

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

РЫБИЧЕВ Алексей Алексеевич

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

Специальность 2.10.1 – «Пожарная безопасность»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор **Скопинцева Ольга Васильевна**

Москва 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 взрываемости 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 нижних концентрационных пределов взрываемости 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 диссертантом (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 $10^9\text{-}10^{12}$ 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 пылевзрывобезопасностью.

Научное значение работы заключается в установлении содержания балластной составляющей в остаточных газах угольных пластов средней стадии метаморфизма, приводящего к увеличению концентрационных пределов взываемости 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 поверхностно-активных веществ», применение которой позволит увеличить содержание балластных газов в высокогазоносных угольных пластах, приводящего к увеличению концентрационных пределов взываемости 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Россия является одним из мировых лидеров по производству и экспорту угля. За прошедший год 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 %)

Анализ данных (рис. 1) показывает, что добыча угля в России 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.

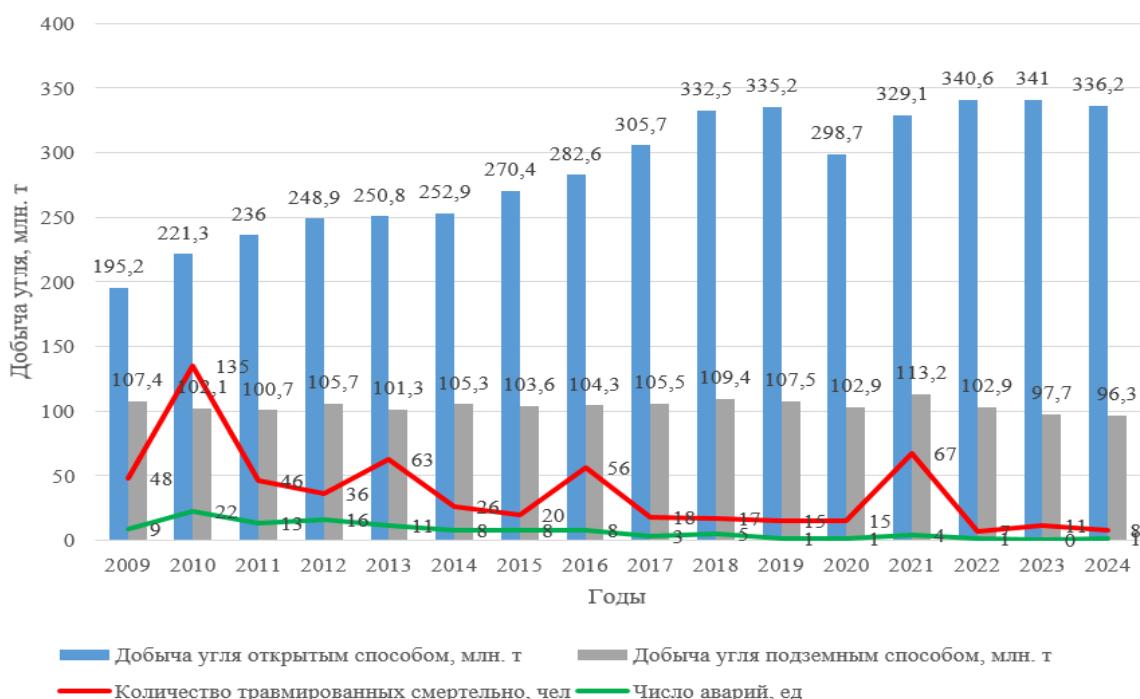


Рисунок 1 – Исследование корреляции темпов угледобычи и частоты происшествий на шахтах Российской Федерации

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 (табл. 1).

Таблица 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

Анализ данных табл.1 показывает 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. 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 процентное содержание этого вида аварий в общем числе аварий остается на прежнем уровне, а доля эндогенных и экзогенных пожаров, особенно внезапных выбросов угля, породы и газа возрастает, составляя 72,23%.

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.

Из 336,2 млн т добываемого в 2024 г. каменного угля 106,7 млн т относится к коксующимся маркам, более половины из которых (56,1 млн т) добыто подземным способом. В марочной структуре коксующихся углей преобладают высокоценные марки ГЖ, Ж, которые преимущественно добываются на шахтах (более 85%) и относятся к группе спекающихся углей. Также добывается на шахтах значительная доля ценных коксующихся марок КЖ и К – соответственно 76,8 и 33,6%.

Основными факторами, определяющими взрывчатость угольной пыли, являются: химический состав пыли, дисперсность пыли, состав атмосферы, влажность пыли, зольность и др. Каждый из этих факторов в отдельности достаточно хорошо изучен, но, «накладываясь» друг на друга, факторы существенно могут изменить пределы взрывчатости угольной пыли. Возможно синергетическое действие нескольких факторов одновременно, усиливающее взрывчатые свойства пыли.

В реальных условиях при разрушении газоносного угольного массива как правило, образуются тройные смеси (угольная пыль + метан + воздух), главной особенностью которых является то, что взятые в отдельности невзрывчатые концентрации метана и угольной пыли в смеси с воздухом приобретают взрывчатые свойства. Присутствие метана даже в небольших количествах заметно снижает нижний концентрационный предел взываемости (НКПВ) угольной пыли.

В диссертационной работе были проведены исследования дисперсного состава угольной пыли, отложившейся на выемочном участке 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.

Дифференциальная ($f(d)$) и интегральная ($F(d)$) кривые распределения частиц пыли представлены на рис. 2.

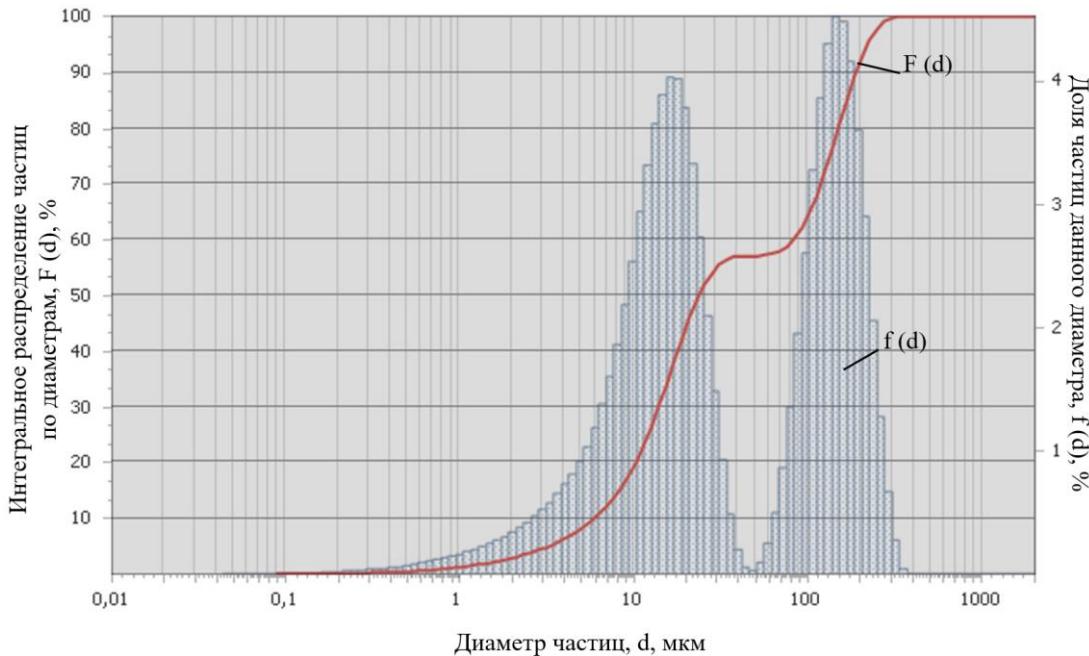


Рисунок 2 – Дифференциальная ($f(d)$) и интегральная ($F(d)$) кривые распределения частиц пыли (пласт Е-5, пыль после комбайна в лаве)

По интегральным и дифференциальным кривым распределения частиц пыли были определены объемные доли частиц пыли, обладающие наиболее высокими взрывчатыми свойствами. Было выбрано три диапазона частиц: менее 40 мкм, от 40 до 100 мкм, от 100 до 300 мкм. Также была определена объемная доля частиц до 10 мкм (табл. 2).

Анализ данных табл. 2 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 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. 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.

Таблица 2 – Весовая доля фракционного состава пылевых частиц

№ п/п	Места отбора проб пыли	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	70	10	20	30
2	Пыль с пересыпа конвейера лавы	68	4	28	30
3	Пыль с пересыпа с конвейера на конвейер на расстоянии 200 м от лавы	58	7	25	20
4	Пыль с пересыпа с конвейера на конвейер в магистральном конвейерном штреке на расстоянии 3200 м от лавы	44	11	45	14

Нижний предел взрываемости угольной пыли пласта Е-5 составляет 36 г/т.

Учитывая, что объемная доля пылевых фракций до 40 мкм в лаве N1 составляет более 70%, то НКПВ пыли пласта Е-5 может быть снижен от 1,5 раз до 4-х раз, что составляет от 9 до 24 г/т. НКПВ пыли в лаве может быть снижен до 4,5 – 12 г/т, для конвейерного - до 6,75 – 18 г/т.

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. 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.

В нормативно-методических документах по проектированию вентиляции угольных шахт при расчете прогноза относительной метанообильности выемочного участка и подготовительной выработки 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 , $\text{м}^3/\text{т}$). Расчет относительной метанообильности выемочных участков и подготовительных выработок по разности природной метаноносности разрабатываемого пласта и остаточной метаноносности угля приводит к недостоверному (заниженному) значению фактической относительной метанообильности и чреват недооценкой повышенной потенциальной опасности взрывов тяжелых углеводородов, имеющих более низкую температуру воспламенения и концентрационные пределы взрываемости по сравнению с метаном.

Проведенные исследования по сопоставлению остаточных углеводородов Кузбасса и Донбасса позволяют выявить общую закономерность для обоих бассейнов (рис. 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.

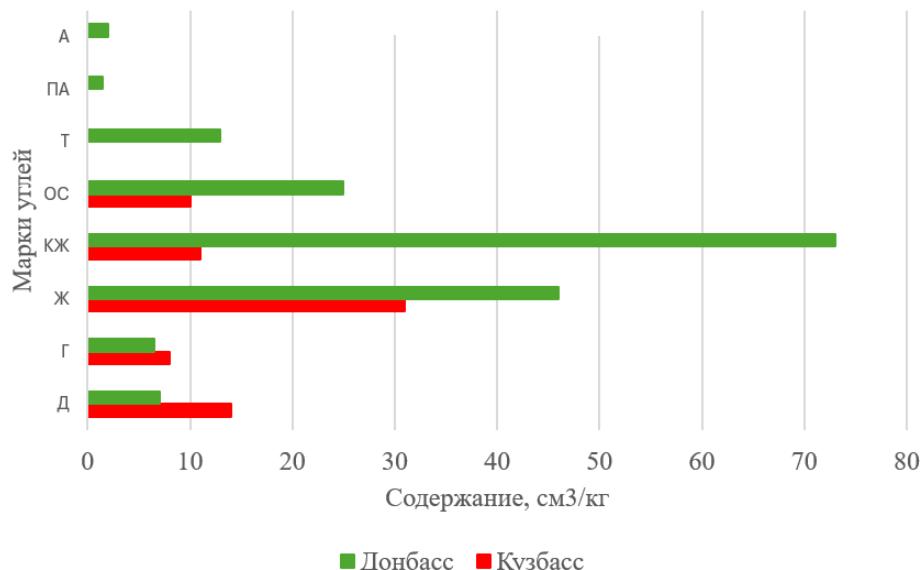


Рисунок 2 – Сравнение марок углей по содержанию в них остаточных углеводородов

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).

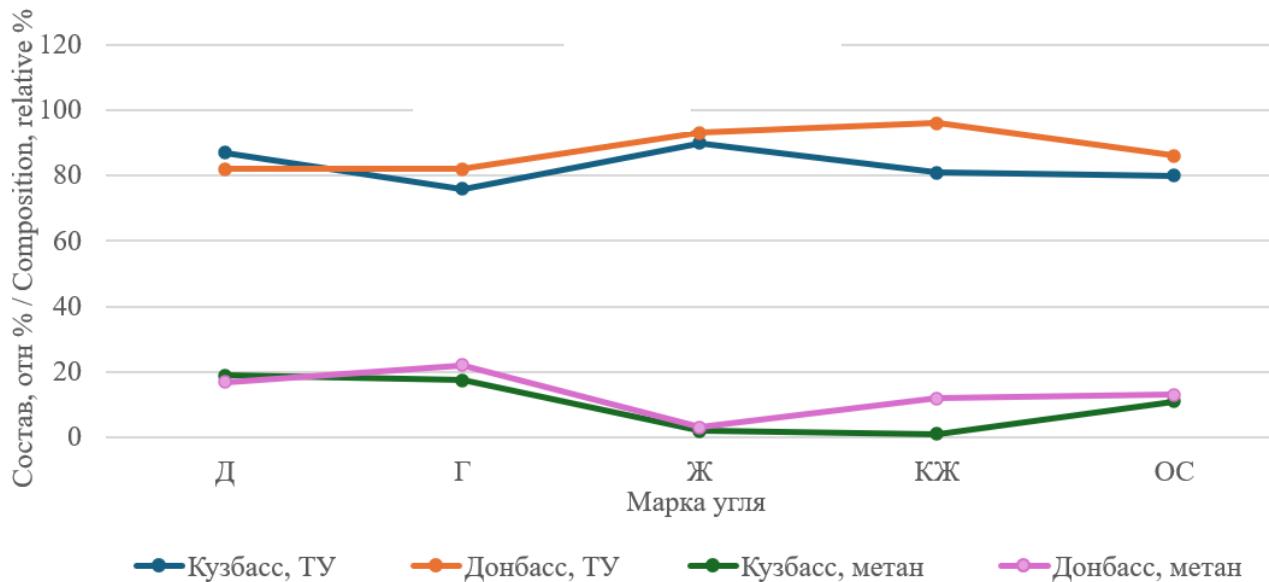


Рисунок 3 – Сравнение процентных распределений содержания метана и тяжелых углеводородов в остаточных газах углей

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. 2). Результаты исследований сорбированных углеводородов, извлеченных из угля пласта Е-5 (марка Ж) и угольной пыли пласта Е-5 представлены в табл. 2 и на рис. 4. Для изучения кинетики десорбции углеводородных газов были выбраны следующие температуры термодегазации: 150, 200, 250 °C. 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.

Анализ данных (рис. 4) показывает, что угольная пыль пласта Е-5 содержит больше углеводородов (бутана, гептана, гексана) по сравнению с углеводородами, извлеченными из углей (пропана, бутана). Факт большего содержания тяжелых углеводородов в угольной пыли по сравнению с углем 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. 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 (табл. 2), то для молекул пропана, бутана и гексана эти значения равны соответственно: 0,632; 0,707; 0,839 нм, то есть, для размера микропор в угле и пыли 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 и больше силы Ван-дер-Ваальса.

Таблица 2 – Количество и состав сорбированных углеводородов, извлеченных из угля и угольной пыли пласта Е-5 методом термодегазации

Вещество, параметры	Углеводороды									$\frac{\sum C-C_6}{\sum C_4-C_6}$
	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	0,6 74	0,780	0,839	
Относительная молекулярная масса	16,04 3	30,07 0	28,054	44,09 7	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	2,6 68	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> 5,61
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	0,0 9 0,5	3,96 20,3	2,31 11,9	19,5 <u>3,26</u> 16,21
Температура самовоспламенения, °С	595	515	435	470		405		286	233	

Примечание: \sum - сумма углеводородов, см³/кг

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. 5).

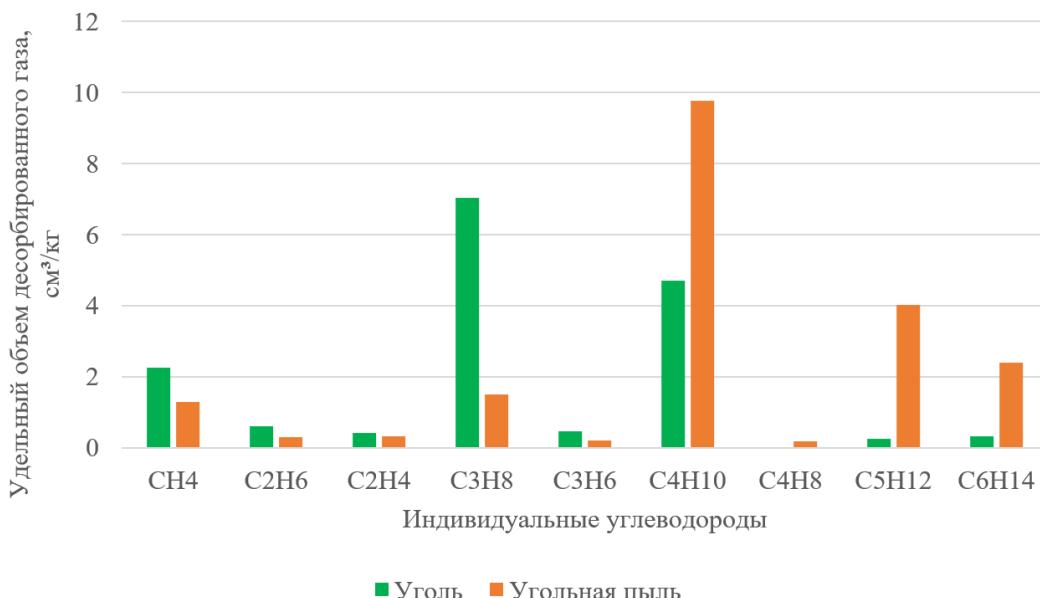


Рисунок 4 – Количество выделяемых углеводородов из угля и угольной пыли пласта Е-5

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

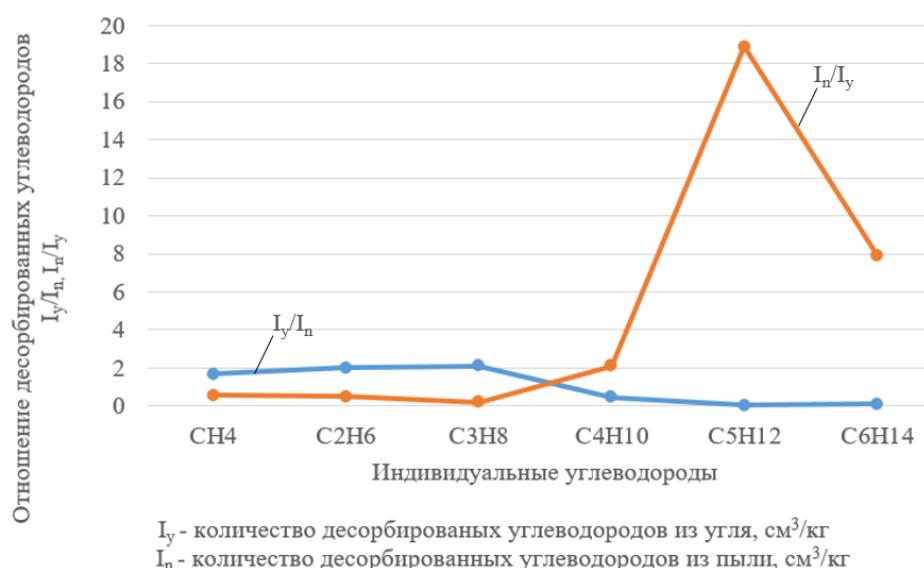


Рисунок 5 – Соотношение сил адсорбционного взаимодействия в угле и в пыли угля пластов средней стадии метаморфизма

Результаты исследования кинетики десорбции углеводородных газов из угольной пыли представлены в табл. 3. Расчетные данные процентного значения десорбированного бутана представлены в табл. 4.

Таблица 3 – Количество и состав десорбированных углеводородов из угольной пыли пласта Е-5

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

Таблица 4 – 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

Функциональные зависимости десорбции пропана и бутана при 150°C, 200°C и 250°C имеют вид:

$$I_{\text{пропан},150} = -21,74 \cdot d^3 + 2,43 \cdot d^2 - 7,98 \cdot d + 0,97; \quad (1)$$

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

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

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

$$I_{\text{пропан},250} = 3,99 \cdot d^3 - 17,98 \cdot d + 18,1 \cdot d + 0,54; \quad (5)$$

$$I_{\text{бутан},250} = 101,9 \cdot d^3 - 162,89 \cdot d^2 + 65,01 \cdot d + 1,8 \quad (6)$$

где $I_{\text{пропан}}$; $I_{\text{бутан}}$ – количество десорбированного пропана и бутана соответственно при температурах дегазации 150 °C, 200°C и 250°C, см³/кг; d – размер частиц угольной пыли, мм.

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.

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. 6).

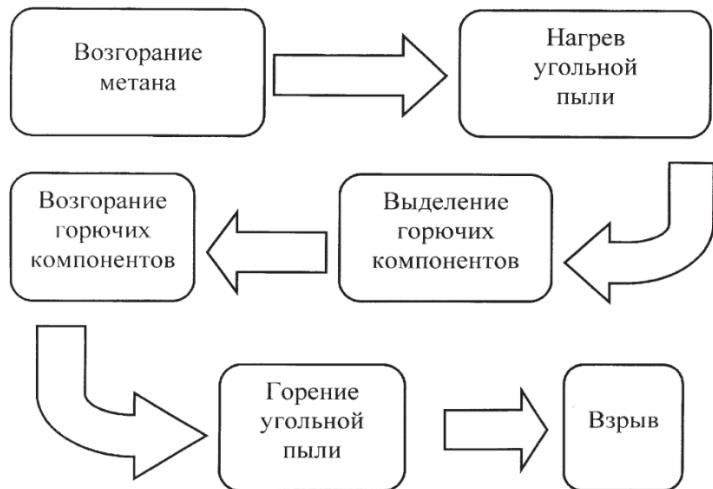


Рисунок 6 – Схема процессов возгорания с последующим взрывом

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%, $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$ – 0,0011%, $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ – 0,0010%.

На рис. 7, а, б, в, г, д представлено изображение пылевых частиц с последующим увеличением центральной части этого изображения. На рис. 7, а, б представлены изображения двух частиц пыли, расположенных в центральной части рисунка 7, а. Крупные частицы (монолит) несут на своей поверхности мелкие частицы (рис. 7, б), покрывающие монолит по всем его сторонам.

Электронные изображения высокого разрешения (рис. 7, в, г, д) показывают, что частицы с аэродинамическим диаметром 5–10 мкм являются носителями большого числа сателлитов размером от 2 до 0,5 мкм. На частице пыли радиусом 500 мкм (рис. 7, а), расположенной в центральной части изображения, 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 (рис. 7, б).

Выполнено сравнение сил аутогезии и гравитации (табл. 5). Сила аутогезии F_K , то есть слабых аттракционных сил, действующих между любыми молекулами, может быть рассчитана по формуле Лондона-Ван-дер-Ваальса

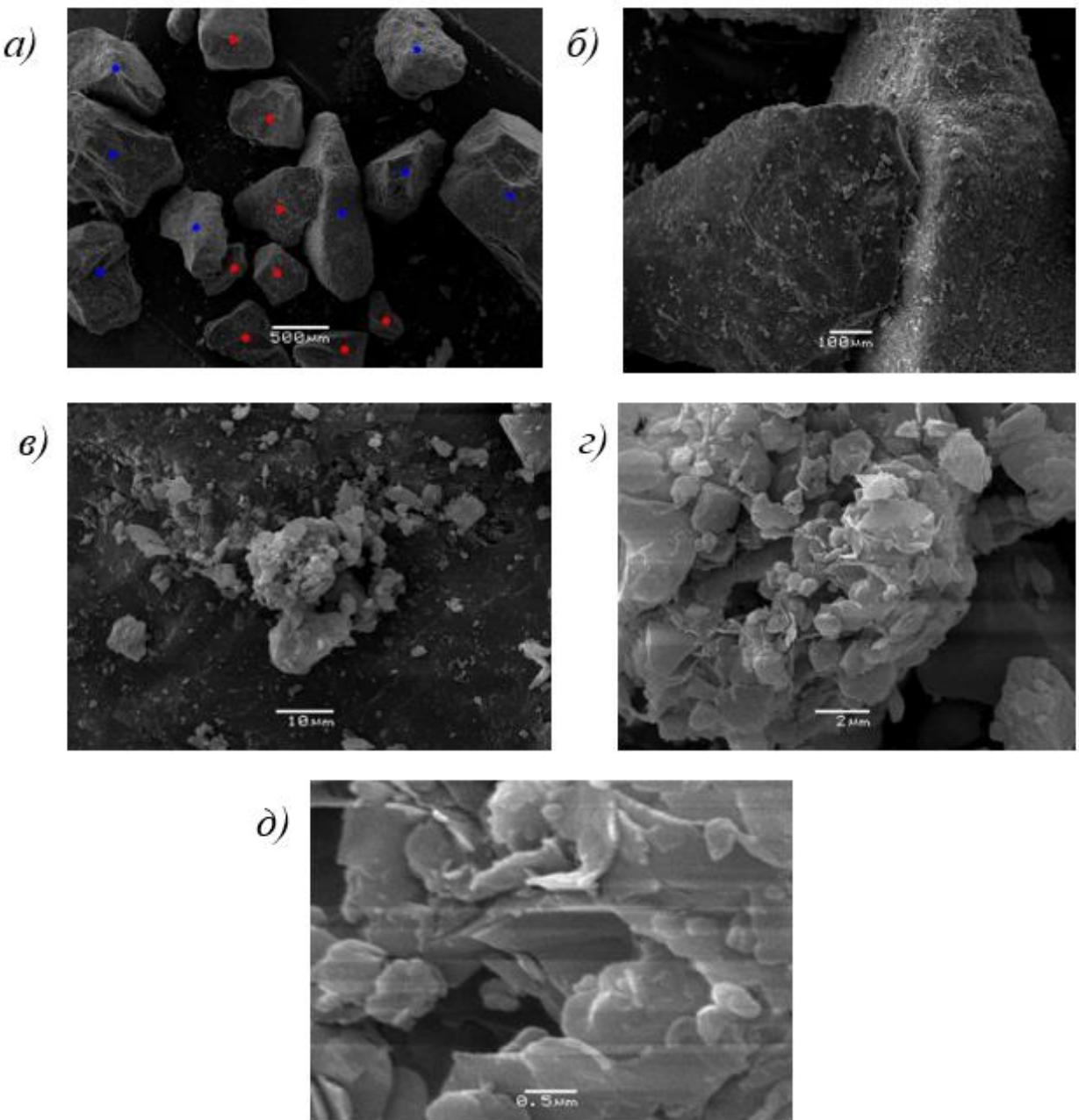


Рисунок 7 – Форма пылевых частиц угля марки Ж

$$F_K = \frac{A}{6} \cdot \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)d^2}, \quad (7)$$

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; R_1 и R_2 – радиусы большой и маленькой частиц соответственно, мкм).

Анализ данных табл. 5 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. 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.

Таблица 5 – 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				
<i>1</i>	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, $i = 1, \dots, 11$.

Электронное изображение позволило установить максимальный радиус частицы (17 мкм) для равновесного соотношения сил аутогезии и гравитации, и разность расчетных значений этих сил определяет величину силы противодействия силам аутогезии: $1,71 \cdot 10^{-7} - 4,0 \cdot 10^{-10} = 1,706 \cdot 10^{-7}$, то есть эти силы противодействия сопоставимы по своему значению с силами аутогезии.

Выполненные исследования согласуются с теорией ортокинетической коагуляции (прилипания 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.

Для подтверждения наличия тяжелых углеводородов в углях марок Ж, ГЖ были проведены термогравиметрические исследования (рис. 8, 9) изменения массы навесок угля (марки ГЖ, Ж, А) при изменении их температур.

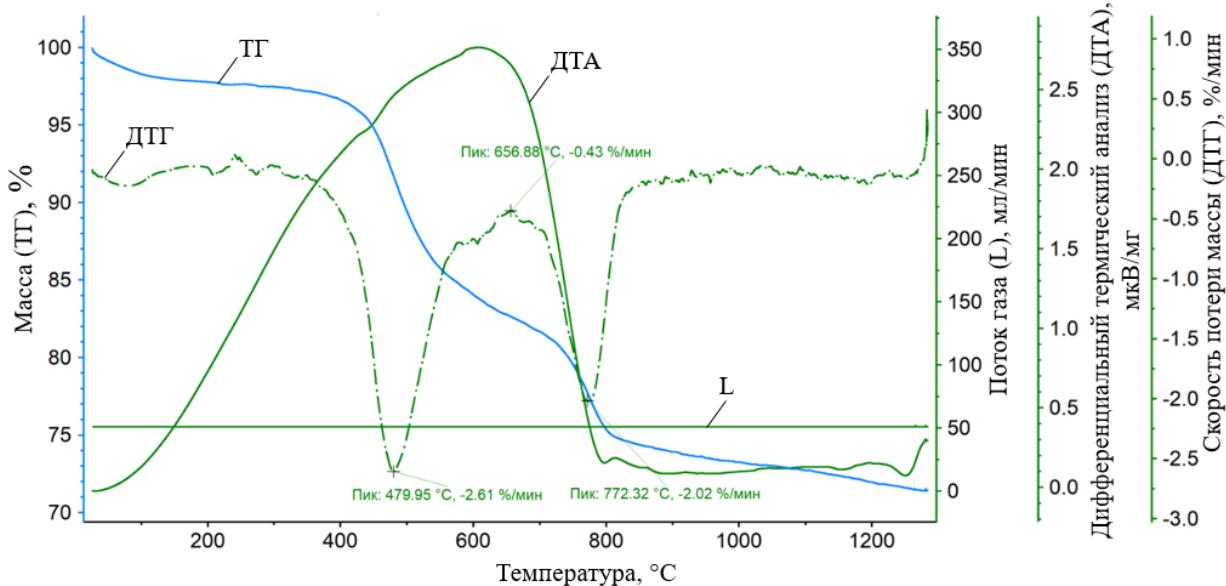


Рисунок 8 – Термогравиметрический анализ (ТГА) угля марки Ж (пласт Е-5, шахта «Осинниковская»)

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

Потеря массы образца (рис. 8) 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, как показывает график ДТГ. Первая ступень охватывает диапазон температур около 350-660 °С, вторая – около 700-870 °С. Согласно графику кривой дифференциального термического анализа (ДТА), первый пик (479,95 °С) связан с эндотермическими процессами, требующими поглощения тепла (испарение, десорбция газов), второй (772,32 °С) – с экзотермическими процессами, сопровождающимися выделением тепла. 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.

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 скорости потери массы при испарении влаги. Таким образом, при десорбции газов испаряется что-то тяжелое, и это не метан, так как молекулярная масса метана меньше даже молекулярной массы воды. Следовательно, на второй ступени потери массы испаряются тяжелые углеводороды.

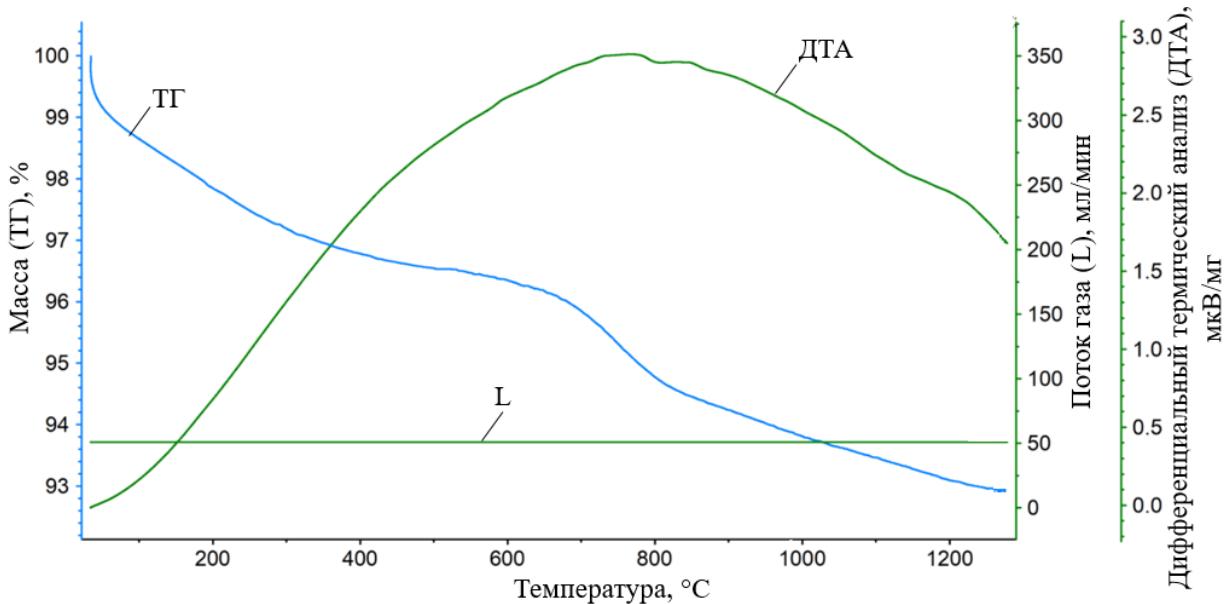


Рисунок 9 – Термогравиметрический анализ (ТГА) угля марки А

Самая маленькая потеря массы в диапазоне температур от 100 до 800°C наблюдается в углях марки А (рис. 9) (из-за отсутствия углеводородов в угле), составляя 7%, что в 5 раз меньше в сравнении с марками Ж и ГЖ.

В составе остаточных газов углей присутствуют не только горючие компоненты, но и негорючие балластные газы, а именно, азот и диоксид углерода, наличие которых необходимо учитывать при прогнозных оценках пожарной опасности. Присутствие в остаточных газах балласта увеличивает пределы воспламеняемости (табл. 6). По результатам исследований соотношений горючих и негорючих компонентов в остаточных газах угольных пластов построены графики. На рис. 10 и 11 показаны соотношения горючих и негорючих компонентов для углей низкой и высокой стадий метаморфизма, а также углей средней стадии метаморфизма.

Из анализа графических данных (рис. 10) следует, что для бурых углей содержание углеводородных газов в остаточных газах углей не превышает 15%, для антрацитов – 3%. При этом содержание CO₂ 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%, поэтому 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.

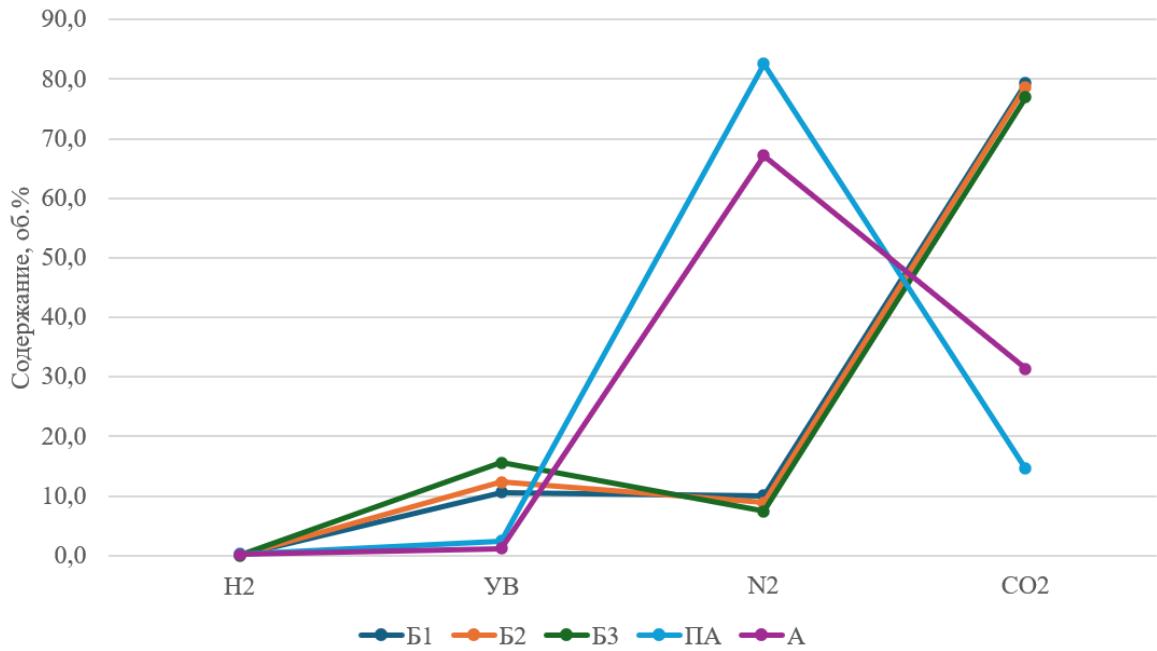


Рисунок 10 – Соотношения горючих и негорючих компонентов в остаточных газах углей низкой и высокой стадий метаморфизма

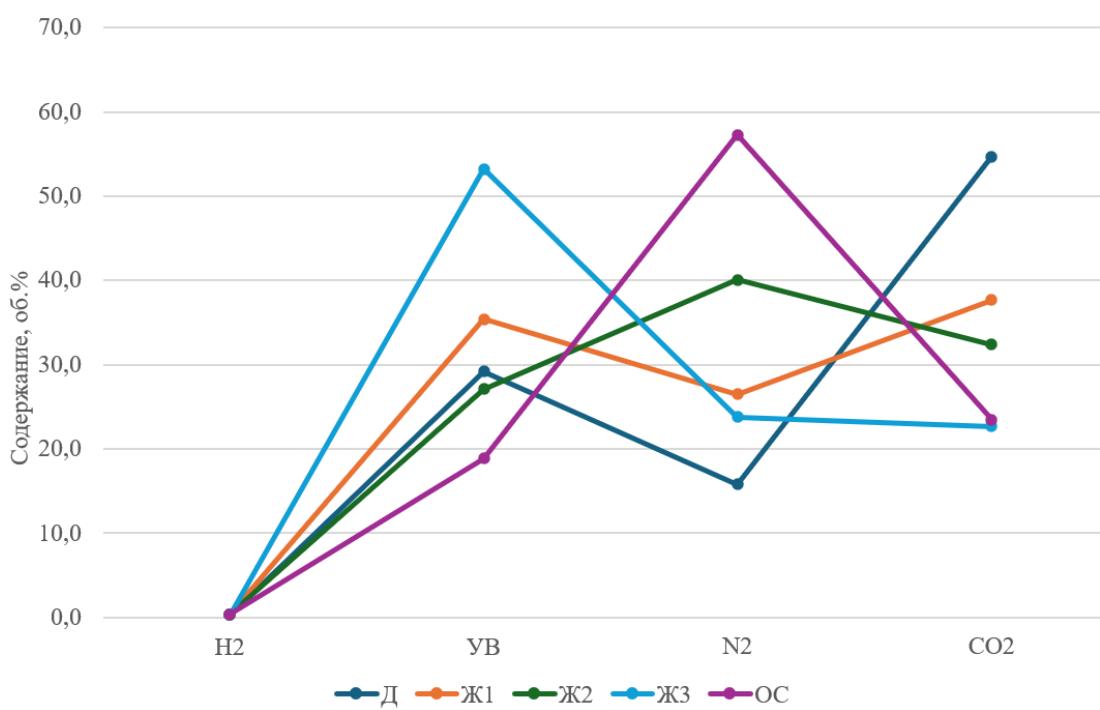


Рисунок 11 – Соотношения горючих и негорючих компонентов в остаточных газах углей средней стадии метаморфизма

Совсем другая картина наблюдается для остаточных газов углей средней стадии метаморфизма. 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 нижних концентрационных пределов взываемости тяжелых углеводородов.

Были рассчитаны концентрационные пределы взываемости «чистой» смеси углеводородных газов в остаточных газах исследуемых углей и – концентрационные пределы взываемости (табл. 7).

Таблица 7 – Расчетные пределы взываемости «чистой» смеси углеводородов (УВ) и остаточных углеводородных газов с балластными газами

Объект	Марка угля	Расчетные концентрационные пределы взываемости «чистой» смеси УВ, об%		Содержание балластных газов, об.-%	Расчетные концентрационные пределы взываемости реальных ОГУ 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	5,9	25,8
Пл. Е-5, Осинниковская (Кузбасс)	Ж(1)	2,1	9,3	64,2	5,7	22,3
Пл. Е-1, Осинниковская (Кузбасс)	Ж(2)	2,1	8,7	72,5	7,2	25,7
Пл. К-5, Осинниковская (Кузбасс)	Ж(3)	1,8	8,7	46,5	3,3	15,1
Пл. 21, Алардинская (Кузбасс)	ОС	1,8	9,2	80,8	8,7	34,5
Шахта 222, Чистяково-Снежнянский район (Донбасс)	ПА	4,2	14,1	97,2	61,0	85,4
Шахта Алмазная, Гуково, Ростовской обл.	А	5	15	98,6	79,0	92,6

На рис. 12 показано, что для рассматриваемой марки угля Ж требуется повышение содержания балластных газов до уровней перекрытия расчетных пределов взываемости реальных ОГУ с учетом балластных газов. В этом случае рекомендуется использование разработанной в докторской диссертации технологии нейтрализации остаточных газов высокогазоносных угольных пластов при обработке их газонаполненными растворами ПАВ.

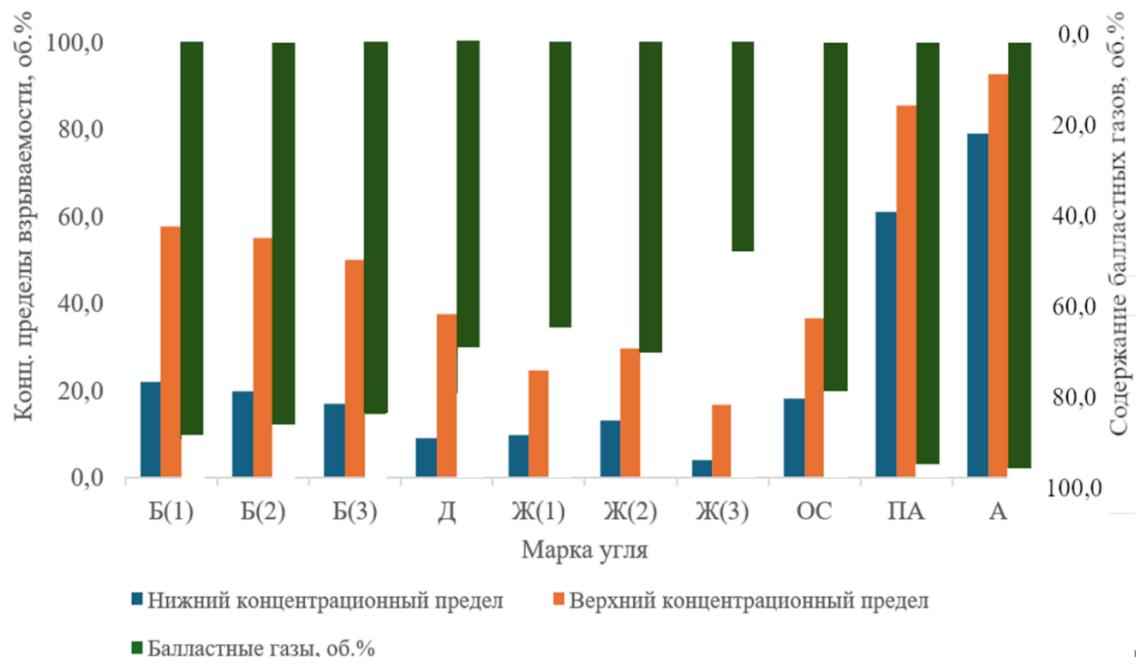


Рисунок 12 – Расчетные пределы взываемости смеси воздуха и остаточных газов углей

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, поэтому для этих марок угля требуется повышение содержания балластных газов до уровней, перекрывающих расчетные пределы взываемости реальных остаточных газов.

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, нейтрализующего остаточные углеводородные газы предлагается использовать азот, в качестве ПАВ – смачиватель СП-01. 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 0,3% 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.

Расчетное значение количества инертного газа, которое необходимо подать в угольный пласт для увеличения балластной составляющей в остаточных газах углей марок Д, Ж, ОС, представлено в табл. 5.

Таблица 5 – 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)

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.

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 средней стадии метаморфизма при обработке угольного массива газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ, что позволяет обеспечить увеличение содержания балластных газов, приводящих к увеличению концентрационных пределов взываемости 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 пласти 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 350-370 °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 (десорбцией тяжелых углеводородов), 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%.

7. Расчетами установлено, что для бурых углей содержание углеводородных газов в остаточных газах углей не превышает 15%, для антрацитов – 3%. При этом содержание CO₂ в остаточных газах бурых углей очень большое (77-80%); для антрацитов и полуантрацитов содержание углеводородных газов (горючих) не превышает 3%, при этом инертного газа N₂ 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 низких концентрационных пределов взываемости 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 взываемости 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.

Результаты исследований отражены в следующих публикациях автора:

1. 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 (Scopus).
2. 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 (Scopus).
3. 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 (Scopus).
4. 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 (BAK, Scopus).
5. 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 (Scopus).
6. 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. (Scopus).
7. 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).