересов, желаний и эмоций, а на базе правил безопасности, обоснованных и нормированных документах, регламентирующих нормы и объемы работ, рациональные режимы работы оборудования, нормированных балансах рабочего времени, их оптимизации, что в конечном счете обеспечивает нормальную (стандартную) работу исполнителя, тем самым, исключая инциденты и аварии. Все это относится к сфере дисциплины организации производственных процессов, организации производства, организации промышленности, и фактически функции, вытекающие из этих дисциплин, практически не исчезли, они выполняются, их нельзя убрать, только они подменены другими понятиями.

В свое время, например, в ГУ КузГТУ существовала кафедра «Экономика и организации горной промышленности» и ряд других кафедр по организации ряда отраслей промышленности, вероятно сложно найти специалиста, который бы одновременно, разбирался в организации химической промышленности, машиностроения, строительства, угольной промышленности и др. Ввиду того, что при надзорных проверках Ростехнадзор отмечает низкую квалификацию горных руководителей: «Результаты анализа смертельного травматизма свидетельствуют, о том, что основной причиной по прежнему остается «человеческий фактор». Недостаточная квалификация специалистов и руководителей предприятий, а иногда и умышленное игнорирование ими требований федеральных норм и правил в области промышленной безопасности, несоблюдение производственной дисциплины влекут за собой трагедии. Также можно констатировать, что нарушение требований промышленной безопасности, приводящие к смертельному травматизму и авариям, допускаются в результате неудовлетворительной организации технологических процессов, неэффективности систем управления промышленной безопасностью и производственного контроля» [2].

Как показывает практика в настоящее время требуются специалисты по организации, значит нужны и кафедры организации производства. Может быть смысл, для повышения качества подготовки горных инженеров создать кафедру «Организации горной промышленности», а также «Организации химической промышленности», «Организации строительной промышленности» и даже кафедр организации по инновационным видам производств, по инновационным отраслям востребованных современным рынком труда. Возможно даже создание «Института организации инновационных производств» или «Института организации инновационных бизнес-процессов» при ФГБОУ ВО КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева – это источник, который обеспечит спрос рынка труда на высококвалифицированных инженеров. Дело только за малым – привлечь аттестованных доцентов и профессоров по кафедрам организации промышленности, а такие есть и в Кузбассе, а если мало, то привлечь из других регионов, главное надо помнить, что Кузбасс имеет все возможности стать лидером по территориям опережающего развития в России и роль КузГТУ здесь – базовая.

Во многих вузах кафедры «Экономики и организации» сохранены: Санкт-Петербургский горный университет, Московский политехнический университет, Уральский Федеральный университет, Северо-Кавказский технологический университет, Институт управления бизнес-процессами СФУ, и ряд др. Организация – это емкая и развивающаяся наука. Даже ВАК РФ по специальности 08.00.05 определяет: «Экономика, организация и управление предприятиями, отраслями, комплексами». А Сибирское управление Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору прямо обращает внимание на неудовлетворительную организацию технологических процессов. Безусловно, компетенции по организации производства необходимы, им по смартфону не научишь, надо минимум 5 лет затратить на подготовку специалиста.

Следует признать, что за последнее время специальность организация производства ослабла, это стратегически опасно, т.к. она основной элемент системы управления (даже по классике менеджмента М. Мескону), без организации нельзя нормально функционировать ни в одной отрасли, тем паче на опасных производствах.

Рассмотрим динамику показателей по угольной отрасли России за 2005-2021 гг., согласно [3] (табл. 1). Анализ данных позволяет сделать вывод, что смертельный травматизм, как не печально присутствует, по ряду определенных выше причин, в том числе и человеческий фактор. Однако на фоне сравнения по удельному травматизму, за период 2005-2021 гг. он снижен в разы $0,36 : 0,153 = 2,35$ раза. Конечно, это не конечное достижение, надо стремиться вообще исключить смертельные исходы на производстве, но это в идеале.

На основе данных Доклада Сибирского управления Ростехнадзора по надзору в угольной промышленности [2] и Ростехнадзора РФ [3], мы можем определить состояние промышленной безопасности в Кемеровской области, по распределению смертельных

случаев в 2020 году - 11, по РФ - 15, т.е. 73,3%. В 2021 году - 64, по РФ - 67 - 95,5% [3], при этом следует учесть, что более 50% добычи угля дает Кузбасс.

Таблица 1

Динамика объемов добычи угля, производственного травматизма со смертельным исходом и аварийности в 2005–2021 годах

| Год | Добыча угля, млн. т | | | Аварии | | | | Смертельно травмированных, чел. | | | | Удельный см. травматизм, чел./млн. т | | |
|------|------------------------|--------|--------|--------|-----|-----|------------|---------------------------------------|-----|-----|------------|--|-------|-------|
| | Общ. | ПГР | ОГР | Общ. | ПГР | ОГР | ОФ+ ТКП | Общ. | ПГР | ОГР | ОФ+ ТКП | Общ. | ПГР | ОГР |
| 2005 | 300,2 | 108,5 | 191,7 | 27 | 15 | 6 | 6 | 107 | 81 | 17 | 9 | 0,36 | 0,747 | 0,089 |
| 2006 | 294,1 | 111,1 | 183,0 | 23 | 20 | 1 | 2 | 68 | 53 | 10 | 5 | 0,23 | 0,477 | 0,055 |
| 2007 | 316,0 | 111,5 | 204,1 | 21 | 18 | 1 | 2 | 232 | 216 | 12 | 4 | 0,73 | 1,937 | 0,059 |
| 2008 | 319,47 | 105,28 | 214,19 | 12 | 9 | 1 | 2 | 53 | 41 | 8 | 4 | 0,16 | 0,389 | 0,037 |
| 2009 | 301,79 | 108,41 | 193,98 | 9 | 8 | - | 1 | 48 | 36 | 9 | 3 | 0,15 | 0,332 | 0,047 |
| 2010 | 323,18 | 102,72 | 220,45 | 22 | 17 | 1 | 4 | 135 | 122 | 12 | 1 | 0,41 | 1,188 | 0,054 |
| 2011 | 337,4 | 100,99 | 234,41 | 13 | 9 | 1 | 3 | 46 | 33 | 10 | 3 | 0,13 | 0,327 | 0,043 |
| 2012 | 355,2 | 112,91 | 242,26 | 16 | 11 | 2 | 3 | 36 | 28 | 5 | 3 | 0,10 | 0,247 | 0,021 |
| 2013 | 352,01 | 101,0 | 251,0 | 11 | 11 | 0 | 0 | 63 | 57 | 4 | 2 | 0,17 | 0,554 | 0,016 |
| 2014 | 358,2 | 105,3 | 252,9 | 8 | 7 | 1 | 0 | 26 | 18 | 5 | 3 | 0,07 | 0,171 | 0,019 |
| 2015 | 373,4 | 103,7 | 269,7 | 8 | 6 | 2 | 0 | 20 | 11 | 7 | 2 | 0,05 | 0,106 | 0,026 |
| 2016 | 385,7 | 104,6 | 281,1 | 8 | 7 | 0 | 1 | 56 | 53 | 2 | 1 | 0,14 | 0,507 | 0,007 |
| 2017 | 408,9 | 104,5 | 304,4 | 3 | 3 | 0 | 0 | 18 | 12 | 5 | 1 | 0,044 | 0,115 | 0,016 |
| 2018 | 439,3 | 108,3 | 330,98 | 5 | 5 | 0 | 0 | 17 | 13 | 4 | 0 | 0,039 | 0,120 | 0,012 |
| 2019 | 440,1 | 107,5 | 332,6 | 1 | 0 | 0 | 1 | 15 | 11 | 4 | 0 | 0,034 | 0,102 | 0,012 |
| 2020 | 401,46 | 102,88 | 298,58 | 3 | 2 | 1 | 0 | 15 | 14 | 1 | 0 | 0,037 | 0,136 | 0,003 |
| 2021 | 438,4 | 113,0 | 325,4 | 4 | 3 | 0 | 1 | 67 | 64 | 2 | 1 | 0,153 | 0,566 | 0,009 |

По данным Сибирского управления Ростехнадзора по надзору в угольной промышленности, за 2022 год на поднадзорных объектах угольной отрасли не допущено аварий (за аналогичный период 2021 года произошло 4 аварии). За 2022 год произошло 6 несчастных случаев со смертельным исходом, за аналогичный период 2021 года зафиксировано 64 случая смертельного травматизма (-58).

Результаты анализа смертельного травматизма свидетельствуют о том, что основной причиной по-прежнему остается «человеческий фактор». Недостаточная квалификация специалистов и руководителей предприятий, а иногда и умышленное игнорирование ими требований федеральных норм и правил в области промышленной безопасности, несоблюдение производственной дисциплины влекут за собой трагедии. Также можно констатировать, что нарушение требований промышленной безопасности, приводящие к смертельному травматизму и авариям, допускаются в результате неудовлетворительной организации технологических процессов, неэффективности систем управления промышленной безопасностью и производственного контроля.

В 2022 году в угольной отрасли Управлением проведено 5099 проверок, из них плановых 53, внеплановых 42, проведенных в режиме постоянного государственного надзора – 5004. В ходе проверок выявлено 21018 правонарушений. По результатам проверок назначено 4300 административных наказаний. Административное приостановление деятельности применялось 401 раз, временный запрет деятельности – 401. На нарушителей обязательных требований промышленной безопасности наложен 3782 административных штрафа. Общая сумма наложенных административных штрафов составила 150359 тыс. руб.

По результатам проведенного анализа проверок поднадзорных организаций в 2022 году часто встречающимися требованиями промышленной безопасности явились (ст. 9.1. КоАП РФ):

- неисправное состояние технических устройств, защит и блокировок (конвейера скребковые и ленточные, лебедки, монорельсовые и рельсовые дизелевозы, электровозы и т.д.);
- нарушения взрывозащиты электрооборудования;

- нарушение утвержденного паспорта крепления горной выработки;
- нарушения противопожарной защиты;
- нарушения в организации и осуществлении производственного контроля.

Для обеспечения безопасности на опасных производственных объектах – угольных шахтах предлагается «Концепция инноваций в области безопасности жизнедеятельности угольных шахт». Предлагаемая концепция инноваций в области безопасности жизнедеятельности угольных шахт в своей сущности основана на: инновациях обеспечивающих синергетический эффект от их внедрения многофункциональных шахтосистем, инновационных проектов, имеющих радикальную рентабельность и минимальный срок окупаемости, на обоснованиях, использующих системный научный метод исследования процессов в области БЖД шахт, на государственном и корпоративном образовании в области безопасности угольных шахт, использовании экспертов и новаторских научно-исследовательских групп при оценках инновационных проектов, и в целом имеет блочную структуру (рис. 1).

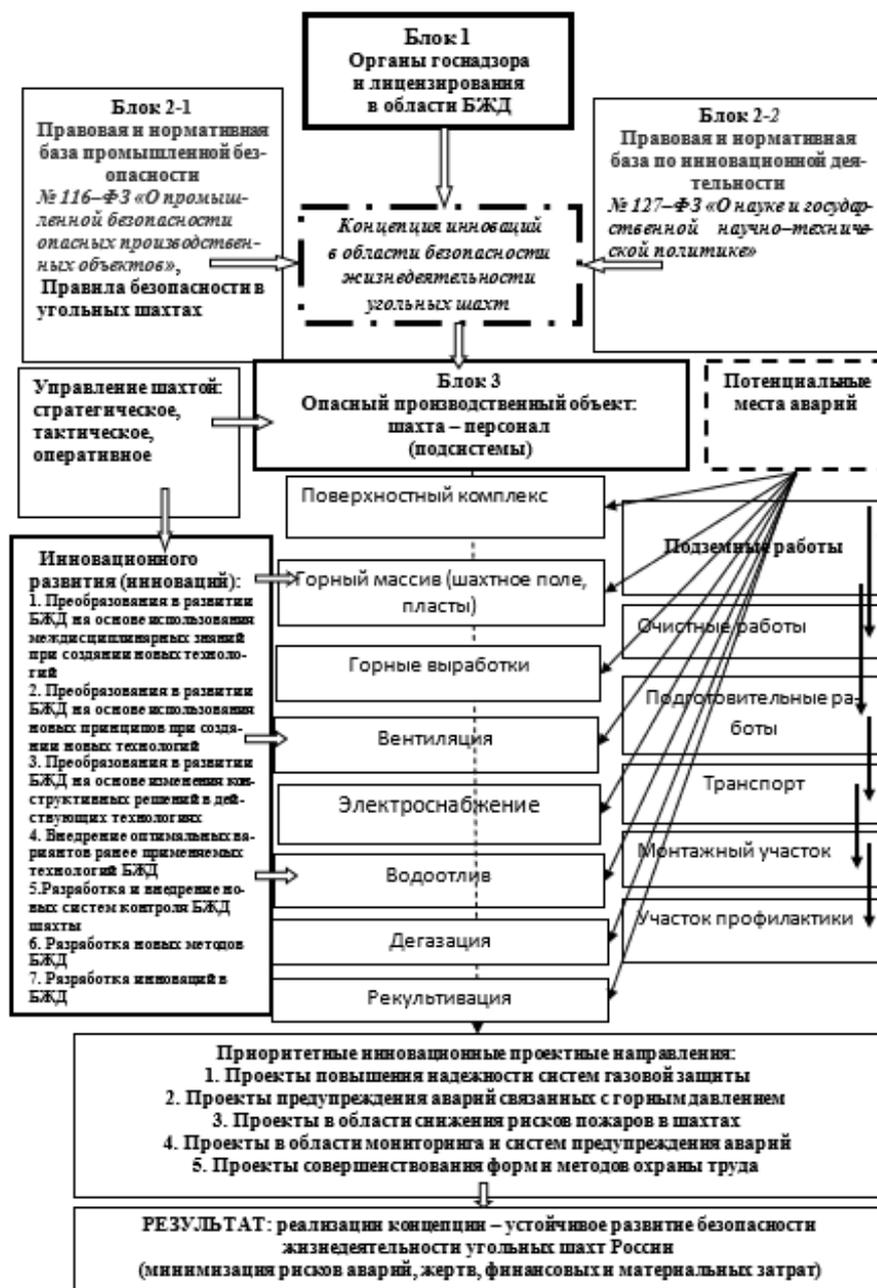


Рис. 1. Схема концепции инновационного развития безопасности жизнедеятельности угольных шахт

Вывод. Резюмируя, можно утверждать, что внедрение в практику методов научной организации труда с элементами цифровизации технологических процессов, внедрение систем МФСБ (Правила безопасности), Систем управления промышленной безопасностью (СУПБ; ФЗ-116) и Систем управления охраной труда (СУОТ; ГОСТ 12.0.230.5-2018) и предлагаемой концепции, в интеграле обеспечат устойчиво-нормальный уровень безопасности на угольных шахтах.

Список литературы

1. Правила безопасности в угольных шахтах : утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 декабря 2020 г., № 507.
2. Доклад о правоприменительной практике контрольной (надзорной) деятельности в Сибирском управлении Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору при осуществлении федерального государственного надзора в области промышленной безопасности за 2022 год : утв. Сибирским управлением Ростехнадзора 14.03.2023, № ПР-340-279-о.– Кемерово-2023 – URL: <http://usib.gosnadzor.ru/activity/PublicDiscuss/dokladi/%D0%9F%D0%A0-340-279-%D0%BE%20%28%D0%9F%D0%91%29.pdf>
3. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2021 году. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2022. – 407 с. – URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/Годовой%20отчет%20за%202021%20г.pdf

УДК.338.1:658.012(571.17)

КОНЦЕПЦИЯ СТРАТЕГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО ТЭК КУЗБАССА КАК ИНТЕГРАЦИОННОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ РАДИКАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

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

Аннотация. Представлена концепция стратегического развития регионального ТЭК Кузбасса как интеграционной экономической системы в условиях радикальных вызовов внешней среды. Разработана графоаналитическая модель взаимосвязи субъектов стратегического управления и технологического функционирования ТЭК Кузбасса.

Ключевые слова: концепция, стратегическое управление, топливно-энергетический комплекс, санкции, системный анализ, рентабельность производства, энергетическая безопасность.

Главными векторами перспективного развития отраслей топливно-энергетического комплекса России, предусмотренными Энергетической стратегией РФ утвержденной Распоряжением Правительства РФ ещё в августе 2003 г. № 1234-р, являлся: переход на путь инновационного и энергоэффективного развития, изменение структуры и масштабов производства энергоресурсов, создание конкурентной рыночной среды, интеграция в мировую энергетическую систему, и это сейчас становится наиболее актуальным в период санкций «коллективного Запада». Целью Энергетической стратегии России на период до 2035 года [1], с одной стороны, является максимальное содействие социально-экономическому развитию страны, а с другой - укрепление и сохранение позиций Российской Федерации в мировой энергетике, как минимум, на период до 2035 года. Для регионального ТЭК Кузбасса современный этап требует внедрения инноваций и дальнейшей цифровизации угольной отрасли, соответствуя новой технологической парадигме.

Формируемая концепция стратегического развития регионального ТЭК должна содержать следующие основные блоки: маркетинговый, финансовый, социально-экономический, организационно-правовой, технико-технологический, безопасности

жизнедеятельности и экологический. Главную роль в региональных ТЭК выполняют территориальные генерирующие компании (ТГК), от их эффективной структуры зависит в большей степени рентабельность всей системы, т.к. электрические станции и тепловые котельные дают в принципе первооснову движения экономических процессов – энергию, и от себестоимости 1kВтч и 1Гкал , зависит тариф на энергоносители, который по всей производственно-хозяйственной цепи входит в стоимость всего ассортимента продукции и в конечном счете, определяет уровень рентабельности всех отраслей региона.

Никто не станет оспаривать тот факт, что на данном этапе, экологические проблемы приняли мировые масштабы. В России реализуется множество экологических программ, не исключением является и Кузбасс, где в настоящее время актуально создание экологических кластеров. По инициативе Губернатора Кузбасса С.Е. Цивилева внедряется региональный экологический стандарт развития угольной отрасли: «Чистый уголь – зеленый Кузбасс», как отмечается в источнике [2] – это масштабный комплекс мероприятий, который призван изменить облик и экологического состояния всего региона. В условиях санкций для Кузбасса, где ведущей отраслью является угольная промышленность, важным направлением является цифровая трансформация производственных процессов и бизнес-моделей горнодобывающей промышленности в условиях рыночной нестабильности, что наглядно раскрывает источник [3]. Сейчас, особенно важно компаниям сформировать и использовать систему мер против санкционного давления, по проблемам в поставках импортного угледобывающего оборудования, трудностями в осуществлении логистических операций по доставке угля клиентам, исполнении своих обязательств перед международными инвесторами, что практически реализуется в ведущих российских угольных компаниях, и репрезентативно раскрыто в статье [4].

Уже давно доказывается, что для региональной экономики значимо создание кластеров в угольной промышленности Кузбасса – стратегического угольного бассейна России и объективно присутствует, это подтверждает деятельность НОЦ Кузбасса [5], а их актуальность в XXI веке доказывается рядом публикаций кузбасских ученых [6-9] и др. Для Кузбасса предложены ряд уникальных проектов, объединяющих предприятия угольной промышленности, электроэнергетики и углехимии в один комплекс (это региональный кластер), что раскрыто в монографии [10]. Такое объединение, путем создания современной системы переработки угля, позволит расширить ассортимент угольной продукции с добавленной стоимостью, повышением радикально уровнем рентабельности производств, и одновременно обеспечением потребителей тепловой и электрической энергией.

Для эффективной реализации стратегических целей – при формировании инновационных экономических образований, следует учитывать уровни взаимосвязей ТЭК России и ТЭК Кемеровской области, и других региональных ТЭК на топливно-энергетическом рынке. Анализируя иерархию взаимоотношений на различных уровнях топливно-энергетического рынка очевидна степень усложнения отношений и функций управления при выходе региональных энергетических компаний на более высокий уровень. Во-первых, растет число участников экономических отношений, во-вторых, усложняется управление коммуникативными функциями и их масштабом, в-третьих, возникают нормативно-правовые несоответствия различных уровней, кроме того, цели участников различных уровней могут отличаться по их внутреннему содержанию.

Для конкретного регионального ТЭКа, на какой-то дискретный период, могут существовать несколько векторов стратегического развития ведущих к одной цели, но надо определять оптимальный, желательный по аналитической модели, на основе параметров (конкретных, обоснованных цифр, проверенных расчетом по различным методам, но дающим одинаковый результат). Региональная энергетическая концепция должна способствовать разработке эффективной стратегии развития и быть привязанной к конкретным условиям региона. Система основных принципов, аксиом развития сложных производственно-экономических систем, которые должны учитываться при формировании энергетической

концепции региона, а в дальнейшем способствовать разработке стратегии, определены в теории систем, и достаточно полно раскрыты ведущими учеными в этой отрасли [11].

В настоящее время стратегическое развитие российского ТЭК определено «Энергетической стратегией России до 2035 года», где определяется удержание конкурентной позиции России на 1-2-х местах мировых лидеров по экспорту газа в периоде 2024-2035гг. Понятно, что без сильного и энергоэффективного ТЭКа России достичь такой цели невозможно, а это в свою очередь требует создания и поддержания в эффективном состоянии региональных ТЭК. Следует учитывать, что в перспективе будет рост добычи угля при использовании наиболее эффективных технологий, согласно ЭС-2035, он определен в диапазоне 485- 668 млн. т угля в год. Надо понимать, что с одной стороны минимальные объемы добычи благо для экологии, но с другой стороны это потери финансовых ресурсов, например, даже при цене 100 долл. за тонну, это будет около 20 млрд. долл. валовой прибыли, при грубых расчетах.

Более наглядно взаимосвязи субъектов стратегического управления и функционирования в ТЭК Кузбасса видны на схеме (рис. 1), очевидно, что основной задачей является решение сложного неравенства (1), при определении оптимальных параметров функционирования в каждом звене взаимодействия: администрации региона: угольщиков, потребителей (спроса), транспорта, энергетиков, запасов угля, экологии. Рациональное согласование объемных параметров во всех звеньях даст региону миллиардные эффекты.

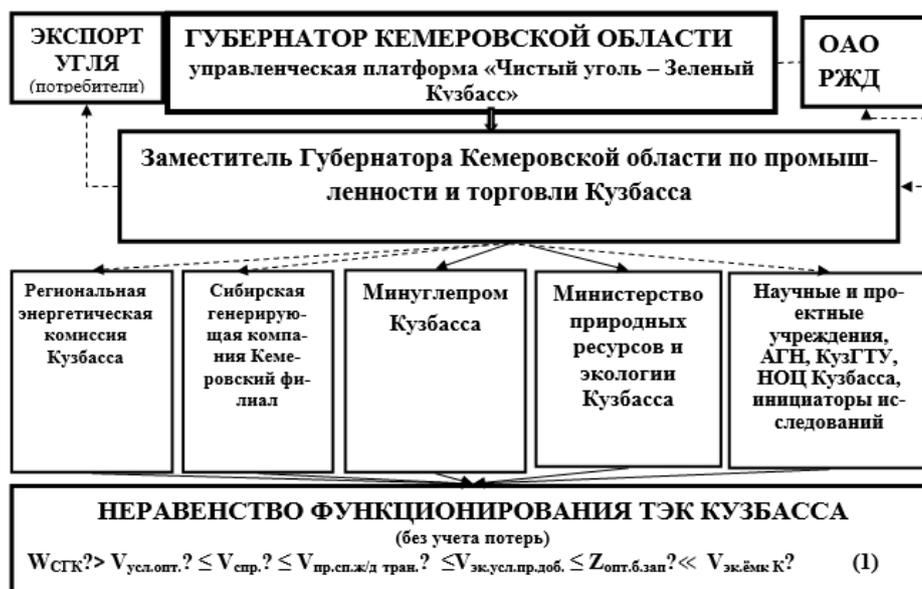


Рис. 1. Графоаналитическая модель взаимосвязи субъектов стратегического управления и функционирования в ТЭК Кузбасса

Обозначения в неравенстве (1) на рис. 1:

$W_{СГК}?$ – энергетическое ограничение, по электроэнергии (мощности), с учетом резервов и режимов работы СГК (МВт, млрд. кВтч);

$V_{усл.опт.}?$ – условно- оптимальный объем добычи угля компаниями в Кузбассе, (млн. т/год);

$V_{спр.}?$ – потенциальный объем спроса на кузнецкие угли (внешний и внутренний рынок), (млн. т/год);

$V_{пр.сп.ж/д\ тран.}?$ – пределы пропускной способности ж/д транспорта по вывозу углей из Кузбасса (внешний и внутренний рынок), (млн. т/год);

$V_{эк.усл.пр.доб.}$ – экологический условный - предел добычи, ≈ 309 млн. т/год, определен по динамике добычи в Кузбассе и объемов выброса загрязняющих веществ в атмосферу Кузбасса за период 2005-2021гг.;

$Z_{\text{опт.б.зап}}?$ – оптимальные балансовые (промышленные) запасы угля, млн. т;
 $V_{\text{эк.ёмк К}}?$ – экологическая емкость Кузбасса (несогласованная ед. измерения, тЗВ/год, т/км², или др. ед), проблемная величина многократно превышающая максимальное техногенное давление на экологию региона.

Как видно из неравенства (1) на рис. 1, везде в обозначениях стоят знаки вопросов, кроме условно-предельного объема добычи по экологическому фактору, который определен в первом приближении [12], что инициирует дальнейшие исследования по согласованию единой единицы измерения экологической емкости региона (условной), нахождение предельных параметров во всех элементах взаимодействия, определения условно-оптимальных параметров производства, транспорта и спроса, т.к. эти параметры на каждый период времени будут различны (вариативны), но это ориентиры для принятия стратегических решений, и по логике неравенства (1) обеспечат синергетический эффект во всей системе производства региона. Еще более сложный вопрос определение потерь, тогда уже надо определять баланс, поэтому предложено неравенство. Стратегическое управление направлено на оптимизацию портфеля выданных лицензий на добычу угля; достоверный мониторинг ресурсной базы месторождений по пластам и маркам углей; оптимизацию производственных мощностей производственных единиц (шахт, разрезов и обогатительных фабрик), согласование по энергетическим мощностям с генерирующими компаниями и конечно же на проведение системного маркетингового анализа.

Вывод. По формированию концепции стратегического развития регионального ТЭК Кузбасса, как интеграционной экономической системы, предлагается концепция развития ТЭК в соответствии со сменой технологических парадигм, а конкретно – формирование оптимальной трансформации существующего регионального ТЭК в цифровизированный и энергоэффективный, при должном уровне экологической безопасности и гармонизации интересов всех участников бизнес-процесса по предложенной графо-аналитической модели.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года : утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г., № 1523-р.
2. Мясков А.В., Алексеев Г.Ф. //Стратегическое преобразование угольной отрасли Кузбасса. Экономика промышленности. – 2020. – Том 13. – № 3. – С. 318-327.
3. Цифровая трансформация производственных процессов и бизнес-моделей горнодобывающей промышленности в условиях рыночной нестабильности / Д.Ю.Савон, Е.В. Шкарупета, А.Е. Сафронов [и др.] // Уголь. – 2021. – № 2. – С.32-37.
4. Цивилева А.Е., Голубев С.С. Влияние санкций на работу предприятий угольной промышленности // Уголь. – 2022. – № 8. – С. 84-91.
5. Опыт и уроки подготовки комплексного научно-технического проекта «Чистый голь – Зеленый Кузбасс» / И.А. Ганиева, Г.В. Шепелев, П.М. Бобылев, Н.А. Петрик // Уголь. – 2022. – № 11. – С. 17-25.
6. Стратегические задачи развития угольной отрасли / В.И. Клишин, Т.Б. Рогова, С.В. Шаклеин, М.В. Писаренко // Уголь. – 2023. – № 3. – С.52-59.
7. Новоселов С.В. Горная доктрина Российской Федерации как один из базовых элементов формирования энергетической безопасности страны // Уголь – 2022.– № 8. – С. 92-94.
8. Добыча угля в Кузбассе и новые экотехнологии / А.И. Копытов, О.А. Куприянов, Ю.А. Манаков, А.Н. Куприянов // ЭКО. – 2021. – № 6(564). – С. 67-76.
9. Синергетический подход к решению геоэкологических проблем угледобывающих и углеперерабатывающих субкластеров / А.А. Хорешок, О.И. Литвин, Д.М. Дубинкин [и др.] // Уголь. – 2022. – № 12. – С.82-86.
10. Новоселов С.В. Системная оценка стратегического развития топливно-энергетического комплекса региона: вопросы теории, методологии и практики (на примере ТЭК Кемеровской области на период 2020-2035гг.): монография. – Кемерово: ООО «ГД «Азия-

Принт», 2017. – 192 с.

11. Буторин В.К., Ткаченко А.Н., Шипилов С.А. Прикладной системный анализ: концептуальный подход: монография. – Кемерово: М.: «Российские университеты»: «Кузбассвузидат»: «АСШТ», 2006. – 323 с.

12. Новоселов С.В., Ремезов А.В. Проблема определения условно-оптимальных объемов добычи для производственной единицы (шахты, разреза) с учетом экологических ограничений в условиях Кузбасса // Уголь. – 2023. – № 3 – С. 104-108.

УДК 504.054

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЙ СТАЦИОНАРНЫХ И ПЕРЕДВИЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ НА ПРИМЕРЕ ПРЕДПРИЯТИЯ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Киприянов Д.А., к.т.н. Поползин И.Ю., Дробышев В.К.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. Проанализирована деятельность котельного подразделения шахтного предприятия, выявлены источники загрязнения атмосферного воздуха, определена общая величина выбросов загрязняющих веществ этими источниками загрязнения. Выполнены расчеты выбросов в атмосферу загрязняющих веществ от породного отвала, механизмами для проведения рекультивации и автотранспорта.

Ключевые слова: источники загрязнения, шахта, породный отвал, пыль углепородная, уголь, атмосферный воздух, выбросы, пылевая поверхность.

Промышленная и сельскохозяйственная продукция, а также другие отрасли человеческой деятельности оказывают негативное воздействие на окружающую среду на протяжении многих лет. Напряженная экологическая обстановка во многих районах и городах России свидетельствует о том, что, несмотря на возросшее в последнее время внимание к этим вопросам и значительные затраты на их решение, принимаемые меры недостаточно эффективны и не вызывают изменения тенденции ухудшения состояния окружающей среды [1].

Сложившаяся в России структура промышленного производства связана с развитием энергетической, горно-металлургической, угледобывающей, химической и машиностроительной отраслей и характеризуется интенсивным потреблением энергетических, сырьевых, водных и земельных ресурсов, а также увеличением нагрузки на окружающую среду. Среди отраслей больше всего загрязняют атмосферу энергетика (32%), металлургия (27%), угольная промышленность (23%).

Угольная промышленность представляет собой чрезвычайно сложный многоотраслевой производственно-хозяйственный комплекс, являющийся тяжелой отраслью не только по содержанию, но и по уровню повышенной опасности для окружающей среды. Добыча угля связана с разрушительным воздействием на атмосферу, земельные и водные ресурсы, растительный и животный мир. Горящие отвалы горных пород, интенсивная запыленность и загрязнение воздуха, гидротехнические сооружения, пруды и отстойники, хвостохранилища, загрязнение поверхностных и подземных вод, образующихся подземных пространств, просадки земной поверхности, искусственное обводнение, заболачивание и многое другое являются источниками экологических опасностей, связанных с эксплуатацией объектов угольной промышленности [2].

На территории Кемеровской области добычу ведут 152 горнодобывающих предприятий, из них 96 – угольные. Уголь поставляется на обогатительные фабрики, которые распределяют его по заводам. В результате добычи, переработки и использования угля

предприятиями угольной промышленности ежегодно выбрасывается огромное количество загрязняющих веществ (диоксид серы, оксиды азота, оксид углерода, органические углеводороды, летучие органические соединения). В атмосферу выбрасываются и специфические загрязняющие вещества: антрацитовая пыль, метан, оксид железа, марганец, свинец, минеральные масла, сероводород. Решение экологических проблем охраны атмосферного воздуха связано с оснащением источников загрязнения высокоэффективными пыле-газоулавливающими устройствами, сокращением количества малых организованных и неорганизованных стационарных источников, разработкой и внедрением более чистых технологических процессов. На сегодняшний день значительная часть основного технологического газоочистного оборудования устарела. По состоянию на конец 2022 года почти 65% технологических установок не оснащены газоочистным оборудованием. В результате в атмосферу попало 1329 тыс. тонн опасных веществ. Это привело к превышению предельно допустимых концентраций (ПДК) многих вредных веществ в воздухе промышленных городов области.

Постановки задачи. Целью работы является оценка влияния угольной промышленности на атмосферный воздух. В качестве объекта исследования были выбраны данные по практике.

Производственный комплекс шахты включает в себя промышленные котельные, вентиляционные шахты, дегазационные установки, мастерские по ремонту гидравлического оборудования, вулканизационную, электрическую, газосварочную станцию, участки, электровоззарядную станцию, автотранспортный гараж, лесной склад, склад угля и шлака, строительный цех, горизонтальную магистраль и шахтный водоем-осветительный пруд, административно-бытовой комбинат, складское помещение.

Анализ влияния источников загрязнения на состояние атмосферного воздуха. Для шахты является действующим предприятием по добыче угля марки «Г», который обеспечивает потребности энергетической отрасли. Добыча угля осуществляется под землей в шахтах – это самостоятельная производственно-хозяйственная единица горнодобывающего предприятия. Рудные месторождения, которые разрабатываются под землей, представлены линзами, стержнями, пластами, куполами, жилами [1].

Горная порода частично остается в шахте, частично выходит на поверхность. Выход горной породы на поверхность составляет 117 тыс. тонн в год. Порода хранится в породном отвале шахты, расположенной в северо-восточной части основной промышленной площадки. Шахта имеет три площадки технологических комплексов, где расположены источники выбросов загрязняющих веществ в атмосферу:

I – промышленная площадка шахты (основная);

II – промышленная площадка котельной;

III – промышленный участок вентиляционной шахты и дегазационного оборудования.

На площадках шахты сложился комплекс основных производств, характерных для угольных шахт и связанных с выбросами вредных веществ в атмосферу. Все производственные помещения и породная отвалы рудника расположены на первой площадке (основной), расположенной в северо-западной части.

В результате анализа деятельности обособленного подразделения шахтного предприятия было выявлено 19 источников загрязнения атмосферного воздуха, которые были разделены на два вида: организованные и неорганизованные.

Организованные – это источники, которые выбрасывают вредные вещества в воздушный бассейн через трубу. Организовано 11 источников загрязнения атмосферного воздуха, а именно: котельная труба ДКВР – 10/13 (источник 1), котельная труба Е – 1/9 (источник 2), труба кузнечной печи (источник 3), труба деревообрабатывающего станка (источник 4), деревообрабатывающие станки (источник 5), вентиляционная шахта № 1 (источник 8), вентиляционная шахта № 4 (источник 18), дегазационное оборудование (источник 19),

котлы Ревокатов (источник 16), бытовая печь РМУ (труба) (источник 13), бытовая печь транспортной секции (котел) (источник 14).

Неорганизованные – источники, выделяющие вредные вещества с большой площади и из-за протечек технологического оборудования. К неорганизованным относятся 8 источников загрязнения, а именно: сварочные аппараты (источник 6), отвал породы (источник 7), двигатели внутреннего сгорания (ДВС) автомобилей (источник 15), участок резки металла (источник 11), шлаковый склад котельной ПК (источник 17), шлакосклад шахты котельной (источник 10), склад горюче-смазочных материалов (источник 12), склад угля (источник 9).

На основании анализа технологического оснащения предприятия проведена инвентаризация источников загрязнения атмосферного воздуха, что позволило установить суммарную мощность выбросов загрязняющих веществ по всем источникам загрязнения на шахте – 12380,20 тонн/год. Свалка отходов является одним из основных стационарных источников загрязнения атмосферного воздуха на шахте табл. 1. Базовая площадь отвала составляет 24,0 га. Под воздействием изменяющейся температуры воздуха, осадков, ветра происходит саморазрушение комковатой породы с образованием определенной доли пыли. В сухую ветреную погоду эта пыль выдувается ветром из отвала и уносится, загрязняя атмосферу. Процесс формирования отвала также сопровождается выделением пыли.

Таблица 1

Данные по отвалу породы рудника

| Параметры источника выбросов | | Вещество | Мощность излучения | |
|------------------------------|------------|---------------|--------------------|-------|
| Высота, м | Диаметр, м | | г/с | т/год |
| 76,0 | 400-702,5 | Угольная пыль | 3,431 | 81,26 |

Для снижения количества пылевыведения предусмотрены технологические решения по рекультивации отвала с последующим его полным озеленением.

Основными источниками выбросов загрязняющих веществ при рекультивации отвала отходов и сопутствующем процессе дополнительных технологических операций являются перемещающиеся по площадке оборудование, транспортные средства, а также технологические операции, связанные с высыпкой и хранением горной породы для обустройства временных технологических насыпок. Валовые выбросы загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу этими источниками загрязнения, их предельно допустимые концентрации (ПДК), класс опасности приведены в табл. 2.

Таблица 2

Валовые выбросы загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу при рекультивации свалки отходов

| Вещество | ГДК, мг/м ³ | Класс опасности | Валовая выработка, т/год | | | |
|-------------------------|------------------------|-----------------|----------------------------|---------------|--|---------------|
| | | | на период рекультивации | | последующие годы до полного благоустройства свалки | |
| | | | от стационарных источников | от транспорта | от стационарных источников | от транспорта |
| Угольная пыль | 0,03 | 4 | 17,18 | 0,0533 | 9,17 | 0,0533 |
| Оксид углерода | 5,0 | 4 | – | 44,52 | – | 44,52 |
| Предельные углеводороды | 1,0 | 4 | – | 13,4 | – | 13,4 |
| Диоксид азота | 0,085 | 2 | – | 17,8 | – | 17,8 |
| Сажа | 0,15 | 3 | – | 6,9 | – | 6,9 |
| Диоксид азота | 0,5 | 3 | – | 8,9 | – | 8,9 |
| Вместе: | | | 17,18 | 91,58 | 9,17 | 91,58 |
| Всего: | | | 108,76 | | 100,75 | |

Для определения степени воздействия на окружающую среду отвала рудника были рассчитаны выбросы из отвала [3], которые показали:

- количество твердых частиц, выделяемых при формировании отвала и бермы, составляет 1,16 т/год;
- количество твердых частиц, сдуваемых с поверхности отвала отходов перед рекультивацией, составляет 80,1 т/год;
- количество твердых частиц, сдуваемых с поверхности отвала в период рекультивации отвала, составляет 16,02 т/год;
- количество твердых частиц, сдуваемых с поверхности свалки отходов в последующие годы до полного благоустройства свалки, составляет 8,01 т/год;
- количество твердых частиц, выбрасываемых при всех видах погрузочно-разгрузочных работ в пределах отвала шахты, составляет 0,045 тонн/год.

В процессе рекультивации терриконов планируется перемещение больших объемов породы текущего производства. Эксплуатация транспорта и механизмов сопровождается выбросами выхлопных газов, которые являются источниками загрязнения воздуха.

Величина выбросов определяется исходя из удельных норм расхода топлива, количества часов работы в год с использованием коэффициентов выбросов. Потребность в механизмах принимается в зависимости от их суточной производительности и односменной работы. Результаты расчетов токсичных выбросов от механизмов и транспортных средств в атмосферу приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов токсичных выбросов от механизмов и транспортных средств в атмосферу в шахтовом предприятии

| Наименование загрязняющих веществ | Выбросы загрязняющих веществ | | | |
|-----------------------------------|------------------------------|------------|------|-------|
| | Выбросы, т/т | Количество | | |
| | | т/год | г/с | т/год |
| Оксид углерода | 0,1000 | 0,0212 | 5,9 | 44,52 |
| Предельные углеводороды | 0,0300 | 0,0064 | 1,8 | 13,4 |
| Диоксид азота | 0,0400 | 0,0085 | 2,4 | 17,8 |
| Сажа | 0,0155 | 0,0033 | 0,92 | 6,9 |
| Диоксид серы | 0,0200 | 0,0042 | 1,2 | 8,9 |

Помимо выбросов загрязняющих веществ, пыль также попадает в атмосферный воздух при эксплуатации транспортных средств, что вызвано движением самосвалов. Пыль выделяется в результате взаимодействия колес с дорожным покрытием и сдувания ее с поверхности материала, загруженного в кузов автомобиля. Расчетное количество пыли, образующейся при движении транспортных средств по территории площадки и по автомагистрали, составляет 0,0011 г/с или 0,0083 т/год.

Выводы. Для оценки воздействия на атмосферный воздух были рассчитаны выбросы загрязняющих веществ в пределах основной промышленной площадки шахты, поступающих из отвала отходов и автотранспорта в атмосферный воздух. Определено, что основным загрязняющим веществом, выделяющимся при формировании отвала и выдувании частиц с его пылевой поверхности, является каменноугольная пыль, валовая эмиссия которой составляет 17,18 т/год.

Необходимо ограничить погрузочно-разгрузочные работы, связанные со значительными выбросами в атмосферный воздух, проводить проверки транспортных средств на содержание загрязняющих веществ в выхлопных газах, восстанавливать поверхности накопленного мелиоративного слоя горных пород путем посева многолетней травянистой и кустарниковой растительности для предотвращения пылеобразования, проводить полное

озеленение прилегающей территории для уменьшения объема частиц, сдуваемых с поверхности свалки отходов, и предотвращения эрозии почвы.

Список литературы

1. Дорохов Д.В., Сивохин В.И. Технология подземной разработки пластовых месторождений / Под общ. ред. Д.В. Дорохова. – Донецк: ДонГТУ, 1997. – 344 с.
2. Меркулов В.А. Охрана природы в угольных шахтах / А.В. Меркулов. – М.: Недра, 1981. – 183 с.
3. Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами. – Л.: Гидрометеиздат, 1986.

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 23.05.2023 г.

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 23,18 Уч.-изд. л. 24,74 Тираж 1000 экз. Заказ 114

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.

Издательский центр СибГИУ