

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

На правах рукописи

РЫБИЧЕВ Алексей Алексеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ПЫЛЕВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ
РАЗРАБОТКЕ ВЫСОКОГАЗОНОСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ,
СОДЕРЖАЩИХ ТЯЖЕЛЫЕ УГЛЕВОДОРОДЫ**

Специальность 2.10.1 – «Пожарная безопасность»

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор **Скопинцева О. В.**

Москва 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПЫЛЕВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ УГЛЯ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	9
1.1. Современное состояние и развитие угледобывающей промышленности в Российской Федерации	9
1.2. Условия возникновения взрывоопасной концентрации метана и угольной пыли в шахтах.....	17
1.3. Синергетическое воздействие факторов при взрывах пылеметановоздушных смесей.....	23
1.4. Нейтрализация взрывчатых свойств метанопылевоздушных смесей ..	25
Выводы, цель и задачи исследований	27
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЫЛЕВОЙ ОПАСНОСТИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ.....	29
2.1. Процессы пылеотложения угольной пыли и переход ее во взвешенное состояние.....	29
2.2. Исследование дисперсного состава отложившейся пыли на шахте «Осинниковская»	32
2.3. Пылеобразование на выемочном участке №1 (лава 4-1-5-9) шахты «Осинниковская» ОАО «ОУК «Южкузбассуголь»	39
Выводы	43
3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА И КОЛИЧЕСТВА ТЯЖЕЛЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ В УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ И УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ И ОЦЕНКА ИХ РОЛИ В ВОЗНИКНОВЕНИИ ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНЫХ СИТУАЦИЙ	44
3.1. Исследование состава и количества остаточных газов угля и угольной пыли	44
3.2. Анализ влияния сорбированных тяжелых углеводородов на взрывчатость угольной пыли	51
3.3. Исследования формы и структуры пылевых частиц угля средней стадии метаморфизма	63

3.4. Термогравиметрический анализ угольной пыли	75
Выводы	79
4. РАЗРАБОТКА МЕТОДА СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЯЖЕЛЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ НА СОЗДАНИЕ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ СИТУАЦИЙ НА ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ.....	81
4.1. Разработка метода снижения области воспламенения тяжелых углеводородов за счет увеличения содержания балластных газов.....	81
4.2. Разработка методики нейтрализации остаточных газов угля путем обработки угольного массива газонаполненными растворами поверхностно активных веществ (НГНР)	87
4.3 Расчет параметров флегматизации остаточных углеводородов угля при разработке высокогазоносных угольных пластов, опасных по взрывам пыли	91
Выводы	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	94
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	98
Приложение 1	113
Приложение 2	122

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. За три последних десятилетия на высокопроизводительных шахтах России происходили взрывы метана и угольной пыли, приводящие к катастрофическим последствиям. После взрывов метановоздушных смесей в угольных шахтах зачастую возникали пожары. Это такие шахты, как: шахта им. Шевякова (1992 г.), «Воркутинская» (1995 г.), «Баренцбург» (1996 г.), «Зыряновская» (1997 г.), «Центральная» (1998 г.), «Юбилейная» (2007 г.), «Ульяновская» (2007 г.), «Распадская» (2010 г.), «Северная» (2016 г.), «Листвяжная» (2021 г.) и др.

В системе профилактических мероприятий, способов и средств борьбы со взрывами в угольных шахтах основное внимание уделено метану, однако известно, что при разработке пластов средней стадии метаморфизма в шахтную атмосферу выделяются гомологи метана, имеющие меньшие концентрационные пределы взрываемости по сравнению с метаном. Угольная пыль, находящаяся в шахте в большом количестве, хорошо сорбирует тяжелые углеводороды, особенно бутан, пентан и гексан, так как эти газы тяжелее воздуха от 2,5 до 3 раз и вследствие стратификации воздушного потока опускаются на почву выработок, покрытые отложившейся пылью. И, если метан вентиляцией удаляется из шахты, то сорбированная тяжелыми углеводородами пыль, хотя и осланцовывается, но остается в шахте.

Таким образом, пыль угольных пластов средней стадии метаморфизма, вследствие хорошей сорбционной способности формирует «свою» шахтную атмосферу, взрывоопасные примеси в которой дополняются сорбированными в пыли тяжелыми углеводородами, оказывающими синергетический эффект при взрывах метана и угольной пыли.

В решении проблемы борьбы со взрывами метана и угольной пыли практически не исследовался состав остаточных газов угля и сорбированных пылью тяжелых углеводородов, у которых концентрационные пределы

взываемости и температура воспламенения ниже, чем у метана, что создает повышенную взрывоопасность пылеметановоздушных смесей.

Целью работы является установление зависимостей содержания тяжелых углеводородов в угольных пластах от степени метаморфизма и оценка роли тяжелых углеводородов в создании пожаровзрывоопасных ситуаций в угольных шахтах.

Идея работы состоит в том, что температура воспламенения остаточных газов угольных пластов, содержащих тяжелые углеводороды, будет определяться парциальным давлением тяжелых углеводородов в воздушно-газовой смеси и малыми значениями низких концентрационных пределов взываемости этих компонентов.

Объект исследования – высокогазоносные угольные пласти, опасные по взрывам пыли.

Предмет исследования – компонентный состав остаточных газов угля и угольной пыли различных стадий метаморфизма угля.

Научные положения, разработанные лично соискателем:

1. Остаточные газы угольных пластов средней стадии метаморфизма в основной своей массе содержат глубокосорбированные тяжелые углеводороды, выделяющиеся при разрушении угля в соответствии с их сорбционными свойствами, что отражает общую закономерность для разных угольных бассейнов. Наибольшее количество тяжелых углеводородов содержится в марках углей Ж, КЖ, К и снижается по отношению к углям низкой и высокой степени метаморфизма.

2. Количество углеводородов, извлеченных из угольной пыли пластов средней стадии метаморфизма, на 23% больше, чем количество углеводородов, извлеченных из исходного угля. Содержание бутана, пентана и гексана в угольной пыли соответственно в 2,1, 18,9 и 7,9 раз больше, чем в исходном угле, что определяется условиями проистекающей физической адсорбции тяжелых углеводородов пылью и соизмеримостью размеров микропор в угольной пыли и диаметров молекул сорбируемого газа.

3. Для микроскопических частиц пыли взаимодействие сил аутогезии, гравитации и электростатического отталкивания обуславливаются размерами пылевых частиц: для частиц радиусом до 1 мкм силы аутогезии в сотни раз превышают силы гравитации; в диапазоне радиусов частиц от 1 мкм до 13–17 мкм силы отталкивания в основном превышают силы притяжения, для частиц, радиусом более 17 мкм проявляются только силы отталкивания.

4. Повышение уровня пылевзрывобезопасности угольных шахт при разработке пластов, содержащих тяжелые углеводороды, может быть обеспечено нейтрализацией остаточных глубокосорбированных углеводородов путем увеличения содержания балластных газов в угле при его обработке газонаполненными растворами ПАВ.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- удовлетворительной сходимостью результатов исследований других авторов о содержании сорбированных тяжелых углеводородов в метаморфическом ряду углей с результатами лабораторных экспериментов по термодегазации и термогравиметрии углей и угольной пыли, полученными доктором физико-математических наук, профессором, заслуженным деятелем науки Российской Федерации, членом-корреспондентом РАН А.И. Смирновым (расхождение не превышает 15-20%);

- достаточным объемом данных, полученных в результате лабораторных исследований структуры угольных частиц на сканирующих электронных микроскопах высокого разрешения (увеличение до 50 000 раз), а также в результате лазерного анализа дисперсного состава пыли (число частиц в определенном объеме составляет 10^9 - 10^{12} единиц), выполненных по апробированным методикам.

Основные задачи исследования:

1. Анализ состояния пылевзрывобезопасности при подземной разработке угля.

2. Исследование состава и количества тяжелых углеводородов, содержащихся в остаточных газах угольных пластов и угольной пыли.

3. Изучение структуры пылевых частиц и исследование влияния дисперсного состава на взрывчатость угольной пыли.

4. Исследование агрегативной устойчивости дисперсной системы, состоящей из частиц пыли, отличающихся повышенной пылевзрывоопасностью.

5. Разработка метода и методики нейтрализации тяжелых углеводородов в остаточных газах угольных пластов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– научно обосновано повышенное содержание тяжелых углеводородов в остаточных газах угольных пластов для всех стадий метаморфизма;

– научно обоснована повышенная взрывопожароопасность угольной пыли пластов средней стадии метаморфизма, содержащая бутан, пентан, гексан;

– установлен механизм взаимодействия межмолекулярных, гравитационных сил и сил электростатического отталкивания для микроскопических частиц пыли, отличающихся повышенной пылевзрывоопасностью.

Научное значение работы заключается в установлении содержания балластной составляющей в остаточных газах угольных пластов средней стадии метаморфизма, приводящего к увеличению концентрационных пределов взрываемости тяжелых углеводородов в угольном пласте и обеспечению пожаровзрывобезопасности при разработке высокогазоносных угольных пластов.

Практическая значимость исследований состоит в разработке «Методики нейтрализации остаточных газов угольных пластов средней стадии метаморфизма при их обработке газонаполненными растворами поверхности-активных веществ», применение которой позволит увеличить содержание балластных газов в высокогазоносных угольных пластах, приводящего к увеличению концентрационных пределов взрываемости

остаточных газов в угольном пласте и повышению пожаровзрывобезопасности высокопроизводительных угольных шахт.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использован комплексный метод, включающий анализ и обобщение материалов литературных источников. Использован комплекс физико-химических методов исследований: газовая хроматография, термогравиметрия, сканирующая электронная микроскопия, лазерный анализ.

Реализация работы. Результаты исследований и рекомендации использованы при: оценке пылевзрывобезопасности угольных шахт, проводимой Автономной некоммерческой организацией дополнительного профессионального образования «Институт промышленной безопасности».

Апробация работы. Основное содержание и отдельные положения работы докладывались на V международной практической конференции «Актуальные вопросы научных исследований» (Москва, 2024 г.), на XII семинаре «Добыча метана из угольных отложений. Проблемы и перспективы» (Москва, РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2024 г.), на научном симпозиуме «Неделя горняка – 2025 » (Москва, НИТУ МИСИС, 2025 г.), на международной конференции «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration» (Пекин, 15 января 2025г.), на научных семинарах кафедры «Техносферная безопасность» (Москва, НИТУ МИСИС, 2020 – 2025 гг.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 научных статей (в том числе 7 – в изданиях, индексируемых в Scopus, 2 – в рецензируемых изданиях ВАК РФ).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения; содержит 21 таблицу, 36 рисунков, список литературы из 120 наименований и 2 приложения.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н., проф. О.В. Скопинцевой, зав. каф. «Техносферная безопасность», д.т.н., проф. Т.И. Овчинниковой, д.т.н., доц. С.В. Баловцеву и всем сотрудникам кафедры «Техносферная безопасность» за содействие при выполнении работы.

1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПЫЛЕВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ УГЛЯ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Современное состояние и развитие угледобывающей промышленности в Российской Федерации

Россия является одним из мировых лидеров по производству и экспорту угля. в 2023 году мировая добыча угля составила 8 970 млн. тонн, при этом 88,3% угля добывается в шести ведущих угледобывающих странах: Китае – 4710 млн тонн (52,51 %), Индии – 1010,9 млн. тонн (11,27 %), Индонезии – 775,2 млн. тонн (8,64 %), США – 526,5 млн. тонн (5,86 %), Австралии – 455,8 млн. тонн (5,08 %) и России – 438,7 млн. тонн (4,89 %) [48, 55, 56].

Если сравнивать мировые объемы добычи угля и доказанные запасы угля, то 75,8% мировых доказанных запасов угля, составляющих 1074 млрд. тонн, располагаются также в этих пяти странах, лидирующих по текущим объемам добычи угля, но уже в следующем порядке: США, Россия, Австралия, Китай и Индия. Получается, что страны с наиболее интенсивной добычей характеризуются относительно низкой обеспеченностью запасами угля [92]. Так, например, Китай, будучи крупнейшим производителем угля в мире [92], при сохранении текущих темпов добычи может исчерпать свои запасы уже через 30,4 года, Индонезия – через 45 лет, а Индия – через 104,8 года. В то же время страны с более умеренными темпами добычи, такие как США и Россия, обладающие значительно большими запасами угля, при современных темпах добычи обеспечивают разработку месторождений на 473 и 370 лет соответственно [48].

Проблемы, связанные с разработкой и внедрением эффективных методов борьбы с угольной пылью в шахтах, являлись предметом исследований таких ученых, как А.С. Бурчаков, В.Н. Воронин, Л.Д. Воронина, Н.Ф. Гращенков, Г.С. Гродель, В.И. Дремов, С.Ю. Ерохин, В.П. Журавлев, Г.С. Забурдяев, И.Г. Ищук, Б.Ф. Кирин, Г.И. Коршунов, Е.И. Кабанов, А.В. Корнев, А.С. Кобылкин, В.В. Кудряшов, М.И. Нецепляев, Е.И. Онтин, Г.Е.

Панов, А.Е. Пережилов, П.М. Петрухин, С.Н. Подображин, Г.А. Поздняков, С.Б. Романченко, В.А. Родионов, О.В. Скопинцева, А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, В.В. Ткачев, М.И. Феськов, А.Э. Филин, М.А. Фролов, V. Courtney, L. Mandell, R. Salmān, V.J. Thomas и др.

Исследованием термодинамических процессов в угольных шахтах и их роли при возникновении эндогенных пожаров занимались ученые: А.А. Скочинский, В.С. Веселовский, Л.Н. Быков, А.В. Зайцев, М.П. Зборщик, В.М. Маевская, П.С. Пашковский, Д.Ю. Палеев, В.А. Портола, Д.В. Федоткин, О.И. Чернов, U. Kugler, G. Leman, R. Muller, X. Kostrots и др.

Угольная промышленность России в настоящее время характеризуется ситуацией устойчивого развития. Это этап инновационного развития отрасли: время цифровой трансформации, внедрение безлюдных технологий работы, автоматизированных систем управления и другое.

В настоящее время угольная промышленность России включает следующие предприятия: 54 угольные шахты (причем две из них: «Полысаевская» и «Инская» не вели добычу, 127 угольных разрезов, 55 обогатительных и брикетных фабрик [8, 48]. Среднесписочная численность работающих в угольной отрасли в 2024 году составила 84722 чел., из них 37602 чел. работают в подземных условиях. Средняя глубина разработки угля в шахтах отрасли превысила 450 м, а на ряде шахт она составляет 800-1050 м [8]. С глубиной возрастает выделение метана и число опасных по метану шахт. Протяженность действующих горных выработок шахт составляет более 100 тыс. км. В последние годы спрос на угольное топливо возрастает, и объемы добычи увеличиваются [48].

В 2024 году добыча угля в России составила 443,5 млн тонн угля, это на 1,3% больше, чем в 2023 году (438 млн тонн) (рис. 1.1). В 2024 г. было добыто 118,9 млн т коксующегося угля (рис.1.2). Доля углей для коксования в общей добыче составила 36,1%. Основной объем добычи этих углей пришелся на предприятия Кузбасса – 59%. Здесь было добыто 67,9 млн т угля для

коксования. В Республике Саха (Якутия) было добыто 32,3 млн т угля для коксования. Добыча коксующегося угля в Печорском бассейне составила 7,2 млн т [48].



Рисунок 1.1 – Динамика добычи угля в России по способам добычи

Из добываемого подземным способом угля более половины относится к коксующимся, причем наиболее ценных марок Ж, КЖ, К (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Соотношение углей по назначению их применения

Основным источником роста добычи угля в стране явился экспорт, который за 2010 – 2024 гг. увеличился на 80 %, обеспечив рост производства угля на 36 %. Экспорт угля в дальнее зарубежье составил 200704,6 тыс. т. Ожидается, что в период до 2030 – 2040 гг. такая ситуация сохранится.

К 2025 году в структуре Российского экспорта угля ключевые позиции заняли страны Азии. Основными направлениями экспорта стали: Китай, Республика Корея и Япония. В то же время за 2024 год существенно снизился экспорт угля в европейские страны, в первую очередь в Германию и Нидерланды.

Анализ данных (рис. 1.3) показывает, что добыча угля за последние 15 лет увеличилась со 195,2 млн. т в год до 336,2 млн. т, что составляет 1,7 раза. А число аварий за этот период уменьшилось в три раза (рис. 1.3).

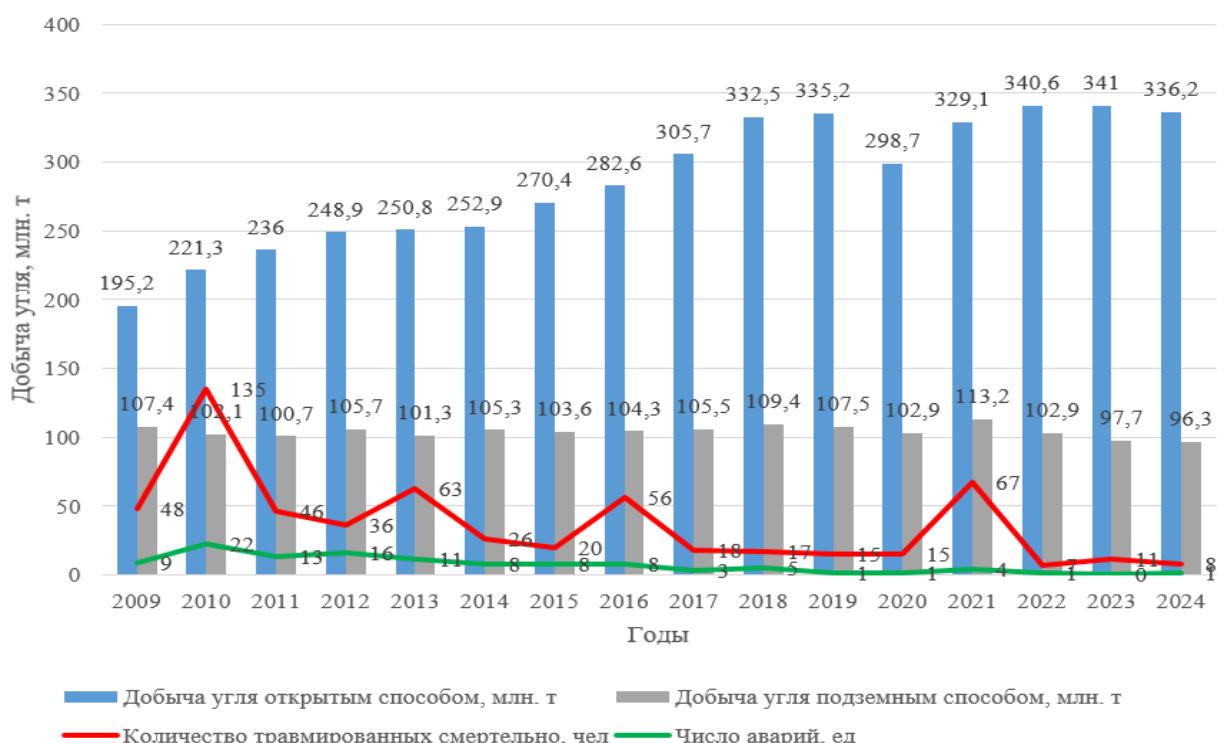


Рисунок 1.3 – Исследование корреляции темпов угледобычи и частоты происшествий на шахтах Российской Федерации [8]

Более детальный анализ видов аварий при делении рассматриваемого периода на два этапа: 2010 – 2014 гг. и 2015-2024 гг. показывает, что

процентное содержание аварий, наиболее опасных по своей катастрофичности последствий, возрастает (рис. 1.4), (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Динамика снижения средних значений количества основных видов аварий в шахтах за период с 2010 г. по 2024 г.

№ п/п	Вид аварии	2010-2014 гг.		2010-2014 гг.		Снижение средних значений количества аварий в год
		Среднее значение количества аварий, год ⁻¹	%	Среднее значение количества аварий, год ⁻¹	%	
1.	Обрушения пород	8,4	46	0,8	27,5	10,5
2.	Взрывы метана и угольной пыли, вспышки и воспламенения метана	3,6	19,7	0,5	17,2	7,2
3.	Эндогенные пожары	4,0	21,9	0,7	24,13	5,7
4.	Экзогенные пожары	1,8	9,8	0,5	17,2	3,6
5.	Горные удары и внезапные выбросы угля, породы и газа	0,4	2,2	0,4	13,7	1,0

Если анализировать данные рис. 1.4, то создается впечатление, что ситуация по безопасности ведения горных работ кардинально меняется к лучшему, так как количество обрушений уменьшилось в 10 раз, число взрывов метана и угольной пыли (в том числе вспышек и воспламенения метана) уменьшилось в 7 раз, эндогенных пожаров – в 6 раз, экзогенных пожаров – в 4 раза [8]. Однако следует и другой вывод, что процентное содержание аварий, наиболее опасных по своей катастрофичности последствий, возрастает. При общем снижении числа взрывов метана и угольной пыли (в том числе вспышек и воспламенения метана) данные рис. 1.3 показывают, что такие взрывы продолжают происходить с частотой 1 раз в три-четыре года [8]. Поскольку такие аварии, кроме воздействия ударной волны, делают непригодной для дыхания шахтный воздух, то погибает большое количество горняков и даже горноспасатели, прибывающие для спасения пострадавших.

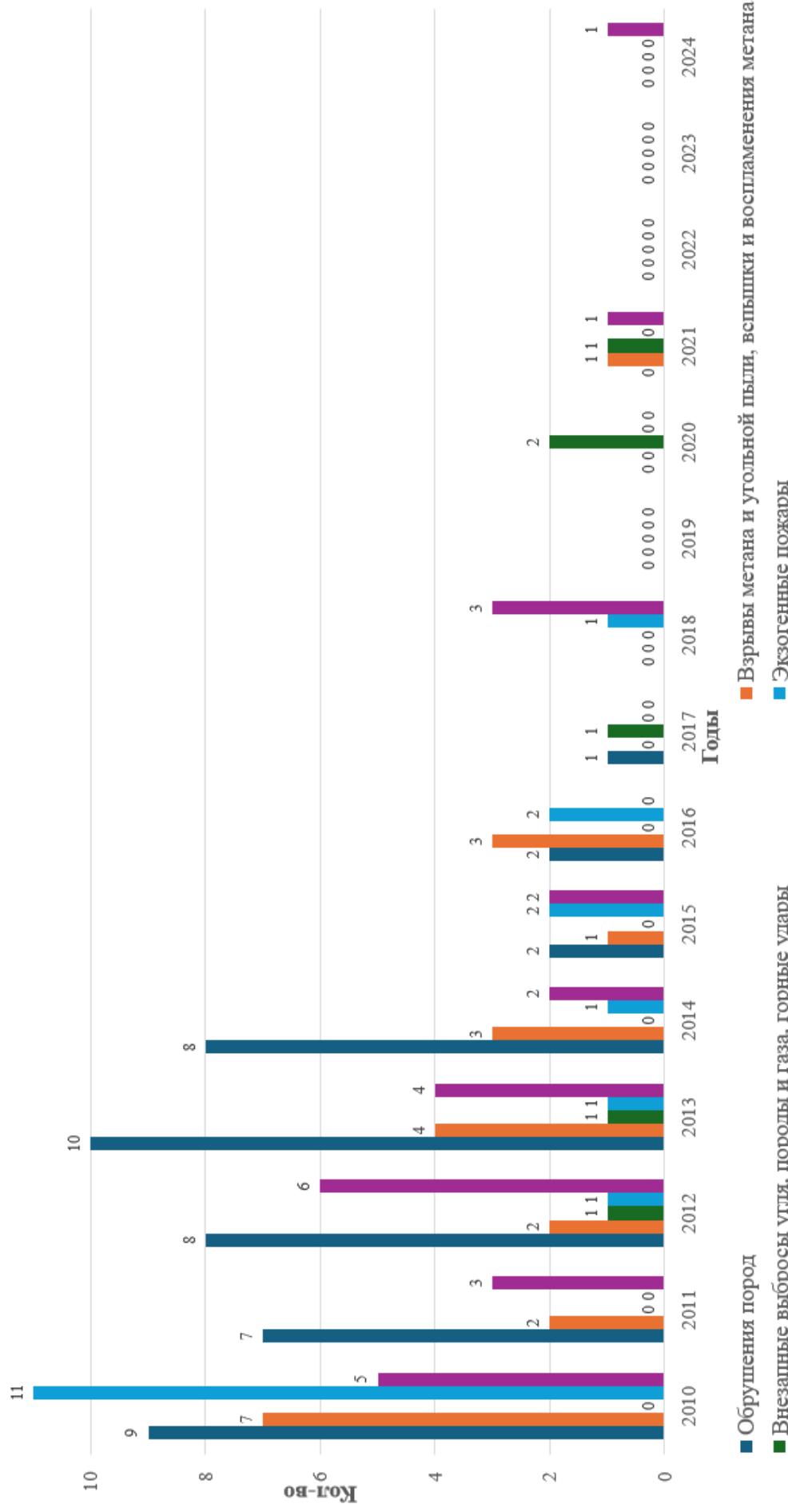


Рисунок 1.4 – Показатели опасных производственных факторов на угольных шахтах

В качестве примера можно привести аварии на шахтах «Распадская» (2010 г.), «Северная» (2016 г.), «Листвяжная» (2021 г.). В результате аварии пришлось на время затопить шахту «Распадская» и «Северная» (до сих пор не восстановлена). Это свидетельствует о необходимости дальнейшего изучения причин и механизмов образования взрывоопасной атмосферы в горных выработках и разработки способов и средств нейтрализации взрывоопасных газов, поступающих в атмосферу горных выработок.

Распределение шахт по категориям представлено на рис. 1.5.



Рисунок 1.5 – Категории шахт по газу на 2024 г.

Анализ данных (табл. 1.2) показывает, что почти все шахты опасны, хотя бы по одному фактору, но многие из них опасны по двум, трем и даже четырем факторам одновременно, что создает синергетический эффект в проявлении опасных факторов. В большинстве шахт в настоящее время глубина работ превышает 300м (рис. 1.6).

Воздействие горно-геологических факторов увеличивается с понижением глубины разработки (рис. 1.7). Более 60% добычи угля произведено на глубине 500 и более метров (рис. 1.8).



Рисунок 1.6 – Виды опасностей разрабатываемых шахтопластов

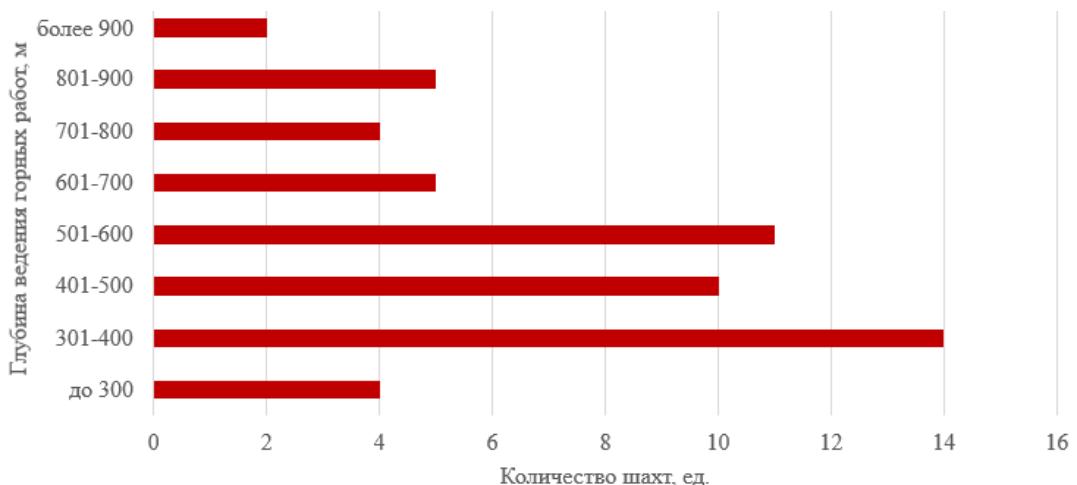


Рисунок 1.7 – Характеристика шахт в зависимости от глубины разработки угольных пластов в 2024 г.

Для обеспечения конкурентоспособности Российских угольных компаний Правительством РФ была разработана и 13 июня 2020г. принята к реализации Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года [68]. Она включает три этапа своей реализации: I этап 2019 - 2025 годы, II этап 2026 - 2030 годы, III этап 2031 - 2035 годы.

Несмотря на благоприятные тенденции в результате реструктуризации угольной промышленности (в 1991 г. функционировало 238 шахт, в 2020 г. - 93 шахты, в 2024 г. - 54 шахты), состояние промышленной безопасности в

угледобывающей отрасли остается достаточно напряженным, требуется совершенствование противоаварийной устойчивости на угольных шахтах.

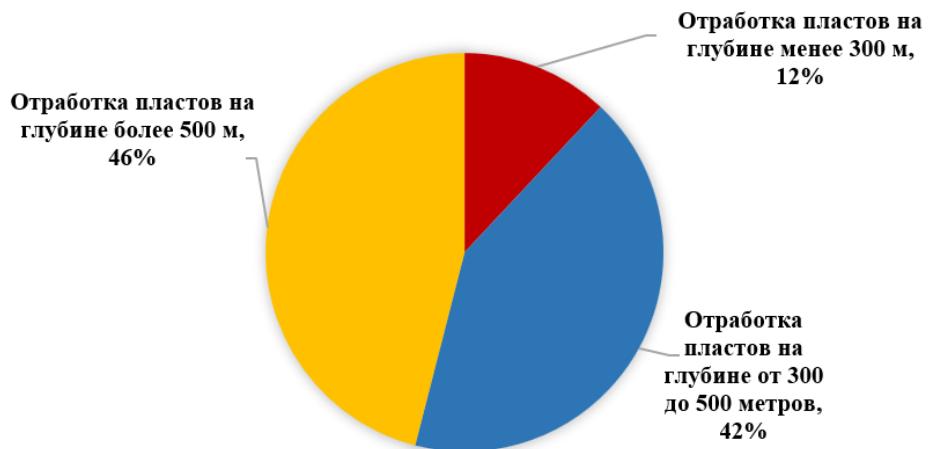


Рисунок 1.8 – Процентное соотношение добычи угля в зависимости от глубины (по состоянию на декабрь 2024г.)

1.2. Условия возникновения взрывоопасной концентрации метана и угольной пыли в шахтах

Среди опасностей горного производства наиболее тяжелыми по своим последствиям являются взрывы газовых и газопылевых смесей, которые в большинстве случаев носят характер катастроф. В условиях современного производства, несмотря на коренное изменение технологии угледобычи, технического перевооружения шахт в основных угледобывающих странах мира, проблема предупреждения взрывов метана и угольной пыли сохраняет свою остроту [20,21, 23, 24, 33, 38, 39, 105-107, 109, 110].

Катастрофический характер взрывов метана и угольной пыли обусловлен тем, что отложившаяся угольная пыль находится в шахте на протяжении всей сети горных выработок и при взрыве метана переходит во взвешенное состояние, развивая и усиливая взрыв того первоначального количества метана, ущерб от которого без участия пыли был бы не столь катастрофическим [113, 120]. Участие угольной пыли во взрыве метана значительно увеличивает зоны в угольных шахтах, которые подвергаются разрушительным действиям ударной волны, доходящей иногда до шахтного

ствола и надшахтных зданий на поверхности, как случилось на шахте «Распадская».

Основные горючие (взрывоопасные) компоненты шахтной атмосферы как при нормальном технологическом режиме работы шахты, так и в условиях внезапных и суфлярных выделений рудничных газов и при подземных пожарах, представлены метаном, тяжелыми газообразными гомологами метана (пределными – этаном, пропаном, бутаном, пентаном, гексаном и весьма редко встречающимися непределными гомологами – этиленом, пропиленом и т. д.), водородом, оксидом углерода и некоторыми токсичными газами [41, 81].

Как было показано в п.1.1, средняя глубина разработки угля в шахтах отрасли превысила 450 м, 46% добычи угля производится с пластов, находящихся на глубине более 500 м, две шахты работают на глубине более 900 м. Сравнение горно-технических условий шахт в настоящее время с опубликованными данными Ф.С. Клебанова [28] показывает, что абсолютная газообильность шахты им. СМ. Кирова увеличилась в 2,18 раз за 27 лет и составила 181,7 м³/мин (при увеличении нагрузки на очистной забой в 1,5 раза); на шахте «Полысаевская» при сохранении прежней нагрузки на очистной забой абсолютная газообильность возросла в 1,77 раз и составила 108,98 м³/мин (табл. 1.3).

С углублением горных работ наряду с газообильностью в результате повышения горного давления и внутрипластового давления метана заметно возросла выбросоопасность угольных пластов (табл. 1.4). Уже, начиная со 150 м пласт «Поленовский» (ш. им. С.М. Кирова) является опасным по горным ударам, а с глубины 535 м – склонным к внезапным выбросам, при том, что глубина ведения горных работ уже составляет 600 м [8].

Все пласты, разрабатываемые шахтами СУЭК- Кузбасс относятся к опасным по взрывам угольной пыли [81] (выход летучих веществ всех 12-ти пластов находится в диапазоне 38,5 – 43,1%) (табл. 1.4).

Таблица 1.2 – Сравнение показателей горнотехнических условий шахт Кузбасса за периоды 1995-2022 гг. [28]

№ п/п	Название шахты (глубина разработки пластов, м)	Год ввода шахты в экспл.	1995 год (по Ф.С. Клебанову)			2022 год			Название пласта, марка угля, год разработки пласта, наличие дегазации	
			Производст венная мощность, (A), т/сут	Способ и схема проветривания шахты	Абсолютная газообильнос ть по метану (J _{абс}), м ³ /мин	Производствен ная мощность, (A), т/сут	Способ и схема provетривания шахты	Абсолютная газообильность по метану (J _{абс}), м ³ /мин		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	СУЭК-Кузбасс (КУЗБАСС)		Добывает более 50% всего отечественного угля и 72% углей коксующихся марок. В 2021г добыто 243,1 Млн тонн, в т.ч. 156 млн тонн – открытым способом и 87,1 – подземным. Углей энергетических марок – 171,4 млн тонн; и 71,7 млн тонн – коксующихся углей. Переработано 189,7 млн тонн угля, в т ч, 71 млн тонн – коксующихся углей.							
1.	Шахта «Полысаевская» (120)	1939	6400	Нагн.всас.фл	61,50	6111	Нагн. центр. - фланговая	108,98 (увеличи- лась в 1,77) сверхх.	Бреевский (Г) 1974 Дегазации нет	
2.	Шахта им.С.М. Кирова (600)	1935	9000	Нагн.всас.фл	83,40	13500	Нагн.всас.фл	181,7 (увеличи- лась в 2,18) сверхх	Поленовский (Г, ГЖ) 1935 Болдыревский (Г, Ж) 1935 Дегазация- ППДУ	
3.	Шахта им. А.Д. Рубана (330)	1999	-	-	-	13319	Центр.фл.	28,34 2 кат.	Полысаевский- 2 (Д, ДГ) 2012 Надбайкаимски й(Д) 1991 Дегазация - ППДУ	

Продолжение табл. 1.2

№ п/п	Название шахты (глубина разработки пластов, м)	Год ввода шахты в экспл.	1995 год (по Ф.С. Клебанову)			2022 год			Название пласта, марка угля, год разработки пласта, наличие дегазации
			Производст венная мощность, (A), т/сут	Способ и схема проветривания шахты	Абсолютная газообильнос ть по метану (J _{абс}), м ³ /мин	Производствен ная мощность, (A), т/сут	Способ и схема provетривания шахты	Абсолютная газообильность по метану (J _{абс}), м ³ /мин	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4.	Шахта им. 7 ноября (380)	1930	9500	Нагн.всас.фл	34,0	10944	Нагн.всас.фл	31,9 2кат.	Сычевский-1 (Д) 1998 Дегазация - ППДУ
5.	Шахта «Талдинская- Западная-1» (210)	1988	н/д	н/д	н/д	7525	Нагн.центр.	16,94 2кат	Пл.66(след.67) (Д,ДГ) 2013 Дегазации нет
6.	Шахта «Талдинская- Западная-2» (510)	2001	-	-	-	13400	Нагн.центр.	сверхк .	Пл.69-а (Д,ДГ, ГЖО) 2018 Дегазации нет
7.	Шахта им. В.Д. Ялевского (320)	1994	-	-	-	20902	Нагн.центр.	72,63 сверхк .	Пл.50 (ДГ, Г) 2009 Пл.52 (ДГ) 1994 Дегазация - ППДУ
8.	Шахта «Комсомолец» (450)	1933	5700	Нагн.всас.фл	70,60	6502	Нагн.всас.комб	90,52 м ³ /мин (увелич. В 1,28) Сверхк (46,95 м ³ /т)	Толмачевский (Г) 1957 Емельяновский (Г) 1955 Дегазация - ППДУ

Таблица 1.3 – Основные характеристики шахтопластов СУЭК-Кузбасса за 2022г.

№ п/п пласта	Номер шахтопласта (год разработки)	Марки пластов	Нагруз. на оч. з., т/сут	Глубина разработки, м	Мощность пласта, м	Угол падения, град.	Выход летучих, %	Влажность, %	Зольность, %	Коэф. креп.	Пыль, испытание на врыв	Склонность к внезапным выбросам, м	Опасность по гор. ул., самовозгор.	Наличие дегазации
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1.	Пласт №1 (1974)	Г	6111	120	2,2-1,75	3-5	43,1	7,5		1,0-1,5	опасна	560	230 нет	нет
2.	Пласт №2 (1935)	Г, ГЖ	13500	600	2,7	5	Г=41,0 ГЖ=41,7	4,0	37,8	1,5	опасна	535	150 нет	ППДУ
3.	Пласт №3 (1935)	Г, ГЖ		325	2,9	4	Г=41,0 ГЖ=41,7	4,0	37,8	1,5	опасна	535	150 нет	ППДУ
4.	Пласт №4 (2012)	Д, ДГ	13319	330	4,95	4-6	Д=41,0 ДГ=43,5	8,5	8,4	1,5	опасна	500	252 да	ППДУ
5.	Пласт №5 (1991)	Д			2,2	4-6	41,0	8,3	9,7	1,5	опасна	500	220 да	ППДУ
6.	Пласт №6 (1998)	Д	10944	380	4,5-4,7	2-8	42,0	12	17,1	1,2	опасна	340	250 да	ППДУ
7.	Пласт №7 (2013)	Д, ДГ	7525	210	4,8-5,6	5	38,5	9,5	11-16,4	1,5	опасна	350	200 да	нет
8.	Пласт №8 (2018)	Д, ДГ, ГЖО	13400	510	3,71-4,3	6	39,9			1,8	опасна	450	210 да	нет
9.	Пласт №9 (2009)	ДГ, Г	20902	327	3,72	3	39,9	5,7	5,7	1,0	опасна	440	220 да	ППДУ
10.	Пласт №10 (1994)	ДГ			4,14	2	40,0	9,0	8,7	1,0	опасна	440	180 весьма	ППДУ
11.	Пласт №11 (1957)	Г	6502	420	3,2-3,1	1-5	43,0	7,5	28,8	1,5	опасна	560	274 нет	ППДУ
12.	Пласт №12 (1955)	Г		420	1,7	1-5	42,1	5,2	10,5	1,5	опасна	831	230 нет	ППДУ

Исследованиями многих ученых [1, 3, 9, 100] установлено, что свыше 15% угольная пыль становится взрывчатой. Пыль длиннопламенных и газовых углей (табл. 1.4) содержит наибольшее количество летучих веществ по сравнению с другими марками угля, поэтому пыль этих марок от двух до трех раз превышает порог взрывчатости угольной пыли и легко воспламеняется [81]. Пыль антрацитов почти не содержит летучих веществ, поэтому практически не взрывается.

Зольность угля обычно изменяется в широких пределах. Для представленных характеристик шахтопластов (табл. 1.4) зольность меняется в диапазоне от 5,7% (пл.50, марка Г, ДГ, ш. им. В.Д. Ялевского) до 37,8% (пл. «Поленовский», марка Г, ш. им. С.М. Кирова). Зола в угольной пыли снижает ее взрывчатые свойства, поэтому пыль пласта «Поленовский» менее взрывчата, чем пыль пласта 50. Присутствие золы в аэровзвеси угольной пыли увеличивает теплоемкость системы, поглощает часть тепловой энергии от источника воспламенения. Кроме того, зола, как инертный компонент пылевоздушной смеси, уменьшает фактическую концентрацию горючего и соответственно выход летучих веществ [81].

На использовании свойств золы по снижению взрывчатости угольной пыли основаны мероприятия по локализации и подавлению взрывов пыли, такие как осланцевание и сланцевые заслоны. Суть осланцевания выработок – искусственное повышение зольности отложившейся в выработках пыли путем добавления стандартной инертной пыли [8]. Нормы осланцевания в разных странах различные и находятся в диапазоне 50-80%, расход пыли должен быть не менее 1 кг на м^3 выработки.

Как инертный компонент в составе пылевоздушной смеси влага оказывает более сильное влияние на взрывчатость угольной пыли, чем зола, так как теплоемкость воды примерно в 5 раз превышает теплоемкость инертной пыли [77]. Для локализации и подавления взрывов пыли применяются наряду со сланцевыми заслонами и водяные заслоны.

1.3. Синергетическое воздействие факторов при взрывах пылеметановоздушных смесей

Основными факторами, определяющими взрывчатость угольной пыли, являются: химический состав пыли, дисперсность пыли, состав атмосферы, влажность пыли, зольность и др. [13, 17, 78]. И хотя каждый из факторов в отдельности достаточно хорошо изучен, сложность заключается в том, что факторы, «накладываясь» друг на друга, существенно могут изменить пределы взрываемости угольной пыли, и взрыв становится возможен при меньшем содержании угольной пыли, чем это было установлено в лабораторных условиях. Более того возможно синергетическое действие нескольких факторов одновременно, усиливающее взрывчатые свойства пыли [78].

Из результатов исследований [47, 50, 78] следует, что размер частиц пыли оказывает существенное влияние на ее взрывчатые свойства таким образом, что при большой массовой концентрации мелкодисперсных частиц нижний концентрационный предел взрываемости пыли может снизиться в 5,8 раз (табл. 1.5).

Таблица 1.4 – Влияние содержания мелкой фракции угольной пыли (60 мкм) на ее взрывчатость

	Объемная доля пыли, размером до 60 мкм, %		
	32	65	91
НКПВ угольной пыли, г/м ³	257	60	44

По данным исследований [47, 50, 78] следует, что при содержании в атмосфере 2% метана нижний концентрационный предел взрываемости (НКПВ) угольной пыли может снизиться в 4 раза (табл. 1.6).

Таблица 1.5 – Кратность изменения нижнего концентрационного предела взрываемости угольной пыли

	Объемная доля метана, %					
	0,00	0,50	0,75	1,00	1,50	2,00
Кратность изменения НКПВ угольной пыли	1,00	0,75	0,60	0,50	0,35	0,25

При внезапных и суфлярных выделениях рудничных газов, а также при нормальном технологическом режиме работы шахты в шахтной атмосфере присутствуют горючие и взрывчатые газы, такие как метан, этан, пропан, бутан, пентан, гексан, этилен, пропилен и др. [5, 69, 78], пределы взрываемости которых приведены в табл. 1.7. После взрывов пылеметановоздушных смесей образуются водород, оксид углерода; количество метана при этом составляет большую концентрацию, чем до аварии по причине нарушения работы вентиляции выработок и шахты, что представляет большую опасность для горноспасателей при ликвидации аварии [78].

Таблица 1.6 – Пределы взрываемости горючих природных газов с воздухом (%) при температуре 20°C и давлении 101,3 кПа [94]

Название	Пределы взрывчатости	
	нижний	верхний
Предельные (насыщенные) углеводороды	Водород	4,00
	Метан	5,0
	Этан	3,22
	Пропан	2,4
	Бутан	1,9
	Пентан	1,45
	Гексан	1,25
Непредельные (ненасыщенные) углеводороды	Этилен	2,75
	Пропилен	2,00
	Бутилен	1,70

При разрушении газоносного угольного пласта в шахтную атмосферу выделяются свободные и сорбированные газы из пласта, а также образуется пыль при отделении угля от массива. Таким образом шахтный воздух представляет собой смесь компонентов: воздух + метан + угольная пыль + гомологи метана [69, 81, 83]. Главной опасностью таких смесей является то, что в отдельности присутствующие в смеси угольная пыль, метан, гомологи метана не достигают своих нижних пределов взрываемости, однако все вместе

они образуют взрывчатую смесь. Известно, что присутствие метана даже в небольших количествах увеличивает взрывчатую способность угольной пыли.

Температура воспламенения гексана 233 °С, бутана – 405 °С, пропана – 470 °С [78, 94]. Температура воспламенения метана выше, чем у этих газов и составляет 650-750 °С. Нижние концентрационные пределы взрываемости: гексан – 1,25%, бутан – 1,9%, пропан – 2,4%, метан – 5%. При работе комбайнов, шахтных ленточных конвейеров и другого оборудования на выемочном участке могут возникать температуры воспламенения тяжелых углеводородов [41, 42, 78, 81]. Таким образом, от источника теплового импульса могут сначала вспыхнуть тяжелые углеводороды, которые дадут искру для взрыва метана. При взрыве метана находящаяся в выработке угольная пыль поднимается в воздух, нагревается и из нее выделяются сорбированные ею тяжелые углеводороды, которые придают значительное усиление мощности взрыва метана и угольной пыли [78].

1.4. Нейтрализация взрывчатых свойств метанопылевоздушных смесей

В настоящее время многие из используемых в угольной промышленности технических средств предупреждения и локализации взрывов горючих смесей морально устарели и перестали удовлетворять возросшим требованиям и условиям работы в шахтах.

В последние годы в нашей стране и за рубежом ведутся интенсивные поиски новых более эффективных средств и способов обеспечения взрывозащиты горных выработок, отвечающих современным требованиям и техническим возможностям.

На этой основе были открыты возможности использования новых подходов к решению проблемы предупреждения взрывов метана и угольной пыли путем нейтрализации взрывчатых свойств метанопылевоздушных смесей. Добавки различных веществ могут флегматизировать горючую систему вплоть до превращения системы в негорючую.

Характерно, что сам горючий компонент в количестве, превышающем верхний концентрационный предел взываемости, является флегматизатором. В этом случае, например, для метановоздушных смесей добавление лишь 6% метана от стехиометрической смеси нейтрализует ее взрывчатые свойства [81], хотя при этом содержание кислорода в метановоздушной смеси остается около 18%.

Нейтрализация взрывчатых свойств метановоздушной смеси азотом, мольная теплоемкость которого всего на 1/3, а теплопроводность на 1/5 меньше, чем у метана, происходит при содержании кислорода около 10%, т.е. по необходимому снижению содержания кислорода азот примерно в четыре раза хуже флегматизирует смесь по сравнению с метаном [81]. Таким образом, содержание горючих выше верхнего концентрационного предела взываемости оказывает более сильное действие, чем инертные газы.

Применение различных флегматизаторов для нейтрализации взрывчатых свойств метанопылевоздушных смесей наряду со строгими ограничениями допустимых концентраций горючих газов является необходимой предпосылкой обеспечения взрывопожаробезопасности угольных шахт.

В диссертационной работе Скопинцевой О.В. представлен разработанный комплексный метод снижения пылевой и газовой опасностей в угольных шахтах, реализуемый на способе обработки угольных пластов газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ (ПАВ) [81]. Экспериментально апробирован газонаполненный раствор ПАВ, состоящий из растворенного в воде пенообразователя (поверхностно-активного вещества), в котором растворяются газы, например, диоксид углерода (CO_2) или азот (N_2) с концентрацией от 2 до 3% [81, 86]. Высвобожденный при разрушении угля газ (CO_2 и N_2) взаимодействует с пенообразователем и образует воздушно-механическую пену, которая изолирует отбитый уголь, снижая пылегазовыделение в атмосферу горной выработки как из отбитого угля, так и из обнаженной поверхности разрабатываемого пласта [81, 86].

Создание новых подходов к усилению пылевзрывобезопасности [51, 67, 70, 75, 76, 80, 86, 97] угольных шахт становится насущной научной проблемой. Разработка метода обработки угольного массива газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ (ПАВ) представляется крайне актуальной. Эти растворы способны эффективно уменьшать концентрацию пыли [53, 54] в шахтном воздухе и снижать количество пылевых отложений в выработках. Более того, они могут увеличивать содержание балластных газов [85], приводящих к увеличению концентрационных пределов взрываемости остаточных газов в угольных пластах и обеспечению пожаровзрывобезопасности.

Выводы, цель и задачи исследований

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Увеличение добычи угля в два раза на шахтах Российской Федерации за последние 15 лет влечет за собой существенное увеличение абсолютной газообильности угольных шахт, которая достигает в настоящее время около $181,7 \text{ м}^3/\text{мин}$ (шахта им. СМ. Кирова), что свидетельствует о росте потенциальной взрывопожароопасности горных работ.

2. Шахтный воздух представляет собой смесь компонентов: воздух + метан + гомологи метана + сорбированная тяжелыми углеводородами угольная пыль. Главной опасностью таких смесей является то, что в отдельности [78] присутствующие в смеси угольная пыль, метан, гомологи метана не достигают своих нижних пределов взрываемости, однако все вместе они образуют взрывчатую смесь. Известно, что присутствие метана даже в небольших количествах увеличивает взрывчатую способность угольной пыли [78].

3. Создание новых подходов к усилению пылевзрывобезопасности угольных шахт становится насущной научной проблемой. Разработка метода нейтрализации остаточных газов пластов средней стадии метаморфизма представляется крайне актуальной вследствие увеличения содержания балластных газов, приводящих к увеличению концентрационных пределов

взываемости остаточных газов [78] в угольных пластах и обеспечению пожаровзрывобезопасности при разработке высокогазоносных угольных пластов, опасных по взрывам пыли.

Исходя из анализа общего состояния вышеизложенной проблемы, теоретических и экспериментальных исследований в этой области и в соответствии с поставленной в диссертации целью осуществлялось решение ряда задач, основными из которых являются:

- анализ состояния пылевзрывобезопасности при подземной разработке угля;
- исследование состава и количества тяжелых углеводородов, содержащихся в остаточных газах угольных пластов и угольной пыли;
- изучение структуры пылевых частиц и исследование влияния дисперсного состава на взрывчатость угольной пыли;
- исследование агрегативной устойчивости дисперсной системы, состоящей из частиц пыли, отличающихся повышенной пылевзрывоопасностью;
- разработка метода и методики нейтрализации тяжелых углеводородов в остаточных газах угольных пластов.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЫЛЕВОЙ ОПАСНОСТИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

2.1. Процессы пылеотложения угольной пыли и переход ее во взвешенное состояние

При оценке свойств пыли наряду с силикозоопасностью учитывают ее существенные свойства такие, как пожароопасность и взрывчатость, которые особенно проявляются для пыли, находящейся в воздухе в состоянии аэрозоля. При линейной скорости распространения реакции не более 10 м различают горение, при скорости более 10 м. но менее скорости звука – различают дефлаграцию; при скорости равной или большей скорости звука – различают взрыв.

Температура воспламенения угольной пыли равна 700-800°C. Исследованиями установлено [47, 50], что взрыв угольной пыли имеет следующие особенности: взрыв пылевого облака зависит от степени дисперсности пыли, ее способности к агрегации, содержания влаги, мощности источника воспламенения; химический состав пыли обусловливают выход летучих веществ, принимающих участие во взрыве [81]; облако угольной пыли способно самозаряжаться электричеством вследствие трения пылинок друг от друга, а при благоприятных условиях разряжаться с появлением искр, которые могут воспламенять пыль; при взрыве угольной пыли образуется много оксида углерода, а при взрыве метана – преимущественно диоксида углерода.

Пылевой баланс современного комплексно-механизированного очистного участка от разных источников пылеобразования представлен на рис. 2.1. От 50 до 60% в общем пылевом балансе очистного участка приходится на работу очистных комбайнов.

На интенсивность пылеобразования при работе комбайнов оказывает влияние целый ряд факторов. Среди наиболее существенных: показатели влажности угля; параметры вентиляционного режима [10, 11]; крепость и петрографический состав угля и др.

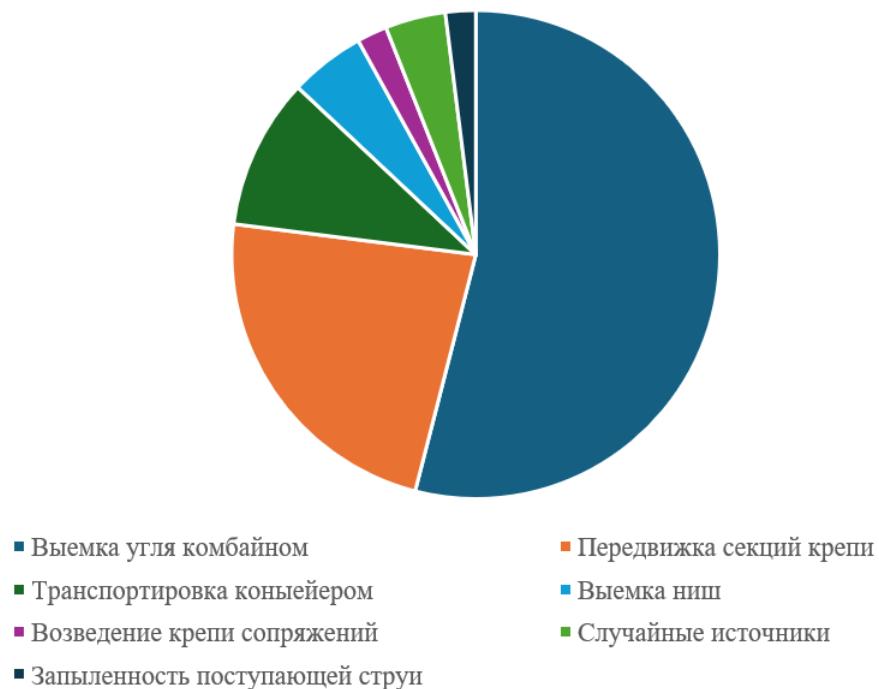


Рисунок 2.1 – Общий пылевой баланс современного механизированного очистного участка

Повышение содержания естественной влажности в угле в несколько раз снижает запыленность шахтной атмосферы [54]. Зависимость между удельным пылевыделением, пластовой влажностью и выходом летучих веществ отображена на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Характеристики пылеобразующей способности угля в ряду его метаморфизма

Уровень удельного пылевыделения углей средней стадии метаморфизма (марки Г, Ж, К, ОС) является самым высоким, составляя в среднем от 500 до 700 г/т.

Общее количество пыли, образующейся в шахте, составляет 0,1-0,5% суточной добычи шахты. Пыль осаждается на поверхности выработок как при малых, так и при больших скоростях вентиляционной струи. Осаждение пылевых частиц в турбулентном потоке возможно под действием гравитационных сил, диффузионных процессов и инерционных сил.

Для оценки влияния процессов осаждения аэрозоля и сдувания частиц со стенок выработок потоком воздуха важно знать закон распределения твердых частиц в сечении потока. Задача о вертикальном распределении частиц в горизонтальном потоке с учетом действия гравитационного поля решена Н.А. Фуксом. Он рассмотрел равновесие процессов осаждения частиц пыли под действием силы тяжести и перехода их в верхние слои потока под влиянием турбулентной диффузии, Н.А. Фукс получил следующее уравнение распределения частиц по высоте [95, 96]:

$$\ln \left(\frac{n_z}{n} \right) = -v_e / D_t, \quad (2.1)$$

где n – концентрация частиц у дна канала, $\text{мг}/\text{м}^3$; n_z – концентрация на высоте z , $\text{мг}/\text{м}^3$; z – высота канала, м; v_e – скорость осаждения частиц в спокойном воздухе, м/с; D_t – коэффициент турбулентной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$.

$$D_t = 0,044 \nu Re^{0,75} \quad (2.2)$$

где Re – число Рейнольдса; ν – кинематическая вязкость воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$.

Пыль, образующаяся в промышленных условиях, полидисперсна. Распределение для каждого конкретного случая устанавливается экспериментально методом дисперсного анализа и выражается кривыми распределения. Функции распределения частиц по их крупности в большинстве случаев имеют хорошо выраженный максимум асимметричной формы – с крутым спадом в сторону мелких частиц и пологим в сторону крупных.

Отложение пыли в вентиляционных выработках зависит от параметров вентиляционной струи, выходящей из лавы: количества проходящего воздуха, его скорости, структуры потока, запыленности атмосферы и дисперсного состава пыли и влажности воздуха [81]. Однако влияние фактора выноса пыли оказывается сильнее. Масса пыли, выносимая из лавы на вентиляционный штрек за сутки, достигает 300 кг и более, причем на 1 т добычи выносится 0,02-1,8 кг пыли. Суточное пылеотложение на расстоянии 10 м от лавы в различных условиях колеблется в пределах $65-1500 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$ [81].

Таким образом, скорость движения воздуха в горных выработках является преобладающим фактором, влияющим на запыленность воздуха и пылеотложение по горным выработкам, и хотя существуют оптимальные по пылевому фактору скорости движения воздуха, находящиеся в диапазоне 1,5 – 2,0 м/с, но их соблюдение не всегда возможно, так в первую очередь при добыче угля обеспечивается соблюдение ПДК метана в шахтном воздухе (основанное на разжижении метана воздушной струей), и при существующих нагрузках на очистной забой средствами вентиляции это становится делать все труднее [81].

2.2. Исследование дисперсного состава отложившейся пыли на шахте «Осинниковская»

Катастрофический характер взрывов метана и угольной пыли обусловлен тем, что отложившаяся угольная пыль находится в шахте на протяжении всей сети горных выработок и при взрыве метана переходит во взвешенное состояние, развивая и усиливая взрыв того первоначального количества метана, ущерб от которого без участия пыли был бы не столь катастрофическим. Участие угольной пыли во взрыве метана значительно увеличивает зоны в угольных шахтах, которые подвергаются разрушительным действиям ударной волны, доходящей иногда до шахтного ствола и надшахтных зданий на поверхности [78].

Основными факторами, определяющими взрывчатость угольной пыли, являются: химический состав пыли, дисперсность пыли, состав атмосферы, влажность пыли, зольность и др. [35, 37, 94, 98, 99, 101, 104]. И хотя каждый из этих факторов в отдельности достаточно хорошо изучен, сложность заключается в том, что факторы, «накладываясь» друг на друга, существенно могут изменить пределы взрывчатости угольной пыли, и взрыв становится возможен при меньшем содержании угольной пыли, чем это было установлено в лабораторных условиях. Более того возможно синергетическое действие нескольких факторов одновременно, усиливающее взрывчатые свойства пыли [78].

По данным В.И. Мамаева [47] и В. Цибульского следует, что с увеличением объемной доли пылевых фракций 60 и 75 мкм взрывчатость угольной пыли быстро растет (табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Влияние объемной доли пылевой фракции на снижение НКПВ угольной пыли

№ п/п	Размер фракции пыли, мкм	Объемная доля пылевой фракции, %		
		НКПВ объемной доли пылевой фракции, г/м ³		
1.	Содержание фракции пыли с размером частиц менее 60 мкм, %.	32	65	91
	НКПВ объемной доли пылевой фракции, г/м ³ (по данным В.И. Мамаева)	257	60	44
	Снижение НКПВ	-	257/60=4,3	257/44=5,8
2.	Содержание фракции пыли с размером частиц менее 75 мкм, %.	23	50	90
	НКПВ объемной доли пылевой фракции, г/м ³ (по данным В. Цибульского)	150	100	70
	Снижение НКПВ	-	150/100=1,5	150/70=2,1

Анализ данных табл. 2.1 показывает, что размер частиц пыли оказывает существенное влияние на ее взрывчатые свойства таким образом, что при большой массовой концентрации мелкодисперсных частиц нижний концентрационный предел взываемости пыли может снизиться в 5,8 раз.

В реальных условиях при разрушении газоносного угольного массива как правило, образуются тройные смеси (угольная пыль + метан + воздух) с тем или иным соотношением горючих компонентов. Главной особенностью тройных смесей [78] является то, что взятые в отдельности невзрывчатые концентрации метана и угольной пыли в смеси с воздухом приобретают взрывчатые свойства. Если в выработке присутствует метан даже в небольших количествах, то это существенно снижает нижний концентрационный предел взрываемости пыли (табл. 2.2).

Таблица 2.2 – Значения коэффициента кратности изменения НКПВ угольной пыли в присутствии метана [81].

	Объемная доля метана, %					
	0,00	0,50	0,75	1,00	1,50	2,00
Коэффициент кратности изменения НКПВ угольной пыли, K_m	1,00	0,75	0,60	0,50	0,35	0,25

Исследования по дисперсному составу угольной пыли проводились по натурным измерениям и экспериментам в филиале «Шахта «Осинниковская» ОАО «ОУК «Южкузбассуголь».

Были проведены исследования дисперсного состава угольной пыли, отложившейся на выемочном участке №1, лавы 4-1-5-9 шахты «Осинниковская», при отработке пласта Е-5 (марка Ж), а также в магистральном конвейерном штреке. Места и объемы отбора проб отложившейся пыли были следующими:

- пыль после комбайна в лаве, 200 г;
- пыль с пересыпа конвейера лавы по ходу движения вентиляционной струи, 200 г;
- пыль с пересыпа с конвейера на конвейер на расстоянии 200 м от лавы по ходу движения вентиляционной струи, 200 г;
- пыль с пересыпа с конвейера на конвейер в магистральном конвейерном штреке на расстоянии 3200 м от лавы по ходу движения вентиляционной струи, 200 г.

Определение гранулометрического состава отложившейся пыли проводили лазерным методом на дифракционном микроанализаторе размера частиц ANALYZETTE 22 MicroTec plus (FRITSCH). Дифференциальная ($f(d)$) и интегральная ($F(d)$) кривые распределения частиц пыли представлены на рис. 2.3-2.6.

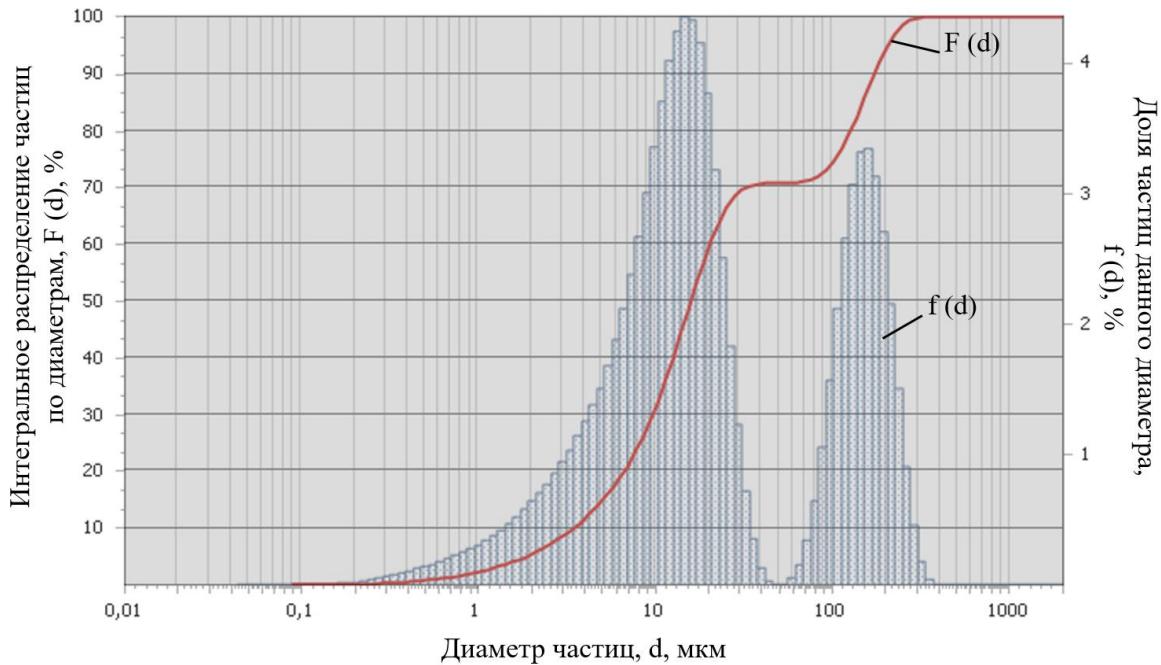


Рисунок 2.3 – Дифференциальная ($f(d)$) и интегральная ($F(d)$) кривые распределения частиц пыли (пласт Е-5, пыль после комбайна в лаве)

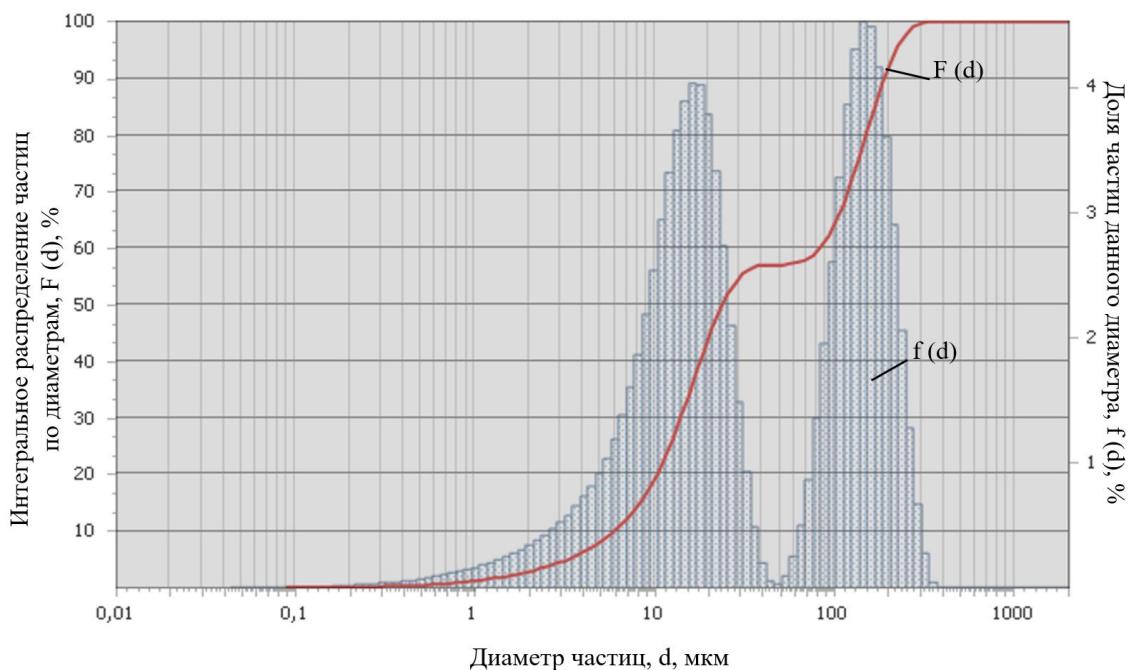


Рисунок 2.4 – Дифференциальная ($f(d)$) и интегральная ($F(d)$) кривые распределения частиц пыли (пласт Е-5, пыль с пересыпа конвейера лавы)

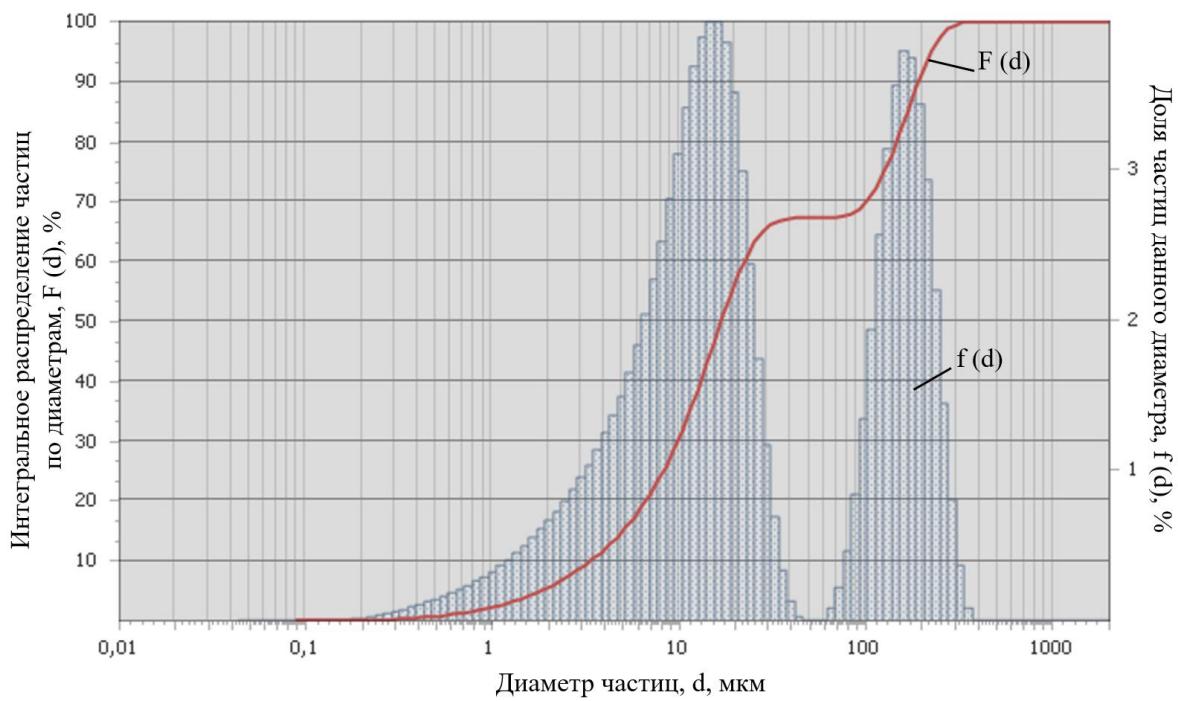


Рисунок 2.5 – Дифференциальная ($f(d)$) и интегральная ($F(d)$) кривые распределения частиц пыли (пласт Е-5, пыль с пересыпа с конвейера на конвейер на расстоянии 200 м от лавы)

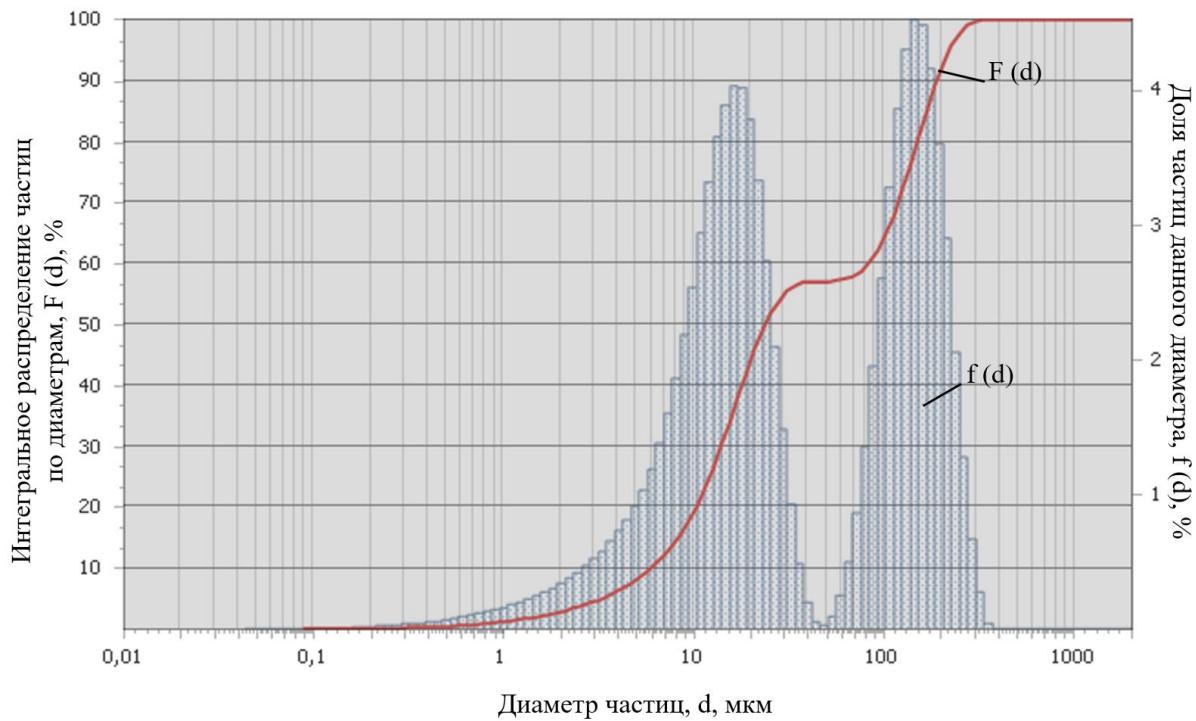


Рисунок 2.6 – Дифференциальная ($f(d)$) и интегральная ($F(d)$) кривые распределения частиц пыли (пласт Е-5, пыль с пересыпа с конвейера на конвейер в магистральном конвейерном штреке на расстоянии 3200 м от лавы)

По данным литературных источников установлено, что в случае одиночного источника пылеобразования пыль мономодальна, ее функция плотности распределения имеет один максимум [71, 72]. Очевидно, что в лавах имеет место витание и отложение частиц пыли от нескольких источников пылеобразования: очистного комбайна, лавных конвейеров, перегружателей, секций крепи при их подвигании и т.д. В этом случае вентиляционным потоком создается суммарный аэрогель с дифференциальной функцией распределения частиц пыли, имеющей несколько локальных максимумов. В нашем случае (рис. 2.3-2.6) наблюдается по два локальных максимума.

По интегральным и дифференциальным кривым распределения частиц пыли были определены объемные доли частиц пыли, обладающими наиболее высокими взрывчатыми свойствами. Также была определена объемная доля частиц до 10 мкм (табл. 2.3).

Таблица 2.3 – Весовая доля фракционного состава пылевых частиц

№ п/п	Места отбора проб пыли	Марка угля	Весовая доля фракции до 40 мкм, %	Весовая доля фракции от 40 до 100 мкм, %	Весовая доля фракции от 100 до 300 мкм, %	Содержание тонких фракций до 10 мкм, %
1	Пыль после комбайна в лаве	Ж	70	10	20	30
2	Пыль с пересыпа конвейера лавы	Ж	68	4	28	30
3	Пыль с пересыпа с конвейера на конвейер на расстоянии 200 м от лавы	Ж	58	7	25	20
4	Пыль с пересыпа с конвейера на конвейер в магистральном конвейерном штреке на расстоянии 3200 м от лавы	Ж	44	11	45	14

Анализ данных табл. 2.3 показывает, что в лаве отложившаяся пыль на 80% является взрывчатой, причем весовая доля наиболее взрывчатых частиц размером до 40 мкм составляет 70%, что снижает НКПВ (по данным табл. 2.1) от 1,5 до 4,3 раз. Пыль с пересыпа лавного конвейера на 72% является взрывчатой. Пыль с пересыпа с конвейера на конвейер на расстоянии 200 м от лавы на 65% является взрывчатой. И только объемная доля взрывчатой пыли с пересыпа с конвейера на конвейер в магистральном конвейерном штреке на расстоянии 3200 м от лавы снижается и составляет 55%. Примечание: ранее было отмечено, что размером частиц, при котором пыль перестает быть взрывчатой считается от 125 до 170 мкм, поэтому в наших оценках при выборе верхней границы взрываемости пыли в 100 мкм, опасность пыли в расчетах занижена.

Содержание респирабельной пыли в очистном забое является высоким и составляет 30%, что представляет угрозу как для здоровья горнорабочих очистного забоя, так и с точки зрения взрывоопасности угольной пыли, так как сила взрыва в отдельных случаях достигает максимума при диаметре частиц менее 10 мкм [50].

Учитывая данные табл. 2.1 В.И. Мамаева – В. Цибульского по снижению НКПВ пыли, имеем, что объемная доля пылевых фракций до 40 мкм в лаве № 4-1-5-9 составляет более 70%, и, следовательно, НКПВ пыли пласта Е-5 может быть снижен от 1,5 раз до 4-х раз. Нижний предел взрывчатости снижается с 9 до 24 г/т [$36 \text{ (г/т)}/1,5=24 \text{ (г/т)}$; $36 \text{ (г/т)}/4=9 \text{ (г/т)}$]. Учитывая, что в лаве предельно допустимое содержание метана составляет 1%, по данным табл. 2.2 получаем дальнейшее снижение НКПВ на 50%. В итоге НКПВ пыли в лаве будет составлять 4,5 – 12 г/т. Проведенные аналогичные расчеты для конвейерного штрека (с учетом ПДК метана 0,5%) дают прогнозную оценку НКПВ пыли 6,75 – 18 г/т.

2.3. Пылеобразование на выемочном участке №1 (лава 4-1-5-9) шахты «Осинниковская» ОАО «ОУК «Южкузбассуголь»

Вентиляция шахты «Осинниковская» осуществляется всасывающим способом вентиляторами главного проветривания ВЦД-47.5У, ВЦ-5, ВЦ-15 и УВЦГ-табл. 2.4) [86].

Таблица 2.4 – Характеристика филиала «Шахта «Осинниковская» [81]

№ п/п	Наименование показателей	Значения
1.	Расчетное количество воздуха по шахте, м ³ /мин	17949
2.	Фактическое количество воздуха, м ³ /мин	22940
3.	Количество воздуха, поступающего в шахту, м ³ /мин:	22940
4.	Опасность по пыли	Опасная
5.	Опасность по внезапным выбросам угля, породы, газа	Опасная (К-2, К-1)
6.	Опасность по горным ударам	Опасная (Е-6, Е-5)
7.	Опасность по суфлярным выделениям	Опасная (К-4, К-3, К-1)
8.	Склонность углей к самовозгоранию	Не склонны
9.	Способ проветривания	Всасывающий
10.	Схема проветривания	Комбинирован
11.	Система проветривания	Единая
12.	Глубина разработки, м	900
13.	Протяженность горных выработок, м	123000
14.	Абсолютное газовыделение, м ³ /мин:	(в 2025г.)
	• метана	79,8
	• углекислого газа	32,7
15.	Относительное газовыделение, м ³ /т:	
	• метана	27,9
	• углекислого газа	15,1
16.	Среднедействующее количество очистных выработок/ среднедействующее количество тупиковых выработок	1/4
17.	Трудность проветривания шахты, кВт с/м ³	6,3 (труднопроветриваемая)
18.	Утечки воздуха, м ³ /мин:	
	• внешние:	расч./факт. 1418/2454
		% 7,9/10,7
	• внутренние:	расч./факт. 1310/2386
		% 7,3/10,4
19.	Годовая добыча угля, млн т	18,5
20.	Списочный состав трудящихся, чел.	1900

На шахте отрабатываются три свиты пластов: Елбанская, Кандалепская и Полкашкинская (15 пластов угля марки «Ж»). Мощность пластов в пределах от 0,8 до 3,2 м. Все пласты относятся к опасным по пыли. Характеристика шахтопластов по пылевому фактору представлена в табл. 2.5 [8, 86].

Таблица 2.5 – Характеристика шахтопластов шахты «Осинниковская»

Порядковый номер	Наименование пласта	Мощность пласта, м	Марка угля	Выход легучих в-%	Влажность угля, %	Зольность, %	Содержание пыли в отбитом угле, %	Удельное пылевыделение, г/т	Группа пластов по пылевому фактору	Результаты испытаний на взрывчатость	Лабораторная норма осланцевания, %	Минимальная норма негорючих веществ (норма осланцевания)	Нижний предел взрывчатости, г/м ³
1.	K-1 в/п	1,6	Ж	29,5	1,8	10,4	1,2	720	VII	Взр.	81	86	38
2.	K-2	0,8	Ж	31,5	2,5	7,25	1,9	450	V	Взр.	82	83	45
3.	K-3	1,3	Ж	30,3	1,9	16,4	1,6	380	V	Взр.	87	89	42
4.	K-4	1,6	Ж	29,0	2,0	24,3	2,5	560	V	Взр.	82	85	41
5.	K-5	1,5	Ж	31,5	1,9	10,7	3,2	1300	VIII	Взр.	86	84	40
6.	E-1	1,8	Ж	32,1	1,8	5,4	0,62	371	V	Взр.	85	85	37
7.	E-3	0,8	Ж	33,3	2,4	12,0	1,8	430	V	Взр.	76	84	42
8.	E-4	1,3	Ж	32,0	1,9	5,2	1,23	1200	VIII	Взр.	85	86	38
9.	E-5	3,2	Ж	32,2	2,4	10,8	1,6	1100	VIII	Взр.	87	86	36
10.	E-6	1,7	Ж	33,4	2,3	5,5	0,71	295	V	Взр.	86	90	30
11.	E-7	1,0	Ж	34,0	2,4	16,3	2,6	770	VII	Взр.	85	89	35
12.	E-9	1,7	Ж	34,3	3,4	27,2	1,34	790	VII	Взр.	85	87	39
13.	E-10	2,6	Ж	36,2	2,7	15,1	0,6	491	VI	Взр.	87	89	30

Объектом исследований был выбран участок №1, лава 4-1-5-9, пласт Е-5 (рис. 2.7).

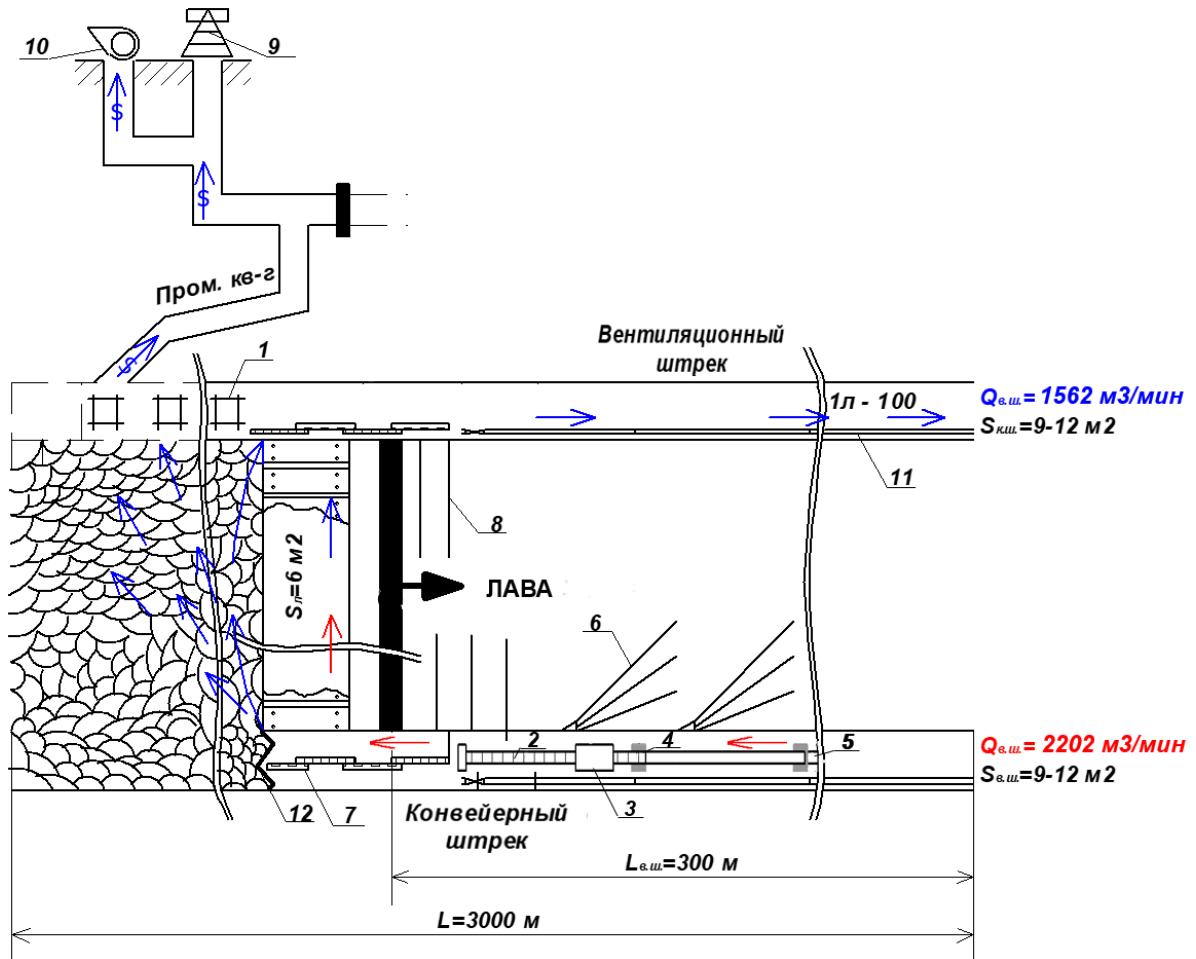


Рисунок 2.7 – Схема вентиляции выемочного участка №1 (лава 4-1-5-9)

1 – деревянная клеть; 2 – ПТК; 3- дробилка; 4- головка конвейера; 5 – ленточный конвейер; 6- дегазационные скважины; 7 – опережающая крепь; 8 – пропиточные скважины; 9 – заглушка; 10 – УВЦГ-15; 11 – пожарно-оросительный трубопровод; 12 - отшив.

Схема вентиляции участка возвратноточная. На выемочный участок по конвейерному штреку поступает $2202 \text{ м}^3/\text{мин}$ ($36,7 \text{ м}^3/\text{с}$) воздуха, который омывает лаву, и большая часть воздуха ($1562 \text{ м}^3/\text{мин}$, $26,0 \text{ м}^3/\text{с}$) удаляется по вентиляционному штреку. Оставшиеся $640 \text{ м}^3/\text{мин}$ ($10,7 \text{ м}^3/\text{с}$) отсасывается на фланг вентиляторами ВЦГ-7. Лава отрабатывается обратным ходом (начальная длина столба 3000м). Скорость движения воздуха на конвейерном штреке равна - $3,1 \text{ м}/\text{с}$, на вентиляционном - $2,1 \text{ м}/\text{с}$ [86].

На исходящей струе из лавы и у комплекта (кутке) вентиляционного штрека в добычные смены содержание метана может достигать 1,3-1,8%, что согласно табл. 2.3 снижает нижний предел взрывчатости угольной пыли пласта Е-5 более, чем в два раза и составляет $18,5 \text{ г/м}^3$ и менее [81].

Таблица 2.6 – Влияние метана на изменение нижнего предела взрывчатости угольной пыли

Объемная доля CH_4 в воздухе, %	Нижний предел взрывчатости, мг/м^3					
	0,5	1	1,5	2	2,5	3
E-5	37	24,64	18,5	12,32	9,842	6,142

Концентрация пыли по вентиляционному штреку в 10 м от лавы доходит до 260 мг/м^3 . Технически достижимый уровень (ТДУ) запыленности воздуха на вентиляционном штреке в 10 м от лавы составляет около 200 мг/м^3 , пылеотложение в этом месте доходит до $390 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$, что также превышает допустимый уровень. Отдельные значения запыленности воздуха могут доходить до 340 мг/м^3 , а в лаве в 10 м от комбайна - от 369 до 1070 мг/м^3 . Норма осланцевания выработки составляет 86%. [81, 86]. Для поддержания уровня пылеотложения во взрывобезопасном состоянии необходимо четырехкратное осланцевание выработки в смену, что технологически невыполнимо.

Исследования показали, что взрывоопасные скопления пыли обнаруживаются в пределах 100 метров от места примыкания выработки к лаве. Проведенные исследования в рамках диссертационной работы (рис. 2.3-2.6) показали, что в пределах этого участка дисперсный состав пыли варьируется от 0,1 до 10 мкм, что соответствует наиболее опасному диапазону по взрывчатости.

Это подтверждает необходимость применения дополнительных способов и средств обеспыливания воздуха для обеспечения пылевзрывобезопасности.

Выводы

1. Стадия метаморфизма угля влияет на его пылеобразующую способность. У углей высокой степени метаморфизма пылеобразующая способность меньше, чем у углей средней стадии метаморфизма. Пылеобразующая способность углей снижается и при переходе к углям более низкой стадии метаморфизма по сравнению со средней его стадией.

2. Установлено, что в лаве 4-1-5-9 отложившаяся пыль на 80% является взрывчатой, причем весовая доля наиболее взрывчатых частиц размером до 40 мкм составляет 70%, что снижает НКПВ от 1,5 до 4,3 раз. Пыль с пересыпа лавного конвейера на 72% является взрывчатой. Пыль с пересыпа с конвейера на конвейер на расстоянии 200 м от лавы на 65% является взрывчатой. Объемная доля взрывчатой пыли с пересыпа с конвейера на конвейер в магистральном конвейерном штреке на расстоянии 3200 м от лавы снижается и составляет 55%.

3. Нижний предел взрывчатости пыли пласта Е-5 может быть снижен до 9 - 24 г/т. С учетом ПДК метана в лаве, составляющей 1%, получаем дальнейшее снижение НКПВ на 50%. В итоге НКПВ пыли в лаве будет составлять 4,5 – 12 г/т. Проведенные аналогичные расчеты для конвейерного штрека (с учетом ПДК метана 0,5%) дают прогнозную оценку НКПВ пыли 6,75 – 18 г/т.

3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА И КОЛИЧЕСТВА ТЯЖЕЛЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ В УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ И УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ И ОЦЕНКА ИХ РОЛИ В ВОЗНИКНОВЕНИИ ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНЫХ СИТУАЦИЙ

3.1. Исследование состава и количества остаточных газов угля и угольной пыли

Угольная промышленность во всем мире остается одной из ключевых отраслей энергетики, однако она сопряжена с высокими рисками, среди которых особое место занимают взрывы газа и пыли, эндогенные и экзогенные пожары, представляющие серьезную угрозу для жизни и здоровья шахтеров, приводящими к значительным экономическим потерям [4, 8, 78, 111, 115, 116, 117].

При вскрытии пласта и снижении пластового давления происходит интенсивное выделение свободных и сорбированных газов. Из отбитого угля за несколько часов истекает основное количество метана, при этом сохраняются остаточные углеводородные газы, обогащенные тяжелыми углеводородами, повышающими степень взрывопожароопасности в угольных шахтах [41, 42, 77, 78]. Основными показателями, отражающими метаноопасность угольных шахт, характеризующей их взрывопожароопасность, являются абсолютная и относительная метанообильность соответственно шахт, выемочных участков, подготовительных выработок.

Относительная метанообильность является достаточно усредненным показателем, так как при больших скоростях подвигания очистного забоя и больших нагрузках на лаву значение относительной метанообильности может занижать фактическую метаноопасность шахт, что может приводить к невыполнению требуемого перечня мер борьбы с метаноопасностью и повышению рисков взрывов метана, угольной пыли, пожаров. Показатель абсолютной метанообильности более точно отражает метановую опасность, однако для повышения полноты информативности этого показателя

необходимо знать не только количество выделившегося из угля метана, но и, какие именно газы остались в угле, то есть количественный и качественный состав остаточных газов угольных пластов [85].

В нормативно-методических документах по проектированию вентиляции угольных шахт при расчете прогноза относительной метанообильности выемочного участка наряду с основным показателем, таким как природная метаноносность разрабатываемого пласта (x , $\text{м}^3/\text{т}$), используется такой показатель, как остаточная метаноносность угля (x_1 , $\text{м}^3/\text{т}$) [64, 66, 77, 85, 88]. Значение относительной газообильности выемочного участка определяется суммой разностей значений x и x_1 с определенными поправочными коэффициентами соответственно для разрабатываемого пласта, пластов-спутников и вмещающих пород. И, если показатель x , действительно отражает содержание метана в разрабатываемом пласте, то для показателя x_1 не так все очевидно, особенно, если рассматривать этот показатель для разных марок углей. Показатель остаточной газоносности используется также для прогноза относительной метанообильности подготовительных выработок [85].

Был собран статистический материал по маркам угля, добываемого в Российской Федерации с 1913 года по 2021 год (табл. 3.1).

Таблица 3.1 – Марки угля, добываемого на шахтах РФ

№ п/п	Название шахты	Год ввода в экспл.	Марки углей, разрабатываемых на шахте	Количество марок углей, разрабатываемых в течение каждых 10 лет	
				Перечень основных марок углей	Наличие углей указанных марок
1	Октябрьская	1913	Ж	Б	1
2	Угольная	1923	Б (Д, ДГ, Г, СС) шесть бурого	Д	3
3	Дальняя	1927	А	ДГ	1
4	Им. 7 ноября(Краснояр)	1930	Д	Г	3
5	Им. А.Д. Рубана	1930-1999	Д, ДГ	ГЖ	1
6	Осинниковская	1932	Ж	ГЖО	-
7	Комсомолец	1933	Г	Ж	3

Продолжение табл. 3.1

№ п/п	Название шахты	Год ввода в экспл.	Марки углей, разрабатываемых на шахте	Количество марок углей, разрабатываемых в течение каждых 10 лет	
				Перечень основных марок углей	Наличие углей указанных марок
8	Им.С.М. Кирова	1935	Г, ГЖ	К	-
9	Воркутинская	1937	2Ж	КО	-
10	Грамотеинская	1939	Д	КС	-
11	Ургалуголь (Северная)	1939	Г	ОС	-
12	Полысаевская	1939	Г 12	А	1
13	Комсомольская	1944	2Ж	Б	-
14	Заполярная	1949	Ж-10, 2Ж	Д	2
15	Чертинская- Коксовая	1952	Ж	ДГ	1
16	Им. В.И. Ленина	1953	КО	Г	1
17	Заречная	1953	Г, Д	ГЖ	1
18	Большевик	1954	ГЖ, ГЖО	ГЖО	1
19	Листвяжная	1956	Д, ДГ	Ж	4
20	Березовская	1958	КО	К	-
21	Костромовская	1958-2000	Ж 9	КО	2
				КС	-
				ОС	-
				А	-
22	Воргашорская	1964-1974	ГЖО	Б	-
23	Юбилейная	1966	Ж	Д	-
24	Алардинская	1969	ТС, КС	ДГ	-
25	Распадская	1973	ГЖ	Г	-
26	Первомайская	1975	К	ГЖ	1
27	Обуховская	1978	А 6	ГЖО	1
				Ж	1
				К	1
				КО	-
				КС+ТС	1+1
				ОС	-
				А	1
28	Есаульская	1980	ГЖ, Ж	Б	-
29	Полосухинская	1985	Ж, ГЖ	Д	1
30	Талдинская- Западная-1	1988	Д, ДГ	ДГ	2
31	Садкинская	1989	А	Г	2
32	Талдинское- Кыргайское	1989	Г	ГЖ	3
33	Им. В.Д. Ялевского	1994	ДГ, Г	ГЖО	-
34	Шерловская- Наклонная	1995	АК, АО, АМ, АС, АШ	Ж	2

Продолжение табл. 3.1

№ п/п	Название шахты	Год ввода в экспл.	Марки углей, разрабатываемых на шахте	Количество марок углей, разрабатываемых в течение каждых 10 лет	
				Перечень основных марок углей	Наличие углей указанных марок
35	Антоновская	1998	ГЖ 8	К	-
				КО	-
				КС	-
				ОС	-
				А	1
36	Талдинская- Западная-2	2001	Д, ДГ, Г, ГЖО	Б	-
37	Разрез Инский	2001	Г, Д	Д	3
38	Сибиргинская	2002	ОС	ДГ	1
39	Сибирская	2002	ОС	Г	2
40	Усковская	2002	ГЖ	ГЖ	3
41	Ольжерасская- новая	2006	ГЖО	ГЖО	2
42	Южная	2009	К, КО, КС	Ж	3
43	Денисовская	2009	К, КЖ	К	5
44	Анжерская Южная	2009	К, КО, КС	КО	2
45	Талдинская- Южная	2009	ГЖ	КС	2
46	Байкаимская	2009	Д	ОС	2
47	Ерунаковская-VIII	2013	Ж	А	-
48	Им. С.Д. Тихова	2017	Ж		
49	Увальная	2017	ГЖ		
50	Межегейуголь	2017	Ж		
51	Распадская- Коксовая	1019	К		
52	Инаглинская	2020	Ж		
53	Денисовская Восточная	2021	К 18		

Анализ графических данных, представленных на рис. 3.1, показывает, что наибольшее процентное содержание разрабатываемых пластов относится к марке Ж и составляет 19%. Затем следуют марки Д и ГЖ с 13% их добычи, затем – марки Г и К с 11% и 9% соответственно. Таким образом, более половины всего добываемого угля в России относится к высокоценным коксующимся углям.

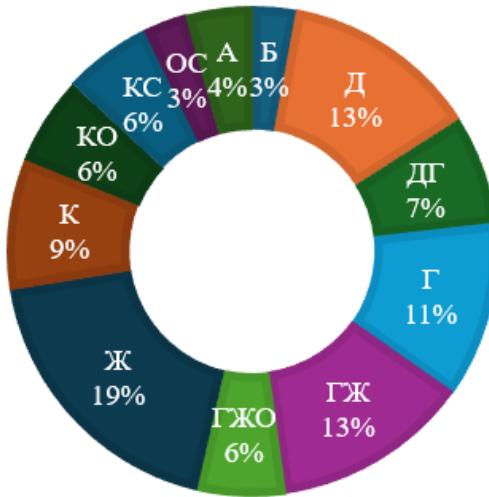


Рисунок 3.1 – Количество разрабатываемых шахтопластов по маркам угля (процентное соотношение от общего количества)

При характеристике газоносности пластов в первую очередь оценивается метаноносность, однако, наличие тяжелых углеводородов в угольных пластах при определенных горнотехнических условиях угледобычи (высокой нагрузке на очистной забой, большой длине очистного забоя, отсутствии дегазации) могут способствовать увеличению аэрологического риска, из-за того, что тяжелые углеводороды имеют более низкие концентрационные пределы взрываемости и температуру воспламенения. По указанным причинам тяжелые углеводороды могут инициировать процессы возгорания и взрывы в угольных шахтах [85].

Обычно в свободных газах угольных пластов содержание тяжелых углеводородов (УВ) не превышает 1-5 %. В литературе приводятся сведения, что свободные газы угольных пластов могут содержать повышенные количества тяжелых УВ. Так, в угленосных толщах Пенсильвании (США) метан содержит примесь до 10 % этана. Е. С. Розанцев и Н. П. Таран приводят данные о высоком содержании тяжелых УВ (десятки %) в угольных газах, отобранных с выбросоопасных участков [41, 85].

Содержание тяжелых углеводородов было также зафиксировано отделениями ВГСЧ в дистанционном отборе по проложенным трубам проб воздуха с аварийного участка при пожаре в лаве, отрабатывающей пласт марки

Ж (из трубопровода на выхлопе ВВН2-150 и из трубопровода УВЦГ на поверхности). В результате термодегазации угля при пожаре содержание индикаторных газов в воздухе горной выработки составило: CH_4 – 1,26%, C_2H_6 – 0,046%, C_3H_8 – 0,0096%, *i*- C_4H_{10} – 0,0011%, *n*- C_4H_{10} – 0,0010%.

Проведенные исследования по сопоставлению остаточных углеводородов Кузбасса и Донбасса позволяют выявить общую закономерность для обоих бассейнов [41, 85] (рис. 3.2). Максимальное содержание остаточных углеводородов в обоих бассейнах установлены в углях марок Ж и КЖ. С уменьшением и увеличением степени преобразования угля содержание остаточных углеводородов в угле снижается [85].

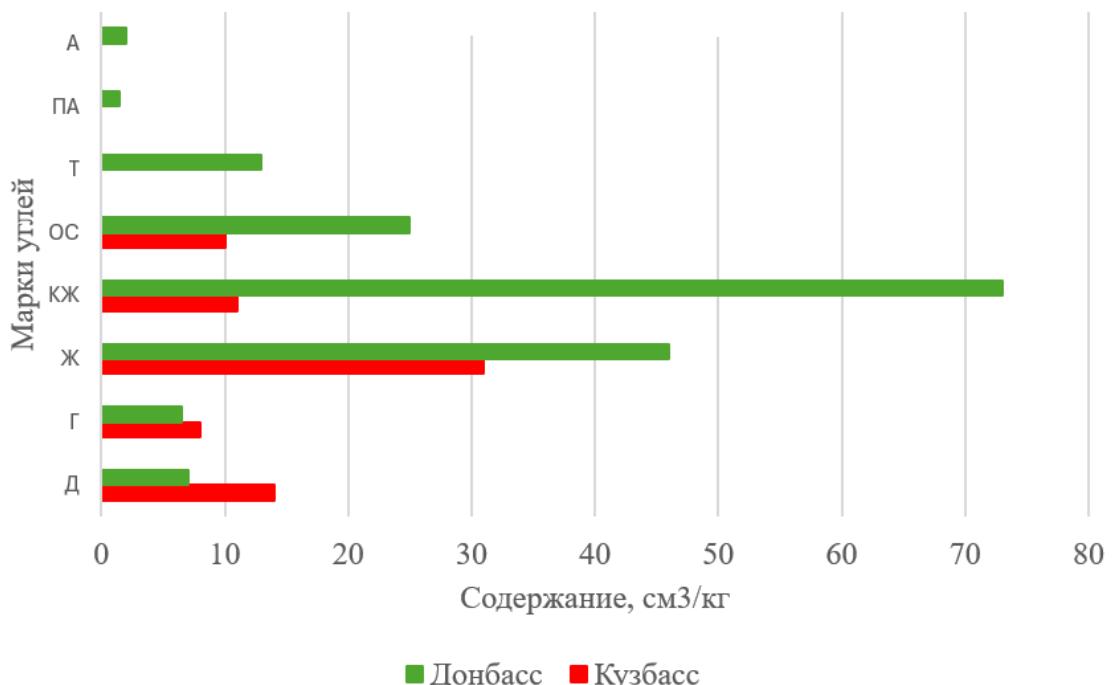


Рисунок 3.2 – Сравнительная оценка марочного состава углей по содержанию в них остаточных углеводородов

Если сравнивать соотношения содержаний метана и тяжелых углеводородов в остаточных газах угля этих бассейнов, то во всех марках углей 80% и более составляют тяжелые углеводороды (рис. 3.3) [85].

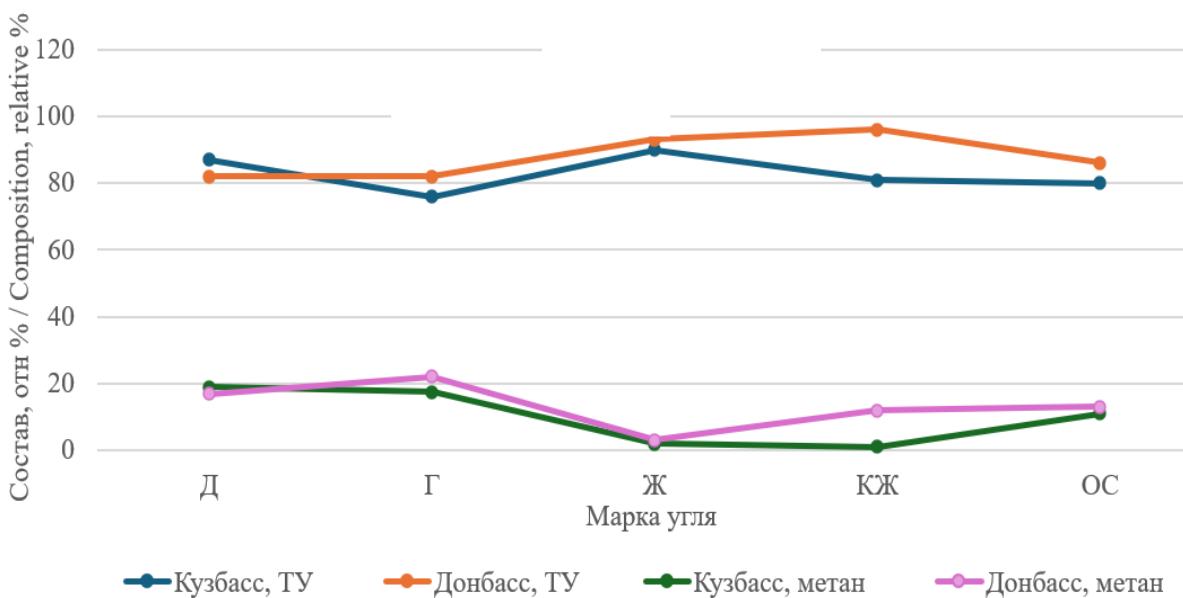


Рисунок 3.3 – Сравнение процентных распределений содержания метана и тяжелых углеводородов в остаточных газах углей

В процессе добычи и дегазации угля [85] в первую очередь из угля удаляется метан, а тяжелые углеводороды остаются в угле и с оставшимся в угле метаном образуют остаточные газы углей. Учет остаточных газов углей производится при расчете относительной метанообильности выемочных участков и подготовительных выработок на этапе проектирования вентиляции шахт. В расчетах учитываются: остаточная метаноносность угля, пластов-спутников, вмещающих пород; остаточная метаноносность угля при выдаче его за пределы выемочного участка, остаточная метаноносность в отбитом угле и др. Во всех случаях остаточная метаноносность оценивается только по метану, однако наши дальнейшие исследования показывают, что тяжелых углеводородов в остаточных газах углей содержится до 80 % [85].

Анализ состава индивидуальных углеводородов к их сумме в остаточных газах угля показывает, что в обоих угольных бассейнах в углях марки Ж количество пропана и бутана превышает содержание остальных газов в 3-7 раз (рис.3.2). Расчет относительной метанообильности выемочных участков и подготовительных выработок по разности природной метаноносности разрабатываемого пласта и остаточной метаноносности угля марок Ж, КЖ приводит к недостоверному (заниженному) значению

фактической относительной метанообильности, что не отражает фактического состояния взрывоопасности выработок [85].

3.2. Анализ влияния сорбированных тяжелых углеводородов на взрывчатость угольной пыли

Среди основных опасностей горного производства таких, как газовая пылевая, внезапные выбросы угля и газа, горные удары, склонность угля к самовозгоранию, главенствующая роль отводится газовой опасности, точнее метановой. Гомологи метана создают в рудничной атмосфере повышенную опасность, так как пределы их взрываемости в смеси с воздухом ниже, чем для метана, например, для пропана эти концентрации составляют 2,4-9,5%, для бутана 1,9-8,4% [42, 85].

Минимальное содержание в смеси (%) нескольких близких по составу горючих компонентов (например, метана, этана, водорода и др.), при котором смесь взрывается, определяется по формуле Ле Шателье.

Наличие в рудничном воздухе 20% пропана и 30% бутана может снизить концентрационный предел взрываемости газовоздушной смеси до 2,9% (табл. 3.2) [85].

Таблица 3.2 – Нижний предел взрываемости смеси горючих компонентов, %

№ п/п	Концентрация горючих газов в смеси рудничного газа, %				Нижний предел взрывчатости смеси в воздухе, %	ПДК смеси газов в воздухе, %
	Метан	Этан	Пропан	Бутан		
1	100	0	0	0	4,9	0,98
2	95	0	0	5	4,54	0,90
3	95	5	0	0	4,77	0,95
4	90	5	5	0	4,54	0,90
5	90	0	0	10	4,23	0,84
6	90	10	0	0	4,65	0,93
7	85	5	0	10	4,13	0,82
8	80	5	5	10	3,96	0,79
9	80	10	5	5	4,14	0,82
10	80	0	0	20	3,72	0,78
11	70	0	0	30	3,32	0,66

Продолжение табл. 3.2

12	50	0	20	30	2,91	0,58
13	50	0	50	0	3,22	0,64
14	50	50	0	0	3,88	0,77
15	0	0	0	100	1,9	0,38

В ОАО «ОУК «Южкузбассуголь» на шахте «Осинниковская» выполнены исследования состава и количества сорбированных углеводородов в пласте Елбанский-5 (Е-5), а также пыли пласта Е-5. Упомянутая шахта разрабатывает три группы пластов — Елбанскую, Кандалепскую и Полкашкинскую, которые включают пятнадцать угольных пластов марки «Ж» толщиной от 0,8 до 3,2 метра. Данное горнодобывающее предприятие классифицируется как опасное [46, 58-60, 61, 63, 65, 101-103] по риску внезапных выбросов угля, породы и газа, горным ударам, а также суфлярным выделениям метана.

Для проведения исследований использовался хроматограф М-3700, оснащённый пламенно-ионизационным детектором, функционирующим на принципе измерения электропроводности водородно-воздушного пламени. Применялся метод поэтапной термодегазации.

Для изучения кинетики десорбции углеводородных газов были выбраны следующие температуры термодегазации: 150, 200, 250 °С. Исследования проводились для углей пласта Е-5, а также для угольной пыли этого пласта [85]. Изучались пылевые фракции размером: менее 0,07 мм; 0,07–0,1 мм; 0,1–0,25 мм; 0,25–0,5 мм; 0,5–1,0 мм, а также общая масса угольной пыли. Результаты этих исследований представлены в табл. 3.3, 3.4 и рис. 3.4.

Таблица 3.3 – Количественные значения десорбированных углеводородов из угля и угольной пыли

Вещество, параметры	Углеводороды								$\sum C-C_6$ $\sum C-C_3$ $\sum C_4-C_6$	
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₈	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	
Эффективный диаметр молекулы, нм	0,414	0,537	0,495	0,632	0,599	0,707	0,674	0,780	0,839	
Относительная молекулярная масса	16,043	30,070	28,054	44,097	42,081	58,124	56,100	72,147	86,173	
Плотность, кг/нор.м ³	0,715	1,357	1,260	2,019	1,915	2,703	2,668	3,172	3,638	
Пределы взрываемости, об. %	5,0 - 14,0	3,2 -12,5		2,4 -9,5		1,9 – 8,4		1,4 - 7,8	1,25 - 6,9	
Количество десорбированного газа из угля пласта Е-5, см ³ /кг; содержание в газовой смеси, об. %	2,25 14,3	0,59 3,7	0,29 1,8	7,03 44,6	0,45 2,9	4,66 29,5	0тс.	0,21 1,3	0,29 1,8	15,8 <u>10,16</u> <u>5,61</u>
Количество десорбированного газа из угольной пыли пласта Е-5, см ³ /кг; содержание в газовой смеси, об. %	1,31 6,7	0,29 1,5	0,21 1,1	1,45 7,4	0,11 0,6	9,74 50,0	0,09 0,5	3,96 20,3	2,31 11,9	19,5 <u>3,26</u> <u>16,21</u>
Температура самовоспламенения, °С	595	515	435	470		405		286	233	

Примечание: \sum - сумма углеводородов, см³/кг

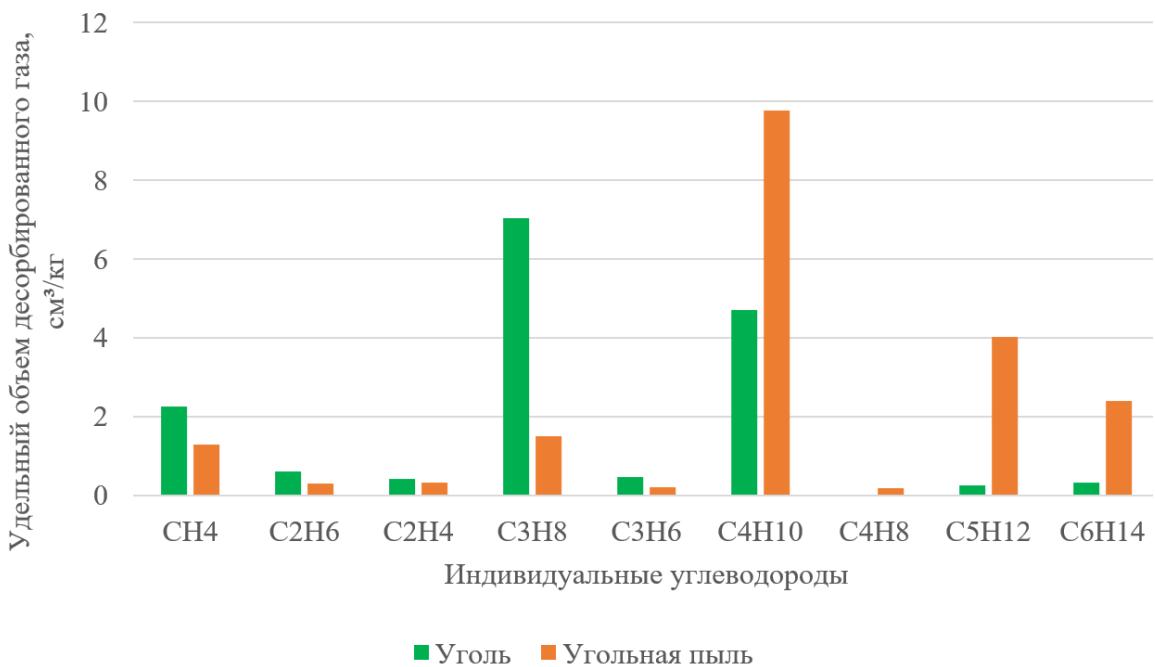


Рисунок 3.4 – Сравнительный анализ по количеству выделяемых углеводородов из угля и угольной пыли для одного и того же пласта

Из анализа данных табл. 3.3 следует, что количество углеводородов, извлеченных из угольной пыли (19,5 см³/кг), на 23 % больше, чем количество углеводородов, извлеченных из угля (15,8 см³/кг). Содержание углеводородов, извлеченных из угля от метана до пропана (10,16 см³/кг) составляет 64,3 %, а из угольной пыли содержание извлеченных аналогичных углеводородов составляет всего лишь 16,7 %, а остальные 83 % представлены тяжелыми углеводородами от бутана до гексана т.е. угольная пыль адсорбирует преимущественно бутан, пентан, гексан. Плотность этих газов составляет от 2,703 до 3,638 кг/нор.м³, поэтому они оседают на почву выработки и задерживаются в ламинарном пограничном слое воздушного потока, проходящего по выработке.

Рис. 2.2-2.6 (гл. 2) наглядно показывают полидисперсный характер угольной пыли. Атомы и молекулы твердого тела, находящиеся на поверхности, обладают большей энергией, чем внутри конденсированных фаз. Поверхностную энергию рассматривают как избыток энергии, приходящейся на единицу поверхности. Поверхностная энергия равна произведению поверхностного натяжения на площадь поверхности, и она может

уменьшаться как за счет сокращения поверхности (стремление жидкости в условиях невесомости принимать сферическую форму – наименьшую поверхность при данном объеме), так и за счет снижения поверхностного натяжения.

Поверхностная энергия стремится самопроизвольно уменьшиться. К явлениям, приводящим к самопроизвольному снижению поверхностного натяжения относится адсорбция. Адсорбция происходит на границе раздела фаз. В нашем случае пыль – адсорбент, тяжелые углеводороды – адсорбат. Количество адсорбции измеряется массой адсорбата, приходящейся на единицу массы адсорбента. Мы можем количественно оценить массу адсорбированного газа угольной пылью, для этого составим разность между количеством десорбированного газа угольной пылью и углем: $19,5 - 15,8 = 3,7$ (см³/кг). Следовательно, величина адсорбции углеводородов угольной пылью равна 3,7 см³/кг.

Адсорбцию можно рассматривать как взаимодействие молекул адсорбата с активными центрами поверхности адсорбента. Различают физическую (молекулярную) адсорбцию, хемосорбцию (химическое присоединение атома, молекулы) и ионный обмен. В нашем случае имела место физическая адсорбция, так как при адсорбции и термодесорбции угольной пыли и угля выделялся один и тот же состав углеводородов.

При физической адсорбции взаимодействие адсорбента с адсорбатом осуществляется за счет сил Ван-дер-Ваальса и водородных связей, которые обеспечивают притяжение атомов и молекул. Силы Ван-дер-Ваальса включают три вида взаимодействий, основным из которых является дисперсионное взаимодействие, так называемый дисперсионный эффект (действие сил Лондона) [94].

Энергия притяжения при адсорбции ($U_{\text{адс}}$) рассчитывается по формуле [94]:

$$U_{\text{адс}} = -\pi C/(6x^3), \quad (3.1)$$

где C – константа, которая рассчитывается по соответствующим для каждого вида взаимодействия формулам; x – расстояние адсорбирующегося атома от поверхности адсорбента.

Энергия притяжения при адсорбции убывает с увеличением расстояния x в третьей степени вместо шестой, как это имеет место при взаимодействии двух атомов (такую формулу мы тоже используем при расчете сил расклинивающего давления). Зависимость (3.1) указывает на более медленное уменьшение энергии притяжения при адсорбции и на дальнодействие адсорбционных сил.

Уравнение (3.1) было использовано Лондоном для экспериментального доказательства дисперсионной природы адсорбционных сил и связи энергии адсорбции со свойствами адсорбированных молекул и адсорбента.

Ископаемые угли – это пористые тела, внутри которых имеются поры, которые могут быть заполнены газом или жидкостью [85]. Их относят к своеобразному классу природных сорбентов, получивших название «молекулярных сит». Более того, в ископаемых углях преобладают микропоры, диаметром 0,5-1,5 нм, что, следует заметить, создает трудности в воздействии на микропоровый объем угля для извлечения угольного метана при проведении дегазации и требует предварительного создания системы транспортных трещин.

Общая пористость углей марки Ж обычно варьируется в диапазоне примерно от 5-10% до 15-20%, иногда достигая 25 % и более для некоторых разновидностей угля. Угольная пыль обладает повышенной сорбционной способностью по сравнению с углем вследствие большой реакционной способности, особенно для тонкодисперсных фракций пыли, что также определяет их повышенную пожаровзрывоопасность. Кроме того, пыль может находиться как в состоянии аэрозоля, так и отложившейся на твердых поверхностях. Удельная поверхность пылевых частиц может достигать 1000 м²/г и более [94]. На рис. 3.5 представлено изображение разветвленной поверхности частиц угольной пыли.

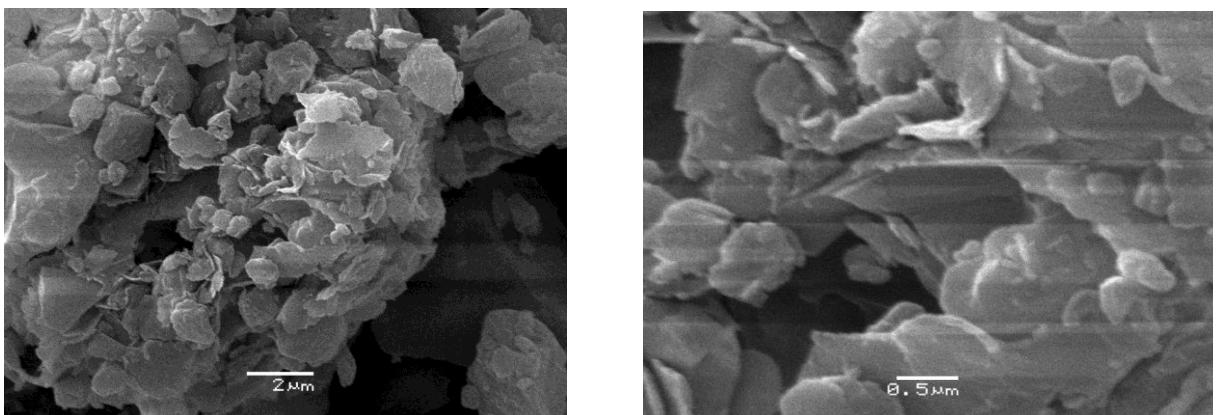


Рисунок 3.5 – Изображение поверхности частиц угольной пыли пласта Е-5

Анализ дисперсного состава отложившейся пыли в лаве 4-5-1-9 (рис. 2.3, 2.4) показывает, что в воздух рабочей зоны поступает пыль с содержанием частиц PM_{10} от 15% до 30% и частиц $PM_{2,5}$ от 0 до 5%, которая дольше висит в воздухе и легче переносится по выработке [85].

При выполнении диссертационных исследований было установлено, что угольная пыль пласта Е-5 содержит больше углеводородов (бутана, гептана, гексана) по сравнению с углеводородами, извлеченными из углей (пропана, бутана) (рис. 3.4). Это можно объяснить следующим: при разрушении угля в воздушный поток лавы выделяются сорбированные в угле углеводородные газы от метана до гексана, которые переносятся воздушным потоком по горным выработкам [85]. Вследствие большой разницы в плотностях газов и их динамической активности, происходит стратификация углеводородов по высоте воздушного потока, в результате чего метан, как наиболее легкий газ, поднимается к кровле выработки, а пропан, бутан и гексан опускаются в нижнюю часть воздушного потока и оседают на почву выработки, так как плотность этих газов от 2-х до 4-х раз больше плотности воздуха. В результате дальнодействия адсорбционных сил происходит адсорбция тяжелых углеводородов угольной пылью. Если эффективный диаметр молекулы метана 0,414 нм, то для молекул пропана, бутана и гексана эти значения равны соответственно: 0,632; 0,707; 0,839 нм, то есть, для размера микропор от 1 до

1,5 нм адсорбционное взаимодействие пыли с тяжелыми углеводородами сильнее, чем с метаном и этаном. И чем больше диаметр молекулы углеводорода, тем сильнее молекулярное притяжение.

Сравним силу межмолекулярного адсорбционного взаимодействия в угле и в пыли, для этого возьмем отношение большего количества адсорбированного газа к меньшему для всех индивидуальных углеводородов. Получим, что в угле для метана сила адсорбционного взаимодействия в 1,7 раза больше, чем для пыли; для этана и пропана также адсорбция в угле в 2,0 раза больше, чем в пыли. А вот для бутана сила адсорбционного взаимодействия в 2,1 раза больше, чем в угле. И особенно обращает внимание тот факт, что пентана в 18,9 раз больше в пыли, чем в угле, и гексана также в 8 раз больше в пыли, чем в угле, что подтверждает, что угольная пыль пластов средней стадии метаморфизма сорбирует тяжелые углеводороды (рис. 3.6).

Во время взрыва метана и угольной пыли на шахте «Листвяжная» в 2021 году находящиеся в шахте горняки интуитивно классифицировали аварию, как взрыв «газовой» пыли.

Результаты исследования кинетики десорбции углеводородных газов из угольной пыли представлены в табл. 3.4.

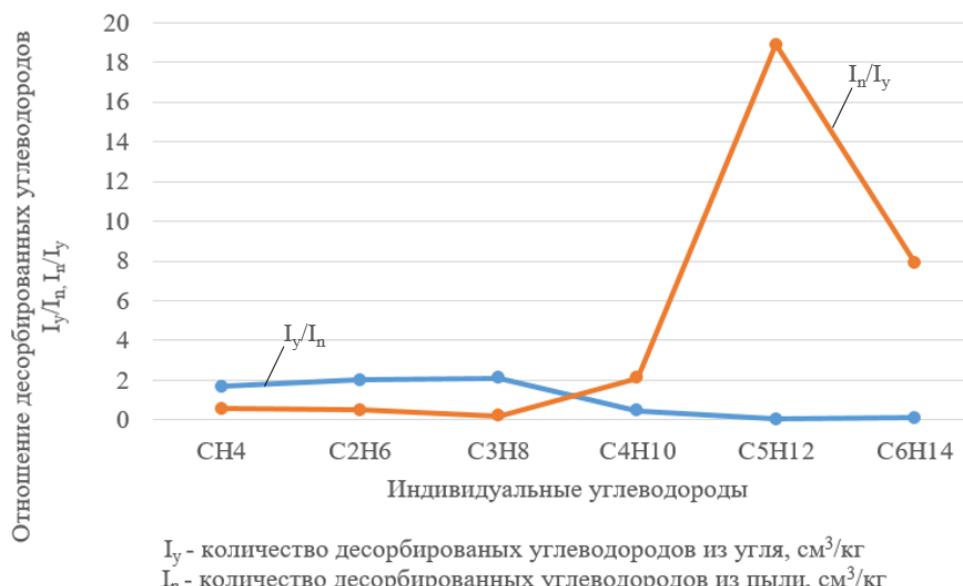


Рисунок 3.6 – Соотношение сил адсорбционного взаимодействия в угле и в пыли угля пластов средней стадии метаморфизма

Таблица 3.4 – Количество и состав десорбированных углеводородов из угольной пыли пласта Е-5 [85]

T, °C	Углеводороды									Σ^{*} , см ³ /кг
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₈	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	
Фракция пыли менее 0,07										
150	1,600	0,240	0,090	0,450	0,000	3,300	0,080	2,200	0,700	8,660
200	0,500	0,000	0,000	0,210	0,000	5,200	0,000	1,600	1,260	8,770
Σ										17,43
Фракция пыли 0,07-0,1										
150	0,730	0,100	0,060	0,460	0,000	2,230	0,000	0,750	0,520	4,850
200	1,700	0,320	0,220	1,980	0,120	4,950	0,000	1,910	1,810	13,010
250	3,080	0,640	0,710	2,080	0,350	6,710	0,120	2,600	3,460	19,750
Σ										37,61
Фракция пыли 0,1-0,25										
150	0,28	0,04	0,02	0,26	0	1,26	0,01	0,54	0,45	2,857
200	1,290	0,230	0,120	1,920	0,000	5,390	0,050	1,310	1,050	11,360
250	3,690	0,790	0,830	3,890	0,380	9,350	0,170	3,070	2,920	25,090
Σ										39,32
Фракция пыли 0,25-0,5										
150	0,900	0,110	0,090	1,300	0,120	2,580	0,000	0,900	0,700	6,700
200	2,070	0,430	0,260	4,130	0,240	4,240	0,000	1,290	1,280	13,940
250	3,270	0,750	0,720	5,380	0,120	6,090	0,120	2,170	2,150	20,770
Σ										41,41
Фракция пыли 0,5-1,0										
150	0,590	0,100	0,050	0,640	0,040	2,330	0,000	0,600	0,850	5,200
200	1,330	0,260	0,150	2,040	0,080	4,270	0,050	1,270	1,180	10,630
250	3,450	0,860	0,730	4,070	0,440	5,460	0,230	2,040	2,540	19,820
Σ										35,65
Угольная пыль; вся масса										
150	1,02	0,16	0,06	0,56	0	1,72	0	0,51	0,28	4,31
200	1,93	0,41	0,22	1,54	0,13	3,9	0,07	0,98	0,77	9,95
250	1,31	0,29	0,21	1,45	0,11	9,74	0,09	3,96	2,31	19,5
Σ										33,76

Анализ данных табл. 3.4 показывает, что при всех температурах проведенной термодегазации из всех фракций пыли десорбируются бутан, пентан, гексан в количестве, значительно превышающем количество

десорбируемого метана. Но этого и следовало ожидать, так как ранее было показано, что из угольной пыли десорбируется углеводородов на 23,4% больше, чем из угля, причем преимущественно C₄-C₆, из них больше всего десорбируется бутана.

Поскольку из угольной пыли исследованных образцов угля марки Ж больше всего выделилось бутана, особенно при температуре термодегазации 250°C, были проведены исследования по установлению кинетики выделения бутана в зависимости от трех исследуемых температур дегазации. Рассчитывалось приращение десорбированного бутана при нагревании на 150, 200 и 250°C.

Проанализировав колонку с десорбированным бутаном по всем фракциям пыли и по всей массе пыли по трем температурам термодегазации (150, 200 и 250°C) можно отметить, что результаты по всем фракциям пыли при всех температурах примерно одинаковы.

Расчетные данные процентного значения десорбированного бутана из всех фракций пыли и общей ее массы (для постоянного объема в 1 г) представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.5 – Процентное значение десорбированного бутана из всех фракций пыли и общей ее массы

Температура, °C	Количество десорбированных углеводородов, %, по размерам фракций, мм					
	0,07-0,1	0,1-0,25	0,25-0,5	0,5-1,0	Вся масса пыли	Среднее значение
150	33	13	42	42	18	29,6
200	40	44	27	36	22	33,8
250	27	43	31	22	60	36,6

Можно сделать вывод, что для частиц пыли больше размера 70 мкм десорбция бутана больше зависит от температуры дегазации, а не от размера частиц. Возможно, что для частиц размером менее 70 мкм кинетика дегазации будет другой.

Функциональные зависимости десорбции пропана и бутана при 150 °C имеют вид:

$$I_{\text{пропан},150} = -21,74 \cdot d^3 + 2,43 \cdot d^2 - 7,98 \cdot d + 0,97; \quad (3.2)$$

$$I_{\text{бутан},150} = -48,84 \cdot d^3 + 78,12 \cdot d^2 - 30,64 \cdot d + 4,56, \quad (3.3)$$

где $I_{\text{пропан},150}$; $I_{\text{бутан},150}$ — количество десорбированного пропана и бутана соответственно при температуре дегазации 150 °C, см³/кг;

d — размер частиц угольной пыли, мм.

Функциональные зависимости десорбции пропана и бутана при 200 °C имеют вид:

$$I_{\text{пропан},200} = -16,58 \cdot d^3 + 13,76 \cdot d^2 + 4,345 \cdot d + 0,521; \quad (3.4)$$

$$I_{\text{бутан},200} = 21,45 \cdot d^3 - 29,76 \cdot d^2 + 9,56 \cdot d + 4,5. \quad (3.5)$$

Функциональные зависимости десорбции пропана и бутана при 250 °C имеют вид:

$$I_{\text{пропан},250} = 3,99 \cdot d^3 - 17,98 \cdot d^2 + 18,1 \cdot d + 0,54; \quad (3.6)$$

$$I_{\text{бутан},250} = 101,9 \cdot d^3 - 162,89 \cdot d^2 + 65,01 \cdot d + 1,8. \quad (3.7)$$

Газовая ситуация на участках осложняется резким повышением нагрузок на очистные и проходческие забои. При больших нагрузках на очистной забой (15-18 тыс. т угля в сутки) в процессе разрушения угля комбайном, кроме метана, в шахтную атмосферу могут выделяться находящиеся в пласте тяжелые углеводороды, особенно это настораживает в отношении высокогазоносных пластов марок Д, Ж, КЖ [78].

Температура воспламенения гексана 233 °C, бутана — 405 °C, пропана — 470 °C. Температура воспламенения метана выше, чем у этих газов и составляет 650-750 °C. Нижние концентрационные пределы взрываемости: гексан — 1,25%, бутан — 1,9%, пропан — 2,4%, метан — 5%. При работе комбайнов, шахтных ленточных конвейеров и другого оборудования на выемочном участке могут возникать температуры воспламенения тяжелых углеводородов. Таким образом, от источника теплового импульса могут

сначала вспыхнуть тяжелые углеводороды, которые дадут искру для взрыва метана. При взрыве метана находящаяся в выработке угольная пыль поднимается в воздух, нагревается и из нее выделяются сорбированные ею тяжелые углеводороды, которые придают значительное усиление мощности взрыва метана и угольной пыли [78].

Схема процесса возгорания может происходить как непосредственно при возгорании метана, так и при нагреве угольной пыли с выделением горючих компонентов, их возгоранием, горением и взрывом (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Схема процессов возгорания с последующим взрывом

В исследованиях В.М. Юрченко приводятся данные, позволяющие оценить температуру воспламенения угля в воздухе под воздействием теплового импульса при работе шахтного ленточного конвейера для транспортировки угля, при неправильной эксплуатации которого на локальных участках может возникать нагрев до 300–500 °С [41, 42]. В.М. Юрченко предполагает возможность воспламенения штыба угля на конвейере в результате воспламенения летучих веществ, в состав которых входят и остаточные газы углей, выделяющиеся из угля при нагревании [41, 42].

При работе комбайнов, шахтных ленточных конвейеров и другого оборудования на выемочном участке могут возникать температуры воспламенения тяжелых углеводородов. Таким образом, от источника

теплового импульса могут сначала вспыхнуть тяжелые углеводороды, которые дадут искру для взрыва метана. При взрыве метана находящаяся в выработке угольная пыль поднимается в воздух, нагревается и из нее выделяются сорбированные ею тяжелые углеводороды, которые придают значительное усиление мощности взрыва метана и угольной пыли [78].

3.3. Исследования формы и структуры пылевых частиц угля средней стадии метаморфизма

Исследования свойств и структуры пылевых частиц угля марки Ж были проведены на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения: JEOL, JSM-6380LA. Технические характеристики: ускоряющее напряжение до 30 кВ; разрешающая способность 3 нм в режиме регистрации вторичных электронов; режим регистрации обратно рассеянных электронов (топография, композиция и с оттенением); режим низкого вакуума для влажных и склонных к статике образцов; встроенный рентгеноспектральный анализатор JED-2300 (диапазон элементов от бора до урана, анализ в точке, профиль по линии, картирование по площади). Производитель: JEOL Ltd., Япония [84].

Образцы обрабатывали золото-палладиевой смесью под давлением в вакууме, чтобы исследуемые частицы держались статичными и не «налипали» на элементы микроскопа, мешая обзору. Подложка сделана из дюралюминиевой стали. Обработка образцов золото-палладиевой смесью в вакууме — это одна из стандартных процедур подготовки проб для исследований с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) [84]. Этот процесс называется напылением (sputter coating) и используется для обеспечения проводимости поверхности образца и улучшения качества изображения [84].

Электронный микроскоп использует электронный пучок, и чтобы избежать накопления заряда на поверхности, необходимо сделать поверхность образца проводящей. Тонкое покрытие помогает избежать изменений структуры образца под действием электронного пучка. Образец

устанавливают в специальной вакуумной камере напылителя. Из камеры удаляется воздух для предотвращения окисления и обеспечения равномерного покрытия. Вакуум также предотвращает рассеивание газов, которые могли бы мешать процессу напыления. Смесь золота (Au) и палладия (Pd) часто используется, так как она обеспечивает хорошую проводимость, равномерное покрытие и долговечность [84].

Напыление осуществляется методом распыления, для чего в камере создаётся плазма, обычно из аргона. Ионы аргона разгоняются в электрическом поле и бомбардируют мишень, состоящую из золотопалладиевого сплава. Атомы золота и палладия выбиваются с поверхности мишени и осаждаются на образце, формируя тонкий металлический слой. Толщина слоя обычно составляет 2–10 нм, что достаточно для создания проводящей поверхности, но не мешает наблюдению микроскопической структуры [84].

Исследования формы и структуры пылевых частиц проводились для тех же образцов пыли угля марки Ж, отобранный из тех же четырех мест: пыль после комбайна в лаве; пыль с пересыпа конвейера лавы; пыль с пересыпа с конвейера на конвейер на расстоянии 200 м от лавы; пыль с пересыпа с конвейера на конвейер в магистральном конвейерном штреке на расстоянии 3200 м от лавы.

При многократном увеличении, частицы пыли угля марки Ж могут характеризоваться и как изометрические и как пластинчатые (рис. 3.8). Форма и величина частиц на первоначальном этапе предопределены характером протекания геологических процессов и структурой окаменевшего органического вещества [95, 96].

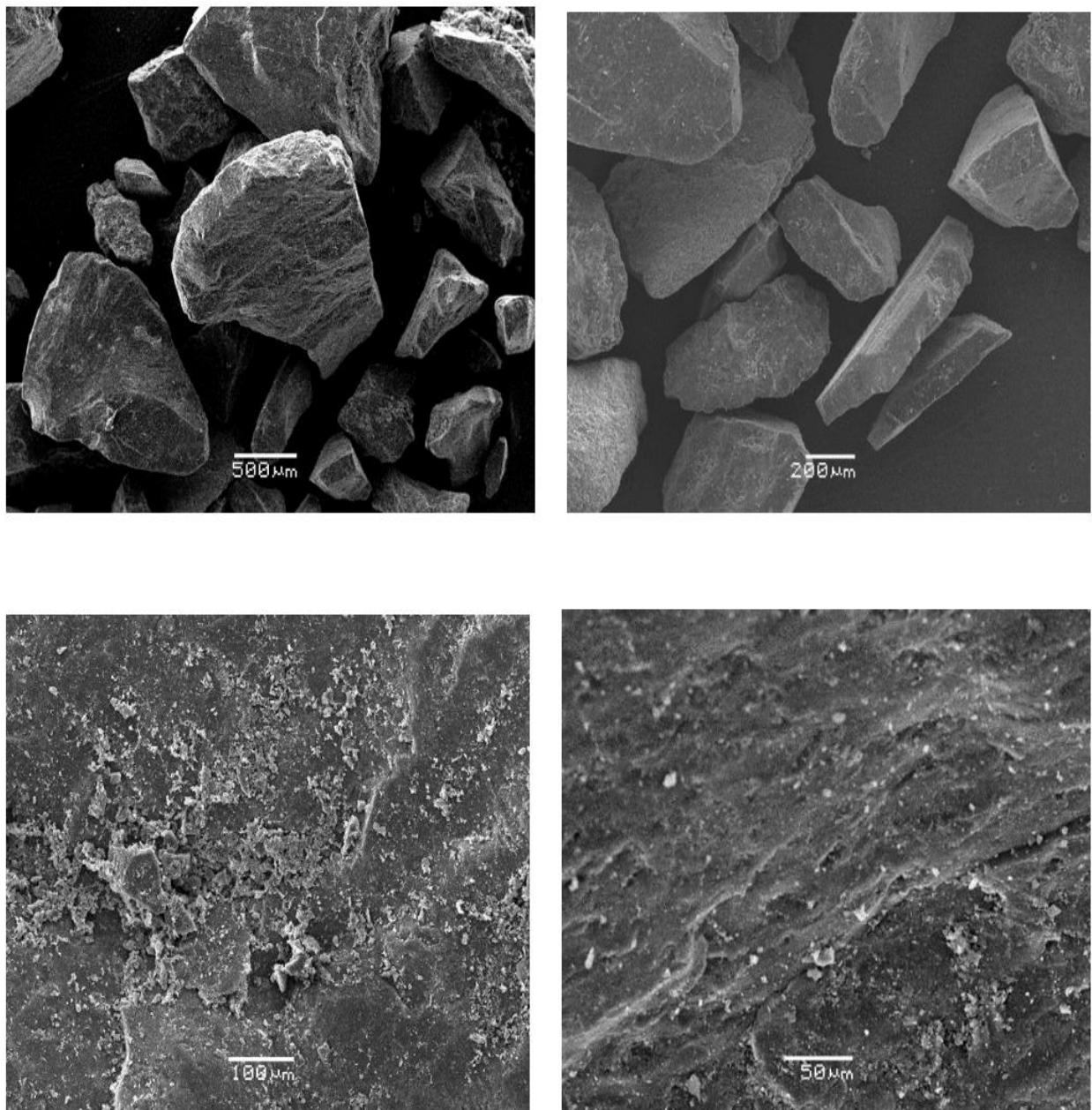


Рисунок 3.8 – форма частиц угля марки Ж при увеличении от 30x до 330x

Микроскопический анализ угольной пыли дает возможность изучить частицы от 1 мкм при увеличении от 10000x (рис. 3.9).

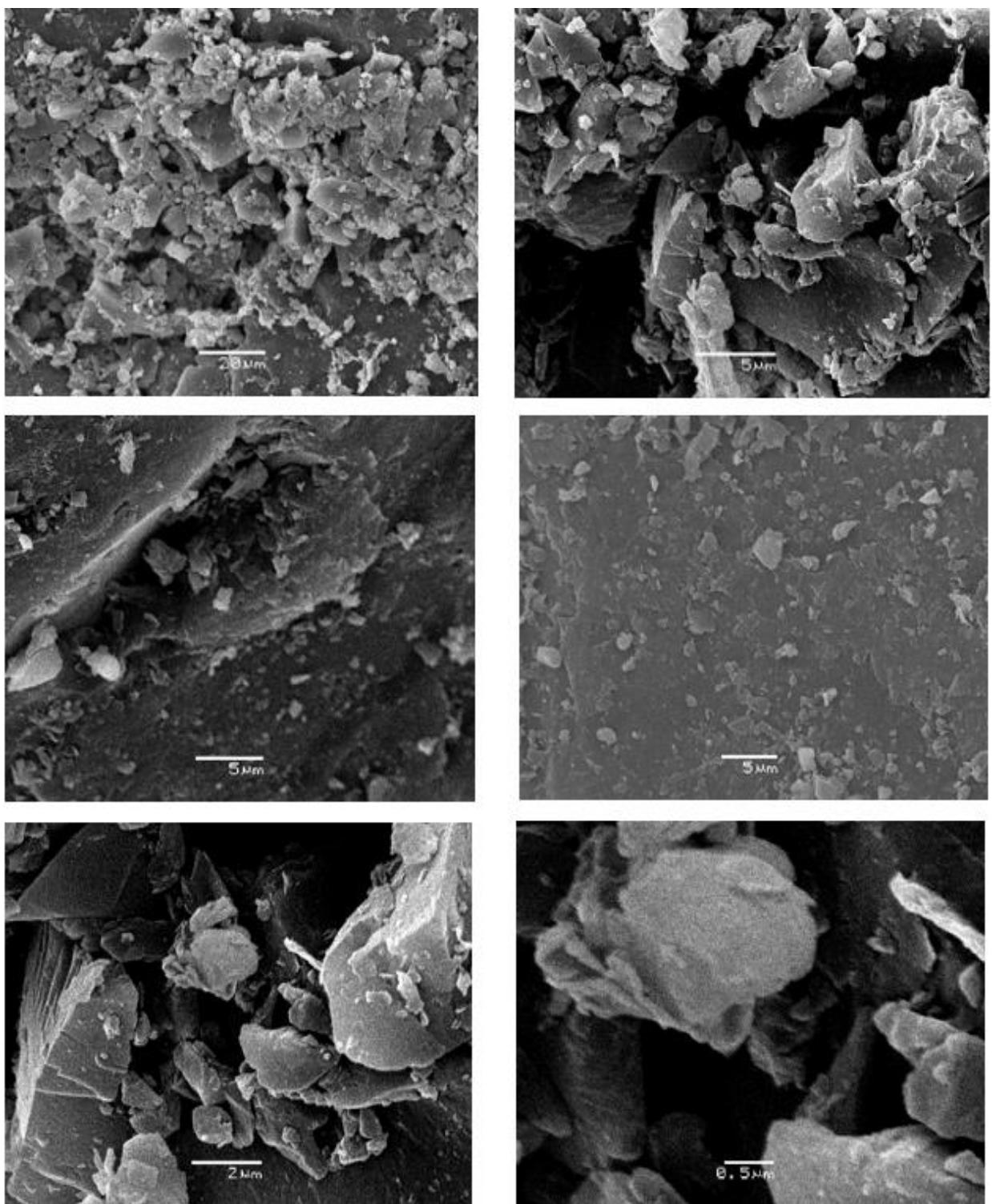


Рисунок 3.9 – форма частиц угля марки Ж при увеличении от 900x до 27000x

Последовательное увеличение одного и того же участка угольной пыли позволяет более наглядно углубиться в его структуру (рис. 3.10).

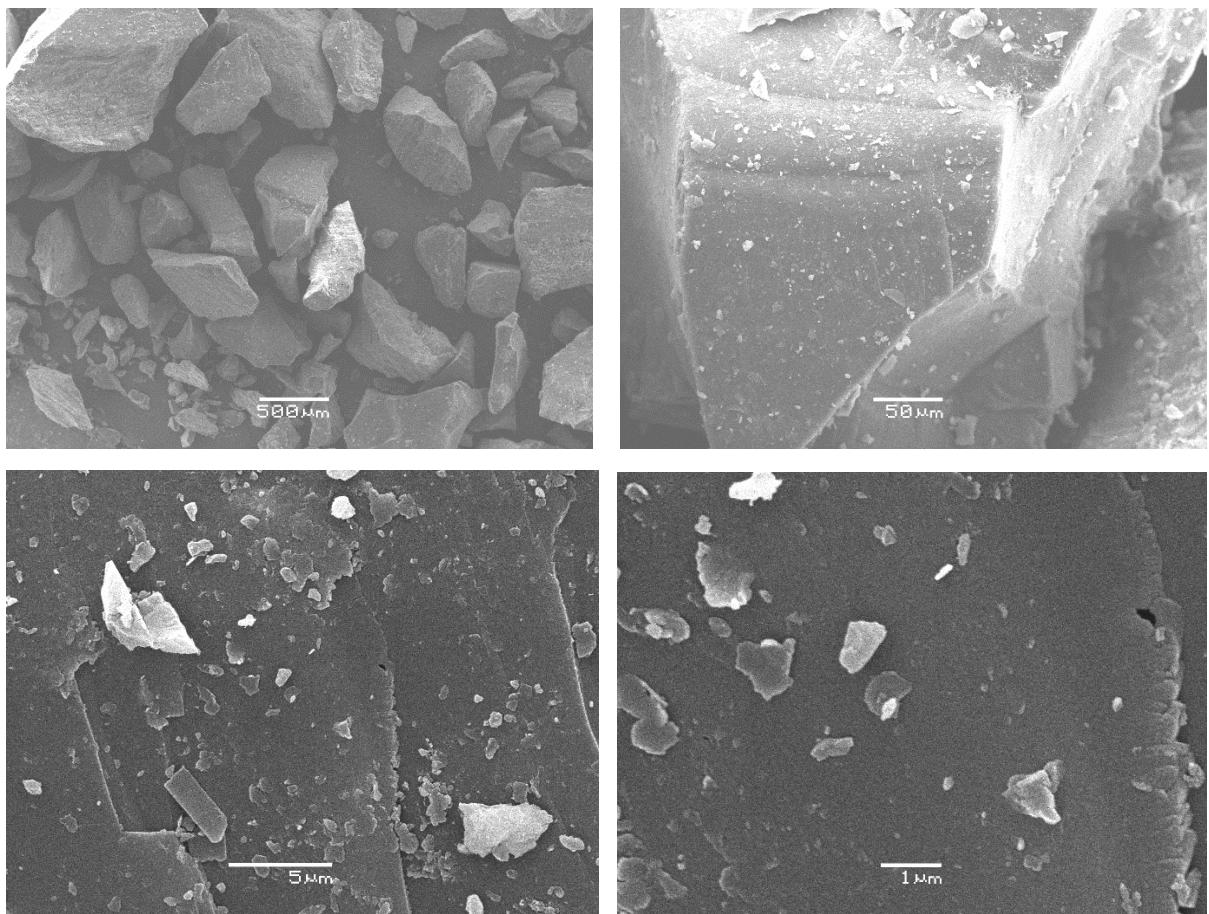


Рисунок 3.10 – последовательное увеличение частицы угля марки Ж
(от 30x до 13000x)

На рис. 3.11, *δ* представлено изображение пылевых частиц, отобранных непосредственно после комбайна, они отличаются от пыли, отобранной с передвижного конвейера, которая подверглась вибрационному воздействию от работы конвейера, в результате чего произошла диспергация более крупных частиц пылевого штыба, и разброс размеров частиц не столь значителен, как для пылевого штыба образца *δ*, для которого максимальный размер частицы составляет 2125 мкм, минимальный – 100 мкм, что более чем в 20 раз меньше максимального размера частицы штыба, отобранного после комбайна.

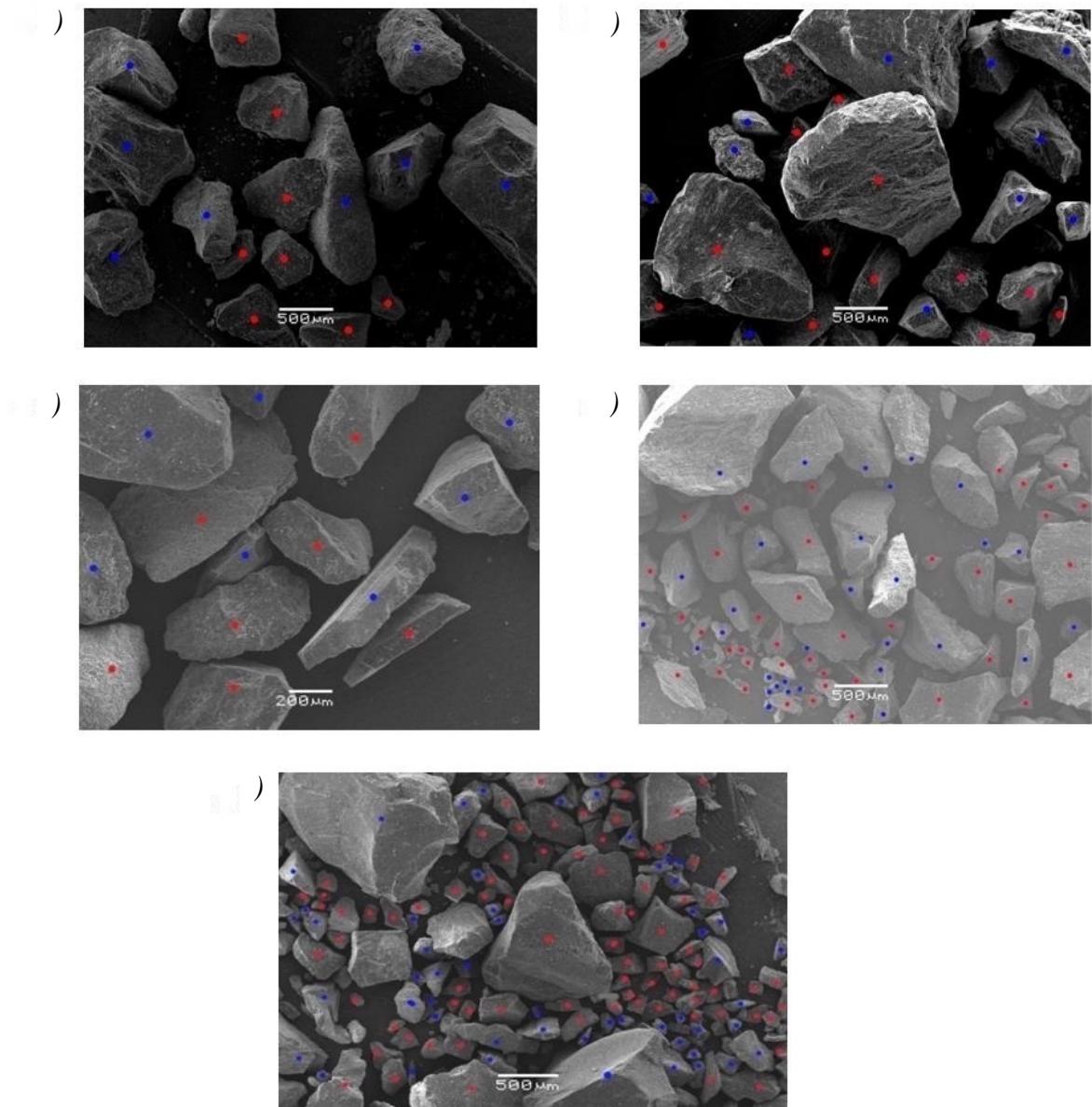


Рисунок 3.11 – частицы пыли коксующегося угля:
а – пыль с пересыпа с конвейера на конвейер на расстоянии 200 м от лавы; б, в – пыль с передвижного конвейера лавы; г – пыль с пересыпа с конвейера на конвейер в магистральном конвейерном штреке на расстоянии 3200 м от лавы; д – уголь из лавы после комбайна; • – изометрические частицы; • – пластинчатые частицы

Было установлено, что количество частиц пыли, имеющих пластинчатую форму, больше, чем количество частиц с изометрической формой, оно составило в среднем 55,4%, причем такое преимущество наблюдалось для всех проб, кроме пробы №3, где соотношение между частицами, имеющими изометрическую форму, и частицами с пластинчатой

формой было одинаковым (табл. 3.6). Эти результаты хорошо согласуются с результатами других авторов [95, 96].

Таблица 3.6 – Распределение видов форм в пробах пылевых частиц угля марки Ж

№ п/п	Количество частиц	Изометрические частицы		Пластинчатые частицы	
		штук	%	штук	%
1	18	8	44,4	10	56,6
2	24	11	45,9	13	
3	14	7	50	7	
4	73	31	42,5	42	
5	123	51	41,5	72	
Всего:	252	110	-	142	-
Среднее значение, %			44,66		55,34

На рис. 3.12, *a, б, в, г, д* представлено изображение пылевых частиц с последующим увеличением центральной части этого изображения. На рис. 3.12, *a, б* представлены изображения двух частиц пыли, расположенных в центральной части рисунка (рис. 3.12, *a*). Крупные частицы (монолит) несут на своей поверхности мелкие частицы (рис. 3.12, *б*), покрывающие монолит по всем его сторонам.

Электронные изображения высокого разрешения (рис. 3.12, *в, г, д*) показывают, что частицы с аэродинамическим диаметром 5–10 мкм являются носителями большого числа сателлитов размером от 2 до 0,5 мкм.

Рассмотрим изометрическую частицу пыли радиусом 500 мкм (рис. 3.12, *a*), находящуюся в центральной части изображения. На этой частице находится множество устойчивых агрегатных образований более мелких частиц пыли с различным диапазоном аэродинамических диаметров (от 0,5–1 мкм до 30–40 мкм), удерживаемых силами аутогезии (слипание частиц пыли за счет молекулярных взаимодействий) [27, 84].

Возникает вопрос: при каком аэродинамическом диаметре агрегатного образования пылевых частиц силы гравитации, действующие на агрегатное образование, будут превышать силы аутогезии, в результате чего агрегатное

образование будет отрываться от монолитной частицы? Для этого выполним следующие расчеты.

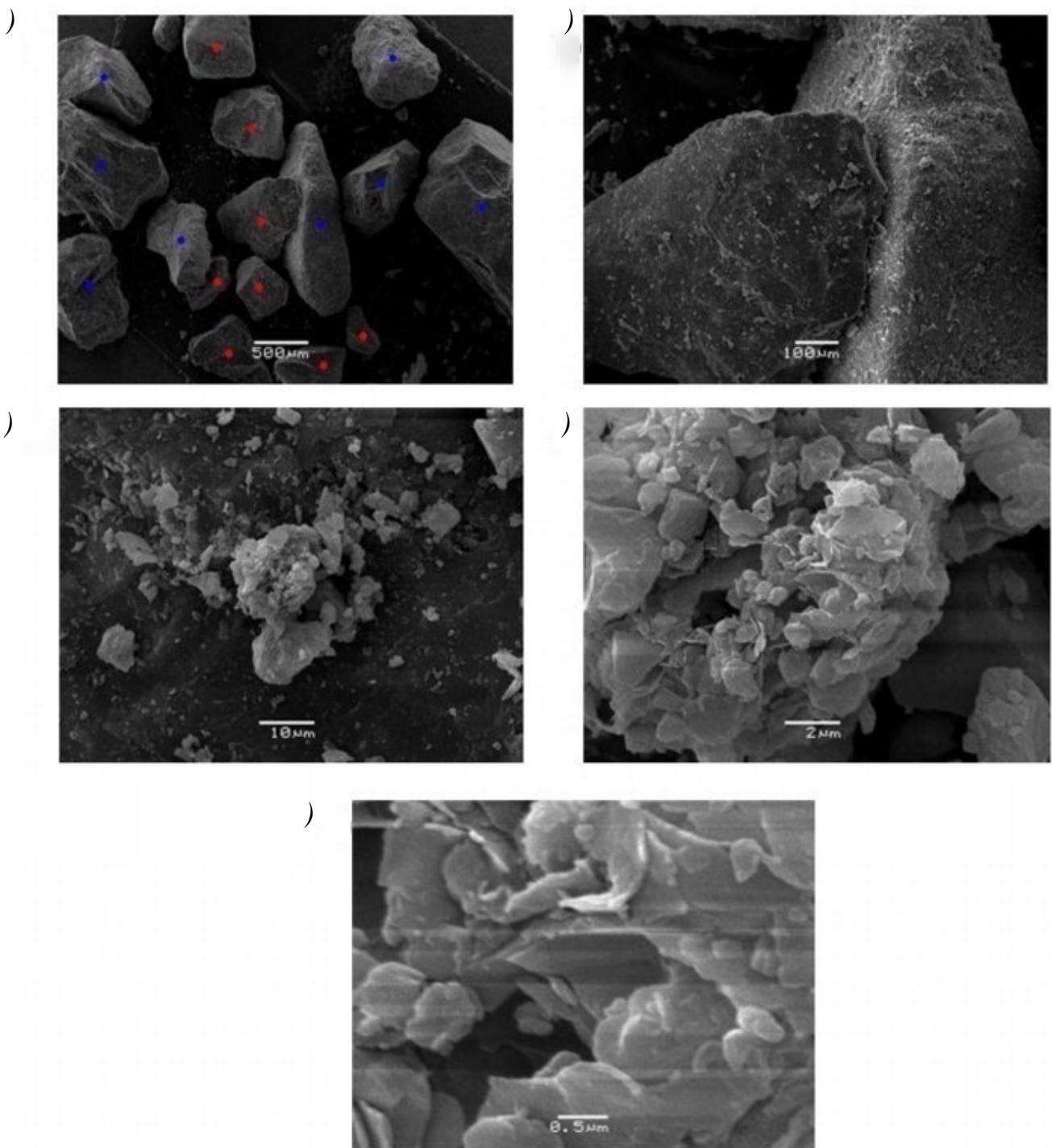


Рисунок 3.12 Форма пылевых частиц угля марки Ж в последовательном приближении

Сила аутогезии F_K , то есть слабых аттракционных сил, действующих между любыми молекулами, может быть рассчитана по формуле Лондона-Ван-дер-Ваальса [15, 84]

$$F_K = \frac{A}{6} \cdot \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2) d^2}, \quad (3.8)$$

где A – константа Гамакера, Дж, для углерода (графит), $A = 3,7 \cdot 10^{-20}$;

d – величина зазора между частицами (для сил Ван-дер-Ваальса принимается расстояние $d = 0,4$ нм = $4 \cdot 10^{-10}$ м);

R_1 и R_2 – радиусы большой и маленькой частиц соответственно, мкм = 10^{-6} м.

Сила тяжести F_g (гравитационная сила) направлена вертикально вниз и рассчитывается по известной формуле

$$F_g = mg = \nu \rho g, \quad (3.9)$$

где m и ν – масса и объем частицы, g – ускорение свободного падения, ρ – плотность частицы.

Были рассчитаны силы Ван-дер-Ваальса и силы гравитации (табл. 3.7). В расчетах $\rho = 2000$ кг/м³; $g = 9,81$ м/с²; $\nu = 4/3(\pi R^3)$, м³.

Таблица 3.7 – Сравнение сил Ван-дер-Ваальса и сил гравитации для различных радиусов пылевых частиц

№ п/п	Радиусы частиц, мкм		Силы Ван- дер-Ваальса, F_K , Н	Силы гравитации, F_g , Н	F_K/F_g	$\frac{F_{K_i}}{F_{g_i}} \div \frac{F_{K_{(i+1)}}}{F_{g_{(i+1)}}}$
	R_1	R_2				
1	2	3	4	5	6	7
1	500	1	$1,035 \cdot 10^{-8}$	$8,2 \cdot 10^{-14}$	126219,5	-
2	500	2	$2,07 \cdot 10^{-8}$	$6,5 \cdot 10^{-13}$	31846	3,9
3	500	17	$1,71 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-10}$	427,5	74,5
4	500	35	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$3,52 \cdot 10^{-9}$	96,6	4,4
5	500	60	$5,58 \cdot 10^{-7}$	$1,77 \cdot 10^{-8}$	55,96	3,06
6	500	100	$8,6 \cdot 10^{-7}$	$8,2 \cdot 10^{-8}$	18,69	3,0
7	500	200	$1,48 \cdot 10^{-6}$	$6,56 \cdot 10^{-7}$	4,01	4,66
8	500	354	$2,159 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	1,054	3,81
9	500	500	$2,604 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	0,451	2,3
10	500	400	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^{-6}$	0,779	0,59
11	1500	400	$3,28 \cdot 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^{-6}$	1,11	0,7
12	3000	400	$3,67 \cdot 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^{-6}$	1,24	0,9

Примечание: i – номер варианта расчета в колонке 1, $i = 1, \dots, 11$.

Анализ данных табл. 3.7 показывает, что при малых значениях радиусов частиц (порядка 1 мкм) силы межмолекулярного притяжения превышают силы гравитации в 126219 раз; при увеличении радиуса частицы в два раза превышение сил межмолекулярного взаимодействия над силами гравитации снижается до 31846 раз, то есть превышение сил межмолекулярного взаимодействия уменьшилось в 4 раза (обратно пропорционально квадрату радиуса). При радиусе частицы 100 мкм это превышение составляет 10 раз, и при радиусе частицы 354 мкм силы гравитации превышают силы Ван-дер-Ваальса в 1,7 раз, что свидетельствует о том, что это максимальный размер частиц пыли, удерживаемых силами аутогезии на монолитной пылевой частице.

Однако на рис. 3.12, б частиц с радиусом 354 мкм, прикрепленных к монолитной частице, нет. Нет там и более мелких частиц, радиусами 200, 100, 60, 35 мкм. Самая крупная частица, удерживаемая на монолитной частице, имеет радиус 17 мкм, при этом значение сил Ван-дер-Ваальса для этой частицы в 12 раз меньше, чем для частицы радиусом 354 мкм. Для частицы радиусом 17 мкм силы межмолекулярного взаимодействия превышают силы гравитации в 74 раза [84]. Поскольку более крупных частиц, чем частицы с радиусом 17 мкм, удерживаемых на монолите, нет, то примем это за равновесное соотношение сил когезии и гравитации, а значит, существуют силы, которые противодействуют силам аутогезии, и величина этого противодействия для радиуса частицы 17 мкм: $1,71 \cdot 10^{-7} - 4,0 \cdot 10^{-10} = 1,706 \cdot 10^{-7}$, то есть эти силы противодействия сопоставимы по своему значению с силами аутогезии [84].

Между частицами дисперсной фазы существуют силы отталкивания электростатической природы, которые обуславливают агрегативную устойчивость дисперсных структур [15, 84]. При сближении двух заряженных пылевых частиц действуют одновременно межмолекулярные силы притяжения и электростатические силы отталкивания, препятствующие агрегации частиц пыли. Силы отталкивания не проявляются на больших

расстояниях и возникают только тогда, когда взаимно перекрываются диффузные слои пылевых частиц. Можно сделать предположение, что при радиусах частиц заведомо меньше 17 мкм силы межмолекулярного взаимодействия превосходят силы отталкивания электростатической природы, а при радиусах больше 17 мкм силам Ван-дер-Ваальса противостоит стабилизирующее влияние электростатических отталкиваний [84].

Выполненные исследования согласуются с теорией ортокинетической коагуляции (прилипание мелких частиц к крупным той же природы) и электростатической составляющей расклинивающего давления, представленной в теории ДЛФО (Б. В. Дерягина, Л. Д. Ландау, Э. В. Фервея, Д. Д. Овербека), что между частицами дисперсной фазы существуют силы отталкивания электростатической природы, которые обуславливают агрегативную устойчивость дисперсных структур. При сближении двух заряженных пылевых частиц действуют одновременно межмолекулярные силы притяжения и электростатические силы отталкивания, препятствующие агрегации частиц пыли. Силы отталкивания не проявляются на больших расстояниях и возникают только тогда, когда взаимно перекрываются диффузные слои пылевых частиц [84].

Следует уточнить, что частица радиусом 17 мкм, выбранная для сравнения соотношений сил межмолекулярного взаимодействия с силами гравитации, является чуть ли не единственным крупным агрегатным образованием на монолитной частице пыли. Следующая после нее по крупности частица имеет радиус 13 мкм. Все же остальные частицы гораздо меньше указанных, и имеют радиус около 1 мкм и меньше, т. е. существует значительный разрыв в выбранных нами для рассмотрения радиусах частиц от 1 мкм до 13–17 мкм [84]. Тогда можно уточнить, что и в диапазоне радиусов частиц от 1 мкм до 13–17 мкм силы отталкивания превышают силы притяжения. Притяжение крупных частиц радиусом 17 мкм обусловлено, возможно, капиллярными эффектами или химическими взаимодействиями. Теоретически оценка когезии еще очень приблизительна, что объясняется не

только несовершенством уравнений, по которым рассчитываются силы межмолекулярных связей, но и тем, что невозможно оценить реальное число связей межмолекулярного взаимодействия [84].

Из полученных расчетных данных (табл. 3.7) следует, что даже при увеличении диаметра большой частицы до 1500 и 3000 мкм критический радиус мелких частиц, которые могут быть удержаны за счет сил аутогезии, остается примерно тем же — 354 мкм. Это связано с тем, что сила аутогезии зависит в основном от радиуса мелкой частицы и расстояния между частицами, а не от радиуса большой частицы [84].

Установленное расклинивающее давление в пылевых частицах угля марки Ж хорошо согласуется с теорией С.Б. Романченко о самодиспергации частиц твердой дисперсной фазы рудничных аэрозолей [71]. В результате эффекта саморасширения пор во всех фракциях пыли вплоть до самодиспергации частиц угольной пыли происходит резкое увеличение площади поверхности в частицах, в результате чего активизируются химические реакции и физические процессы, т. е. активизируется газовыделение с обнаженной поверхности частицы, окислительные процессы на обнажаемых поверхностях и порах и другие преобразования, увеличивающие сорбционную способность угольной пыли.

Полученные результаты могут быть применены для исследования динамики аэрозолей при решении задач противопылевой вентиляции [30, 32, 43, 71] в сочетании с оценкой состояния аэрогазодинамических процессов на угольных шахтах [40, 44, 45]. Исследование процессов образования пылевых частиц, выпадения их из потока, изменения размеров и массы витающих частиц при взаимодействии друг с другом и газовой средой являются основой для разработки технико-технологических решений по предупреждению взрывов метанопылевоздушных смесей в подземных горных выработках [62, 82, 85, 91, 92].

3.4. Термогравиметрический анализ угольной пыли

Термогравиметрия – метод, в котором измеряется изменение массы образца в зависимости от температуры или времени. Этот метод позволяет исследовать физические и химические процессы, такие как фазовые переходы, абсорбция, десорбция, деструкция и реакция твердых веществ с газами. Результатом анализа являются ТГ-кривые— зависимости массы навески (или изменения массы навески) от температуры или времени. Производная от ТГ-сигнала (скорость изменения массы), представляемая кривой ДТГ, позволяет установить момент времени или температуру, при которой изменение веса происходит наиболее быстро.

В области исследований угля термогравиметрический анализ используется в рамках отнесения угольной пыли каждого шахтопласта к взрывчатой. При изотермическом нагреве ($T=900^{\circ}\text{C}$) в муфельной печи в течение 7 минут определяется выход летучих веществ V^{daf} , % (по ГОСТ Р 55660-2013 – как величина потери массы образца, выраженная в процентах) и масса зольного остатка [71, 73].

Нагрев и измерение массы образца с шагом времени и строится TG -кривая: зависимость массы образца, как функции температуры [73]:

$$M=F(T) \quad (3.10)$$

Кроме TG -кривых экспериментально получают $D TG$ -кривые (зависимость скорости потери массы)

$$dM/dt = f(T) \quad (3.11)$$

Исследования образцов угля марок Е-5, ГЖ и А проводились на метрологически аттестованном оборудовании – термовесах ТГА-951, входящих в термоаналитический комплекс «Duont-9900»; скорость нагревания - $20^{\circ}\text{C}/\text{мин}$; атмосфера – аргон (расход газа – 50мл/мин); температурный диапазон нагревания – от 30 до 1200°C [73].

Для подтверждения наличия тяжелых углеводородов в углях определенных марок были проведены термогравиметрические исследования

(рис. 3.13–3.16) изменения массы навесок угля (марки ГЖ, Ж, А) при изменении их температур.

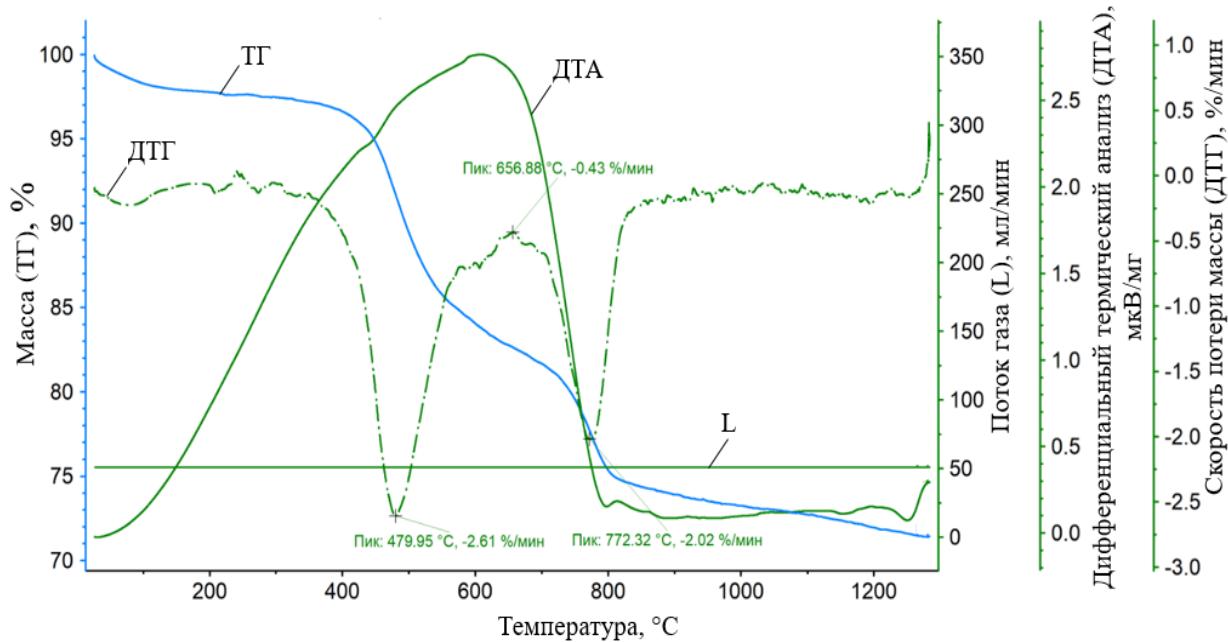


Рисунок 3.13 – Термогравиметрический анализ (ТГА) угля марки Ж (пласт Е-5)

(ТГ – масса, %; ДТГ – скорость потери массы, %/мин; ДТА – дифференциальный термический анализ, мВ/мг)

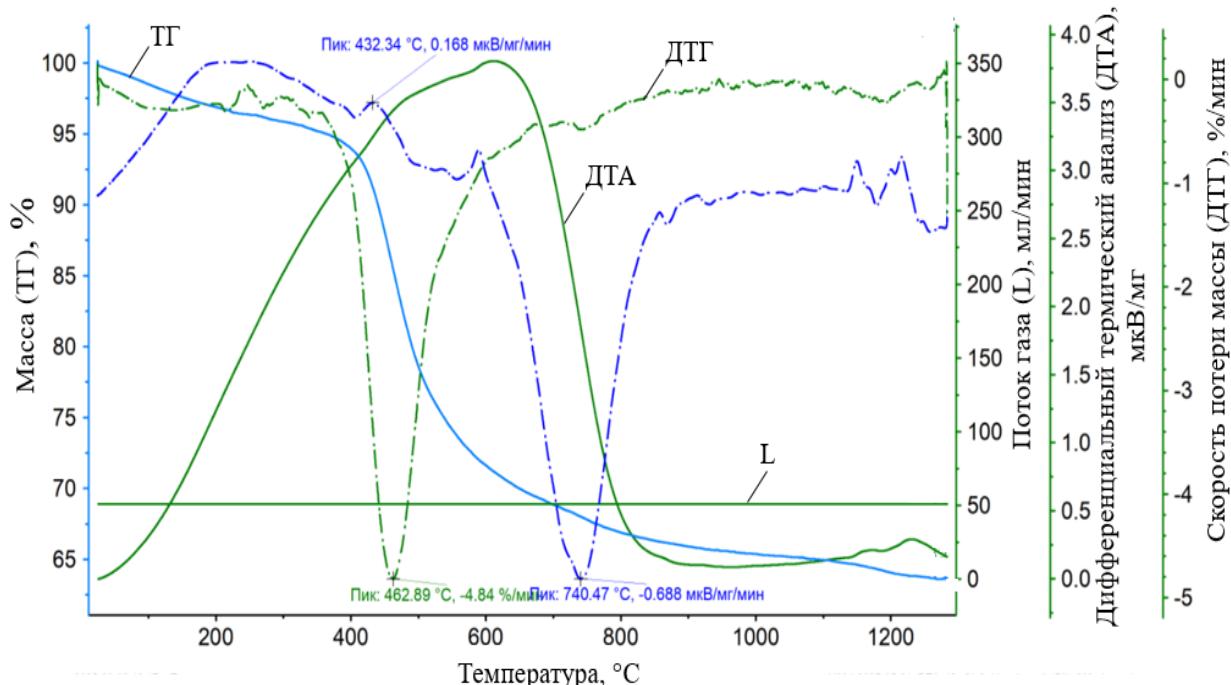


Рисунок 3.14 – Термогравиметрический анализ (ТГА) угля марки ГЖ (пласт «Поленовский»)

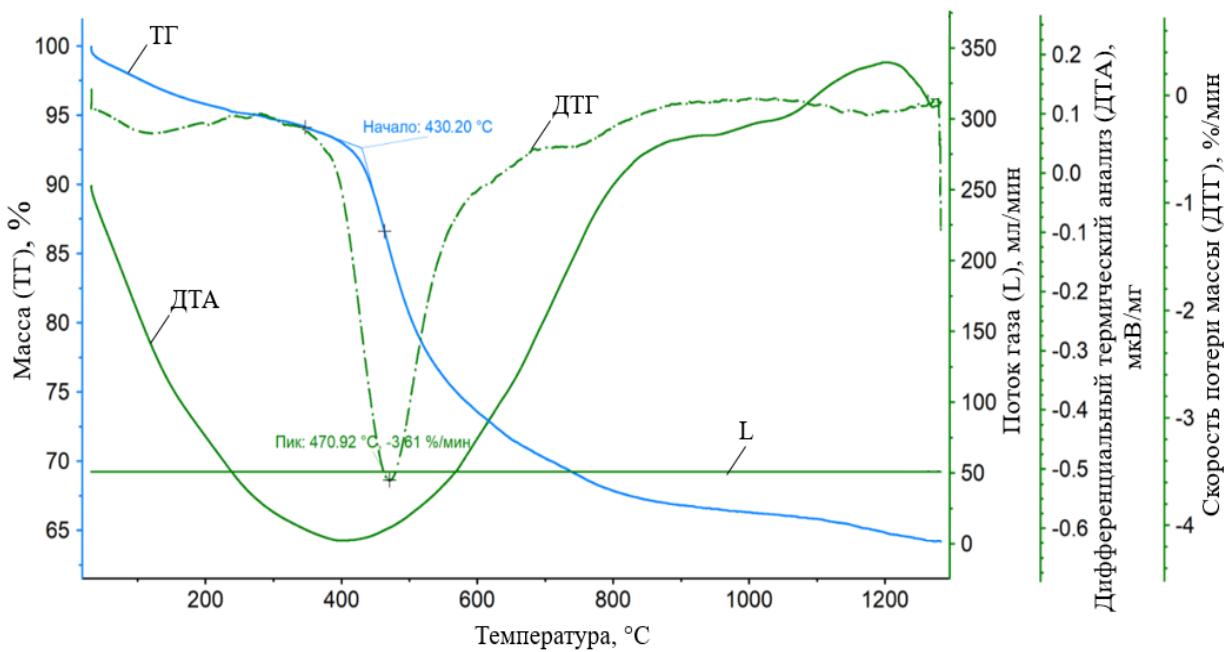


Рисунок 3.15 – Термогравиметрический анализ (ТГА) угля марки ГЖ (пласт «Болдыревский»)

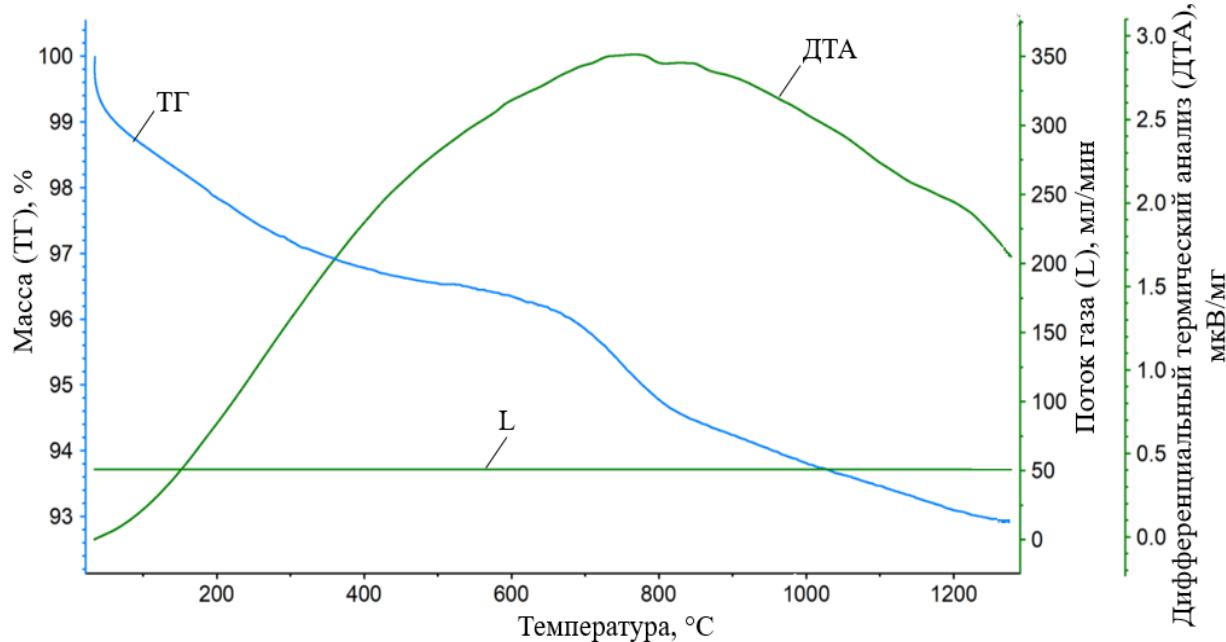


Рисунок 3.16 – Термогравиметрический анализ (ТГА) угля марки А

Потеря массы образца (рис. 3.13) имеет ступенчатый характер. Первичная потеря массы около 4% происходит при температуре около 350-370 °C и связана с испарением внешней и гигроскопической влаги. Вторая потеря массы имеет две ступени, как показывает график ДТГ (первая производная от ТГ). Первая ступень охватывает диапазон температур около 350-660°C, вторая

– около 700-870°C. Согласно графику кривой дифференциального термического анализа (ДТА), первый пик (479,95 °C) связан с эндотермическими процессами, требующими поглощения тепла (испарение, десорбция газов), второй (772,32 °C) – с экзотермическими процессами, сопровождающимися выделением тепла. Разделены ступени температурой 650-670°C. Всего на двух ступенях происходит потеря массы порядка 30%, в том числе – на первой ступени около 16%, на второй – около 14%. Потеря массы на второй ступени связана с окислительными процессами тем кислородом, который находился в угле, так как исследования проводились в атмосфере аргона. Нас интересует потеря массы, связанная с процессами десорбции газов.

Известно, что при разрушении угля выделение углеводородов из углей происходит в соответствии с их сорбционными свойствами: первым выделяется метан, затем при нагревании или измельчении угля начинают выделяться глубокосорбированные углевороды. Первая потеря массы на анализируемом рисунке связана с испарением влаги. Молекулярная масса воды составляет 18 атомных единиц. На ступени потери массы, связанной с десорбцией углеводородов, градиент скорости потери массы в 3-4 раза превышает градиент потери массы при испарении влаги. Значит, при десорбции испаряется что-то тяжелое, и это не метан, так как молекулярная масса метана меньше молекулярной массы воды. Следовательно, на второй ступени потери массы испаряются тяжелые углеводороды.

Аналогичные процессы десорбции тяжелых углеводородов наблюдаются на рис. 3.14, 3.15, так как в углях марки ГЖ присутствуют тяжелые углеводороды. Самая маленькая потеря массы в диапазоне температур от 100 до 800°C наблюдается в углях марки А (рис. 3.16) (из-за отсутствия углеводородов в угле), составляя 7%, что в 5 раз меньше в сравнении с марками Ж и ГЖ.

Выводы

1. Анализ состава индивидуальных углеводородов к их сумме показывает, что в обоих угольных бассейнах (Кузбасс и Донбасс) в углях марки Ж количество пропана и бутана превышает содержание остальных газов в 3-7 раз. Расчет относительной метанообильности выемочных участков и подготовительных выработок по разности природной метаноносности разрабатываемого пласта и остаточной метаноносности угля марок Ж, КЖ приводит к недостоверному (заниженному) значению фактической относительной метанообильности, что не отражает фактического состояния взрывоопасности выработок [85].

2. Установлено, что количество углеводородов, извлеченных из угольной пыли ($19,5 \text{ см}^3/\text{кг}$), на 23 % больше, чем количество углеводородов, извлеченных из угля ($15,8 \text{ см}^3/\text{кг}$). Содержание углеводородов, извлеченных из угля от метана до пропана ($10,16 \text{ см}^3/\text{кг}$) составляет 64,3 %, а из угольной пыли содержание извлеченных аналогичных углеводородов составляет всего лишь 16,7 %, а остальные 83,3 % представлены тяжелыми углеводородами от бутана до гексана т.е. угольная пыль адсорбирует преимущественно бутан, пентан, гексан [85]. Плотность этих газов составляет от 2,703 до 3,638 кг/нор.м³, поэтому они оседают на почву выработки и задерживаются в ламинарном пограничном слое воздушного потока, проходящего по выработке.

3. Выявлено, что при всех температурах проведенной термодегазации (150, 200, 250 °C) из всех фракций пыли десорбируются бутан, пентан, гексан в количестве, значительно превышающем количество десорбируемого метана. Наибольшее количество десорбированного бутана составило значение, равное $9,350 \text{ см}^3/\text{кг}$.

4. При работе комбайнов, шахтных ленточных конвейеров и другого оборудования на выемочном участке могут возникать температуры воспламенения тяжелых углеводородов. Таким образом, от источника

теплового импульса могут сначала вспыхнуть тяжелые углеводороды, которые дадут искру для взрыва метана. При взрыве метана находящаяся в выработке угольная пыль поднимается в воздух, нагревается и из нее выделяются сорбированные ею тяжелые углеводороды, которые придают значительное усиление мощности взрыва метана и угольной пыли [78].

5. Установлено, что количество частиц пыли, имеющих пластинчатую форму больше, чем количество частиц с изометрической формой, оно составило в среднем 55,4%.

6. Для частиц радиусом 1 мкм силы аутогезии в 126219 раз превышают силы гравитации, что подтверждает их главенствующую роль при маленьких радиусах частиц; при увеличении радиуса частицы в два раза превышение сил межмолекулярного взаимодействия над силами гравитации снижается до 31846 раз. Электронные изображения высокого разрешения показывают, что частицы с аэродинамическим диаметром 5–10 мкм являются носителями большого числа сателлитов размером от 2 до 0,5 мкм [84].

7. Существуют силы, противодействующие силам аутогезии, которые обуславливают агрегативную устойчивость дисперсных структур, и величина этого противодействия равна для радиуса частицы 17 мкм $1,706 \cdot 10^{-7}$.

8. Потеря массы образца угля марки Ж при термогравиметрическом анализе имеет ступенчатый характер. Первичная потеря массы около 4% происходит при температуре около 350-370 °С и связана с испарением внешней и гигроскопической влаги. Вторая потеря массы имеет две ступени в диапазоне температур около 350-660 °С, и 700-870 °С. Первый пик (479,95 °С) связан с эндотермическими процессами, второй (772,32 °С) – с экзотермическими процессами. Всего на двух ступенях происходит потеря массы порядка 30%, в том числе – на первой ступени около 16%, на второй – около 14%.

4. РАЗРАБОТКА МЕТОДА СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЯЖЕЛЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ НА СОЗДАНИЕ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ СИТУАЦИЙ НА ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

4.1. Разработка метода снижения области воспламенения тяжелых углеводородов за счет увеличения содержания балластных газов

Известно, что газ угольных пластов зависит от свойств пластов и состоит в основном из метана (до 90-100%) с примесью диоксида углерода, азота, водорода, гомологов метана, оксида углерода [41, 42, 112]. При разработке угольных пластов в первую очередь выделяется метан, как более подвижный в гомологическом ряду углеводородов, имеющий в структуре своей молекулы наименьшее количество атомов углерода и водорода по сравнению с этаном, пропаном, бутаном и т.д. После истечения из пласта основной массы метана начинают выделяться тяжелые углеводороды. Естественно предположить, что остаточную газоносность угля составляют именно тяжелые углеводороды, особенно, как это выяснилось, характерно для углей марок Ж, КЖ, ОС [85].

При добыче угля, его разрушении, измельчении, нагревании вместе с углеводородами выделяются и другие горючие (водород, оксид углерода) и негорючие газы (азот, диоксид углерода). Поэтому для всесторонней оценки роли тяжелых углеводородов в создании пожароопасных ситуаций необходимо учитывать как горючие, так и негорючие компоненты в остаточных газах угольных пластов. Наличие негорючих компонентов в остаточных газах пластов снижает концентрацию горючих, нейтрализует их взрывчатые свойства и, как следствие, снижает степень их пожароопасности [85].

В исследованиях, проведенных Лебедевым В.С. и Скопинцевой О.В. [41, 42], были получены данные по содержанию основных неуглеводородных и углеводородных компонентов остаточных газов разных марок углей, выделяющихся при температуре 200°C. Из горючих компонентов определялось содержание углеводородов (от метана до гексана), кислорода, водорода; из негорючих – содержание азота и диоксида углерода [85].

Были исследованы угли из буроугольных месторождений Дальнего Востока, угольные пласты пермского возраста Кузнецкого угольного бассейна, каменноугольного возраста Донецкого угольного бассейна. Из бурых углей исследовались три вида углей: Б(1) – Павловский разрез (Приморье), Б(2) - Тавричанское месторождение (Приморье); Б(3) - Новиковское месторождение (Сахалин). Из углей средней стадии метаморфизма исследовалось пять видов углей: Д - пл. Сычевский 111 (Кузбасс), Ж(1) - пл. Е-5, Осинниковская (Кузбасс), Ж(2) - пл. Е-1, Осинниковская (Кузбасс), Ж(3) - пл. К-5, Осинниковская (Кузбасс), ОС - пл. 21, Алардинская (Кузбасс). Из углей высокой стадии метаморфизма исследовалось два вида углей: ПА - шахта 222, Чистяково-Снежнянский район (Донбасс), А - шахта Алмазная, Гуково Ростовской области (Восточный Донбасс) [85].

Расчет концентрации балластных газов производится по формулам [52]:

$$L_{n\delta} = L_n \times \frac{100 \times \varepsilon}{100 + L_n \times \frac{k}{1-k}} \quad (4.1)$$

$$L_{\delta\delta} = L_\delta \times \frac{100 \times \varepsilon}{100 + L_\delta \times \frac{k}{1-k}} \quad (4.2)$$

$$\varepsilon = 1 + \frac{k}{1-k} \quad (4.3)$$

где k – балластная составляющая, доли ед.;

$L_{n\delta}$ – нижний концентрационный предел взрываемости с учетом балластной составляющей;

$L_{\delta\delta}$ – верхний концентрационный предел взрываемости с учетом балластной составляющей;

L_n – нижний теоретический предел взрываемости газа, %;

L_δ – верхний теоретический предел взрываемости газа, %.

По результатам исследований построены графики соотношений горючих и негорючих компонентов в остаточных газах угольных пластов. На

рис. 4.1 показаны соотношения компонентов для углей низкой и высокой стадий метаморфизма (бурых углей и антрацитов). На рис. 4.2 отражены соотношения горючих и негорючих компонентов в остаточных газах углей средней стадии метаморфизма [85].

Из анализа графических данных (рис. 4.1) следует, что для бурых углей содержание углеводородных газов в остаточных газах углей не превышает 15%, для антрацитов – 3%. При этом содержание CO_2 в остаточных газах бурых углей очень большое (77-80%); для антрацитов и полуантрацитов содержание углеводородных газов (горючих) не превышает 3%, при этом инертного газа N_2 в остаточных газах содержится от 67 до 82%. Из этого следует, что выделяющиеся при нагревании остаточные газы из бурых углей и антрацитов не представляют серьезной пожароопасности в связи с наличием в них высокого содержания балластных негорючих газов [85].

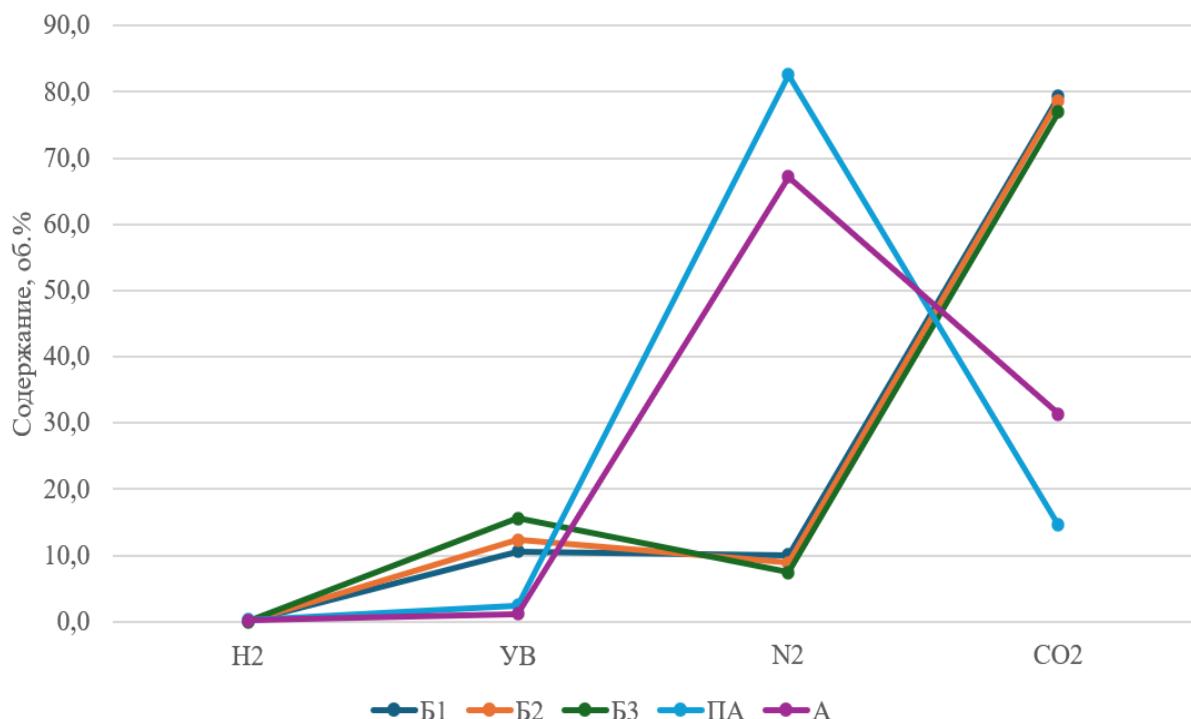


Рисунок 4.1 – Соотношения горючих и негорючих компонентов в остаточных газах углей низкой и высокой стадий метаморфизма

Совсем другая картина наблюдается для остаточных газов углей средней стадии метаморфизма (рис. 4.2). Содержание горючих газов в остаточных газах углей колеблется от 27 до 53%, в то время как содержание балластных

газов достигает наименьшего значения (46,5%) для пласта К-5. Вследствие большого содержания тяжелых углеводородов в остаточных газах углей марок Д, Ж, ОС температура воспламенения остаточных газов будет определяться парциальным давлением горючих газов и малыми значениями низких концентрационных пределов взрываемости тяжелых углеводородов [85].

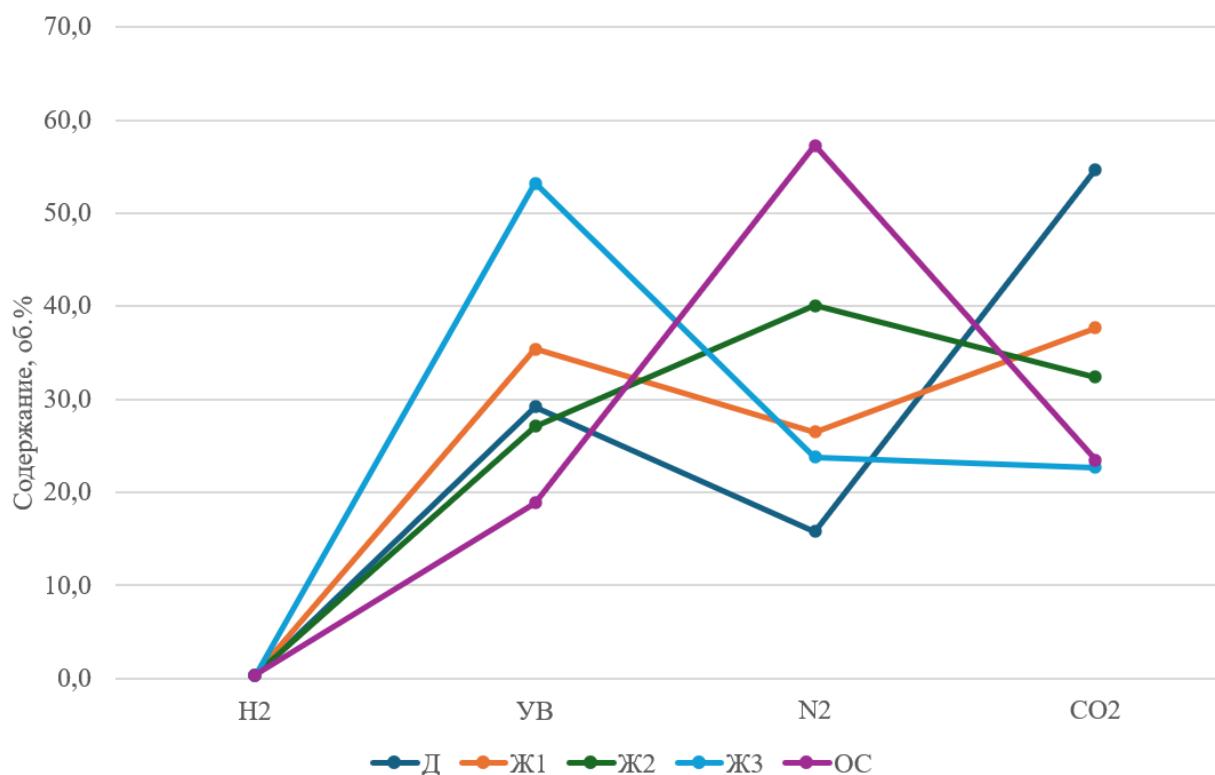


Рисунок 4.2 – Соотношения горючих и негорючих компонентов в остаточных газах углей средней стадии метаморфизма

Для ответа на вопрос: перекрывают ли балластные газы область воспламенения горючих газов, находящихся в остаточных газах углей, были рассчитаны концентрационные пределы взрываемости «чистой» смеси углеводородных газов в остаточных газах исследуемых углей (по формуле Ле Шателье) и – концентрационные пределы взрываемости остаточных углеводородных газов с учетом балластных газов, находящихся в угле [85].

Таблица 4.1 – Расчетные пределы взрываемости «чистой» смеси углеводородов (УВ) и остаточных углеводородных газов с балластными газами

Объект	Марка угля	Расчетные концентрационные пределы взрываемости «чистой» смеси УВ, об%		Содержание балластных газов, об%	Расчетные концентрационные пределы взрываемости остаточных газов с балластными газами, об%	
		Нижний	Верхний		Нижний	Верхний
Павловский разрез (Приморье)	Б(1)	2,9	12,7	89,4	22,0	57,8
Тавричанское месторождение (Приморье)	Б(2)	3	13,2	87,6	20,0	55,1
Новиковское месторождение (Сахалин)	Б(3)	3,1	13,5	84,4	17,0	50,0
Пл. Сычевский 111 (Кузбасс)	Д	1,8	9,3	70,5	9,1	37,7
Пл. Е-5, Осинниковская (Кузбасс)	Ж(1)	2,1	9,3	64,2	9,8	24,6
Пл. Е-1, Осинниковская (Кузбасс)	Ж(2)	2,1	8,7	72,5	13,1	29,8
Пл. К-5, Осинниковская (Кузбасс)	Ж(3)	1,8	8,7	46,5	4,1	16,7
Пл. 21, Алардинская (Кузбасс)	ОС	1,8	9,2	80,8	18,3	36,6
Шахта 222, Чистяково-Снежнянский район (Донбасс)	ПА	4,2	14,1	97,2	61,0	85,4
Шахта Алмазная, Гуково Ростовской области (Восточный Донбасс)	А	5	15	98,6	79,0	92,6

На рис. 4.3 по данным табл. 4.1 отражены области воспламенения исследуемых марок углей, находящиеся между нижним и верхним пределами взрываемости (левая шкала). По другой шкале, справа, отложена концентрация балластных газов, находящихся в остаточных газах угля. Для бурых углей [Б(1), Б(2), Б(3)] и полуантрацитов и антрацитов [ПА, А] области воспламенения полностью перекрываются балластными газами. Для угля марки ОС (пласт 21, шахта «Алардинская») область взрываемости не полностью перекрыта балластными газами, поэтому при концентрации углеводородных газов от 18,3% до 19,2% даже при наличии 80,8% балластных

газов возможен взрыв смеси. И самая опасная ситуация наблюдается для углей марок Д и Ж, для которых содержание балластных газов не перекрывает область воспламенения углеводородов в реальных остаточных газах углей. Согласно проведенному анализу данных (табл. 4.1 и рис. 4.3) следует вывод, что для рассматриваемой марки угля (Ж) требуется повышение содержания балластных газов до уровней, перекрывающих расчетные пределы взрываемости реальных остаточных газов [85].

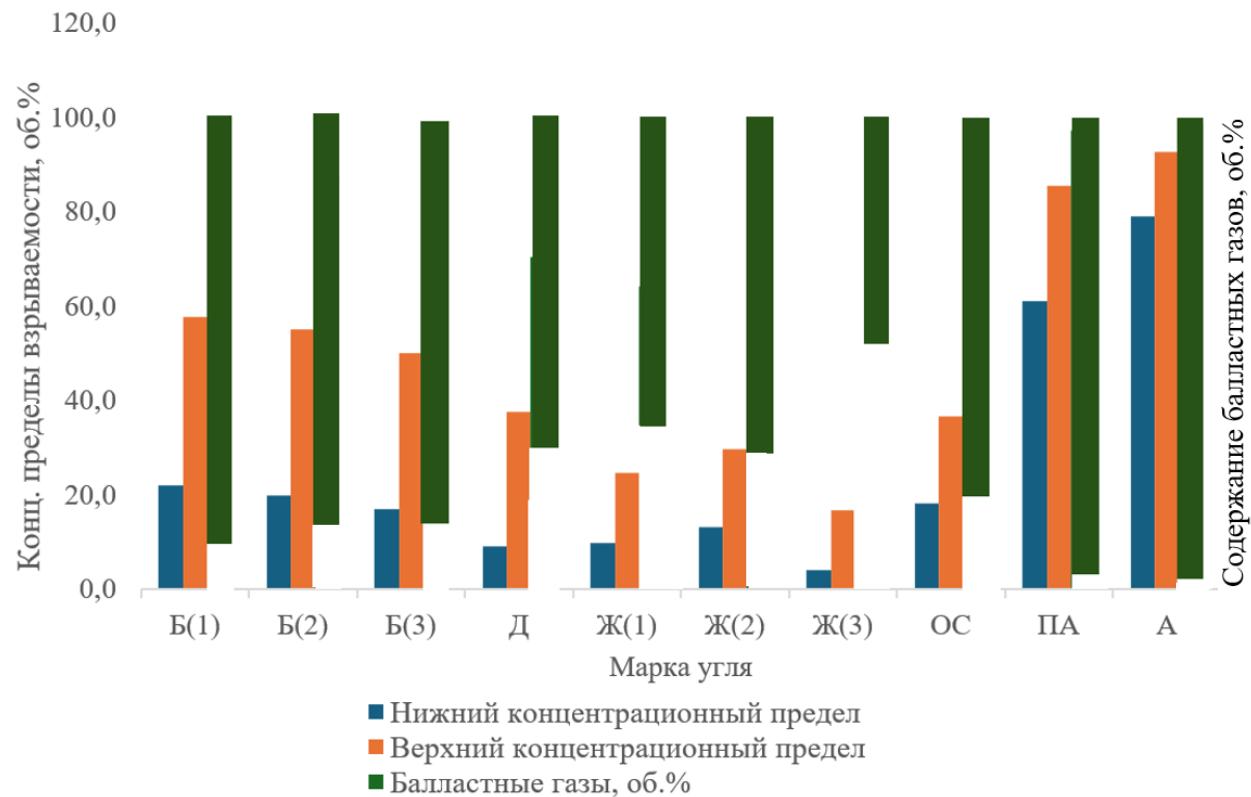


Рисунок 4.3 – Расчетные концентрационные пределы взрываемости остаточных углеводородных газов с балластными газами

Высокое содержание (более 85%) негорючих балластных газов в остаточных газах углей действует комплексно: разбавляет горючие компоненты ниже их порога воспламенения, поглощает теплоту реакции, препятствуя ее самоподдержанию, и снижает скорость химических реакций горения [19, 20, 118]. Все это приводит к тому, что такая газовая смесь теряет способность к горению и классифицируется как негорючая [85].

Поверхностно-активные вещества значительно снижают поверхностное натяжение воды. Это позволяет раствору гораздо эффективнее смачивать

поверхность угля и проникать глубоко в поры и микротрешины, которые недоступны для чистой воды [79, 108, 114, 119]. Улучшенное смачивание блокирует доступ кислорода к активным центрам на поверхности угля. Азот в газонаполненных растворах играет двойную роль: во-первых, как ингибитор для перевода горючей смеси в негорючую, во-вторых, как компонент воздушно-механической пены. При разрушении угля высвобождаемый азот взаимодействует со смачивателем, образуя воздушно-механическую пену, которая герметизирует пространство в объеме разрушенной горной массы. Комбинированное действие ПАВ и газовой фазы обеспечивает глубокую и равномерную обеспыливающую обработку угольного массива [78, 82, 85].

4.2. Разработка методики нейтрализации остаточных газов угля путем обработки угольного массива газонаполненными растворами поверхностно активных веществ (НГНР)

Для повышения пожаровзрывобезопасности при разработке угольных пластов марки Ж путем увеличения содержания балластных газов в остаточных углеводородных газах угольных пластов предлагается нагнетание в угольный пласт газонаполненного раствора поверхностно-активных веществ (ПАВ). В качестве газа, флегматизирующего остаточные углеводородные газы предлагается использовать азот, в качестве ПАВ – смачиватель СП-01. Таким образом, газонаполненный раствор ПАВ представляет собой трехкомпонентную рабочую жидкость, содержащую: воду (в объеме удельного расхода воды от 10 до 30 л/т); растворенный смачиватель СП-01 (с концентрацией от 0,05% до 3%); растворенный азот (с концентрацией от 0,2% до $n\%$, n определяется из расчета перекрытия пределов взываемости остаточных углеводородных газов). Полученная рабочая жидкость нагнетается в скважину под давлением от 1,5 МПа до 30 МПа. После насыщения угольного массива в течение времени от 24 ч до 96 ч массив разрушают, например, рабочим органом комбайна и орошают водой [85].

Газовые пузырьки, распределенные в растворе (часто в виде пены или эмульсии), создают дополнительное расклинивающее давление и способствуют проникновению активного раствора в самые мелкие пустоты пласта. Использование газовой фазы позволяет уменьшить необходимый объем водного раствора, что снижает затраты и уменьшает обводненность массива. Водная фаза раствора обеспечивает охлаждающий эффект, снижая температуру угольного массива [85].

Предлагаемую технологию снижения влияния тяжелых углеводородов на пылевзрывоопасность угольных пластов обозначим, как нейтрализацию остаточных углеводородов угля (флэгматизацию угольных пластов) для предупреждения образования или перевод образовавшейся взрывоопасной среды в негорючую путём нагнетания в высокогазоносные угольные пласты газонаполненных растворов поверхностно-активных веществ (ПАВ), ингибирующих тяжелые углеводороды до концентраций ниже минимально взрывоопасного содержания. В качестве флэгматизатора предлагается использовать инертный газ азот, в качестве ПАВ – СП-01 [85].

В предлагаемой технологии нейтрализации остаточных газов угольных пластов (НГНР) так же, как и при предварительном увлажнении, параллельно забою бурятся скважины, которые поочередно подключаются к оборудованию для нагнетания газонаполненных растворов ПАВ.

Технология НГНР реализуется посредством скважин, которые могут буриться станками БЖ-45 или БЖ-45-100Э как с откаточного и вентиляционного штреков отдельно, так и с обоих штреков одновременно (рис. 4.4).

При расчета параметров технологии нейтрализации остаточных газов угля газонаполненными параметрами пользуются общеизвестными формулами для определения длины скважины; расстояния между скважинами; количества жидкости (м^3), закачиваемой в скважину; продолжительности нагнетания (ч) жидкости в скважину; количества смачивателя, необходимого для обработки угля одной скважиной – формулы

применяются в соответствии с Руководством по борьбе с пылью при расчете параметров предварительного увлажнения угольных пластов [77]. Рассчитанные по этим формулам значения вышеперечисленных параметров приведены в Приложении к настоящему диссертационному исследованию.

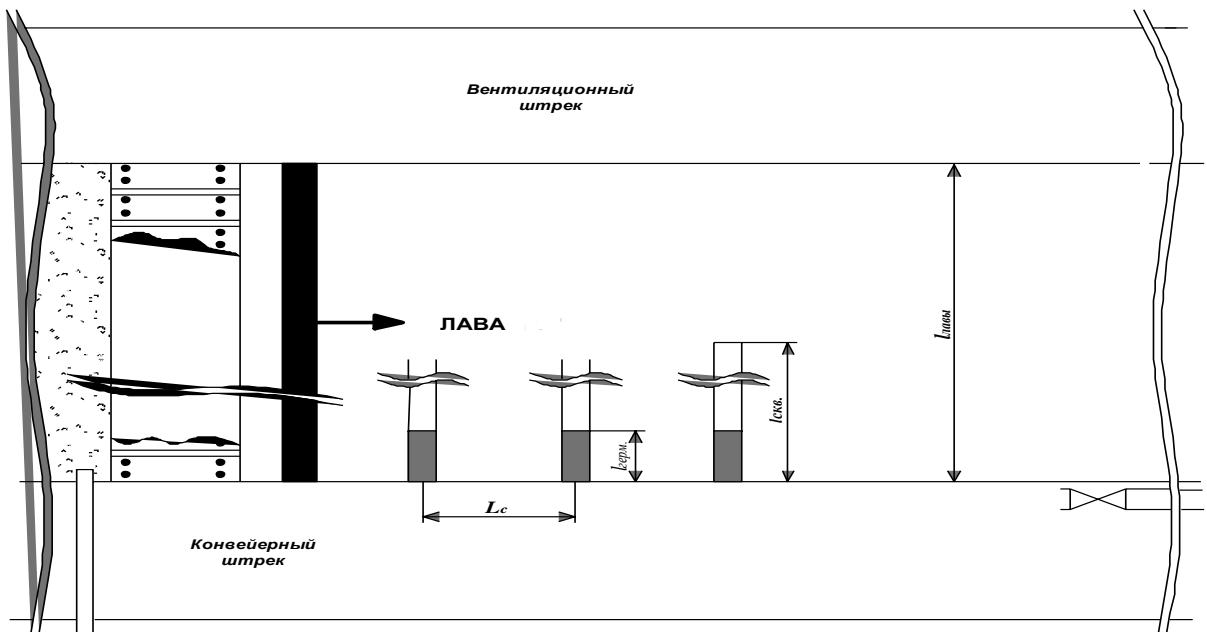


Рисунок 4.4 – Схема бурения скважин в технологии НГНР

Остановимся отдельно на формулах для расчета количества инертного газа, который необходимо растворить в рабочей жидкости, состоящей из воды и смачивателя [81].

$$Q_{ин.газа} = \frac{Q_{скв.} \cdot s \cdot P}{100\%} \quad (4.4)$$

где $Q_{ин.газа}$ – количество инертного газа, л;

s – растворимость газа (рассчитывается при помощи коэффициентов абсорбции Бунзена), %; [81].

P – давление под которым находится газ, МПа.

Объем азота в баллоне объемом $V=40$ л под давлением $P=150$ ат составляет 6000 л или 7,5 кг азота (при $P=1$ ат, $t=20^\circ\text{C}$) [81].

Значение растворимости азота в воде при $P=1$ ат и $t=20^\circ\text{C}$ равняется 1,93% (рассчитано при помощи коэффициентов абсорбции Бунзена) [94].

Коэффициент абсорбции Бунзена (s) — это мера растворимости газа в жидкости: объем газа (приведенный к нормальным условиям: 0 °C и 760 мм рт. ст.), который растворяется в единице объема жидкости при парциальном давлении газа, равном 760 мм рт. ст. (1 атм). Он показывает, сколько газа физически растворилось, и используется для расчета растворимости при других давлениях по закону Генри

$$C = s \cdot Pp, \quad (4.5)$$

где C - концентрация газа, %;

Pp — парциальное давление газа над раствором, атм.

Технологическая схема нейтрализации тяжелых углеводородов угольных пластов средней стадии метаморфизма представлена на рис. 4.5.

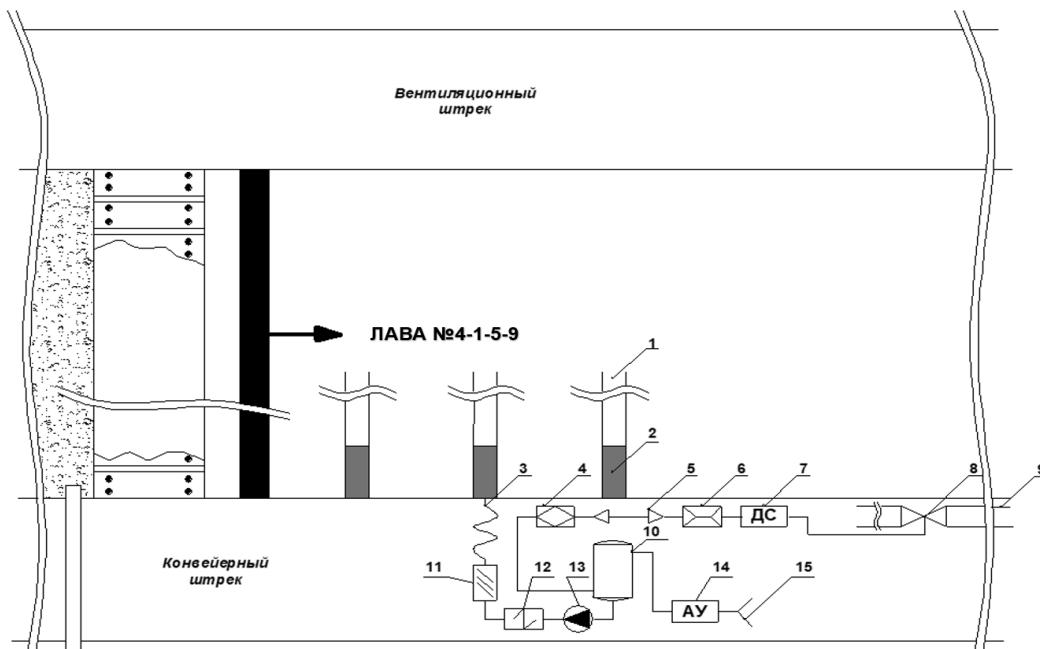


Рисунок 4.5 – Технологическая схема нейтрализации тяжелых углеводородов угольных пластов

1 — скважина; 2 — герметизатор; 3 — шланг гибкий, высоконапорный; 4 — фильтр штрековый; 5 — переходник; 6 — клапан редукционный; 7 — дозатор смачивателя; 8 — вентиль; 9 — пожарно-оросительный трубопровод; 10 — смеситель взрывобезопасного исполнения; 11 — расходомер; 12 — реле давления; 13 — установка для нагнетания раствора УНР-02; 14 — Азотная установка мембранного типа взрывобезопасного исполнения; 15 — воздухозаборник.

4.3 Расчет параметров флегматизации остаточных углеводородов угля при разработке высокогазоносных угольных пластов, опасных по взрывам пыли

Содержание тяжелых углеводородов в углях марок Д, Ж, ОС (табл. 4.1, рис. 4.3) достаточно высокое, что позволяет предположить, что температура воспламенения остаточных газов из этих марок будет определяться парциальным давлением тяжелых углеводородов в воздушно-газовой смеси и малыми значениями нижних концентрационных пределов взрываемости этих компонентов [85].

Технологическая часть проекта нейтрализации остаточных углеводородов угля при разработке высокогазоносных угольных пластов разработана применительно к лаве 4-1-5-9, отрабатывающей пласт Е-5 на выемочном участке №1 шахты «Осинниковская» ОАО «ОУК «Южкузбассуголь».

Длина лавы 300 м. Выемка угля производится комбайном JOY 7LSID, механизированная крепь FRS-GLINK-16/38, лавный конвейер Rybnik 1100, скребковый перегружатель Grot-1100, установка для нагнетания воды в пласт УНВ-2М, станок буровой АБГ-300, штрековый ленточный конвейер ЗЛ1200К. Скорость подвигания лавы 9,0 м/сут. Пласт Е-5 имеет следующие характеристики: мощность пласта 3,2 м; угол падения - $6\div 8^\circ$; влажность угля 2,4%; зольность 10,8%; выход летучих 32,2%; удельное пылевыделение 110 г/т; нижний предел взрывчатости пыли 36 г/м³ [81].

Рассчитаем количество инертного газа, которое необходимо подать в угольный пласт для увеличения балластной составляющей в остаточных газах углей марок Д, Ж, ОС, чтобы перекрыть концентрационный предел взрываемости (табл. 4.2).

Таким образом, для нейтрализации тяжелых углеводородов в остаточных газах угольного пласта Е-5 необходима его обработка газонаполненными растворами ПАВ со следующими параметрами для одной скважины: концентрация смачивателя СП-01: 0,2 %, темп нагнетания 55 л/мин,

расчетное количество воды, закачиваемое в скважину 362,4 м³; насос: УНВ-2М; давление 20 МПа; время нагнетания 4,57 сут; количество азота: 58 кг; давление азота: 7 0,7 МПа.

Таблица 4.2 – Расчетные значения количества и давления азота при нагнетании в пласт для нейтрализации остаточных углеводородов в угле

№ п/п	Объект	Марка угля	Параметры нагнетания газонаполненного раствора		
			Содержание азота в растворе, %	Количество азота, л (кг)	Давление газонаполненного раствора, атм. (МПа)
1.	Пл. Сычевский 111 (Кузбасс)	Д	13,6	48962,8 (61)	7 (0,7)
2.	Пл. Е-5, Осинниковская (Кузбасс)	Ж(1)	13,1	46864,4 (58)	7 (0,7)
3.	Пл. Е-1, Осинниковская (Кузбасс)	Ж(2)	9,3	34973,4 (43,7)	5 (0,5)
4.	Пл. К-5, Осинниковская (Кузбасс)	Ж(3)	20,2	76941,5 (92,2)	11 (1,1)
5.	Пл. 21, Алардинская (Кузбасс)	ОС	5,5	21984,0 (26,2)	3 (0,3)

Обработка угольных пластов газонаполненными растворами ПАВ (технология НГНР) является перспективной и эффективной технологией для предупреждения взрывопожароопасных ситуаций в шахтах. Сочетание улучшенного смачивания, инертизации порового пространства и охлаждающего эффекта позволяет комплексно воздействовать на основные факторы, инициирующие процессы воспламенения углеводородных газов [85].

Выводы

1. Расчетами установлено, что для бурых углей содержание углеводородных газов в остаточных газах углей не превышает 15%, для антрацитов – 3%. При этом содержание СО₂ в остаточных газах бурых углей очень большое (77-80%); для антрацитов и полуантрацитов содержание

углеводородных газов (горючих) не превышает 3%, при этом инертного газа N_2 в остаточных газах содержится от 67 до 82%. Из этого следует, что выделяющиеся при нагревании остаточные газы из бурых углей и антрацитов не представляют серьезной пожароопасности в связи с наличием в них высокого содержания балластных негорючих газов [85].

2. Установлено, что содержание горючих газов в остаточных газах углей средней стадии метаморфизма колеблется от 27 до 53%, в то время как содержание балластных газов достигает наименьшего значения (46,5%) для пласта К-5. Вследствие большого содержания тяжелых углеводородов в остаточных газах углей марок Д, Ж, ОС температура воспламенения остаточных газов будет определяться парциальным давлением горючих газов и малыми значениями нижних концентрационных пределов взрываемости тяжелых углеводородов [85].

3. Одним из перспективных направлений по обеспечению взрывопожаробезопасности угольных шахт является обработка угольных пластов газонаполненными растворами ПАВ. Эффективность технологии флегматизации остаточных газов угольных пластов газонаполненными растворами ПАВ достигается за счёт снижения пылеобразующей способности угля, перевода горючей смеси остаточных газов в негорючую и повышения эффективности пылеулавливания при отбойке угля с помощью воздушно-механической пены[85].

4. Для нейтрализации тяжелых углеводородов в остаточных газах угольного пласта Е-5 необходима его обработка газонаполненными растворами ПАВ со следующими параметрами для одной скважины: концентрация смачивателя СП-01: 0,2 %, темп нагнетания 55 л/мин, расчетное количество воды, закачиваемое в скважину 362,4 м³; насос: УНР-02; давление 20 МПа; время нагнетания 4,57 сут; количество азота: 58 кг; давление азота: 0,7 МПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной для угольной отрасли задачи повышения пылевзрывобезопасности угольных шахт на основе применения разработанной технологии нейтрализации остаточных газов угольных пластов газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ, что позволяет обеспечить увеличение содержания балластных газов, приводящих к увеличению концентрационных пределов взрываемости остаточных газов в угольном пласте и обеспечению пожаровзрывобезопасности при разработке высокогазоносных угольных пластов, опасных по взрывам пыли.

Основные научные и практические результаты, полученные лично автором, выводы и рекомендации работы заключаются в следующем:

рудничная атмосфера высокопроизводительных угольных шахт, разрабатывающих высокогазоносные угольные пласты средней стадии метаморфизма, опасные по взрывам угольной пыли, должна квалифицироваться, как смесь «воздух – метан – гомологи метана – сорбированная тяжелыми углеводородами угольная пыль». Присутствие в рудничной атмосфере тяжелых углеводородов создает повышенную опасность, так как эти газы образуют взрывчатые смеси с воздухом при более низких концентрациях, чем метан.

2. Проведенные исследования по сопоставлению остаточных углеводородов Кузбасса и Донбасса позволяют выявить общую закономерность для обоих бассейнов. Максимальное содержание остаточных углеводородов в обоих бассейнах установлены в углях марок Ж и КЖ. С уменьшением и увеличением степени преобразования угля содержание остаточных углеводородов в угле снижается.

3. Анализ состава индивидуальных углеводородов к их сумме показывает, что в обоих угольных бассейнах (Кузбасс и Донбасс) в углях

марки Ж количество пропана и бутана превышает содержание остальных газов в 3-7 раз. Расчет относительной метанообильности выемочных участков и подготовительных выработок по разности природной метаноносности разрабатываемого пласта и остаточной метаноносности угля марок Ж, КЖ приводит к недостоверному (заниженному) значению фактической относительной метанообильности, что не отражает фактического состояния взрывоопасности выработок.

4. Установлено, что количество углеводородов, извлеченных из угольной пыли ($19,5 \text{ см}^3/\text{кг}$), на 23 % больше, чем количество углеводородов, извлеченных из угля ($15,8 \text{ см}^3/\text{кг}$). Содержание углеводородов, извлеченных из угля от метана до пропана ($10,16 \text{ см}^3/\text{кг}$) составляет 64,3 %, а из угольной пыли содержание извлеченных аналогичных углеводородов составляет всего лишь 16,7 %, а остальные 83,3 % представлены тяжелыми углеводородами от бутана до гексана т.е. угольная пыль адсорбирует преимущественно бутан, пентан, гексан.

5. Для частиц радиусом 1 мкм силы аутогезии в 126219 раз превышают силы гравитации, что подтверждает их главенствующую роль при маленьких радиусах частиц; при увеличении радиуса частицы в два раза превышение сил межмолекулярного взаимодействия над силами гравитации снижается до 31846 раз. Существуют силы, противодействующие силам аутогезии, которые обуславливают агрегативную устойчивость дисперсных структур, и величина этого противодействия равна для радиуса частицы 17 мкм $1,706 \cdot 10^{-7}$.

6. Потеря массы образца угля марки Ж при термогравиметрическом анализе имеет ступенчатый характер. Первичная потеря массы около 4% происходит при температуре около $350\text{-}370^\circ\text{C}$ и связана с испарением внешней и гигроскопической влаги. Вторая потеря массы имеет две ступени в диапазоне температур около $350\text{-}660^\circ\text{C}$, и $700\text{-}870^\circ\text{C}$. Первый пик ($479,95^\circ\text{C}$) связан с эндотермическими процессами (десорбцией тяжелых углеводородов), второй ($772,32^\circ\text{C}$) – с экзотермическими процессами. Всего на двух ступенях

происходит потеря массы порядка 30%, в том числе – на первой ступени около 16%, на второй – около 14%.

7. Расчетами установлено, что для бурых углей содержание углеводородных газов в остаточных газах углей не превышает 15%, для антрацитов – 3%. При этом содержание CO_2 в остаточных газах бурых углей очень большое (77-80%); для антрацитов и полуантрацитов содержание углеводородных газов (горючих) не превышает 3%, при этом инертного газа N_2 в остаточных газах содержится от 67 до 82%. Из этого следует, что выделяющиеся при нагревании остаточные газы из бурых углей и антрацитов не представляют серьезной пожароопасности в связи с наличием в них высокого содержания балластных негорючих газов.

8. Установлено, что содержание горючих газов в остаточных газах углей средней стадии метаморфизма колеблется от 27 до 53%, в то время как содержание балластных газов достигает наименьшего значения (46,5%) для пласта К-5. Вследствие большого содержания тяжелых углеводородов в остаточных газах углей марок Д, Ж, ОС температура воспламенения остаточных газов будет определяться парциальным давлением горючих газов и малыми значениями нижних концентрационных пределов взрываемости тяжелых углеводородов.

9. Научно обоснован метод повышения уровня пылевзрывобезопасности угольных шахт на основе применения технологии нейтрализации остаточных газов угольных пластов средней стадии метаморфизма при обработке угольного массива газонаполненными растворами ПАВ с использованием рациональных значений концентрации смачивателя и давления газонаполненного раствора ПАВ для увеличения содержания балластных газов, приводящих к увеличению концентрационных пределов взрываемости остаточных газов в угольном пласте и обеспечению пожаровзрывобезопасности угольных шахт.

10. Разработана методика нейтрализации остаточных газов угля путем обработки угольного массива газонаполненными растворами поверхностно-

активных веществ (НГНР). Расчетные значения для одной скважины при обработке пласта Е-5: концентрация смачивателя СП-01: 0,2 %, темп нагнетания 55 л/мин, расчетное количество воды, закачиваемое в скважину 362,4 м³; насос: УНВ-2М; давление 20 МПа; время нагнетания 4,57 сут; количество азота: 58 кг; давление азота: 0,7 МПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айруни А.Т. Теория и практика борьбы с рудничными газами на больших глубинах. – М.: Недра. – 1981. – 335 с.
2. Айруни А.Т., Клебанов Ф.С., Смирнов О.В. Взрывоопасность угольных шахт. – Издательство «Горное дело». – 2011. – 264 с.
3. Айруни А.Т., Смирнов О.В. Взрывы газопылевоздушных смесей в угольных шахтах. – Липецк: Липецкое изд-во. – 2000. – 208 с.
4. Архипов И.А., Филин А.Э. Анализ состояния аварийности на угольных предприятиях России // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 1. – С. 208–215. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-208-215.
5. Балдин К.В., Башлыков В.Н., Рукосуев А.В. Теория вероятностей и математическая статистика. – М. – Изд-во «Дашков и К». – 2023. – 472 с.
6. Баловцев С.В. Анализ причинно-следственных связей между событиями, приводящими к чрезвычайным ситуациям // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 7. – С. 328-332.
7. Баловцев С.В. К методике прогноза взрывобезопасности выемочных участков угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 11. – С. 218-226. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-218-226.
8. Баловцев С.В. Разработка методологии управления аэробиологическими рисками в угольных шахтах. Диссертация на соискание ученой степ. д.т.н. – М., 2025. – 291 с.
9. Баловцев С.В., Скопинцева О.В., Куликова Е.Ю. Оценка влияния тяжелых углеводородов на аэробиологические риски аварий в угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. – № 2. – С. 234–245. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-234-245.
10. Босиков И.И., Клюев Р.В., Майер А.В., Стась Г.В. Разработка метода анализа и оценки оптимального состояния аэрогазодинамических процессов

на угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. – №1. – С. 97–106. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-97-106.

11. Босиков И.И., Клюев Р.В., Хетагуров В.Н. Анализ и комплексная оценка газодинамических процессов на угольных шахтах с помощью методов теории вероятности и математической статистики // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. – № 3. – С. 461-467. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-461-467.

12. Воробьева О.В., Костеренко В.Н., Тимченко А.Н. Анализ причин взрывов с целью повышения эффективности системы управления безопасностью труда угледобывающих предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № S61. – С. 3-17. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-61-3-17.

13. Ганова С.Д., Скопинцева О.В., Исаев О.Н. К вопросу исследования состава углеводородных газов угольных пластов и пыли с целью возможного прогнозирования их потенциальной опасности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 6. – С. 109-115. DOI 10.18799/24131830/2019/6/2132.

14. Гоффарт Т.В., Новиков А.В., Паневников К.В. Сканирующий (динамический) газовый контроль в угольных шахтах. // Безопасность труда в промышленности. – 2017. – № 6. – С. 59-62. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-6-59-62.

15. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли-пыли, дымы и туманы / пер. с анг. Л., 1969. 428 с.

16. Ерохин С.Ю., Дремов В.И. Способ аэрогидродинамического обеспыливания очистного забоя. Каталог научно-технических разработок. – М.: МГГУ. - 1999.

17. Жихарев С.Я., Родионов В.А., Пихконен Л.В. Исследование технологических свойств и показателей взрывопожароопасности каменноугольной пыли инновационными методами // Горный журнал. – 2018. – № 6. – С. 45–49. DOI: 10.17580/gzh.2018.06.09.

18. Забурдяев В.С. Газовая опасность в угольных шахтах: условия, причины, экспертиза безопасности // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 11. – С. 15-18. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-11-15-18.

19. Забурдяев В.С. Прогноз и предотвращение рисков формирования взрывоопасных смесей в угольных шахтах // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 6. – С. 65-69. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-6-65-69.

20. Зайцев А.В., Пересторонин М.О. Исследование эффективности использования системы кондиционирования воздуха для обеспечения безопасности ведения горноспасательных работ в зоне высоких температур воздуха// Безопасность труда в промышленности. 2024. № 3. С. 7–13. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-3-7-13.

21. Золотых С.С. Заблаговременная дегазация угольных пластов как фактор повышения безопасности на шахтах Кузбасса // Горная промышленность. – 2019. – № 5. – С. 18–22. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-05-18-22.

22. Кабанов Е.И., Коршунов Г.И., Корнев А.В., Мяков В.В. Анализ причин взрывов, вспышек и воспламенений метана в угольных шахтах России в 2005-2019 гг. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2–1. – С. 18-29. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-18-29.

23. Кирин Б.Ф. Теоретические и экспериментальные исследования физико-химических методов борьбы с пылью в шахтах. Диссертация на соискание ученой степ. д.т.н. – М.: МГИ. - 1974.

24. Каледина Н.О., Малашкина В.А. Индикаторная оценка надежности функционирования шахтных вентиляционно-дегазационных систем // Записки Горного института. – 2021. – Т. 250. – С. 553-561. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.8.

25. Каледина Н.О., Чечель К.Н. Анализ газового баланса выемочного участка в обеспечении аэрологической безопасности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 10–1. – С. 5-16. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_5.

26. Каледина Н. О., Кобылкин С. С., Малашкина В. А., Мещеряков Д. А. К определению газового баланса высокопроизводительных выемочных участков угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 11 (специальный выпуск 23). — С. 3–22. DOI:10.25018/0236_1493_2025_11_23_3.
27. Киряева Т.А., Опарин В.Н., Яценко Д.А. Микро-nanoструктурный анализ особенностей в строении угольного вещества в зависимости от стадий его метаморфизма // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5. — С. 5–23. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_5.
28. Клебанов Ф.С. Воздух в шахте. — М. — 1995. — 600 с.
29. Кобылкин А.С. Исследования пылераспределения в очистном забое у комбайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 6–1. — С. 65–73. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-65-73.
30. Кобылкин С.С., Тимченко А.Н. Классификация систем снижения уровня запыленности рудничной атмосферы тупиковых горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 10–1. — С. 112–123. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_112.
31. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Закоршменный И.М., Решетняк С.Н. Резервы повышения эффективности работы выемочных участков угольных шахт // Уголь. — 2019. — № 3 (1116). — С. 46-49. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-3-46-49.
32. Коршунов Г.И., Каримов А.М., Подсевалов В.С. Анализ различных способов борьбы с мелкодисперсной респирабельной фракцией пыли на горнодобывающих предприятиях // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2022. — № 1. — С. 190-199. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-1-1-190-199.
33. Коршунов Г.И., Спицын А.А., Онегов Н.А., Фитерман С.И. Применение метода снижения запыленности в угольных шахтах // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. — 2024. — Т. 13. — № 2(66). — С. 250-255.

34. Корнев А. В., Спицын А. А., Коршунов Г. И., Баженова В. А. Обеспечение пылевзрывобезопасности подземных горных выработок в угольных шахтах: методы и современные тенденции // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 3. – С. 133–149. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_133.
35. Корнев А.В., Ледяев Н.В., Кабанов Е.И., Корнева М.В. Оценка прогнозной запыленности в забоях угольных шахт с учетом особенностей смачиваемости угольной пыли // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6–2. – С. 115-134. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_115.
36. Кравчук И.Л., Андреева Л.И. Оценка риска эксплуатации горной техники и оборудования в изменившихся условиях функционирования горного предприятия // Горное оборудование и электромеханика. – 2023. – № 4(168). – С. 36-47. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-4-36-47.
37. Кудряшов В.В., Кобылкин А.С. Анализ методов измерения запыленности шахтной атмосферы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 10–1. – С. 29-44. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_29.
38. Куликова Е.Ю. Методика интегральной оценки риска в шахтном и подземном строительстве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2–1. – С. 124-133. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-124-133.
39. Куликова Е.Ю., Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Комплексная оценка геотехнических рисков в шахтном и подземном строительстве // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. – № 1. – С. 7–16. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16.
40. Лавцевич В.П. Оценка метановзрывоопасности технологических систем угольных шахт: теория методы, моделирование. Диссертация на соискание ученой степ. д.т.н. – Кемерово, 1994. – 367 с.

41. Лебедев В.С., Скопинцева О.В. Остаточные газовые компоненты угольных пластов: состав, содержание, потенциальная опасность // Горный журнал. – 2017. – №4 – С. 84-86. DOI: 10.17580/gzh.2017.04.17.
42. Лебедев В.С., Скопинцева О.В., Иванов Д.В., Иванов П.Д. Состав остаточных газов ископаемых углей и оценка их роли в создании пожаровзрывоопасных ситуаций в угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 2. – С. 152-160. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-152-160.
43. Левин Л.Ю., Исаевич А.И., Сёмин М.А., Газизуллин Р.Р. Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов // Горный журнал. – 2015. – № 1. – С. 43-55. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.13.
44. Ли Сяньгун, Ли Юй, Фа Цывэй, Алам Асар Оценка риска аварий с выбросами угля и газа на угольных шахтах на основе факторного анализа и логистической регрессии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 10-1. – С. 116-127. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_116.
45. Мазаник Е.В. Совершенствование технологии дегазации угольных шахт на основе заблаговременной поэтапной скважинной подготовки шахтных полей. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2010. –233 с.
46. Малашкина В.А. Направления повышения эффективности использования систем дегазации угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 6. – С. 206-214. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-206-214.
47. Мамаев В.И., Ибраев Ж.А., Лигай В.А. и др. Предупреждение взрывов пылеметановоздушных смесей. – М.: Недра. – 1990. – 159 с.
48. Мешков Г.Б., Петренко И.Е., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за 2023 год // Уголь. – 2024. – № 3. – С. 18-29. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-3-18-29.

49. Мясников С.В., Коршунов Г.И., Кабанов Е.И. Метод комплексной оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 5. – С 60-65. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-5-60-65
50. Нецепляев М.И., Любимова А.И., Петрухин П.М. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах. – М.: Недра, 1992. – 298 с.
51. Патрушев М.А., Карнаух Н.В., Лепихов А.Г. Повышение надежности проветривания шахт. – К.: Техника. – 1990. – 168 с.
52. Перекатнова Е.С., Райкова В.М., Акинин Н.И. Влияние строения углеводородов на температуру самовоспламенения // Успехи в химии и химической технологии. — 2017. — Т. 31, № 13. — С. 52–54.
53. Пернебек Б.П., Рыбичев А.А., Федоткин И.О., Оразхан А.А., Мадмарова А. Исследование критической концентрации мицеллобразования при смачивании пыли бурых углей // Уголь. – 2025. – № 3. – С. 27-32. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-3-27-32.
54. Пернебек Б.П., Семенов Ю.В., Рыбичев А.А., Козлова Л.О. Оценка эффективности смачиваемости угольной пыли при разных температурах растворов // Уголь. – 2024. – № 1. – С. 70-75. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-1-70-75.
55. Петренко И.Е. Итоги работы угольной промышленности России за 2021 год // Уголь. – 2022. – № 3. – С. 9-23. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-3-9-23.
56. Петренко И.Е. Итоги работы угольной промышленности России за 2022 год // Уголь. – 2023. – № 3. – С. 21-33. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-3-21-33.
57. Поздняков Г.А., Голосков С.И., Голосков Е.И., Закутский Е.Л. Проблемы и перспективы развития систем мониторинга взрывобезопасности горных выработок. // Горная промышленность. – 2016. – № 4 (128). – С. 66.

58. Приказ Ростехнадзора от 01.09.2023 г. № 319 «Об утверждении Руководства по безопасности «Рекомендации по применению средств взрывозащиты горных выработок угольных шахт, опасных по газу и (или) угольной пыли».

59. Приказ Ростехнадзора от 01.09.2023 г. № 319 «Об утверждении Руководства по безопасности «Рекомендации по применению средств взрывозащиты горных выработок угольных шахт, опасных по газу и (или) угольной пыли».

60. Приказ Ростехнадзора от 03.11.2022 г. № 387 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах».

61. Приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 г. № 507 (ред. от 23.06.2022) "Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах».

62. Приказ Ростехнадзора от 20.03.2023 г. № 121 «Об утверждении Руководства по безопасности «Рекомендации по прогнозу и выбору мер, направленных на снижение запыленности рудничного воздуха в угольных шахтах».

63. Приказ Ростехнадзора от 21.11.2025 № 397 «Об утверждении руководства по безопасности "Методические рекомендации по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на угольных шахтах».

64. Приказ Ростехнадзора от 27.04.2024 г. № 142 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта».

65. Приказ Ростехнадзора от 28.12.2023 г. № 498 «Об утверждении Руководства по безопасности «Рекомендации по дегазации угольных шахт».

66. Приказ Ростехнадзора от 28.12.2023 г. № 504 «Об утверждении Руководства по безопасности «Рекомендации по аэробиологической безопасности угольных шахт».

67. Пучков Л.А., Каледина Н.О., Кобылкин С.С. Системные решения обеспечения метанобезопасности угольных шахт. // Горный журнал. – 2014. – № 5. – С. 12-14.

68. Распоряжение Правительства РФ от 13.06.2020 г. № 1582-р (ред. от 13.10.2022) «Об утверждении Программы развития угольной промышленности России на период до 2035 года».

69. Родионов В.А., Серегин А.С., Иконников Д.А. Мультиплекативный метод оценки взрывопожароопасных свойств рудничной атмосферы при поступлении в воздушную среду углеводородных газов // Горный журнал. – 2023. – № 9. – С. 35-40. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.05

70. Романченко С.Б., Губина Е.А., Воронцова Е.Г., Вдовина В.В., Киселева Н.А. Способы контроля пылевзрывобезопасности горных выработок // Актуальные вопросы пожарной безопасности. – 2023. – № 3(17). – С. 14–23. DOI: 10.37657/vniipro.avpb.2023.84.16.002.

71. Романченко С.Б., Руденко Ю.Ф., Костеренко В.Н. Пылевая динамика в угольных шахтах: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр». – 2011. -256 с.

72. Романченко С.Б., Нагановский Ю.К., Корнев А.В. Инновационные способы контроля пылевзрывобезопасности горных выработок // Записки Горного института. – 2021. – Т. 252. – С. 927-936. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.14.

73. Романченко С.Б., Соболев В.В., Нагановский Ю.К., Губина Е.А. Термогравиметрические экспериментальные исследования взрывоопасности угольной пыли и ее смесей с инертной пылью. Пожарная безопасность. 2024. № 2 (115). С. 64-73.

74. Романченко С.Б., Поздняков Г.А., Лебецки К. и др. Стендовые и шахтные испытания системы автоматизированного контроля пылевзрывобезопасности горных выработок // Науч. сообщ. / ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского. М., 2004. Вып. 327. С.21–32.

75. Романченко С. Б., Корнев А. В. Инновационные методы исследований пылевой взрывоопасности углей // Записки Горного института. – 2025. – Т. 274. – С. 129-141.
76. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. – Макеевка-Донбасс. – 1989. – 320 с.
77. Руководство по борьбе с пылью в угольных шахтах. – М.: Недра. – 1979. – 319 с.
78. Рыбичев А.А. К вопросу оценки влияния тяжелых углеводородов на взрывчатость пылеметановоздушных смесей // Уголь. – 2023. – №2. – С. 41-44. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-2-41-44.
79. Рыбичев А.А., Пернебек Б.П. Оценка эффективности пылеподавления с использованием смачивающих растворов // Уголь. – 2023. – №. 12. – С. 60-63. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-12-60-63.
80. Семин М.А., Гришин Е.Л., Левин Л.Ю., Зайцев А.В. Автоматизированное управление вентиляцией шахт и рудников. Проблемы, современный опыт, направления совершенствования // Записки Горного института. – 2020. – Т. 246. – С. 623-632. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4.
81. Скопинцева О.В. Научное обоснование комплексного метода снижения пылевой и газовой опасностей в угольных шахтах. Диссертация на соискание ученой степ. д.т.н. – М. – 2012. – 396 с.
82. Скопинцева О.В., Вертинский А.С., Иляхин С.В., Савельев Д.И., Прокопович А.Ю. Обоснование рациональных параметров обеспыливающей обработки угольного массива в шахтах // Горный журнал. – 2014. – №5. – С. 17-20.
83. Скопинцева О.В., Ганова С.Д., Демин Н.В., Папичев В.И. Комплексный метод снижения пылевой и газовой опасностей в угольных шахтах // Горный журнал. – 2018. – № 11. – С. 97-100. DOI: 10.17580/gzh.2018.11.18.
84. Скопинцева О. В., Рыбичев А. А., Баловцев С. В. Исследования формы и структуры пылевых частиц угля средней стадии метаморфизма //

Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 2. – С. 5–15.
DOI: 10.25018/0236-1493-2025-2-0-5.

85. Скопинцева О.В., Рыбичев А.А., Баловцев С.В. Нейтрализация взрывчатых свойств остаточных углеводородов угольных пластов газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 11. – С. 140–152. DOI: 10.25018/0236-1493-2025-11-0-140 (BAK, Scopus).

86. Савельев Д.И. Повышение пылевзрывобезопасности при подземной разработке угля за счет обработки угольного массива газонаполненными растворами ПАВ. Диссертация на соискание ученой степ. к.т.н. – М.: МГГУ. – 2011. – 181 с.

87. Сластунов С.В., Коликов К.С., Садов А.П., Хаутиев А.М.-Б., Комиссаров И.А. Обеспечение безопасной и интенсивной разработки газоносных угольных пластов на основе их комплексной дегазационной подготовки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 2. – С. 152–166. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_152.

88. Ушаков К.З. Газовая динамика шахт. – М.: МГГУ, 2004. – 481 с.

89. Ушаков К.З., Каледина Н.О., Кирин Б.Ф. Безопасность ведения горных работ и горноспасательное дело. Под редакцией К.З. Ушакова. – М.: Изд-во Академии горных наук, 1999. – 487 с.

90. Федоткин И.О., Федоткин Д.В. Проблемы пожаров в угольных шахтах и обзор современных подходов к их моделированию // Уголь. – 2024. – № 2. – С. 69-73. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-2-69-73.

91. Федоткин, Д.В. Механизм генерации самовспенивающейся газоаэрозоленаполненной пены / Д. В. Федоткин // Пожарная безопасность. – 2024. – № 4(117). – С. 74-79. – DOI 10.37657/vnipro.pb.2024.117.4.007. (BAK, 2.10.1. Пожарная безопасность с 14.12.2022)

92. Федоткин И.О. Ключевые факторы угледобычи в ведущих странах мира // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – №3. – С. 153–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_3_0_153.

93. Филин А.Э., Курносов И.Ю., Колесникова Л.А., Овчинникова Т.И., Колесников А.С. К вопросу моделирования процесса осаждения пыли для условий угольной шахты // Уголь. – 2022. – № 9. – С. 67-72. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-67-72.

94. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы: Учебник для вузов. – М.: ООО ТИД «Альянс». - 2004. – 464 с.

95. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1955. 352 с.

96. Фукс Н.А. Успехи Механики аэрозолей. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1961. 160 с.

97. Харитонов И.Л., Терёшкин А.И., Корнев А.В., Коршунов Г.И., Корнева М.В. Разработка мероприятий по улучшению пылевой обстановки в очистных забоях угольных шахт // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 12. – С. 53-59. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-12-53-59.

98. Черданцев С.В., Филатов Ю.М., Шлапаков П.А. Режимы диффузионного горения мелкодисперсных пылегазовоздушных смесей в атмосфере горных выработок // Уголь. – 2020. – № 2. – С. 27-32. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-2-27-32.

99. Balovtsev S.V., Skopintseva O.V., Kulikova E.Yu., Rybichev A.A. Decision-making algorithms for reducing aerological risks in coal mines. Sustainable Development of Mountain Territories. 2025, vol. 17, no. 2, pp. 688–700. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-688-700.

100. Gendler S.G., Rudakov M.L., Kuznetsov V.S. Evaluation Principles of the Dust Influence of Mining Enterprises on the Environment. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2019, vol. 56, iss. 3, pp. 62-69. DOI: 10.2478/lpts-2019-0020/.

101. Hasheminasab F., Bagherpour R., Aminossadati S. M. Numerical simulation of methane distribution in development zones of underground coal mines

equipped with auxiliary ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 89, pp. 68–77. DOI: 10.1016/j.tust.2019.03.022.

102. Lolon S. A., Brune J. F., Bogin G. E., Juganda A. Study of Methane Outgassing and Mitigation in Longwall Coal Mines. *Mining, Metallurgy and Exploration*. 2020, no. 37(5), pp. 1437-1449. DOI: 10.1007/s42461-020-00287-6.

103. Lu Gao, Xiangtao Kang, Meng Tang, Jinguo Hu, Jiachi Ren, Cunliu Zhou. Study on Prediction of Outburst Risk of Excavation Face by Initial Gas Emission. *Geofluids*. 2022, vol. 2022, article no. 4866805. DOI: 10.1155/2022/4866805.

104. Ma Q., Nie W., Yang S., Xu C., Peng H., Liu Z., Guo C. Effect of spraying on coal dust diffusion in a coal mine based on a numerical simulation. *Environmental Pollution*. 2020, article no. 114717.

105. Mitra S., Kumar D., Chaulya S.K., Kumar Ch. Prediction of Strata Monitoring System in Underground Coal Mines Using IoT. *Journal of the Geological Society of India*. 2022;98:232–236. DOI: 10.1007/s12594-022-1963-8.

106. Nematollahi Sarvestani A., Oreste P., Gennaro S. Fire Scenarios Inside a Room-and-Pillar Underground Quarry Using Numerical Modeling to Define Emergency Plans. *Applied Sciences*. 2023;13(7):4607. DOI: 10.3390/app13074607.

107. Nguyen Q. L., Nguyen Q. M, Tran D. T., Bui X. N. Prediction of ground subsidence due to underground mining through time using multilayer feed-forward artificial neural networks and back-propagation algorithm – case study at Mong Duong underground coal mine (Vietnam). *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(4):241–251. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-4-241-251.

108. Ning J. G., Wang J., Tan Y. L., Xu Q. Mechanical mechanism of overlying strata breaking and development of fractured zone during close-distance coal seam group mining. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020, vol. 30, no. 2, pp. 207-215. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.03.001.

109. Srivalli Dr.G., Ujwala Sony V., Sahithi G., Harshini D., Spoorthi B. Study on Coal Mine Safety Monitoring and Alerting System Using IOT.

International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRAS). 2023;11(6):3781-3786. DOI: 10.22214/ijraset.2023.54194.

110. Tang C, Gao E, Li Y, Li M, Bai D, Tang H, Zhou G. Inspection Robot and Wall Surface Detection Method for Coal Mine Wind Shaft. *Applied Sciences*. 2023; 13(9):5662. DOI: 10.3390/app13095662
111. Trinh L.H., Nguyen V.N. Mapping coal fires using Normalized Difference Coal Fire Index (NDCFI): case study at Khanh Hoa coal mine, Vietnam. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(4):233–240. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-4-233-240.
112. Tripathi A.K., Aruna M., Prasad S., Pavan J., Kant R., Choubey C.K. New approach for monitoring the underground coal mines atmosphere using IoT technology. *Instrumentation Mesure Métrologie*. 2023;22(1):29-34. DOI: 10.18280/i2m.220104
113. Verda V., Borchiellini R., Cosentino S., Elisa G., Tuni J.M. Expanding the FDS Simulation Capabilities to Fire Tunnel Scenarios Through a Novel Multi-scale Model. *Fire Technology*. 2021, vol. 57(6), pp. 2491–2514. DOI: 10.1007/s10694-020-01081-y.
114. Wang, T., Liu, J., Wang, S., Jin L., Lin M., Ou Sh. Enhancement of the wettability of a coal seam during water injection: effect and mechanism of surfactant concentrations above the CMC. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. DOI: 10.1007/s11356-022-25036-8.
115. Wen H., Liu Y., Guo J., Zhang Z., Liu M., Cai G. Study on Numerical Simulation of Fire Danger Area Division in Mine Roadway. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021;(2):1-13. DOI: 10.1155/2021/6646632.
116. Wu X, Cui J, Tong R, Li Q. Research on Methane Measurement and Interference Factors in Coal Mines. *Sensors*. 2022;22(15):5608. DOI: 10.3390/s22155608.
117. Zhu Z., Wang H., Zhou J. Monitoring and Control Model for Coal Mine Gas and Coal Dust. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2020, vol. 56, pp. 504–515. DOI: 10.1007/s10553-020-01161-3.

118. Zakorshmennyi I. M., Grabsky A. A., Blokhin D. I., Kobylkin A. S. The use of thermochemical technologies for mining abandoned coal reserves. Sustainable Development of Mountain Territories. 2023;15(4):966-974. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-966-974.

119. Zou C., Yang Zhi, Huang Sh., Ma F., Sun Q., Li F., Pan S., Tian W. Resource types, formation, distribution and prospects of coal-measure gas. Petroleum Exploration and Development. 2019, vol. 46, iss. 3, pp. 451-462. DOI: 10.1016/S1876-3804(19)60026-1.

120. Zakorshmennyi I.M., Sizin P.E., Uvarova I.F., Obvintseva N. Yu., Dianov P.A. Assessing the influence of broken coal on methane concentration distribution in the face area. Ugol'. 2025;(10):94-98. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-10-94-98.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям
НИТУ МИСИС,

проф., д.т.н.

М.Р. Филонов



« 21 »

2025г.

МЕТОДИКА

НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ УГОЛЬНОГО МАССИВА
ГАЗОНАПЛНЕННЫМИ РАСТВОРАМИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВ-
НЫХ ВЕЩЕСТВ (НГНР)

Москва 2025

Настоящая методика является результатом исследований, проводимых в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» по проблемам борьбы с пылью и газом в угольных шахтах.

Методика составлена проф., д.т.н. О.В. Скопинцевой (НИТУ МИСИС), доц., д.т.н. С.В. Баловцевым (НИТУ МИСИС) и аспирантом А.А. Рыбичевым (НИТУ МИСИС).

Методика одобрена и утверждена в «Национальном исследовательском технологическом университете «МИСИС» (НИТУ МИСИС).

Данная методика предназначена для оценки по пылевому и газовому факторам эффективности обработки угольного массива газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ (ПАВ) с целью повышения взрыво-взрывобезопасности горных работ, нейтрализации остаточных газов угольного массива и снижения пылеобразующей способности высокогазоносных угольных пластов, опасных по взрывам пыли. Методика может быть использована службой аэробиологической безопасности угольных шахт при планировании развития горных работ на угольной шахте.

ИСПОЛНИТЕЛИ:

проф., д.т.н. О. В. Скопинцева

доц., д.т.н. С. В. Баловцев

асп. А. А. Рыбичев

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Основными опасностями при разработке угольных пластов являются: газовая и пылевая опасности, внезапные выбросы угля, породы и газа, горные удары, самовозгорание угля и др. В основе борьбы с этими опасностями являются: управление свойствами и состоянием горного массива путем бурения скважин с целью дегазации угольного пласта или нагнетания в него рабочей жидкости для снижения напряженного состояния массива.

При дегазации угольных пластов основная масса находящегося в них метана удаляется вакуум-насосными установками, однако остается часть остаточных газов, трудноизвлекаемых из пластов, в составе которых для пластов средней стадии метаморфизма находится большое содержание тяжелых углеводородов, представляющих большую пожароопасность в сравнении с метаном.

Суть предлагаемой разработки сводится к тому, что через пробуренные скважины в угольный пласт подается газонаполненный раствор ПАВ поверхностью активных веществ для увеличения балластных газов в пласте, приводящих к увеличению нижних и верхних концентрационных пределов взрываемости газовой смеси.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ УГОЛЬНОГО МАССИВА ГАЗОНАПЛНЕННЫМИ РАСТВОРАМИ ПОВЕРХНОСТЬ- АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ (НГНР)

Механизм комплексной обработки угольного пласта газонаполненными растворами заключается в том, что высокое содержание (более 85%) негорючих балластных газов в остаточных газах углей действует комплексно: разбавляет горючие компоненты ниже их порога воспламенения, поглощает теплоту реакции, препятствуя ее самоподдержанию, и снижает скорость химических реакций горения. Все это приводит к тому, что такая газовая смесь теряет способность к горению и классифицируется как негорючая.

Поверхностно-активные вещества значительно снижают поверхностное натяжение воды. Это позволяет раствору гораздо эффективнее смачивать поверхность угля и проникать глубоко в поры и микротрещины, которые недоступны для чистой воды. Улучшенное смачивание блокирует доступ кислорода к активным центрам на поверхности угля. Азот в газонаполненных растворах играет двойную роль: во-первых, как ингибитор для перевода горючей смеси в негорючую, во-вторых, как компонент воздушно-механической пены. При разрушении угля высвобождаемый азот взаимодействует со смачивателем, образуя воздушно-механическую пену, которая герметизирует пространство в объеме разрушенной горной массы. Комбинированное действие ПАВ и газовой фазы обеспечивает глубокую и равномерную обеспыливающую обработку угольного массива.

Газовые пузырьки, распределенные в растворе (часто в виде пены или эмульсии), создают дополнительное расклинивающее давление и способствуют проникновению активного раствора в самые мелкие пустоты пласта. Использование газовой фазы позволяет уменьшить необходимый объем водного раствора, что снижает затраты и уменьшает обводненность массива. Водная фаза раствора обеспечивает охлаждающий эффект, снижая температуру угольного массива.

В предлагаемой технологии нейтрализации остаточных газов угольных пластов (НГНР) так же, как и при предварительном увлажнении, параллельно забою бурятся скважины, которые поочередно подключаются к оборудованию для нагнетания газонаполненных растворов ПАВ. Расчет значений параметров нагнетания осуществляется по стандартной методике предварительного увлажнения пласта в соответствии с Руководством по борьбе с пылью.

Трудности могут возникать при расчете количества инертного газа, которое необходимо закачать в массив вместе с рабочей жидкостью, представляющей собой раствор из воды и смачивателя с концентрацией 0,2%.

Расчет количества инертного газа, который необходимо растворить в рабочей жидкости, состоящей из воды и смачивателя

$$Q_{\text{ин.газа}} = \frac{Q_{\text{CKB}} \cdot s \cdot P}{100\%} \quad (1)$$

где $Q_{\text{ин.газа}}$ — количество инертного газа, л;

s — растворимость газа (рассчитывается при помощи коэффициентов абсорбции Бунзена), %;

P — давление под которым находится газ, МПа.

Объём азота в баллоне объёмом $V=40$ л под давлением $P=150$ ат составляет 6000 л или 7,5 кг азота (при $P=1$ ат, $t=20^\circ\text{C}$).

Значение растворимости азота в воде при $P=1$ ат и $t=20^\circ\text{C}$ равняется 1,93% (рассчитано при помощи коэффициентов абсорбции Бунзена).

Коэффициент абсорбции Бунзена (s) — это мера растворимости газа в жидкости: объем газа (приведенный к нормальным условиям: 0°C и 760 мм рт. ст.), который растворяется в единице объема жидкости при парциальном давлении газа, равном 760 мм рт. ст. (1 атм). Он показывает, сколько газа физически растворилось, и используется для расчета растворимости при других давлениях по закону Генри

$$C = s \cdot Pp, \quad (2)$$

где C — концентрация газа, %;

Pp — парциальное давление газа над раствором, атм.

Содержание балластных газов, метана и тяжелых углеводородов для различных марок угля проиллюстрировано на углях из буроугольных месторождений Дальнего Востока, угольных пластах пермского возраста Кузнецкого угольного бассейна, каменноугольного возраста Донецкого угольного бассейна. Из бурых углей исследовались три вида углей: Б(1) — Павловский разрез (Приморье), Б(2) — Тавричанское месторождение (Приморье); Б(3) — Новиковское месторождение (Сахалин). Из углей средней стадии метаморфизма исследовалось пять видов углей: Д - пл. Сычевский 111 (Кузбасс), Ж(1) - пл. Е-5, Осинниковская (Кузбасс), Ж(2) - пл. Е-1, Осинниковская (Кузбасс), Ж(3) - пл. К-5, Осинниковская (Кузбасс), ОС - пл. 21, Алардинская (Кузбасс). Из углей высокой стадии метаморфизма

исследовалось два вида углей: ПА - шахта 222, Чистяково-Снежнянский район (Донбасс), А - шахта Алмазная, Гуково Ростовской области (Восточный Донбасс).

Расчетные пределы взрываемости «чистой» смеси углеводородов (УВ) и остаточных углеводородных газов с балластными газами представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1 – Расчетные пределы взрываемости «чистой» смеси углеводородов (УВ) и остаточных углеводородных газов с балластными газами

Объект	Марка угля	Расчетные концентрационные пределы взрываемости «чистой» смеси УВ, об%		Содержание балластных газов, об%	Расчетные концентрационные пределы взрываемости остаточных газов с балластными газами, об%	
		Нижний	Верхний		Нижний	Верхний
Павловский разрез (Приморье)	Б(1)	2,9	12,7	89,4	22,0	57,8
Тавричанское месторождение (Приморье)	Б(2)	3	13,2	87,6	20,0	55,1
Новиковское месторождение (Сахалин)	Б(3)	3,1	13,5	84,4	17,0	50,0
Пл. Сычевский 111 (Кузбасс)	Д	1,8	9,3	70,5	9,1	37,7
Пл. Е-5, Осинниковская (Кузбасс)	Ж(1)	2,1	9,3	64,2	9,8	24,6
Пл. Е-1, Осинниковская (Кузбасс)	Ж(2)	2,1	8,7	72,5	13,1	29,8
Пл. К-5, Осинниковская (Кузбасс)	Ж(3)	1,8	8,7	46,5	4,1	16,7
Пл. 21, Алардинская (Кузбасс)	ОС	1,8	9,2	80,8	18,3	36,6
Шахта 222, Чистяково-Снежнянский район (Донбасс)	ПА	4,2	14,1	97,2	61,0	85,4
Шахта Алмазная, Гуково Ростовской области (Восточный Донбасс)	А	5	15	98,6	79,0	92,6

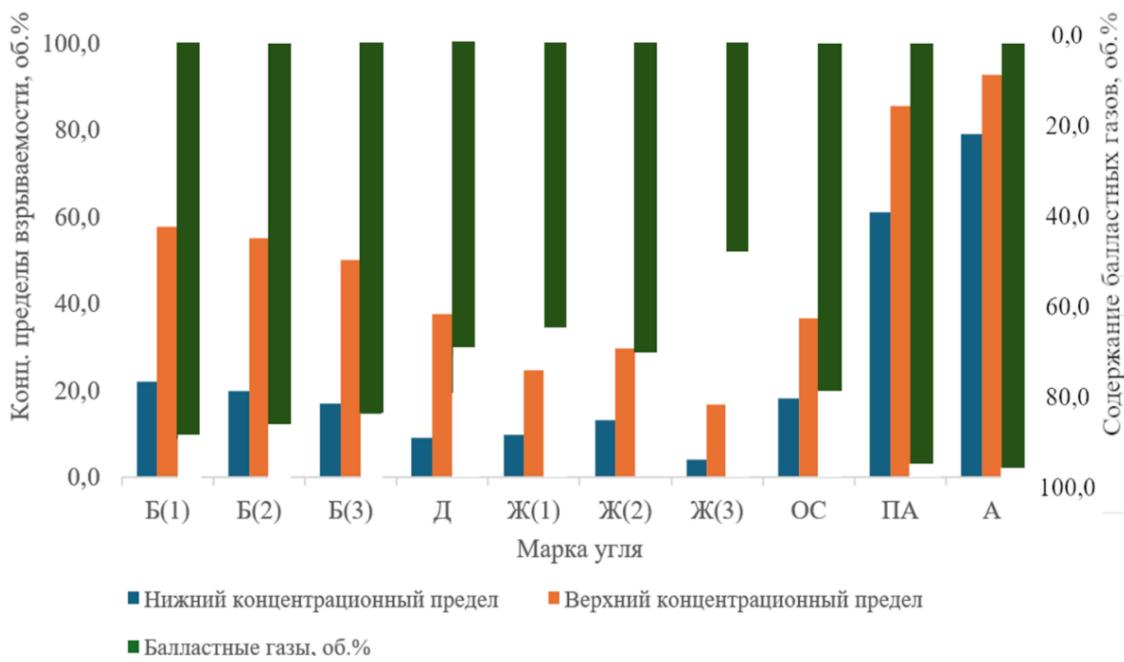


Рисунок 1 - Расчетные концентрационные пределы взрываемости остаточных углеводородных газов с балластными газами

На рис. 1 по данным табл. 1 отражены области воспламенения исследуемых марок углей, находящиеся между нижним и верхним пределами взрываемости (левая шкала). По другой шкале, справа, отложена концентрация балластных газов, находящихся в остаточных газах угля. Для бурых углей [Б(1), Б(2), Б(3)] и полуантрацитов и антрацитов [ПА, А] области воспламенения полностью перекрываются балластными газами. Для угля марки ОС (пласт 21, шахта «Алардинская») область взрываемости не полностью перекрыта балластными газами, поэтому при концентрации углеводородных газов от 18,3% до 19,2% даже при наличии 80,8% балластных газов возможен взрыв смеси. И самая опасная ситуация наблюдается для углей марок Д и Ж, для которых содержание балластных газов не перекрывает область воспламенения углеводородов в реальных остаточных газах углей. Согласно проведенному анализу данных (табл. 1 и рис. 1) следует вывод, что для рассматриваемой марки угля (Ж) требуется повышение содержания балластных газов до уровней, перекрывающих расчетные пределы взрываемости реальных остаточных газов.

Рассчитаем по формулам (1) и (2) количество инертного газа, которое необходимо подать в угольный пласт для увеличения балластной составляющей в остаточных газах углей марок Д, Ж, ОС, чтобы перекрыть концентрационный предел взрываемости (табл. 2).

Таблица 2 – Расчетные значения количества и давления азота при нагнетании в пласт для нейтрализации остаточных углеводородов в угле

№ п/п	Объект	Марка угля	Параметры нагнетания газонаполненного раствора		
			Содержание азота в растворе, %	Количество азота, л (кг)	Давление газона- полненного раст- вора, атм. (Мпа)
1.	Пл. Сычевский 111 (Кузбасс)	Д	13,6	48962,8 (61)	7 (0,7)
2.	Пл. Е-5, Осинниковская (Кузбасс)	Ж(1)	13,1	46864,4 (58)	7 (0,7)
3.	Пл. Е-1, Осинниковская (Кузбасс)	Ж(2)	9,3	34973,4 (43,7)	5 (0,5)
4.	Пл. К-5, Осинниковская (Кузбасс)	Ж(3)	20,2	76941,5 (92,2)	11 (1,1)
5.	Пл. 21, Алардинская (Кузбасс)	ОС	5,5	21984,0 (26,2)	3 (0,3)

Таким образом, для нейтрализации тяжелых углеводородов в остаточных газах угольного пласта Е-5 необходима его обработка газонаполненными растворами ПАВ со следующими параметрами для одной скважины: концентрация смачивателя СП-01: 0,2 %, темп нагнетания 55 л/мин, расчетное количество воды, закачиваемое в скважину 362,4 м³; насос: УНВ-2М; давление 20 МПа; время нагнетания 4,57 сут; количество азота: 58 кг; давление азота: 0,7 МПа.

Таблица 3 – Оборудование для проведения технологии НГНР

№ п/п	Оборудование	Ед. изм.	Кол-во	Тип, ГОСТ, ТУ
1	Азотная установка	шт	1	SKIDN-GEN10
2	Фильтр штрековый	шт	1	ФШ-100
3	Манометр	шт	11	ГОСТ Р 8.905-2015
4	Герметизатор	шт	11	«Таурус»
5	Разгрузочный вентиль	шт	1	

Продолжение табл. 3

6	Насосная установка	шт	1	УНВ-2М
7	Напорный рукав для раствора	шт	1	ТУ 38-105976-76
8	Дозатор смачивателя	шт	1	ДСУ-4М
9	Буровой станок	шт	1	АБГ-300
10	Смеситель	шт	1	
11	Расходомер	шт	1	СВД-20-130
12	Напорный рукав для раствора	шт	1	ГОСТ 10362-2017
13	Переходник	шт	2	ГОСТ 13961-74



Автономная некоммерческая организация дополнительного профессионального образования «Институт промышленной безопасности» (АНО ДПО «ИПБ»)

Россия, 115193, г. Москва, ул. Петра Романова, дом 7, строение 1.

Тел. +74959700733 Эл. почта: info@tex-m.ru, ano-ipb@mail.ru

Орган по сертификации продукции: Номер в РАЛ: RA.RU.11ПБ98

Лицензия: ДЭ-00-013491 от 18 мая 2012 года

Лицензия: ПМ-00-016693 от 27 июня 2017 года

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
РЫБИЧЕВА Алексея Алексеевича

на тему:

«ПОВЫШЕНИЕ ПЫЛЕВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ ВЫСОКОГАЗОНОСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ, СОДЕРЖАЩИХ ТЯЖЕЛЫЕ УГЛЕВОДОРОДЫ»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.10.1 – «Пожарная безопасность»

Интенсификация производственных процессов при подземной добыче угля в условиях постоянного увеличения глубины горных работ сопровождается учащением проявлений природных опасностей в шахтах, среди которых особое место по катастрофичности последствий занимают газовая и пылевая опасности, внезапные выбросы угля и газа. В системе профилактических мероприятий, способов и средств борьбы со взрывами в угольных шахтах основной акцент сделан на метан, в то время как правильнее было бы рассматривать все виды горючих и взрывчатых примесей шахтного воздуха в совокупности. При планировании развития горных работ на действующей угольной шахте использованы следующие результаты диссертационной работы Рыбичева А.А., имеющие научную и практическую значимость:

1. Зависимости содержания тяжелых углеводородов в угольных пластах от степени метаморфизма и оценка роли тяжелых углеводородов в создании пожаровзрывоопасных ситуаций в угольных шахтах.

2. Методика нейтрализации остаточных газов угольного массива газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ (НГНР).

Считаем, что применение разработанной Методики является крайне необходимым и актуальным для обеспечения взрывопожаробезопасности на угольных шахтах, разрабатывающих пласти средней стадии метаморфизма.

С уважением,

ректор

доц., к.т.н.



/А.А. Шилов/