

Федеральное Государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
**«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени Т.Ф. ГОРБАЧЕВА»**

На правах рукописи

СИН СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНЕРТИЗАЦИИ
АЗОТОМ ВЫРАБОТАННЫХ ПРОСТРАНСТВ ДЛЯ ПРОФИЛАКТИКИ
И ПОДАВЛЕНИЯ САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ В ШАХТАХ**

2.10.3 - Безопасность труда
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д. т. н., проф. В. А. Портола

Кемерово 2023

СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	5
1	АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ БОРБЫ С ЭНДОГЕННЫМИ ПОЖАРАМИ В ВЫРАБОТАННОМ ПРОСТРАНСТВЕ ШАХТ.....	10
1.1	Систематизация данных о возникновении эндогенных пожаров в шахтах Кузбасса	10
1.2	Обзор исследований по проблеме профилактики самовозгорания угля	19
1.3	Анализ практики борьбы с эндогенными пожарами	25
1.4	Оценка перспективы применения азота для борьбы с самовозгоранием угля в шахтах	34
2	ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ УГЛЯ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ОКИСЛЕНИИ	38
2.1	Методика исследований низкотемпературного окисления угля и угольной пыли	38
2.2	Исследование влияния степени измельчения угля на константу скорости сорбции кислорода ...	40
2.3	Исследование влияния азота на сорбционную активность угля в условиях низкотемпературного окисления	43
2.4	Исследование влияния азота на сорбционную активность угля, предварительно разогретого до температуры возгорания	49
2.5	Анализ результатов исследований.	52
3	ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЗОТА НА УГОЛЬ В ПРОЦЕССЕ НАГРЕВА	54
3.1	Методика исследований угля в условиях нагрева	54

	3.2	Оценка влияния примеси кислорода на температуру стабилизации очага при нагреве угля и угольной пыли в условиях лабораторного эксперимента	59
	3.3	Оценка влияния примеси кислорода в азоте на выделение индикаторных газов при самовозгорании угля	64
	3.4	Влияние примеси кислорода в азоте на выделение индикаторных газов при самовозгорании угольной пыли	71
	3.5	Анализ результатов исследований	77
4	ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕСИ КИСЛОРОДА В АЗОТЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ И ТУШЕНИЕ ОЧАГОВ САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ		82
	4.1	Математическое описание процесса самонагрева при окислении угля	82
	4.2	Моделирование влияния фракционного состава скопления угля на процесс его разогрева при продувке азотом с примесью кислорода	87
	4.3	Исследование динамики охлаждения очага самовозгорания угля при его продувке азотом с примесью кислорода	96
	4.4	Анализ результатов исследований	101
5	РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ПРОФИЛАКТИКИ И ПОДАВЛЕНИЯ ОЧАГОВ САМОВОЗГОРАНИЯ В ВЫРАБОТАННОМ ПРОСТРАНСТВЕ		105
	5.1	Установки для получения азота	105
	5.2	Использование азота для получения пены	112

5.3	Разработка технологических схем подачи азота в выработанное пространство	118
5.4	Реализация технологической схемы на пласте 67 Шахты «Талдинская-Западная-1»	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		132
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		135

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Высокая потребность в угле приводит к увеличению его добычи в России, достигшей 440 млн. т в 2018 г. При этом значимо возрастает долевое участие Кузбасса в планируемом приросте добычи угля. По итогам 2019 года в бассейне добыто 250 миллиона тонн угля, что составляет 57 % общероссийского уровня.

Добыча угля в шахтах сопряжена с вероятностью возникновения аварийных ситуаций, угрожающих существованию предприятий, а также здоровью и жизни людей. Наиболее распространенной аварией на угольных предприятиях являются пожары. Пожары от самовозгорания угля на всех этапах освоения бассейна негативно влияли как на технико-экономические показатели шахт, так и на состояние травматизма шахтёров и горноспасателей.

С увеличением глубины горных работ возрастает выделение метана и для преодоления «газового барьера» все большее распространение находят схемы проветривания выемочных участков с выносом смеси воздуха, метана и угольной пыли по выработанному пространству, что способствует интенсификации процесса окисления теряемого угля и росту температуры угольных скоплений.

Традиционно разнонаправленные меры борьбы с газом и эндогенными пожарами в этих условиях ещё более обострили проблему защиты выемочных полей от самовозгорания угля. Поэтому в настоящее время актуальность проблемы борьбы с эндогенными пожарами возросла в связи с необходимостью оценки эффективности традиционных мер их предупреждения в новых горно-геологических и горнотехнических условиях ведения горных работ.

Целью работы является повышение безопасности применения азота для борьбы с самовозгоранием угля в зависимости от фракционного состава,

скорости фильтрации газа, температурного состояния скопления и примеси кислорода в рудничной атмосфере в зоне его формирования.

Идея работы состоит в использовании эффекта термостабилизации скопления в ходе гетерогенной реакции окисления угля различной фракции за счёт управления концентрацией примеси кислорода, скоростью фильтрации и влагосодержанием инертного газа.

Объектом исследований являются скопления угля и угольной пыли, склонных к самовозгоранию шахтопластов.

Предметом исследований являются воздействие азота на процесс самовозгорания угля.

Задачи исследований:

- исследовать влияние обработки азотом угля и угольной пыли на их сорбционную активность по отношению к кислороду;

- изучить влияние примеси кислорода в подаваемом инертизирующем составе на выделение пожарных индикаторных газов из очагов самовозгорания угля и угольной и пыли;

- определить параметры подаваемой инертизирующей смеси, обеспечивающие предотвращение и тушение очагов самовозгорания угля.

Методы исследований. Решение поставленных задач реализовано с использованием комплексного метода, включающего:

- анализ статистических данных о возникновении эндогенных пожаров в шахтах Кузбасса и России;

- лабораторные исследования сорбционной активности угля и угольной пыли после обработки азотом, зависимости температуры стабилизации очагов самонагревания угля от концентрации кислорода в азоте, а также выделения индикаторных пожарных газов из угля, нагреваемого в среде азота;

- численное математическое моделирование процесса самовозгорания угля и угольной пыли при подаче азота;

- шахтные исследования атмосферы выработанного пространства в условиях длительной его инертизации путём нагнетания азота.

Научные положения, выносимые на защиту:

- обработка сухим азотом снижает сорбционную активность по отношению к кислороду прогретого угля в 1,2-1,5 раза, но увеличивает активность свежееобнаженного угля за счет испарения влаги, а увлажненный азот уменьшает его активность в 1,2 – 1,6 раз, что позволяет использовать увлажненный азот для предотвращения самовозгорания угля;

- подача азота в скопление разогретого угля и угольной пыли уменьшает выделение оксида углерода и водорода с падением содержания примеси кислорода, что снижает эффективность контроля состояния очага, однако отношение концентраций оксида углерода к водороду растет с увеличением температуры угля и может использоваться для контроля состояния очагов самовозгорания;

- предотвратить развитие процесса самовозгорания угля и угольной пыли на любой стадии развития можно снижением содержания кислорода и варьированием скорости фильтрации газа через скопление, а экстремальные значения примеси кислорода при инертизации атмосферы азотом в районе формирования очагов самовозгорания угля не являются постоянными величинами и зависят от его фракционного состава, скорости фильтрации газа и температуры очага.

Научная новизна.

1. Установлено активирующее влияние обработки азотом на сорбционную активность угля и антипирогенное воздействие после насыщения азота влагой.

2. Найдены зависимости выделения пожарных газов из нагреваемого угля и угольной пыли от изменения содержания примеси кислорода в азоте.

3. Получены зависимости экстремальных значений примеси кислорода в азоте, обеспечивающих стабилизацию на уровне ниже температуры возгорания, от фракционного состава угля и скорости фильтрации газа.

Достоверность научных положений подтверждается:

- большим объемом статистических данных об эндогенных пожарах в Кузбассе (в течение периода 1984-2020 гг.);
- применением в экспериментальных исследованиях нормативных методик и приборов для оценки термостабилизации гетерогенной системы «уголь-азот»;
- положительными результатами внедрения инертизации выработанных пространств азотом с использованием предложенных решений.

Личный вклад автора включает в себя:

- анализ результатов теоретических исследований и практики борьбы с самовозгоранием угля с оценкой перспективы применения азота для этой цели;
- разработку математической модели для оценки влияния примеси кислорода в азоте и скорости фильтрации смеси на температуру стабилизации очагов самонагревания угля и угольной пыли;
- определение необходимости совершенствования газоаналитического метода обнаружения очагов самовозгорания угля и контроля за ходом их тушения при использовании для этой цели азота с примесью кислорода.

Практическое значение работы заключается в разработке и внедрении технологических схем профилактики и подавления самовозгорания угля способом инертизации выработанных пространств в условиях применения комбинированной схемы проветривания очистных забоев.

Реализация результатов работы.

Результаты работы переданы организациям, отработывающим склонные к самовозгоранию шахтопласты угля, для предотвращения самовозгорания и ликвидации эндогенных пожаров, возникающих в выработанных пространствах шахт.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались и получили одобрение на: VIII, X и XIV Международных

научно-практических конференциях «Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах (Кемерово, 2009, 2013, 2021г.); на IV и V Международных научно-практических конференциях «Инновационные технологии и экономика в машиностроении» (Томск, 2013, 2014г.); на II и III Всероссийских молодежных научно-практических конференциях «Экологические проблемы промышленно развитых и ресурсодобывающих регионов: пути и решения» (Кемерово, 2017, 2018г.); на XVIII Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (Кемерово, 2020).

Публикации. По результатам исследований опубликованы 23 научных работы, в том числе 11 статей в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, получен один патент на изобретение.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 5 разделов, заключения и содержит 146 страниц текста, 48 рисунков, 18 таблиц и список литературы из 119 наименований.

1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ БОРЬБЫ С ЭНДОГЕННЫМИ ПОЖАРАМИ В ВЫРАБОТАННОМ ПРОСТРАНСТВЕ ШАХТ

1.1. Систематизация данных о возникновении эндогенных пожаров в шахтах Кузбасса

Систематизация данных статистики о возникновении эндогенных пожаров является составной частью исследований по проблеме борьбы с самовозгоранием угля. Она позволяет выявить наиболее характерные для конкретных условий и времени факторы, обуславливающие пожароопасность бассейна. Кроме того, она делает возможной ранжировать по эффективности меры, направленные на устранение факторов, увеличивающих вероятность возникновения эндогенных пожаров в действующих и отработанных выемочных полях.

По этой причине анализу статистических данных уделено большое внимание в ряде работ. К их числу относятся работы П.А. Манукяна и М.Д. Бузикова [1, 2], в которых проанализированы пожары, возникшие в Кузбассе в 30-х - 40-х годах прошлого столетия. Более поздние данные использованы А.Б. Захаровым, Н.Ф. Дмитриюком, Н.И. Линденау, В.М. Маевской, В.В. Егошиным, В.Г. Игишевым и др. [3, 4, 5, 6, 7].

Обобщение исследований этих авторов показывает, что пожары, вызванные самовозгоранием угля, происходили на шахтах Кузбасса во все периоды эксплуатации, независимо от применяемых технологий, угледобывающей техники и изменения параметров пластов. При работе шахт Прокопьевско–Киселёвского района наблюдался рост числа пожаров при увеличении глубины горных работ из-за сложности изоляции ранее списанных очагов самовозгорания на верхних горизонтах.

Такое положение впервые было отмечено А.Б. Захаровым [8], который, оценивая пожароопасность при углублении горных работ, приводит данные, что из 69 пожаров, зарегистрированных при разработке нижних горизонтов шахт «Коксовая-1», № 5-6 и 3-3бис, 52 возникли в выемочных полях,

расположенных под ранее списанными пожарами первого и второго горизонтов и только 17- в полях, над которыми пожаров не было.

Более детально влияние глубины работ на эндогенную пожароопасность выемочных полей и эффективность профилактики на пластах крутого и крутонаклонного падения Кузбасса исследовано В.Г. Игишевым [7]. Предметом его исследований явились статистические данные о 1042 не пожарных и 185 пожарных полях, отработанных в наиболее пожароопасном Прокопьевско-Киселёвском районе.

В период реструктуризации отрасли (90-е годы) в первую очередь закрывались шахты с наибольшим количеством аварий. Поэтому представляется целесообразным отражение влияния этого фактора на общую аварийность и на статистику по эндогенным пожарам. Для оценки тенденции аварийности рассмотрим периоды: 1984-1988 гг; 1991-1995 гг; 1996-2000 гг; 2001-2005 гг; 2006-2010 гг; 2011-2020 гг. В период с 1984 по 1988 гг в Кузбассе возникло 113 эндогенных пожаров. Минимум зафиксирован в 1987 г (17 пожаров). Максимум- в 1984 г (30 пожаров). Среднее число пожаров не превысило 23 в год, в то время как в 1962-1966 гг. в Кузбассе ежегодно возникало 42 пожара от самовозгорания угля. При этом долевое участие Прокопьевско-Киселёвского района достигало 83 %. Число пожаров в остальные периоды времени приведено на рис. 1.1

Как видно из приведённых данных, среднегодовое число пожаров постоянно снижается. Однако при этом отмечается повышение долевого участия Кузбасса в уровне эндогенной пожароопасности отрасли в целом. В 1991-1995 г оно составило 55 % от общероссийского. В 1996-2000 г. достигло 65 %. В 2001-2005 гг. увеличилось до 82 %, в 2006-2010 гг. составило 91 % и в 2011-2020 достигло 95 %.

Реструктуризация угольной промышленности Кузбасса в анализируемые годы привела к сокращению числа забоев при одновременном росте нагрузки. В настоящее время, например, на шахтах бассейна ряд лав работает с нагрузкой по добыче до 50000 т/сут.

Концентрация горных работ с ростом их глубины, газообильности и запылённости сформировала качественно новую ситуацию, характеризующуюся появлением дополнительных факторов пожароопасности и снижением эффективности общепринятых способов борьбы с эндогенными пожарами. Поэтому задача профилактики самовозгорания угля в действующих выемочных полях приобрела особую актуальность.

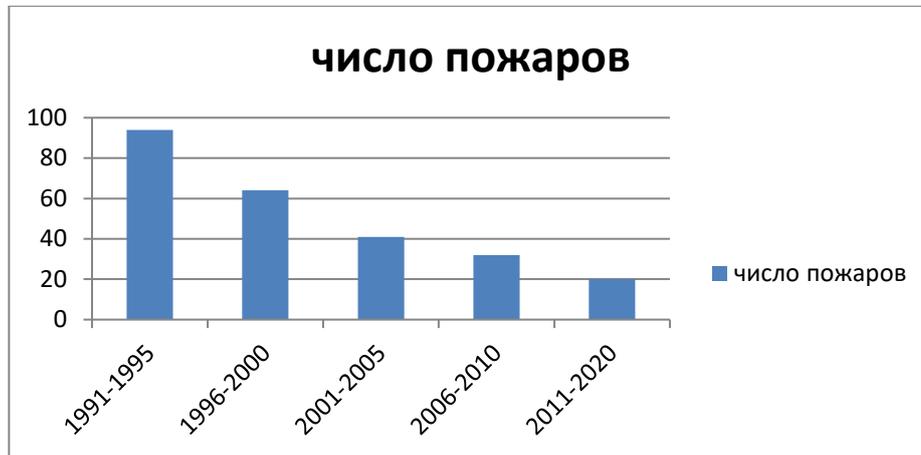


Рисунок 1.1 – Количество эндогенных пожаров в Кузбассе

Для сравнения потерь от эндогенных пожаров, возникшим в 1995г, 2004г, 2005г, 2009г. и 2010г, использовали общие затраты горноспасателей на работу в респираторах (человеко-часы) и материальный ущерб. За четыре последних года из вышеуказанных возможно сравнение по прямому материальному ущербу за услуги ВГСЧ, используемые материалы и стоимость оборудования, теряемого при изоляции очагов пожаров.

В 1995 г. в Кузбассе возникло 13 эндогенных пожаров. При общих затратах 26743 чел.ч на ликвидации пожаров было отработано 17508 чел.ч. Средние затраты на один пожар составили соответственно 2057 и 1346 чел.ч. Семь пожаров возникли в выработанном пространстве действующих полей и 6 пожаров – в выработанном пространстве отработанных изолированных или находящихся на стадии изоляции. В целиках у выработок пожаров не было. Долевое участие пожаров шахт Прокопьевско-Киселёвского района составляло 84 % (11 пожаров). Материальные затраты в ценах 1995 г

составили 6579 млн. руб. при общем ущербе от возникновения всех аварий 64118 млн. руб.

В 2004 г возникло 12 эндогенных пожаров. Из них принято к учёту 8. В связи с тем, что в ликвидации всех двенадцати пожаров принимали участие ВГСЧ, то нами при оценке объёма работ и прямого ущерба от этого вида аварий были суммированы все случаи. Из 12 пожаров только 2 (17 %) возникли в целиках у горных выработок. Десять очагов (83 %) обнаружены в выработанном пространстве действующих (4 пожара) и отработанных выемочных полей (6 пожаров). Работа ВГСЧ оценивается в 30238 чел.ч, в том числе в респираторах – 7943 чел.ч. Прямой материальный ущерб достиг 69 млн. 260 тыс. руб. при среднем на одну аварию – 5 млн. 77 тыс. руб.

В 2005 г ВГСЧ участвовало в ликвидации 6-ти эндогенных пожаров, из которых к учёту были приняты только 3. К анализу приняты все случаи, т. к. причиной, например, взрыва метана пыли на шахте «Есаульская» 08.02.2005 г. послужило самонагревание угольной пыли в отработанной части пласта на сопряжении конвейерного штрека 29-26 с монтажной камерой.

Причиной вызова ВГСЧ на шахту № 12 08.05.2005 г явилось самовозгорание угля на пласте «Прокопьевский» гор ±0 м. Отработано 583 чел.ч, из которых 136 в респираторах. Случай не был принят к учёту, хотя материальный ущерб составил 1 млн. 395 тыс. руб.

Также не был учтён эндогенный пожар на сопряжении полевого штрека № 2 с квершлагом № 27 гор +210 м. ВГСЧ отработало на его ликвидации 3389 чел.ч, в том числе 1235 чел.ч в респираторах. Ущерб достиг 4 млн. 300 тыс. руб.

С учётом всех шести случаев трудозатраты общие составили 65543 чел.ч, в том числе в респираторах -11030 чел.ч. Материальный ущерб (прямые затраты) - 339 млн. 932 тыс. руб. Средние цифры на один пожар соответственно равны: 10923 чел.ч; 1838 чел.ч; 56 млн. 658 тыс. руб.

В 2009 г возникло 7 эндогенных пожаров. К учёту приняты 2. Суммарные трудозатраты составили 12893 чел.ч (в среднем 1842 чел.ч) при

782 чел.ч (в среднем 112 чел.ч) работы в респираторах. Прямой ущерб составил 102 млн. 636 тыс. руб. при среднем на пожар – 14 млн. 662 тыс. руб.

Из шести эндогенных пожаров в 2010 г приняты к учёту три случая. Трудозатраты ВГСЧ составили 10952 чел.ч, в том числе работа в респираторах - 558 чел.ч. Материальный ущерб из-за возникновения шести пожаров достиг 476 млн. 989 тыс. руб. На один пожар эти показатели распределились следующим образом: 1825 чел.ч; 93 чел.ч; 79 млн. 498 тыс. руб.

Исследованная за 2004-2005 гг выборка составляет 31 пожар, возникших в следующих местах:

- в целиках или в горных выработках – 3 пожара (11 %);
- в выработанном пространстве действующих забоев – 20 пожаров (62 %);
- в выработанном пространстве отработанных и изолированных участков – 8 пожаров (27 %).

Сравнивая приведенные значения с данными 1987 г, полученными в работе [7], можно сделать вывод, что распределение пожаров по местам возникновения длительное время остаётся неизменным. Пожары в выработанном пространстве составляют 89-90 %. Эта специфика предопределяет трудности обнаружения, локации, локализации и тушения очагов самовозгорания угля в Кузбассе.

Из общего числа пожаров в анализируемые годы на Прокопьевско-Киселёвский район приходится 73% (32 пожара). Однако сравнение таких показателей, как общие трудозатраты и работа в респираторах - позволяет сделать следующие выводы. Так, на изоляцию одного эндогенного пожара в шахтах Прокопьевско – Киселёвского района средние трудозатраты составляют 1673 чел.ч при 73 чел.ч работы в респираторах.

На шахтах Южного Кузбасса, отрабатывающих пологие пласты, за рассматриваемый период на ликвидацию одного эндогенного пожара средние трудозатраты существенно больше (12023 чел.час и 1717 чел.час). Средний

прямой материальный ущерб от одного эндогенного пожара в этом районе за 2004-2005 гг. и 2009-2010 гг. соответственно 112 млн. 993 тыс. руб. и 18 млн. 674 тыс. руб., что больше чем в Прокопьевско-Киселёвском районе в 6 раз.

Из приведённых данных следует, что в произошло смещение эпицентра проблемы борьбы с самовозгоранием угля от региона с преобладанием крутых и крутонаклонных пластов в регионы с пластами пологого и наклонного падения.

Наряду с большим экономическим ущербом самовозгорание угля может приводить к воспламенению пылегазовых смесей, что угрожает жизни шахтёров и горноспасателей. Взрыв на шахте «Красногорская» 26.06.95 г, причиной которого явился эндогенный пожар, привёл к гибели четырёх шахтёров в процессе ведения очистных работ и четырёх горноспасателей, занятых на возведении перемычек при его изоляции. На шахте «Есаульская» 08.02.2005 г самовозгорание угольной пыли в отработанной части лавы 29-26 явилось причиной взрыва метана. В результате пострадало 30 человек, в том числе 25 – смертельно. В числе последних 17 горноспасателей и 8 горнорабочих.

Рецидив самовозгорания угля в изолированном пространстве отработанного горизонта на пласте Горелом с квершлага № 17 гор. -40 м на шахте им. Ворошилова 14.02.2009 г инициировал взрыв метана. Смертельно травмированы 2 горноспасателя.

Из-за вспышки метана в лаве 0-6-1-13 на пласте VI шахты им. Ленина в 29.07.2008 г пострадали 17 горнорабочих. Источником теплового импульса явилось самовозгорание угля в отработанной части лавы в зоне геологического нарушения.

Динамику эндогенной пожароопасности принято оценивать по числу эндогенных пожаров, возникающих при отработке одного выемочного поля или при подземной добыче 1 млн. т. угля. Изменение этого показателя приведены в таблице 1.1. В таблице 1.1 учтены все эндогенные пожары, в ликвидации которых приняли участие ВГСЧ. Средняя относительная

аварийность от эндогенных пожаров в 2001-2010 гг уменьшилась с 0,09 до 0,07 пожаров на 1 млн. т добычи угля подземным способом.

Таблица 1.1 – Динамика подземной добычи и эндогенной пожароопасности в Кузбассе в 1993-2010 гг.

	1993- -2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Добыча, млн. т.	817,1	92,6	82,6	82,1	81,4	80,6	79,9	84,1	81,8	85,9	79,2
Число по- жаров и ин- цидентов	116	7	5	11	12	6	5	7	7	7	6
Относительная ава- рийность	0,14	0,07	0,06	0,13	0,14	0,07	0,06	0,08	0,08	0,08	0,07
Средняя за период	0,14	0,09					0,07				

Для сравнения. С 1993 г по 2000 г подземная добыча изменялась в пределах 83,6 -127,7 млн. т. в год. При общей добыче 817,1 млн. т. число эндогенных пожаров в этот период достигло 116. Относительная аварийность составила 0,14 пожара на 1 млн. т. добычи. Эти расчёты позволяют сделать вывод о том, что реструктуризация отрасли за счёт закрытия наиболее аварийных шахт позволила снизить эндогенную пожароопасность в Кузбассе в 1,6 раза. После завершения реструктуризации угольной отрасли эндогенная пожароопасность в Кузбассе стабилизировалась. Число пожаров на 1 млн. т. добычи, например, с 2005 по 2010 гг. изменялось в пределах 0,06 – 0,08 при среднем значении в этот период 0,07.

В период реструктуризации в Кузбассе происходили два взаимозависимых процесса – повышение нагрузки на очистные забои при сокращении их числа. По данным В.В. Соболева [10] с 1993 по 2001 гг. среднесуточная нагрузка на механизированный забой увеличилась с 719 до 1494 т, т. е. в 2 раза. При этом в отдельных лавах она превышает 8000 т/сутки. В период с 2005 по 2011 гг. число лав, работающих с нагрузкой более 1,0 млн. т. в год изменялось в пределах 26-31 при среднем 28.

Необходимость преодоления газового барьера при такой высокой нагрузке на забой предопределила расширение области применения прямоточных схем проветривания и внедрение схем с отводом метана по выработанному пространству с помощью газоотсасывающих установок. Негативное влияние этого фактора на эндогенную пожароопасность отражено в работе [9]. В этой работе на примере эндогенного пожара в лаве № 18-21 пласта Толмачёвского на шахте «Полысаевская», возникшего 19.09.2001 г, раскрыта причина такого рода аварии на пласте, который не был отнесён к категории склонных к самовозгоранию. За всю историю его отработки на шахте не было ни одного самовозгорания угля.

Комиссия, расследовавшая пожар, установила, что причиной возникновения эндогенного пожара явилось наличие угольной пыли в отработанной части пласта. Утечки воздуха при работе газоотсасывающего вентилятора (лава проветривалась по комбинированной схеме) составляли 200 м³/мин. Средняя скорость подвигания лавы равнялась 190 м /мес. Потери угля по мощности пласта отсутствовали.

При фактической запылённости в лаве на уровне 325 мг/м³ масса угольной пыли, выносимой утечками воздуха в течение суток, достигала 31,6 кг. Общая масса пыли, отложившейся на пути утечек воздуха в течении года, превысила 11 т.

Следует отметить, что в Кузбассе в отдельных лавах при производительности газоотсасывающих установок до 400 м³/мин и более суточные отложения угольной пыли на пути движения метано-воздушной смеси достигают 90-100 кг. В этом случае она играет роль катализатора самовозгорания угля. Этот фактор чётко обозначен А. Путилиным ещё в 1933 г [11]. Скочинский А.А. и Огиевский В.М в 1954 г [12] также указывали на негативное влияние мелких фракций угля на его самовозгорание. В более поздних работах В.С. Веселовский и др. в монографиях [13, 14, 15, 16] оценивали этот фактор по величине удельной сорбции кислорода углем. При снижении размера частиц от 20-30 мм (мелкий уголь) до размера 0,5-1,0 мм

(угольная пыль) этот показатель увеличился с 0,0020 до 0,0125 мл/г·ч, т.е. в 6 раз.

Таким образом, практика эксплуатации угольных месторождений Кузбасса до и после реструктуризации отрасли свидетельствует о том, что принятые в этот период меры, в частности закрытие наиболее аварийных шахт в Прокопьевско-Киселёвском районе, дали ожидаемый эффект. В проведенных исследованиях [17,18, 19] показано, что в период с 2001 по 2010 гг. количество самовозгораний на 1 млн. т добычи уменьшилось с 0,09 до 0,07).

Однако при этом в исследуемые годы не изменилось распределение пожаров по местам возникновения. Пожары в выработанном пространстве действующих выемочных полей составляют 62 %. В изолированных полях их доля составляет 27 %. В целиках и скоплениях угля у выработок возникло 11 % пожаров.

Согласно проведенным исследованиям [17] в последние годы количество пожаров в Кузбассе изменялось следующим образом (рис. 1.2)

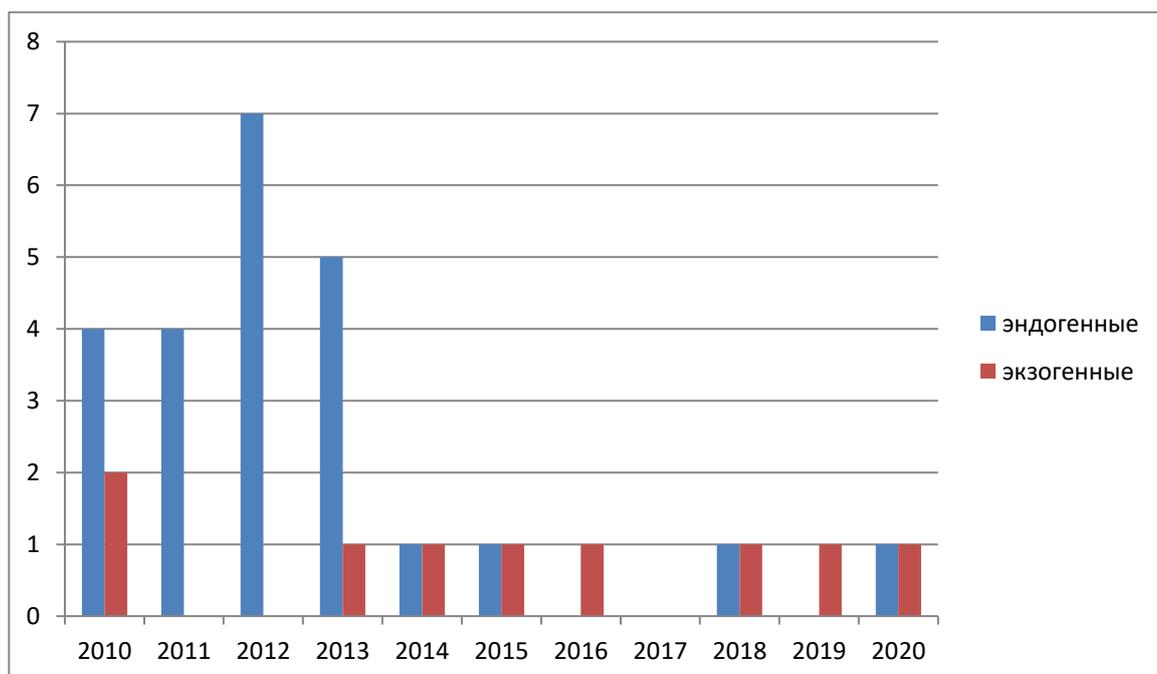


Рисунок 1.2 – Статистика возникновения пожаров на шахтах Кузбасса

Анализируя приведенные на рис. 1.2 данные, можно сделать вывод, что наблюдается резкое снижение количества эндогенных пожаров. Основной причиной уменьшения эндогенной пожароопасности является закрытие наиболее опасных шахт Прокопьевско-Киселевского месторождения. Кроме того, отсутствует единая служба сбора статистических данных по авариям.

Вместе с тем, выполненная в данном разделе диссертации систематизация данных о возникших в анализируемые годы эндогенных пожарах позволяет сделать вывод о том, что эпицентр проблемы борьбы с самовозгоранием угля сместился в бассейне от регионов с преобладанием крутонаклонных и крутых пластов в регионы с пластами пологого и наклонного падения. Об этом свидетельствует резкое, в 6 раз, увеличение прямого ущерба на ликвидацию одного эндогенного пожара в Южном Кузбассе по сравнению с таковым для Прокопьевско-Киселёвского района.

В качестве нового фактора эндогенной пожароопасности в последние годы обозначились отложения пыли в выработанном пространстве на пути движения метановоздушной смеси при реализации комбинированных схем проветривания в лавах с нагрузкой более 2000 т в сутки. Высокая скорость подвигания лав в таких условиях (190 м в мес. и более) не гарантирует предупреждение самовозгорания скоплений угля и угольной пыли, в которых последняя является катализатором процесса окисления. В результате эндогенные пожары стали возникать на пластах, отнесённых к категории не склонных к самовозгоранию.

1.2. Обзор исследований по проблеме профилактики самовозгорания угля

Профилактика включает в себя все мероприятия, направленные на предотвращение самовозгорания угля. Это делает очевидным тот факт, что её эффективность достигается при ясном понимании условий самовозгорания, а также процессов, которые протекают в скоплениях угля с момента их контакта с кислородом воздуха до развития в них очагов пожаров.

Процесс горения, как таковой, возникает при совместной реализации трёх условий: наличия горючей массы; источника теплового импульса; внешней среды, способной поддерживать горение. В задачу диссертационной работы не входит анализ теорий самовозгорания углей. Отметим лишь, что до привлечения в конце 30-х годов прошлого столетия А.А. Скочинским [12] к исследованиям по проблеме физико-химических представлений, при разработке теорий основное внимание было сосредоточено на химической стороне процесса, как источнике теплового импульса. Изучение внешней среды, способной поддерживать самонагревание и горение, и факторов, приводящих к образованию скоплений угля у выработок и в выработанном пространстве, уделялось недостаточное внимание.

Современная научная теория, основные положения которой сформулированы в работе В.С. Веселовского [13], рассматривает самовозгорание угля как сложный химический процесс, протекающий в определённых физических условиях. При этом в основу создания теплового импульса положена химическая реакция соединения кислорода с углеродом на поверхности угольных пор, которая протекает с выделением тепла.

Согласно данной теории основным соотношением, которое управляет самовозгоранием, служит тепловой баланс окисляющегося материала. Для единицы объёма в скоплении оно имеет вид:

$$qUC\rho = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} + \rho' c_p v \frac{\partial T}{\partial \chi} + \frac{\partial}{\partial \chi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \chi} \right) + Q, \quad (1.1)$$

где q - удельная теплота сорбции, Дж/м³; U - константа скорости сорбции кислорода углем, м³/(кг·с); C - концентрация кислорода, объёмная доля; ρ - плотность угля, кг/м³; c - теплоёмкость угля, Дж/(кг·К); T - температура, К; ρ' - плотность воздуха, кг/м³; c_p - теплоёмкость воздуха, Дж/(кг·К); v - скорость воздуха, м/с; λ - коэффициент теплопроводности угля, Вт/(м·К); τ - время, с; Q - прочие потери, Дж/ (м³·с).

Члены этого уравнения выражают мгновенные скорости генерации и распределения образующегося тепла. Левая часть уравнения (1.1) определяет

приходную статью теплового баланса – генерацию тепла за счёт химической энергии окисляемого материала. Правая часть характеризует расходные статьи: нагревание единичного объёма скопления, конвективный вынос тепла воздухом, потери тепла за счёт теплопроводности и прочие потери. В числе последних наибольшую значимость имеют потери тепла на испарение влаги из угля.

Приходная статья баланса с учётом вышеуказанной аксиомы о совместной реализации трёх условий, необходимых для самовозгорания угля, иллюстрирует пути полного исключения возможности возникновения эндогенных пожаров в шахтах. Последняя обеспечивается при снижении до нуля потерь угля, его сорбционной активности или концентрации кислорода в зоне формирования скопления.

Однако полная ликвидация указанных условий невозможна по следующим причинам:

- сведение к нулю потерь возвело бы проблему борьбы с эндогенными пожарами в самоцель, игнорирующую экономическую целесообразность выемки угля;

- ликвидация сорбционной активности угля исключает возможность его применения как топлива:

- на практике невозможно обеспечить полную изоляцию потерь угля от кислорода воздуха, так как отсутствуют абсолютно воздухонепроницаемые материалы.

Исходя из этих положений, научные исследования и практические работы по профилактике эндогенных пожаров [12, 13, 5, 7, 20, 21, 22, 23, 24, 25] развивались по следующим основным направлениям:

- совершенствование систем разработки для уменьшения потерь угля в условиях каждого месторождения;

- применение антипирогенов для снижения сорбционной активности углей, которая может быть решающим фактором при возникновении эндогенных пожаров в определённых условиях;

- создание в отработанной части пласта пожаробезопасной концентрации кислорода (применение инертных газов, сооружение изолирующих перемычек и др.).

Эндогенная пожароопасность объекта (лава, выемочное поле, шахта) определяется произведением вероятности возникновения самовозгорания угля на величину экономического ущерба. Поэтому в последние годы прошлого столетия наряду с перечисленными, активно развивались работы по совершенствованию способов прогноза, обнаружения, локации, локализации и тушения очагов эндогенных пожаров. Только комплексное решение задач по обозначенным направлениям, с учётом невозможности снижения до нуля параметров приходной статьи теплового баланса, позволяет повысить эффективность борьбы с самовозгоранием угля в шахтах.

Высокая эндогенная пожароопасность Кузбасса предопределила большой объём исследований по всем направлениям её снижения. К их числу относятся работы А.А. Скочинского, В.С. Веселовского, В.М. Маевской, Л.П. Белавенцева, В.А. Бонецкого, В.Б. Попова, В.В. Егошина, В.А. Портолы, В.Г. Игишева и др. [12, 13, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32].

Уравнение (1.1), кроме перечисленных направлений профилактики, указывает на возможность предупреждения пожаров путём воздействия на расходную часть теплового баланса в сторону его увеличения и превышения над генерацией. Этого можно достичь, например, увеличением выноса тепла за счёт конвекции и теплоотдачи в окружающую среду. Конвективный вынос тепла воздухом в скоплении угля равен:

$$Q_k = \rho'c_p B \frac{\partial T}{\partial x}, \text{ Дж}/(\text{м}^3\text{с}), \quad (1.2)$$

где $\rho'c_p$ – объёмная теплоёмкость воздуха, Дж/(м³К); B – объёмная скорость потока воздуха, м³/(м²с); x – путь фильтрации воздуха в скоплении, м.

Для B справедливо равенство:

$$B = \frac{m \cdot V' \cdot n}{S}, \quad (1.3)$$

где m - пористость скопления; V' - объём скопления, м³; n - кратность обмена воздуха в скоплении за единицу времени, с⁻¹; S - площадь фильтрации, м².

После подстановки (1.3) в (1.2) имеем:

$$Q_k = \rho' c_p \frac{mV' \cdot n}{S} \frac{\partial T}{\partial x}, \text{ Дж}/(\text{м}^3\text{с}). \quad (1.4)$$

Как видно из уравнения (1.4), увеличение пористости скопления, кратности обмена в нём воздуха и уменьшение площади его поперечного сечения способствуют росту конвективного выноса тепла. Однако следует иметь в виду, что пористость скопления угля и его форма в выработанном пространстве определяются горно-геологическими и горнотехническими условиями отработки конкретных шахтопластов и относятся к числу неуправляемых факторов эндогенной пожароопасности.

Регулирование конвективного выноса тепла достигается увеличением кратности обмена воздуха в скоплении. В ряде случаев, особенно при увеличении скорости воздуха в куполах у выработки, удаётся получить снижение температуры в приконтурной зоне угольного массива.

В выработанных же пространствах, как указывает В.С. Веселовский [13], воздух протекает неравномерно по каналам с наименьшим сопротивлением. По оси канала скорость может быть достаточной для охлаждения, но к периферии канала она убывает и становится недостаточной, что приводит к активизации самонагрева.

Кроме того, увеличение кратности воздухообмена влияет на приходную часть баланса, так как увеличивает концентрацию кислорода в скоплении. Поэтому применение данного способа предупреждения эндогенных пожаров на практике известно в единичных случаях [32] и не является характерным для проблемы в целом.

Из практики отработки самовозгорающихся пластов замечено, что эндогенные пожары чаще всего возникают не тогда, когда разрыхленная масса угля контактирует с обрушенной породой и имеет, таким образом, возможность быть перемешанной с ней, а в тех случаях, когда скопление

соприкасается с окружающим воздухом. В таких случаях потеря тепла поверхностью скопления можно описать законом Ньютона:

$$Q_{II} = \alpha(T - T_0)F, \text{ Дж/с}, \quad (1.5)$$

где T и T_0 - соответственно температура поверхности и воздуха, К; α - коэффициент теплоотдачи, Дж/(м²·с·К); F - поверхность теплоотдачи, м².

Увеличение этих потерь можно достичь увеличением поверхности скопления. Однако выполнение этой меры на практике технически невозможно.

Теплота, расходуемая на нагревание единицы объёма угля в скоплении, вычисляется по формуле:

$$Q_H = \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial \tau}, \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{ч)}. \quad (1.6)$$

Увеличение этой расходной статьи баланса возможно, например, путём увеличения влажности угля. С её увеличением, как указывает А.А. Агроскин [33], линейно возрастает и теплоёмкость. Аналогично возрастает и теплопроводность угля, что может увеличить потери тепла, которые для стационарного процесса имеют вид:

$$Q_T = \lambda(T_1 - T_2)\Phi, \text{ Дж/с} \quad (1.7)$$

где $T_1 - T_2$ - перепад температуры, измеренный в определённых точках, К; Φ – фактор, характеризующий геометрическую форму и размеры скопления.

Но среди исследователей нет единого мнения о влиянии влаги на процесс самовозгорания угля. В частности И.М. Печук, В.М. Маевская [34] и В.С. Веселовский [13] отмечают рост химической активности угля после испарения влаги и, как следствие, увеличение эндогенной пожароопасности горных работ. Исследования В.Г. Игишева [32] подтверждают активирующее влияние воды на окисленный уголь. В тоже время в работах [35, 36, 37, 38] утверждается, что увлажнение скоплений угля приводит к снижению скорости сорбции кислорода углем и значительно повышается критический объём скопления, достаточный для его самовозгорания.

Таким образом, анализ уравнений теплового баланса (1.1), позволяет сделать вывод о том, что научную основу имеют все меры профилактики эндогенных пожаров, которые оказывают воздействие на его приходную и расходную статьи, т.е. снижают потери угля, уменьшают его сорбционную активность и снижают концентрацию кислорода за счёт улучшения изоляции выработанных пространств.

1.3 Анализ практики борьбы с эндогенными пожарами

Как отмечено в 1.2, полное устранение одного из условий самовозгорания углей невозможно. Поэтому современная профилактика эндогенных пожаров в Кузбассе включает в себя комплекс мер, направленных на уменьшение степени влияния факторов, предопределяющих реализацию физических условий самовозгорания. Все эти меры являются составными элементами основных направлений профилактики: уменьшения потерь угля при эксплуатации; снижения химической активности угля путём обработки антипирогенами; и предотвращения поступления к углю кислорода воздуха.

К числу таких мер, согласно А.А. Скочинскому и В.С. Веселовскому [12,13], относятся: быстрая разработка пластов с минимальными потерями; повышение устойчивости целиков; применение жидких и газообразных антипирогенов; тщательная изоляция выработанных пространств; разработка шахтного поля отдельными участками и в обратном порядке; вынос подготовительных выработок в породы лежащего бока при разработке мощных пластов; профилактическое заиливание; предупреждение пожаров от подработки верхних этажей и пластов; создание пожаробезопасного вентиляционного режима; закладка выработанного пространства; и др.

Часть из этих мер в Кузбассе нашла своё повсеместное применение при эксплуатации самовозгорающихся пластов. Так, уже к началу 50-х годов в Кузбассе почти полностью перешли на полевую подготовку мощных

пластов. Разработка ведётся отдельными легко изолируемыми выемочными полями. Порядок работ в пределах поля обратный. Эффективность данных мер доказана и на примере других бассейнов, поэтому они уже стали составной частью нормативных документов.

На практике длины полей на пластах крутого и крутонаклонного падения в Кузбассе колеблются от 100 до 300 м, достигая в ряде случаев 800 м. Сроки отработки подобных полей при средних скоростях подвигания 10-14 м/мес колеблются от 8-9 мес. до 2-3-х лет. С целью своевременной профилактики участки большой длины разбиваются на блоки из расчёта отработки их за 6 мес. Между блоками оставляются целики, равные мощности пласта, но не менее 6 м. В действительности эта величина не превышает 6-12 м. При этом считается, что оставление целиков способствует усилению изоляции выработанных пространств.

Быстрая отработка угольных пластов приводит к сокращению времени контакта оставляемого в виде потерь угля с атмосферным кислородом, снижая тем самым опасность его самовозгорания в выработанном пространстве. Это положение иллюстрируется данными А.Б. Захарова и В.А. Моисеева (табл. 1.2), полученными ими при исследовании пожароопасности щитовой системы разработки [39].

Таблица 1.2 – Долевое участие пожаров при различных скоростях подвигания щитового забоя.

Скорость подвигания щитового забоя, м/мес.	Количество пожаров, %
до 30	59,05
30-40	27,3
40-50	9,1
50-55	4,55

Как видно из таблицы 1.2, подавляющее большинство пожаров в щитовой системе разработки возникло на участках, где скорость подвигания очистного забоя по падению не превышала 40 м/месс.

На пластах пологого и наклонного падения размеры выемочных столбов по простиранию достигают двух и более километров. Согласно требованиям безопасности необходимо обеспечить скорость подвигания очистных забоев по простиранию не менее 60 м/месс на склонных и не менее 90 м/месс на весьма склонных к самовозгоранию шахтопластах. Фактические скорости подвигания на подобных пластах достигают 190-260 м/мес.

В работе [4] в подтверждение эффективности этой меры Н.Ф. Дмитриук приводит данные о том, что увеличение скорости подвигания очистных забоев и уменьшение эксплуатационных потерь за счёт широкого применения комбайнов при выемке угля привело к резкому снижению числа пожаров на шахтах Челябинского месторождения (1962г).

Однако следует иметь в виду, что увеличение скорости подвигания очистных забоев не является результатом деятельности специальных служб профилактики, а обуславливается горно-геологическими условиями и технической оснащённостью шахт. Поэтому по форме своего влияния на пожароопасность данную меру следует относить к разряду общетехнических.

К числу специальных мер профилактики, как по форме исполнения, так и целенаправленности работ, относится обработка угля антипирогенами [40, 41, 42, 43]. В Кузбассе она применяется с 1960 г для предупреждения пожаров в доступных для активного воздействия местах-целиках и скоплениях угля у выработок и надщитовых подушках.

С учётом того факта, что более 80-% эндогенных пожаров в бассейне возникает в отработанной части пластов, Л.П. Белавенцевым [40] разработан принципиально новый аэрозольный способ обработки выработанного пространства действующих выемочных полей. В работе доказано, что для достижения эффекта целесообразно применять аэрозоль с размером частиц 10-15 мкм, являющихся 3-5 % водным раствором карбамида.

Способ применим на пластах и наклонного падения при различных технологических схемах проветривания выемочных полей. При прямоточной схеме проветривания очистного забоя (рис. 1.3) оборудование для приготовления и подачи раствора антипирогена располагается в вентиляционном штреке. Из трубопровода 1 вода подается в ёмкость 2, где добавляется карбамид для получения раствора антипирогена. Высоконапорной насосной установкой 3 раствор антипирогена подается по шлангу 4 к генератору аэрозолей 5, где распыляется и вводится в поток утечек воздуха [40].

Вентиляционный штрек

Вентиляционный штрек

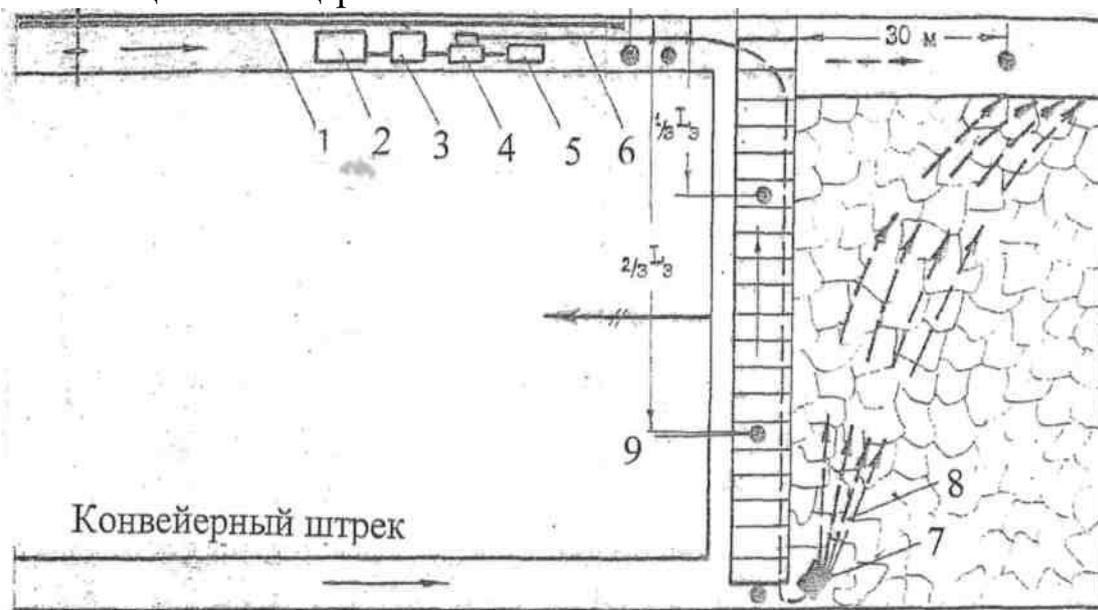


Рис. 1.3 – Технологическая схема профилактической обработки выработанного пространства действующего очистного забоя антипирогенами: 1- трубопровод; 2-емкость с антипирогеном; 3-дозаторное устройство; 4- насос; 5-электродвигатель; 6-высоконапорный шланг; 7-генератор аэрозолей; 8-направление движения утечек воздуха и аэрозоля антипирогенов; 9- места замера влагосодержания воздуха

Разработанная технологическая схема профилактики эндогенных пожаров применена впервые в 1978г. в лаве № 106 на шахте «Южная» объединения «Северокузбассуголь». В настоящее время она доработана до

стадии нормативного требования и реализуется на всех пластах, отнесённых к категории склонных к самовозгоранию [44].

Широко использовалась для борьбы с самовозгоранием глинистая пульпа. Использование глинистой пульпы позволяет получить следующий эффект:

- снижения сорбционной активности угля за счет глины, осевшей в пустотах разрыхленного угля, и препятствующей проникновению кислорода;
- охлаждения разогретого угля и пород жидкой фазой;
- повышения влажности воздуха в выработанном пространстве, что препятствовало испарению влаги из угля и торможению процесса его окисления.

Широкое применение глинистой пульпы выявило и ее низкую эффективность при борьбе с самовозгоранием угля. Так, несмотря на применение пульпы, число пожаров на шахтах продолжало оставаться высоким. Исследованиями [5] было установлено, что только при обработке пульпой консистенции $T : Ж = 1 : 4$ и более ($T : Ж$ – отношение твёрдой и жидкой фаз в пульпе) образуется глинистая плёнка на кусках угля. Также уголь, обработанный пульпой консистенции 1:8 и менее, при нагреве более $150^{\circ}C$ более активно сорбирует кислород, чем необработанный.

Однако и этот механизм влияния на пожароопасность не срабатывает в условиях роста глубины работ. По данным исследований В.Г. Игишева [32] при повсеместной реализации этой меры профилактики частота пожаров на пластах Прокопьевско-Киселёвского месторождения при глубине отработки более 300м возросла в 3 раза по сравнению с таковой на первом горизонте (менее 100м).

Снижение эффективности применения глинистой пульпы с ростом глубины работ, а также невозможность реализации на пластах пологого падения в условиях бесцеликовой выемки предопределили тот факт, что с 1985г объём использования способа заиливания начал уменьшаться (с 1079 тыс. м³ глины в целике в 1985г до 786 тыс. м³ в 1990г) [46]. При этом

наблюдался рост применения антипирогенов с 593т до 1425т ; жидкого азота – 923т в 1982г до 11160т в 1990г ; пенообразователя – с 607т до 1980т в те же годы (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Основные работы по предупреждению самовозгорания и тушению пожаров на шахтах Кузнецкого бассейна в 1981 – 1990гг

Годы	Заиливание, тыс. м ³	Бурение скважин, тыс. м	Засыпка провалов и выемок, тыс. м ³		Расход жидкого азота, т	Расход пенообразователя, т	Расход антипирогенов, т
			всего	в т. ч. привозным грунтом			
1981	992	233	16499	11006	-	-	-
1982	920	225	17721	12245	923	607	-
1983	1018	255	21831	15793	1522	1020	-
1984	1043	283	25787	18972	1701	1197	-
1985	1079	304	29605	22966	3088	1300	-
1986	1004	309	32836	27017	4932	1665	593
1987	943	315	33228	27719	6455	1950	818
1988	879	331	34082	27570	8206	1505	1107
1989	830	340	34530	27930	9820	1735	1245
1990	786	349	34980	28210	11160	1980	1425

Для сравнения в таблице 1.4 приведены сведения об объемах работ, выполненных силами ВГСЧ и шахт за 5 лет [104].

Из сравнения данных таблиц 1.3 и 1.4 очевидно, что продолжалось снижение объемов использования глинистой пульпы. В среднем за 2007-2011 гг. её применение для профилактики и тушения пожаров составило 20264 м³

(глины в целике) в год, т. е. уменьшилось в 38 раз по сравнению с 1990г. Одновременно резко, до 36 – 59 км. в год, уменьшилась протяжённость скважин, используемых для борьбы с самовозгоранием угля (в 1990 г пробурено 349 км. скважин).

Таблица 1.4 – Работы, выполненные для предупреждения и тушения эндогенных пожаров в 2007-2011гг [104].

№	Показатели	2007	2008	2009	2010	2011
1	2	3	4	5	6	7
1.	Количество шахт	76	77	75	73	72
2.	Количество пожаров:					
	действующих:	16	14	11	7	14
	возникших:	7	7	7	6	5
3.	Количество пластов, склонных к самовозгоранию	118	106	103	103	101
4.	Количество криогенных установок	19	21	24	26	28
5.	Возведено перемычек всего	1199	1128	1018	1204	893
	взрывоустойчивых	769	754	756	815	585
	из гипса	345	298	245	188	85
	из «Текбленда»	424	456	511	627	500
	не взрывоустойчивых	430	374	262	389	308
	из шлакоблоков	299	324	179	301	273
	из кирпича	1	1	2	8	1
	из дерева	130	49	81	80	34
	-пробурено скважин, км					
	для тушения	9,409	18,695	9,660	36,303	34,461
	для профилактики	26,637	24,407	35,813	16,654	24,822
6.	Израсходовано:					
	-глинистой пульпы, м ³	11766	48898	14246	1691	24719
	- пенообразователя, т	542,4	458,5	674,6	1702,1	2617,5
	- смачивателя, т	122,6	178,4	157,2	182,9	180,6
	- огнегасящего порошка, т	6,1	4,2	0,1	0	0
	- глины (сухой), т	1830	757	2150	180	8634
	- летучей золы, т	1400	4231	610	6106	18467
	- песка, т	101,8	137,7	135,2	119,3	104,5
	- антипирогенов, т	1002,9	1572,8	901,6	1015,4	741,8
	- инертной пыли, т	4263,3	4001,6	3993,5	3714,6	3287,5
	- жидкого азота, т	3208,5	3459,1	2009,0	3359,3	2374,3
	- газа азота, тыс. м ³	19335	15500	20213	38245	28947

В таблице 1.4 обращает на себя внимание внедрение новых материалов для аналогичных целей. В их число входит летучая зола, инертная пыль, газообразный азот. Их средний годовой расход составил: летучая зола – 6163т; инертная пыль – 3852т ; газообразный азот – 21015601м³ . Также резко возросло применение изолирующих взрывоустойчивых перемычек из нового материала – цементной смеси «Текбленд». Одновременно практически сведено на нет использование перемычек из кирпича и дерева.

В 2011г возведено 893 изолирующих перемычки, в том числе 85 – взрывоустойчивых из гипса и 500 – взрывоустойчивых из цементной смеси «Текбленд». Число невзрывоустойчивых перемычек из шлакоблоков составило 273, кирпичных – 1 и брусчатых (чураковых) – 34. В 1968г в Кузбассе было возведено около 6000 перемычек. Из них: бетонных – 2500; кирпичных – 2100; чураковых – 1400. Резкое уменьшение числа изолирующих перемычек и возведение их из новых материалов обусловлено в сравнимые годы происшедшей реструктуризацией отрасли – увеличением нагрузки на забой при уменьшении их числа и поиском воздухо непроницаемых материалов, позволяющих механизировать процесс возведения перемычек.

Гидравлическая закладка выработанных пространств является эффективным средством предупреждения пожаров при разработке верхних горизонтов. Именно эти качества гидрозакладки обеспечили её широкое применение в ряде стран в прошлом веке. По данным Л.Н. Гапановича и др. [47] удельный вес добычи с гидрозакладкой в общей добыче угля из мощных пластов составлял в шестидесятые годы в Верхне-Силезском (Польша) бассейне 73%, а в месторождении Фушунь (КНР) – 100%.

Характерным для некоторых зарубежных бассейнов в те годы являлось применение частичной закладки исключительно в профилактических целях (Румыния, Чехия, Франция). Сущность частичной состоит в возведении

изоляционных зон шириной 5-8м под участками, имеющими очаги пожаров и на границе двух соседних выемочных полей. Выемка угля в пределах таких зон производилась с полным обрушением кровли и потерями порядка 20-35%. Пожары в этом случае, как правило, не возникали.

Аналогичные предложения для условий Кузбасса выдвигали в разные времена И.Н. Казнин, Г.А. Ломов, В.Ф. Парусимов, П.И. Кокорин и Н.А. Чинакал [47]. Однако из-за высоких экономических затрат добыча угля с закладкой не превышала 5% от всей добычи шахт Прокопьевско-Киселёвского района. В 1968г в Кузбассе планировалось добыть с использование гидравлической закладки 1млн 646 тыс. тон угля. Обозначенный уровень не был достигнут.

Известный из зарубежного опыта[22] метод борьбы с эндогенными пожарами путём ликвидации утечек через изолирующие перемычки за счёт выравнивания давления воздуха в Кузбассе с 60-х годов применялся исключительно для целей профилактики [48]. При этом на пожароопасном участке обеспечивался нагнетательно-всасывающий способ проветривания с созданием нулевого напора на уровне вентиляционного горизонта. Ежегодно с его применением отрабатывалось 10-15 очистных забоев, что составляло около 3% от общего числа забоев Прокопьевско-Киселёвского района. Методу, как показала практика, присущи недостатки. Основным из них является загазование участков после взрывных работ. В связи с этим в последние годы он в Кузбассе не применяется.

Таким образом, представленный в настоящем разделе диссертации анализ состояния практики борьбы с эндогенными пожарами в шахтах Кузбасса показал, что решение проблемы в последние годы базируется на резком в 38,8 раза уменьшении использования глинистой пульпы как основного средства профилактики и тушения эндогенных пожаров при одновременном увеличении применения других способов и средств. Широкое распространение на шахтах Кузбасса получило применение пены [7, 49, 50]. В частности, среднегодовой расход летучей золы достиг 6163т,

инертной пыли – 3852 т. Для инертизации атмосферы было подано 105 млн. 078 тыс. 008 м³ газообразного азота, генерируемого мембранными воздухоразделительными установками, а также 2882 т. жидкого азота. Совокупный расход азота в жидком состоянии в Кузбассе составил 27318 т за год.

1.4. Оценка перспективы применения азота для борьбы с самовозгоранием угля в шахтах

Во второй половине XX века в ряде угледобывающих стран Европы (Англия, Германия) были успешно реализованы способы борьбы с подземными пожарами путём нагнетания с поверхности инертных газов [51, 52, 53, 54]. При этом в качестве таких газов использовался диоксид углерода, парогазовые продукты сгорания топлива и азот.

Применение инертных газов первоначально было вызвано невозможностью тушения пожара другими способами и средствами. Инертизация пожарных участков при этом преследовала две цели: снижение концентрации кислорода для локализации очага горения в границах его обнаружения и создание невзрывоопасной атмосферы на аварийном участке. Предпочтение азоту, по сравнению с другими газами, применявшимися для этой цели, было отдано с учётом следующих преимуществ:

- плотность азота близка к плотности воздуха (0,97), что обеспечивает его равномерное распределение в атмосфере пожарного участка;
- незначительная сорбция углём и породами (в 40 раз меньше, чем CO₂) и малая растворимость в воде (в 60 раз меньше, чем CO₂), что также способствует равномерному распределению и малым потерям на пути движения в изолированном пространстве;
- при испарении 1 т жидкого азота образуется 854 м³ газа с температурой 293 К, что в 1,8 раза больше, чем из 1 т жидкого CO₂.

Указанные преимущества азота predeterminedили его широкое применение на шахтах Германии. С 1974 по 1989 гг. азот для борьбы с подземными пожарами успешно использовался 102 раза. В результате инертизации были сохранены 72 очистных забоя с запасами 26 млн. т и суммарной суточной добычей 120 тыс. т. [55]. Обращает на себя внимание тот факт, что в подавляющем большинстве случаев (85 раз – 83%) азот применялся для локализации очагов самонагревания угля в выработанном пространстве действующих выемочных полей.

Промышленное освоение нового способа борьбы с эндогенными пожарами в Кузбассе начато с 1980 г в условиях наиболее пожароопасного Прокопьевско-Киселёвского района. Азот при этом использовался в жидком, газообразном и связанном в инертную пену и вспененную глинистую пульпу виде. Необходимость последнего обусловлена большими утечками воздуха из-за наличия аэродинамической связи действующих выемочных полей с поверхностью. В этих условиях инертная пена и вспененная пульпа выполняла роль хладагента, объектного инертизатора и изолирующей «завесы», резко сокращающей утечки воздуха через очаги ранее потушенных пожаров на верхних горизонтах пластов крутого падения или на сближенных пластах пологого падения.

Охлаждающий эффект при подаче 1 т жидкого азота к очагу пожара с последующим нагревом газообразного азота до 373 К равен 508,3 МДж. При этом теплосъём от испарения азота составляет 197,5 МДж. Остальное тепло (310 МДж) расходуется на нагревание газообразного азота до 373 К.

Для сравнения: теплосъём при подаче 1 т воды с температурой 293 К на очаг пожара равен 2591,9 МДж. При этом теплота парообразования составляет 2256,7 МДж. Затраты тепла на нагревание 1т воды от 293 К до 373 К равны 335,2 МДж, что сопоставимо с азотом.

Из приведенных данных очевидно, что вода является лучшим хладагентом по сравнению с жидким азотом. Однако этот вывод справедлив только для случаев непосредственной подачи хладагента на очаг пожара с

высокой температурой. Охлаждающий эффект азота значительно выше, чем у воды, в тех случаях, когда местонахождение очага неизвестно и отвод тепла обусловлен снижением температуры окружающей среды. Как отмечено в п. 1.1. долевое участие подобных пожаров в шахтах Кузбасса превышает 80%.

Характер влияния на тепловой баланс очага самовозгорания угля (снижение концентрации кислорода) объясняет большие расходы азота при защите от эндогенных пожаров действующих выемочных полей. В Германии, например, расход газообразного азота в одном выемочном поле превысил 10,0 млн.м³ (около 12000 т жидкого). При неизвестном местонахождении очага самонагревания в выработанном пространстве только постоянная инертизация от момента его обнаружения до демонтажа комплекса и изоляции выемочного поля позволяет достичь положительного эффекта.

Подача жидкого азота в выработанное пространство может быть опасна из-за интенсивного испарения азота при контакте с пористой структурой горных пород и угля резко возрастает. В результате возможно резкое увеличение давления газа с разрушением оборудования. Для предотвращения опасных последствий предложено получать жидкие аэрозоли из воды и жидкого азота [56, 57, 58, 59].

Использование азота в качестве газовой фазы пены, как показал опыт Кузбасса, позволяет уменьшить его расходы. При затратах 3000 т жидкого азота и 1000 т пенообразователя в 1987 г здесь под защитой инертной пены отработывались 26 выемочных полей. Однако работа с азотом в импульсном режиме, даже в случае большой стойкости инертной пены и вспененной глинистой пульпы в выработанном пространстве (до трех суток), требует больших материальных затрат и не всегда подкреплена его своевременной поставкой.

Поэтому в работе [55] было предложено для длительной инертизации при расходе азота до 30 м³/мин использовать «молекулярные сита». Автономные воздуходелительные установки нового типа позволяют

снизить стоимость 1 м³ генерируемого азота в шесть раз. В Кузбассе подобные установки используются с 2006 г.

Одним из условий, обеспечивающих высокую эндогенную пожароопасность шахт Кузбасса, является увеличение глубины работ. На больших глубинах локальная дезактивация скоплений угля в отработанной части пластов жидкими антипирогенами, в том числе глинистой пульпой, по индивидуальным скважинам с поверхности не эффективна из-за технических трудностей их бурения в пожароопасные зоны выработанного пространства.

В этих условиях использование мембранных воздухоразделительных установок, позволяющих в автономном режиме производить объектную и объёмную инертизацию выработанных пространств, является перспективным направлением защиты шахт Кузбасса от эндогенных пожаров.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ УГЛЯ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ОКИСЛЕНИИ

Процесс самовозгорания угля начинается при естественной температуре окружающей среды. Возможность возникновения очагов самовозгорания определяется скоростью сорбции кислорода углем, величина которой пропорциональна количеству выделяемого тепла в угольном скоплении. Поэтому изучение сорбционной активности угля при естественной температуре окружающей среды является необходимым этапом для оценки возможности развития очагов самовозгорания

2.1. Методика исследований низкотемпературного окисления угля и угольной пыли

С учётом задач, сформулированных во введении, исследования проводились в условиях низкотемпературного (293 ± 2) К окисления угля. В экспериментах использовалась методика, основные положения которой разработаны В.С. Веселовским [13]. Сущность метода состоит в определении объёма поглощенного кислорода исследуемой массы угля из воздуха при температуре 293 К за определённый промежуток времени.

Схема лабораторной установки приведена на рис. 2.1. Установка состоит из набора сорбционных сосудов 4 объёмом 500 см^3 . Смесь кислорода и азота поступала из баллона 1 через ротаметр 2 для поддержания постоянного расхода воздуха. В пипетку 8 для отбирали пробы газа при помощи вакуумного насоса.

Уголь для исследования отбирался в полиэтиленовые мешки из свежееобнажённого (очистного или подготовительного) забоя шахты путём взятия вруба размером от 5×5 до 10×10 см. Перед исследованиями в специализированных лабораториях обогатительных фабрик проводился технический анализ угля на содержание влаги, золы и других показателей. Разрыв во времени между набором угля и началом исследования не

превышало 48 часов. Навеска угля для испытаний составляла 80 г, фракция 1-3 мм. Расход воздуха равнялся 1,3 л/мин. Время продувки составляло пять минут.

За показатель химической активности угля принималась константа скорости сорбции кислорода, определяемая по уравнению:

$$U = -\frac{V}{H \cdot \tau} \cdot \ln \frac{(1 - C_0)C_a}{C_0(1 - C_a)}, \text{ см}^3/\text{Г} \cdot \text{ч}, \quad (2.1)$$

где V - объём воздуха в сосуде, см^3 ; H - масса навески, г; C_0 , C_a - начальная и конечная концентрация кислорода, доли единицы; τ - время сорбции, ч.

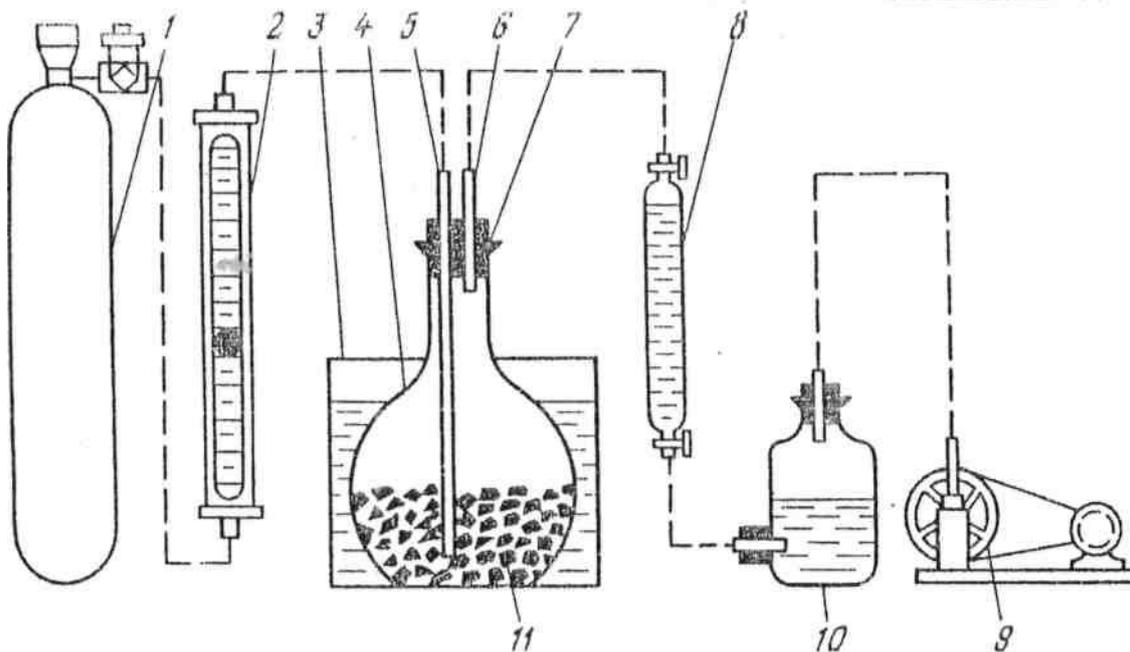


Рисунок 2.1 – Схема установки для оценки химической активности угля:
1 - баллон; 2- ротаметр; 3- термостат; 4- реакционная колба; 5, 6 - трубки;
7- пробка; 8- пипетка; 9- вакуум-насос; 10- сосуд; 11- уголь

Согласно [13], поправка на колебания температуры и барометрического давления в лаборатории практически не влияют на точность результатов и ею можно пренебречь.

Навеска выбрана из расчёта снижения концентрации кислорода в сорбционном сосуде от 4 до 14-18 %. Из длительного опыта реализации

методики она рекомендована для каменных углей массой до 80 г. Для бурых углей из-за их высокой химической активности масса может быть уменьшена до 30 г. Вычисленные по формуле (2.1) значения U характеризуют среднюю удельную скорость сорбции кислорода между двумя отборами проб газа [64].

В ряде случаев более иллюстративной в исследованиях является оценка не константы скорости сорбции, а удельной сорбции кислорода, определяемой по уравнению [64]:

$$M = V(C_0 - C_a)/H, \text{ см}^3/\text{г}, \quad (2.2)$$

Изменение общего объёма кислорода, сорбированного одним граммом угля за определенный промежуток времени, также позволяет оценить эффективность мер, принимаемых по его дезактивации для предотвращения процесса самовозгорания [64].

2.2. Исследование влияния степени измельчения угля на константу скорости сорбции кислорода

Зависимость химической активности угля от степени его измельчения исследована в работах многих авторов, в частности А.А. Скочинского и В.М. Огиевского [12], В.С. Веселовского, Н.Д. Алексеевой, Л.П. Виноградовой, Г.Л. Орлеанской, Е.А. Терпегосовой [13], В.В. Померанцева, С.Л. Шагаловой, В.А. Резника, В.В. Кушнаренко [60], Н.И. Линденау, В.М. Маевской, В.Ф. Крылова [5], В.А. Портолы [61, 62]. В этих работах отмечено, что уменьшение размера частиц угля приводит к росту скорости его окисления. Так, в [12] приведены данные, согласно которым уменьшение размера частиц с (0,35 – 0,80) мм до (0,07 – 0,15) мм увеличивает относительную скорость окисления в два раза. При увеличении размера частиц угля до (2,4 – 4,7) мм имеет место её снижение в пять раз.

Для оценки влияния степени измельчения на константу скорости окисления углей Кузбасса использовалась установка, изображенная на рис. 2.1. Уголь отбирался на шахтах Кузбасса и в лабораторных условиях пробы

измельчены до угольной мелочи размером 1-3 мм и угольной пыли трех фракций: 0,2-1 мм; 0,064-0,2 мм; 0-0,064 мм. Уголь пласта Сычевский 1 в условиях лавы ПЕ «Шахта им. 7 Ноября Новая» АО СУЭК-Кузбасс имеет мощность 3,04 м, угол падения 3-8°. Марка угля Д, газоносность 0-7 м³/т, влажность 8,2 %. Изменение константы скорости сорбции кислорода, полученной через 24 часа, в зависимости от размера частиц приведено на рис. 2.2 [63].

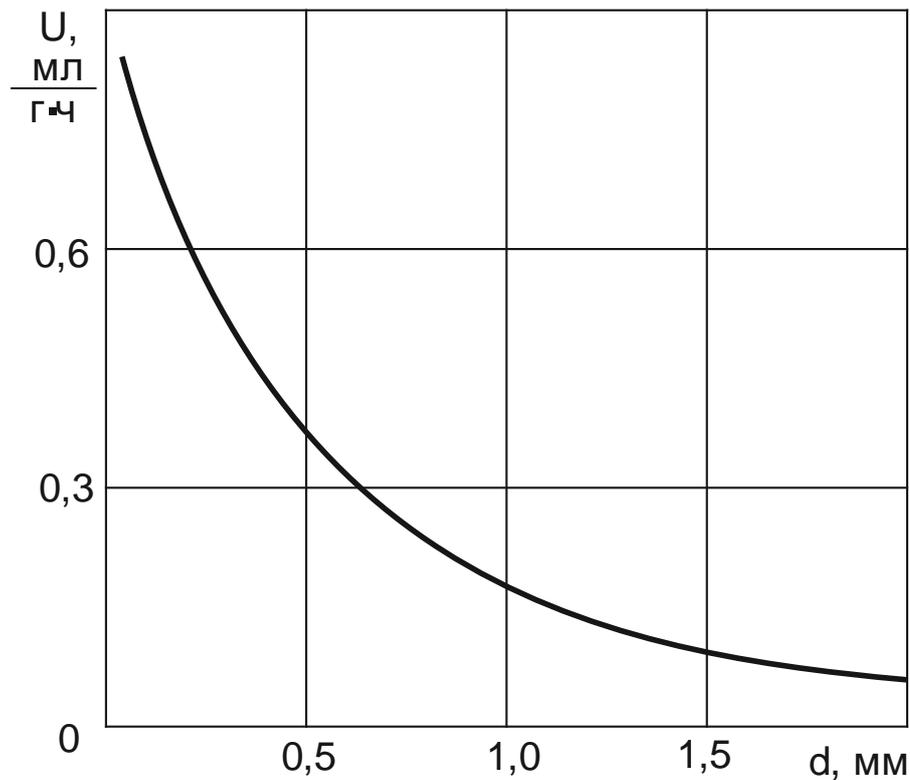


Рисунок 2.2 – Изменение константы скорости сорбции кислорода в зависимости от размера угольных частиц пласта Сычевский 1

Полученные результаты свидетельствуют, что уменьшение размера угольных частиц от 2,0 мм до 0,03 мм приводят к увеличению константы скорости сорбции кислорода в 8,5 раза. Проведенными ранее исследованиями установлено, что в шахтах Кузбасса дисперсионный состав пыли в атмосфере высокопроизводительных очистных забоев (более 2000 т в сутки) характеризуется преобладанием мелких фракций (около 60% частиц фракции до 4 мкм). Степень дисперсности оказывает влияние на физико-

химические свойства пыли, что может сказаться на повышении опасности развития очагов самовозгорания. Учитывая полученные результаты, вероятность самовозгорания угольной пыли резко увеличивается.

Однако у других угольных пластов существует меньшая зависимость константы скорости сорбции кислорода от размера частиц угля. Так, уголь пласта 69 (лава 69-07) в условиях шахты «Талдинская-Западная 2» АО «СУЭК-Кузбасс» показал другую закономерность.. Пласт 69 имеет мощность 4,08-6,05 м, угол падения 0-16 °, марка угля Д, ДГ, Г, ГЖО, газоносность 0-5 м³/т, влажность 4,4-8,9 %. Изменение константы скорости сорбции кислорода пласта 69, полученной через 24 часа, в зависимости от размера частиц приведено на рис. 2.3.

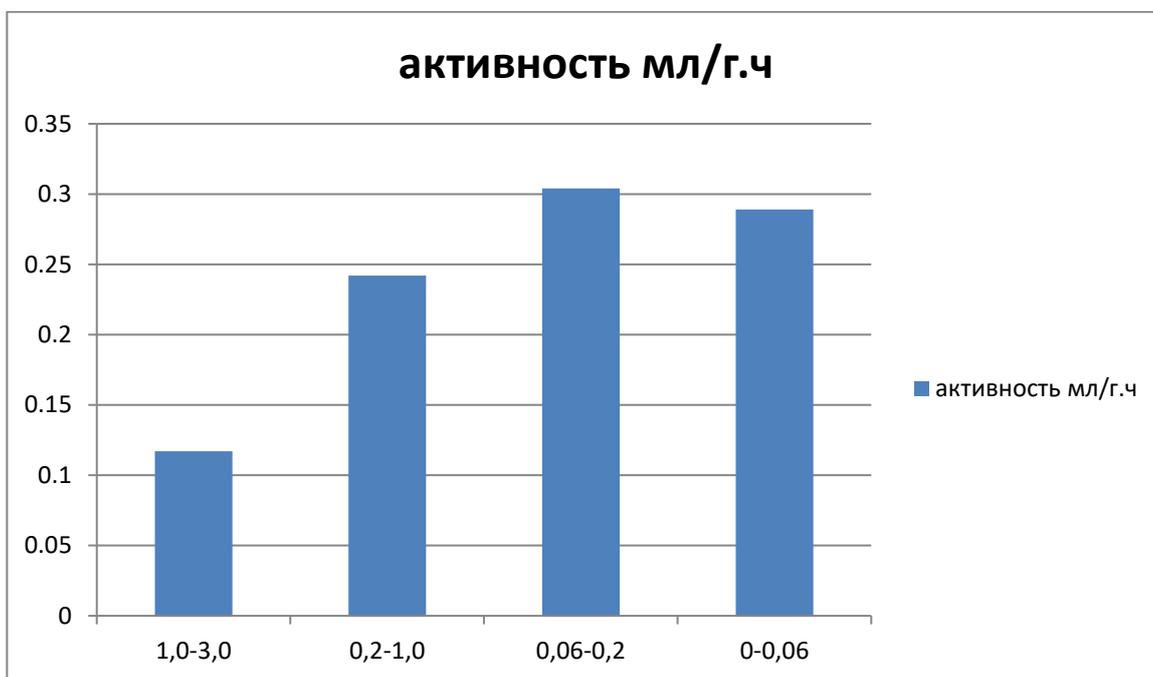


Рисунок 2.3 – Изменение константы скорости сорбции кислорода в зависимости от размера угольных частиц пласта 69

Из приведенных рис. 2.3 данных видно, что для данного угля уменьшение размера частиц угля приводит к росту константы скорости сорбции кислорода только в 2,58 раза. При этом для самой мелкой фракции наблюдается незначительное снижение константы скорости сорбции кислорода.

2.3. Исследование влияния азота на сорбционную активность угля в условиях низкотемпературного окисления

Исследования проведены с углем марки КЖ, имеющим влажность 7,9 %, выходом летучих – 27,6 %, зольностью – 5,8 %, содержанием серы – 0,44 %, теплотой сгорания – 8630 ккал/кг. Навеска угля помещалась в сорбционный сосуд 4 (рис. 2.1). После этого она в течение 60 мин продувалась азотом (99,7 %) с объёмной скоростью 0,5 л/мин. Для сравнения параллельно с изучением влияния азота на химическую активность угля исследовалась сорбция кислорода углем естественного угля и угля, обработанного дистиллированной водой. В последнем случае навеска полностью заливалась водой и выдерживалась в течение 60 мин. После окончания обработки уголь помещался на сито, затем на фильтровальную бумагу для удаления воды [64].

Все сорбционные сосуды с загруженными углями перед началом сорбции 5 минут продувались воздухом с расходом 1,3 л/мин. Каждый вид обработки дублировался. Результаты исследований влияния газообразного азота на сорбционную активность угля марки КЖ при температуре 293 К представлены в таблице 2.1. и на рисунке 2.4 [64].

Таблица 2.1 – Влияние газообразного азота на константу скорости сорбции угля [64]

Время сорбции, τ , ч.	Вид обработки		
	необработанный	азотом	дистиллированной водой
	$U, \text{см}^3/(\text{г} \cdot \text{ч})$	$U, \text{см}^3/(\text{г} \cdot \text{ч})$	$U, \text{см}^3/(\text{г} \cdot \text{ч})$
24	0,0522	0,0621	0,0181
72	0,0339	0,0363	0,0134
145	0,0288	0,0288	0,0116
241	0,0223	0,0230	0,0107

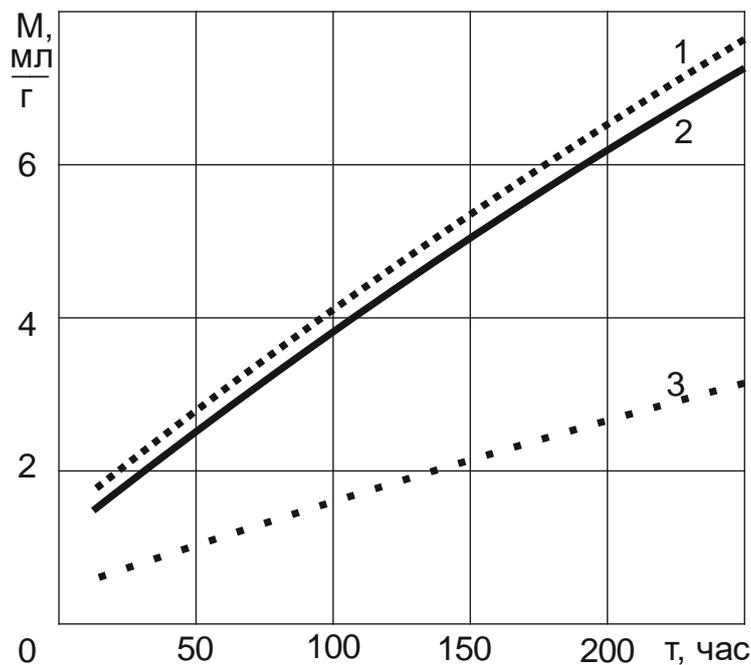


Рисунок 2.4 – Изменение удельной сорбции кислорода углем марки КЖ: 1 – обработан азотом; 2 – необработанный; 3 – обработан водой

Из результатов исследований видно, что удельная скорость сорбции кислорода углем, обработанным газообразным азотом, выше, чем у необработанного. Существенно снижает константу скорости сорбции кислорода обработка угля водой. Активирующее влияние азота на уголь можно объяснить тем, что подаваемый азот не содержит влаги. Поэтому его подача приводит к интенсивному испарению жидкости, находящейся на поверхности частиц угля. После восстановления подачи воздуха освобожденная поверхность начинает активно сорбировать кислород.

Полученные результаты показывают, что применение сухого газообразного азота для профилактики самовозгорания может быть опасно в случае восстановления утечек воздуха через скопления угля, ранее заполненные азотом. Для предотвращения такого негативного воздействия азота на уголь можно использовать подачу воды в подаваемый азот. Распыление воды в сухой газообразный азот приведет к ее испарению и насыщению азота водяным паром. Поступление такого увлажненного газа в скопления угля не вызовет испарение содержащейся в не окисленном угле

влаги и увеличение константы скорости сорбции кислорода углем. При содержании в газообразном азоте жидких частиц сорбционная активность не окисленного угля по отношению к кислороду дополнительно снизится за счет осаждения капель на его поверхности. Подача увлажненного азота с частицами жидкости в разогретые скопления угля приведет также к интенсификации теплосъема вследствие потерь тепла на испарение жидкости и большей плотности и теплоемкости подаваемой смеси по сравнению с сухим азотом [64].

Для предотвращения испарения содержащейся в угле воды необходимо в сухой азот подать количество воды, равное или превышающее количество пара, находящееся в насыщенном влажном газе. Рассчитать влагосодержание газа можно по выражению [64]:

$$D = 0,622 \frac{P_p \varphi}{P_0 - P_p \varphi}, \quad (2.3)$$

где D – влагосодержание газа, кг/кг; P_0 - барометрическое давление воздуха, Па; P_p - давление насыщенного водяного пара, Па; φ - относительная влажность воздуха.

Давление насыщенного водяного пара в газе зависит от температуры и может быть определено по формуле [65]

$$P_p = P_1 e^{-L/(RT)}, \quad (2.4)$$

где P_1 – постоянная, Па; L - удельная теплота парообразования, Дж/моль; R - универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T - термодинамическая температура, К.

Учитывая, что относительная влажность азота не должна быть менее 100 %, количество воды, распыляемой в газообразный азот, можно определить по формуле, получаемой из (2.3) с учетом (2.4) [64]:

$$D \geq 0,622 \frac{P_1 e^{-L/(RT)}}{P_0 - P_1 e^{-L/(RT)}}. \quad (2.5)$$

Из формулы (6) видно, что количество распыляемой в сухой азот воды зависит от температуры газа. Расчет показывает, что для получения насыщенного влажного азота необходимо добавить 12,7 г воды на 1 м³ газа при температуре 15 °С. При 20 °С требуется расход воды 17,1 г/м³, а при 25 °С необходимо распылить 22,8 г/м³. Превышение расчетного количества распыляемой воды приведет к появлению в азоте частиц жидкости [64].

Для оценки воздействия увлажненного азота на уголь была проведена третья серия экспериментов. Пробы не окисленного и предварительно прогретого угля обрабатывались насыщенным влагой азотом. Температура азота равнялась 20 °С, количество распыляемой воды составило 17,1 г/м³. Константа скорости сорбции кислорода не окисленного угля равнялась 0,0522 см³/(г·ч), а после обработки насыщенным влагой азотом составила 0,0426 см³/(г·ч) через 24 часа. Подача азота с частицами жидкости (распылено 21,0 г/м³ воды), снизило сорбционную активность угля до 0,0315 см³/(г·ч) через 24 часа. После обработки насыщенным влагой азотом предварительно разогретого угля его сорбционная активность составила 0,0637 см³/(г·ч) через 24 часа. Использование азота с частицами жидкости привело к снижению скорости сорбции кислорода до 0,0583 см³/(г·ч) через 24 часа [64].

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что насыщенный влагой азот снижает сорбционную активность угля в 1,2-1,6 раз и его можно использовать в качестве антипирогена для предотвращения самовозгорания угля. Снижение сорбционной активности по отношению к кислороду наблюдается как у не окисленного, так и предварительно разогретого угля. Содержание в азоте частиц распыленной воды увеличивает эффективность обработки для предупреждения эндогенных пожаров. Дополнительным эффектом распыления воды в сухой азот является снижение температуры

газа за счет потерь тепла на испарение жидкости [64]. Охлаждение угля также способно замедлить развитие процесса самовозгорания [66].

Важнейшей характеристикой процесса самовозгорания угля является длительность инкубационного периода, в течение которого угольное скопление нагревается до критической температуры. Длительность инкубационного периода самовозгорания угля, согласно [67], можно определить по формуле:

$$\tau_{инк} = \frac{C(T_k - T_0) + 0.6jW + q_d X}{24\alpha U^{0,45} C_o q_o}, \quad (2.6)$$

где: C – теплоемкость угля, кал/(г·К); T_k – критическая температура самовозгорания угля, °С; T_0 – начальная температура угля, °С; j – теплота испарения воды, кал/г; W – начальная влажность угля, доли ед.; q_d – удельная теплота десорбции метана, кал/мл; U – константа скорости сорбции кислорода углем, мл/(г·ч); C_o – концентрация кислорода на входе в угольное скопление, доли ед.; q_o – удельная теплота сорбции кислорода воздуха углем, кал/мл; X – природная газоносность угля, мл/г.

Анализируя выражение (2,6) можно сделать вывод, что снижение начальной температуры и увеличение влажности угля, а также уменьшение концентрации кислорода в газовой среде и константы скорости сорбции кислорода углем способствуют увеличению длительности процесса самовозгорания. Наиболее простым путем предотвращения эндогенного пожара в шахте является подача азота в выработанное пространство, где в основном и формируются очаги самовозгорания.

Для повышения эффективности профилактических работ по предотвращению самовозгорания и снижения стоимости работ необходимо оценить, как увеличивается длительность инкубационного периода самовозгорания в зависимости от концентрации кислорода в рудничной атмосфере. С целью решения этой задачи отбирались пробы угля на различных шахтах. В лабораторных условиях определялась сорбционная активность угля по убыли кислорода в воздухе сорбционного сосуда, в

котором исследовались пробы угля. Уголь предварительно дробился до фракций 1-3 мм и проба герметично закрывалась в сосуде на 120 часов. Константу скорости сорбции кислорода определяли по формуле (2,1).

Затем по выражению (2,6) определялась длительность инкубационного периода самовозгорания угля при нахождении в газовой среде с различной концентрацией кислорода. В расчетах использовались следующие концентрации кислорода: 2%, 5%, 10%, 15% и 20%. Результаты расчета приведены в таблице 2.2 [68].

Таблица 2.2 – Влияние концентрации кислорода в азоте на длительность инкубационного периода самовозгорания угля

Длительности инкубационного периода самовозгорания угля, сутки						
Константа скорости сорбции кислорода, мл/(г·ч)	Концентрация кислорода в воздухе, %					
	20	15	10	5	2	
0,0337 при W = 2,0%	50	78	117	234	585	
0,0455 при W = 6,7%	79	105	158	317	795	
0,0131 при W = 4,6%	116	156	234	469	1170	

На рис. 2.5. показано изменение длительности инкубационного периода самовозгорания угля в зависимости от концентрации кислорода в рудничной атмосфере. Константа скорости сорбции кислорода исследованного угля равна 0,0337 мл/(г ·ч).

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что подача азота в выработанное пространство, приводящая к инертизации атмосферы, позволяет в несколько раз увеличить продолжительность процесса самовозгорания. Учитывая большие скорости подвигания очистного забоя, подача азота может полностью предотвратить развитие эндогенных пожаров и изолировать отработанный участок.

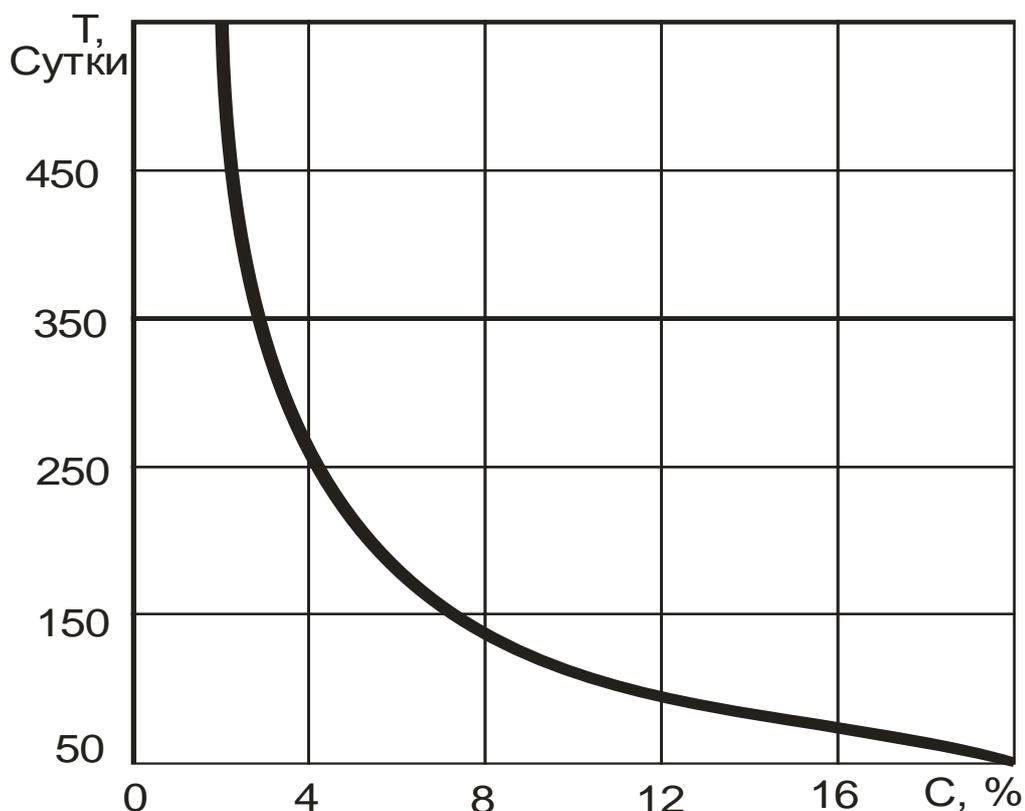


Рисунок 2.5 – Изменение инкубационного периода самовозгорания угля в зависимости от концентрации кислорода в окружающем газе

2.4. Исследование влияния азота на сорбционную активность угля, предварительно разогретого до температуры возгорания

На практике возможно применение азота для профилактических целей в выемочных полях со скоплениями угля, вскрытыми после тушения эндогенных пожаров. Поэтому следующим этапом исследований являлась оценка влияния азота на сорбционную активность угля, предварительно разогретого до высокой температуры.

Для этого подготовленные навески угля загружались в сушильный шкаф, разогретый до 623 К. Средняя температура, при которой уголь подвергался термической обработке в течение 60 мин, равнялась 613 К. Разогретый уголь ставился на сорбцию после охлаждения в течение 30 мин и достижения в сорбционном сосуде температуры 293 К [64].

Обработка прогретых углей азотом и водой производилась аналогично обработке углей в нормальных условиях ($T=293$ К). После обработки уголь

помещался в сорбционные сосуды. Все сосуды вначале продувались атмосферным воздухом в течение пяти минут с расходом 1,3 л/мин. Полученные результаты исследований влияния обработки на константу скорости сорбции кислорода углем приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Изменение константы скорости сорбции кислорода предварительно прогретым углем после обработки

Время сорбции, τ , ч.	Вид обработки		
	необработанный	азотом	дистиллированной водой
	$U, \text{см}^3/\text{г}\cdot\text{ч}$	$U, \text{см}^3/\text{г}\cdot\text{ч}$	$U, \text{см}^3/\text{г}\cdot\text{ч}$
24	0,0867	0,0704	0,0680
72	0,0285	0,0227	0,0373
145	0,0212	0,0167	0,0291
241	0,0140	0,0121	0,0237
356	0,0090	0,0066	0,0163
501	0,0079	0,0062	0,0161
670	0,0086	0,0061	0,0148
860	0,0068	0,0043	0,0120
1100	0,0046	0,0033	0,0092
1412	0,0027	0,0016	0,0067
1748	0,0027	0,0017	0,0046

Замеры показали, что влажность необработанного угля после прогрева уменьшилась до 0,3 %. После обработки дистиллированной водой она увеличилась в 40 раз до 12 % [64].

Изменение удельной сорбции кислорода разогретого угля после охлаждения приведены на рис. 2.6.

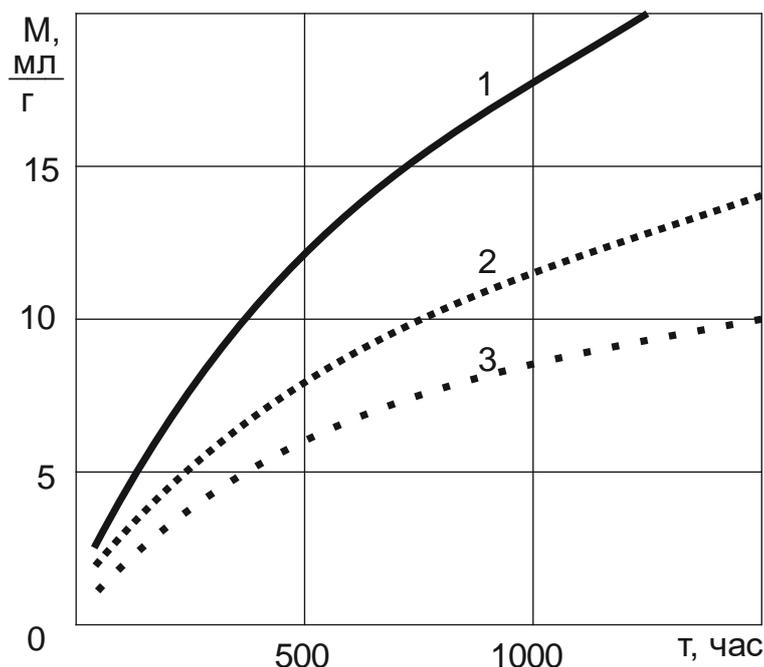


Рисунок 2.6 – Изменение удельной сорбции кислорода углем марки КЖ после охлаждения (разогрев до температуры 613 К):
1 – обработан водой; 2 – необработанный; 3 – обработан азотом

Каждый грамм предварительно разогретого и остывшего необработанного угля через 1748 ч поглотил $14,10 \text{ см}^3$ кислорода. После обработки газообразным азотом уголь сорбировал $10,53 \text{ см}^3$. Воздействие дистиллированной водой привело к росту поглощенного кислорода до $22,65 \text{ см}^3$.

Приведённые результаты показывают, что обработанный азотом уголь в 1,2 – 1,5 раза снижает химическую активность угля, предварительно разогретого до температуры 613 К. Дистиллированная вода приводит к увеличению сорбционной активности угля в 1,3 раза за 72 наблюдений. В промежуток 72 – 1748 часов во всех замерах удельная скорость сорбции обработанного водой угля превышала таковую для необработанного угля в 2,0 – 2,4 раза.

Приведённые результаты показывают, что прогрев угля существенно увеличивает сорбционную активность угля по отношению к кислороду. Так, через сутки константа скорости сорбции кислорода прогретого угля увеличилась в 1,66 раз по сравнению с не прогретым углем. Однако затем

произошло быстрое снижение сорбционной активности предварительно прогретого угля. Обработка азотом угля, предварительно разогретого до температуры 340 °С, снижает его химическую активность в 1,1 – 1,2 раза. Несовпадение воздействия азота с результатами в первой серии экспериментов можно объяснить следующим образом. В отличие от первой серии экспериментов, прогретый уголь не содержит влаги, поэтому сухой азот не освобождает поверхность его пор от влаги. При обработке часть азота остается в порах угля, что затрудняет проникновение кислорода к активным центрам [64].

Дистиллированная вода сохраняет эффект дезактивации предварительно прогретого угля в течение трех суток. Затем проявляется активизирующее действие воды на предварительно разогретый уголь. Объяснить такое изменение свойств угля можно механическим действием воды. Так, охлаждающее действие воды на разогретый уголь приводит к его интенсивному растрескиванию при обработке, что вызывает увеличение поверхности пор. Однако вода заполняет часть пор, что препятствует проникновению кислорода и приводит к снижению сорбционной активности угля. Затем вода начинает испаряться и освобождает поверхность угля для взаимодействия с кислородом [64].

Анализ результатов исследований

Проведенные исследования позволили установить, что уменьшение размера частиц угля увеличивает их сорбционную активность [69], а использование газообразного азота, получаемого традиционными способами, для инертизации выработанного пространства в шахтах приводит к увеличению сорбционной активности угля по отношению к кислороду, что может активизировать развитие процессов самовозгорания после прекращения подачи газа. Основной причиной активизации свежего угля

является увеличение поверхности за счет интенсификации испарения влаги, содержащейся в угле, сухим азотом [64].

Предварительный прогрев угля привел к испарению содержащейся в нем влаги, что способствовало повышению его сорбционной активности по отношению к кислороду после охлаждения и подачи воздуха. Подача сухого азота в предварительно нагретый уголь незначительно снизила его сорбционную активность в результате заполнения пор азотом [64].

Распыление воды в азоте позволяет увлажнить газ до состояния насыщения. Обработка таким газом не окисленного и предварительно прогретого угля приводит к снижению его сорбционной активности по отношению к кислороду. Полученные уравнения позволяют рассчитать необходимое для увлажнения азота количество воды в зависимости от температуры газа [64].

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЗОТА НА УГОЛЬ В ПРОЦЕССЕ НАГРЕВА

Подача азота в действующие очаги самовозгорания может использоваться как для прекращения выделения тепла и охлаждения очага, так и для предотвращения возможных взрывов горючих газозводушных и пылегазовых смесей. Заполнение азотом горных выработок или выработанного пространства приводит к снижению концентрации кислорода и может выводить газовую смесь из треугольника взрываемости.

Однако существующие установки могут получать азот с некоторым количеством кислорода. Причем концентрация кислорода в газовой смеси повышается с ростом производительности установок по газу и снижению себестоимости полученного азота. Существующие в шахте утечки воздуха, в том числе и выработанном пространстве, могут еще больше увеличивать концентрацию кислорода в атмосфере пожарного участка.

Учитывая возможность присутствия кислорода в подаваемом азоте необходимо исследовать влияние примесей этого окислителя на очаги самовозгорания. Особенно интересно оценить изменение выделения индикаторных газов из очага самовозгорания при подаче азота с примесями кислорода.

3.1. Методика исследований угля в условиях нагрева

Исследования проведены в условиях нагрева пробы угля (фракция 1-3 мм) и угольной пыли (фракция 0,2-0,4 мм) в интервале температур 293 – 673 К. При проведении экспериментов применена установка, схема которой приведена на рис. 3.1. Установка включает в себя баллон 1 с исследуемым газом, редуктор 2, ротаметр 3, термометры 4, 6, реторту 5 с углем, помещённую в электронагревательную печь 9. Подобная установка использована В.Г. Игишевым [7] при исследовании газообразных продуктов

нагрева угля для оценки эффективности его дезактивации различными антипирогенами.

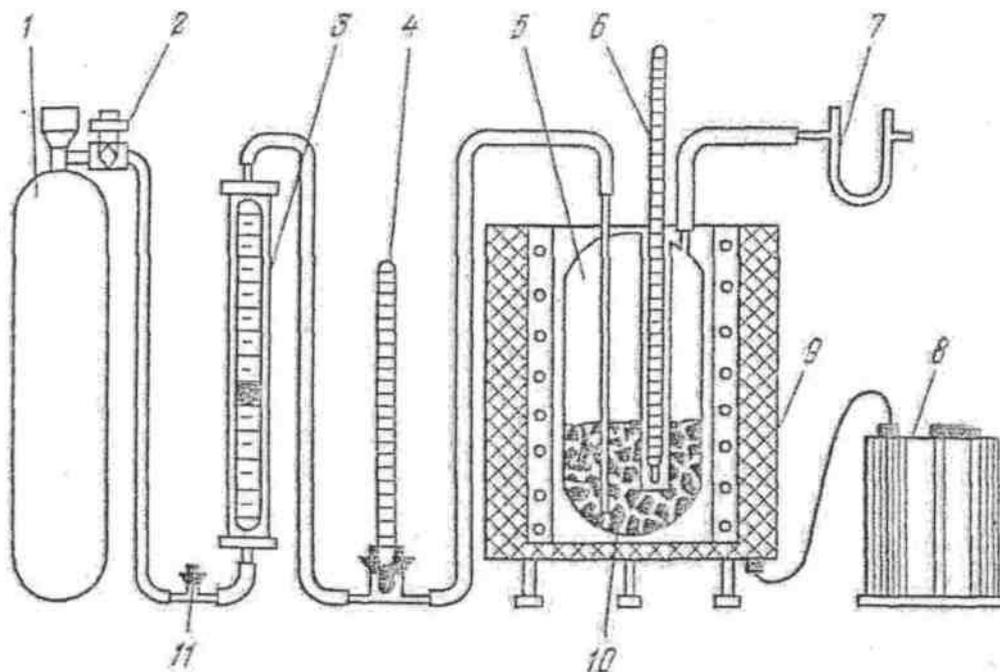


Рисунок 3.1 – Схема установки для нагрева угля: 1- баллон с воздухом; 2- редуктор; 3- ротаметр; 4, 6-термометры; 5- реторта; 7 – фильтр; 8- трансформатор; 9- электронагревательная печь; 10-уголь; 11- предохранительный клапан

Термический метод, разработанный в РосНИИГД, заключается в следующем. Исследуемая навеска засыпается в реторту 5, которая затем помещается в печь 9, предварительно нагретую в течение одного часа при температуре (T_n), обеспечивающей возгорание необработанного угля. Температура нагревательной печи регулировалась величиной подаваемого напряжения. Контроль температуры угля осуществлялся при помощи ртутного термометра 6. Расход воздуха через навеску в 60 г поддерживался постоянным, равным 0,5 л/мин. Перед серией опытов определялась максимальная температура пустой реторты и минимальная температура ($T_{кр}$), при которой происходило возгорание угля.

На рис. 3.2 приведена термограмма разогрева пустой реторты и заполненной углем пласта 69 шахты «Талдинская-Западная 2».

**Термограмма прогрева угля, пласт 69
АО СУЭК-Кузбасс (Шахта "Галдинская-Западная 2")
U=105V.**

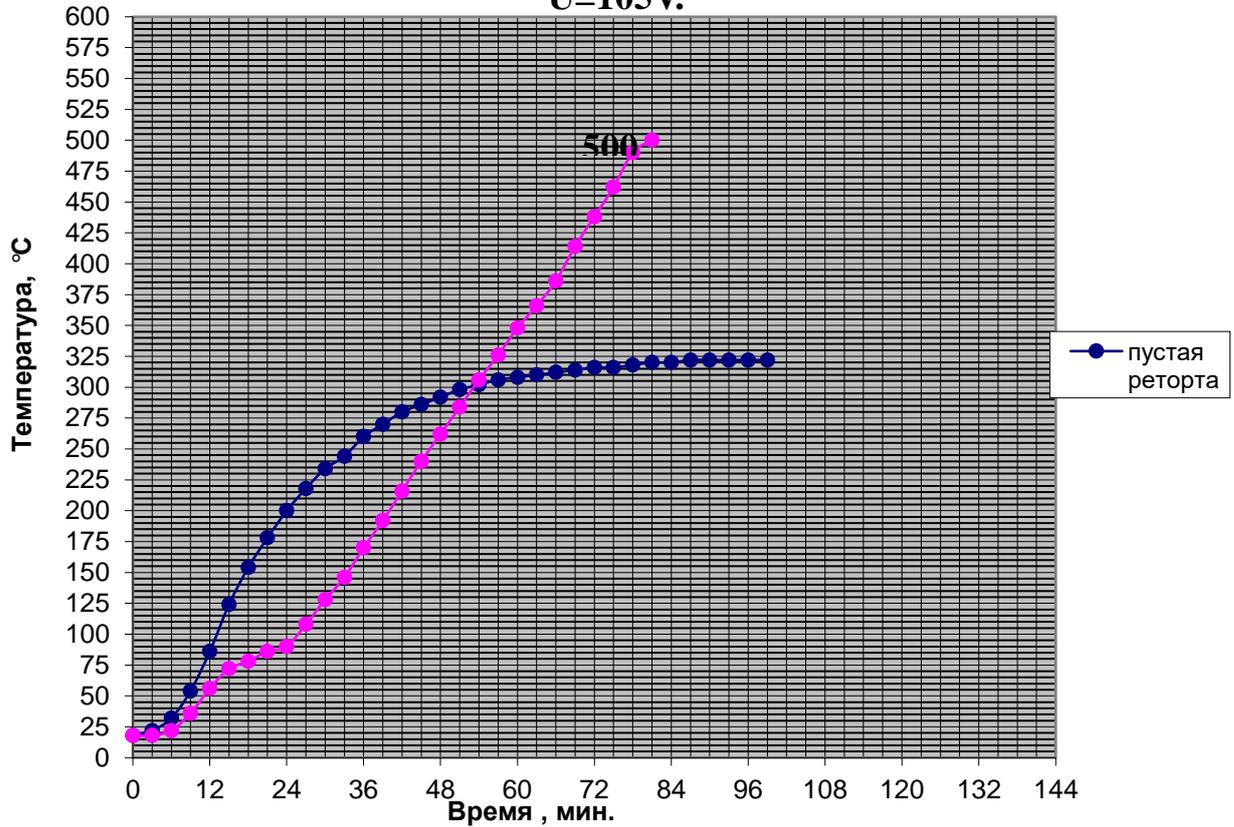


Рисунок 3.2 – Изменение температуры угля и пустой реторты при нагреве

Гипотетические кривые разогрева исходного угля и угля, обработанного антипирогеном, представлены на рис. 3.3.

Эффективность влияния антипирогена на динамику разогрева угля оценивалась по следующим показателям:

- разности (ΔT) между максимально достигаемой температурой за счёт реакции окисления обработанного и необработанного угля и критической температурой исходного угля;
- значению максимальной температуры (T_{\max}) и критической температурой ($T_{\text{кр}}$) исходного угля;
- времени достижения критической температуры ($\tau_{\text{инд}}$).

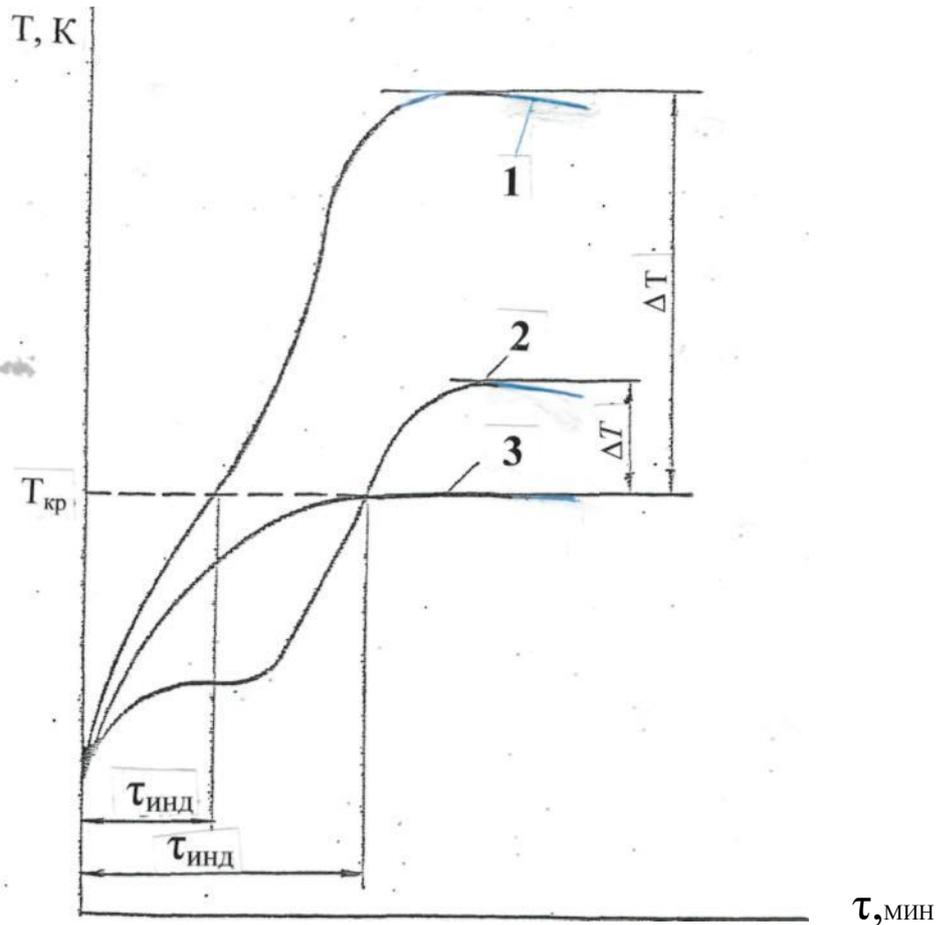


Рисунок 3.3 – Динамика разогрева угля:

1- исходный уголь при температуре печи, обеспечивающей возгорание навески ($T_{кр}$); 2- обработанный уголь; 3- исходный уголь при температуре ниже ($T_{кр}$) на 6-8 К.

Возможности методики иллюстрируются термограммами, представленными на рис. 3.4 и 3.5. Термограммы построены по результатам исследований приведённых в работах [7, 70.44]. На рис. 3.4 чётко обозначено увеличение условного индукционного периода самовозгорания у угля марки Бз, с рабочей влажностью 19,3 %, по сравнению с углем марки КЖ, имеющего влажность 2,5 %. По термограммам, приведенным на рис. 3.5, можно сделать вывод о том, что добавка к воде жидкого стекла (5%) позволяет существенно замедлить нагрев угля и рекомендовать этот состав к использованию в качестве антипирогена.

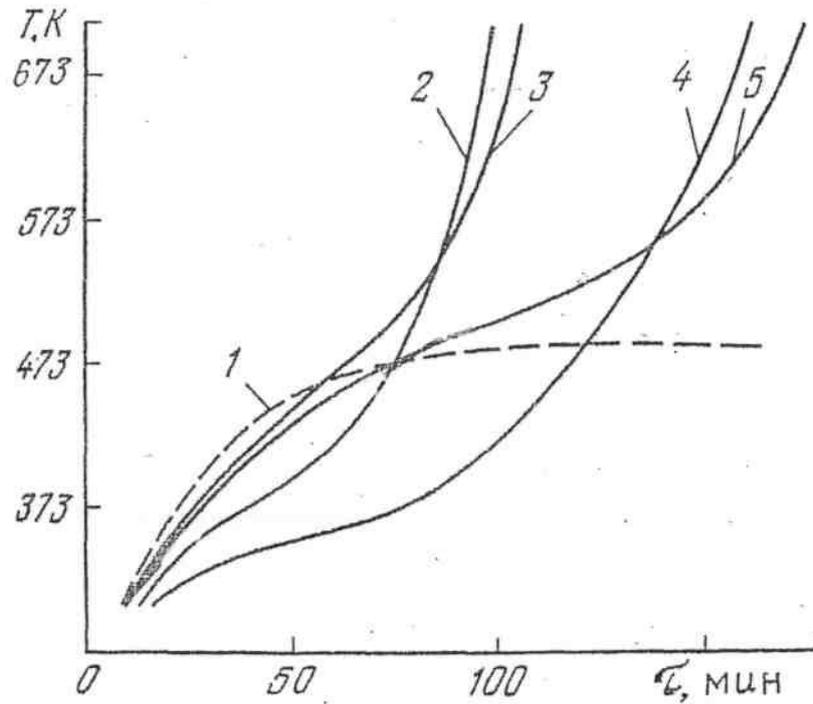


Рисунок 3.4 – Термограммы разогрева:
1- пустой реторты; 2, 3, 4, 5 – угля соответственно марок СС, КЖ, БЗ и Т.

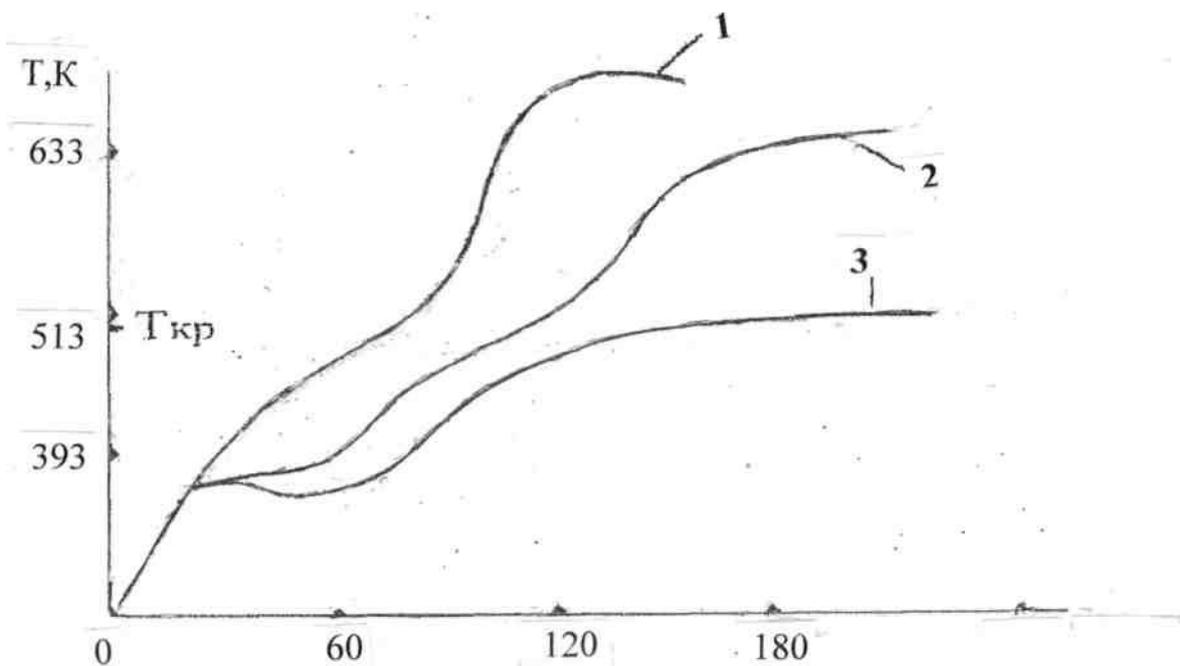


Рисунок 3.5 – Термограммы разогрева:
1 – естественного угля; 2 – обработанного водой; 3 – обработанного водой с добавкой жидкого стекла (5%).

Анализ представленных на рис. 3.4 и 3.5 термограмм позволяет сделать вывод о том, что использованный в работе [7] метод целесообразно применять в настоящей работе. С этой целью достаточно заменить баллон с воздухом (рис. 3.1) на баллон с исследуемой смесью азота и кислорода. Ступенчатое повышение примеси кислорода позволит определить её значения, обеспечивающие стабилизацию температуры исследуемой навески угля или пыли ниже температуры их возгорания [117].

3.2. Оценка влияния примеси кислорода на температуру стабилизации очага при нагреве угля и угольной пыли в условиях лабораторного эксперимента

Исследования по данному разделу диссертации проведены с углем марки «ДГ». Пробы угля были набраны в действующей лаве пласта 67 на шахте «Талдинская-Западная-1». Результаты технического анализа угля следующие: влажность-10,4 %; выход летучих-38,0 %; зольность-9,1 %; наличие серы-0,3 %. Разделка проб до фракции (-0,4 +0,2) мм произведена в контрольно-измерительной лаборатории Прокопьевского ОВГСО.

На первом этапе эксперимента была определена максимальная температура реторты в условиях её нагрева при отсутствии угольной навески ($T_{п.р.}$). Результаты нагрева при объёмном расходе воздуха 0,5 л/мин и напряжении на нагревательных элементах печи 56В представлены на рис. 3.6. Начальная температура равнялась 22 °С. Из результатов наблюдений следует, что максимальная температура пустой реторты, достигнутая через 270 минут, составляет 148°С.

На втором этапе, согласно методике, определялась критическая температура реторты, обеспечивающая возгорание угольной навески. Сначала навеска исследуемой угольной пыли (фракция 0,2-0,4 мм) прогревалась при температурах выше и ниже температуры пустой реторты (

$T_{П.Р.}$). На рис.3.7 и 3.8 приведены данные по нагреву угольной пыли соответственно при максимальной температуре пустой реторты 152 и 146 °С

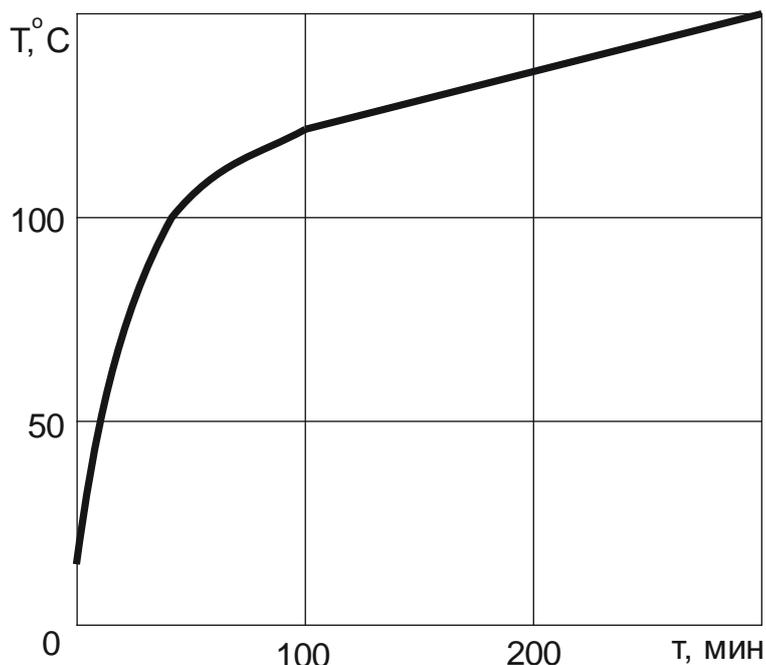


Рисунок 3.6 – Динамика разогрева пустой реторты при определении критической температуры.

В первом случае реторта с пылью помещалась в печь, нагретую до температуры 152 °С. Такая температура достигалась подачей напряжения 58 В. Пыль загорелась при температуре 253 °С. Во втором случае напряжение составило 54 В, обеспечивающую температуру реторты 146 °С. Угольная пыль в этом случае не загорелась. Температура её не превысила 183°С.

Для оценки критической температуры реторты, обеспечивающей возгорание навески, температура угольной пыли была уменьшена до 148 °С. Динамика разогрева навески угольной пыли при U- 56 В и T печи- 148 °С приведены на рис. 3.9.

Возгорание пыли произошло при температуре 322 °С. Поэтому можно сделать вывод, что критическая температура самовозгорания данной пробы угольной пыли равна 148 °С. В рассматриваемом случае критическая температура угля ($T_{кр}$) совпала с максимальной температурой пустой

реторты ($T_{п.р.}$). Однако это совпадение является случайным. Критическая температура, достаточная для возгорания, может быть больше и меньше $T_{п.р.}$.

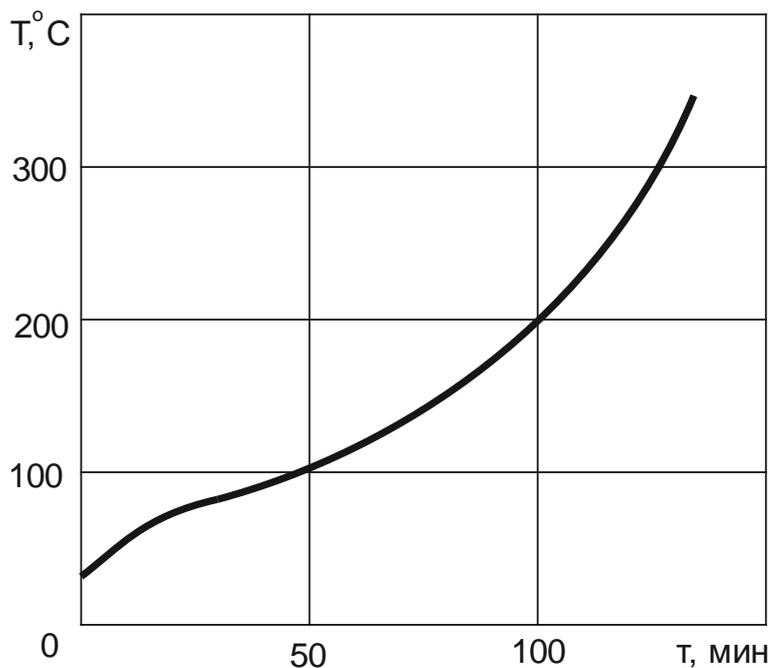


Рисунок 3.7 – Динамика разогрева навески угольной пыли при $U= 58 \text{ В}$, $T_{\text{печи}}= 152^\circ\text{C}$ для определения критической температуры

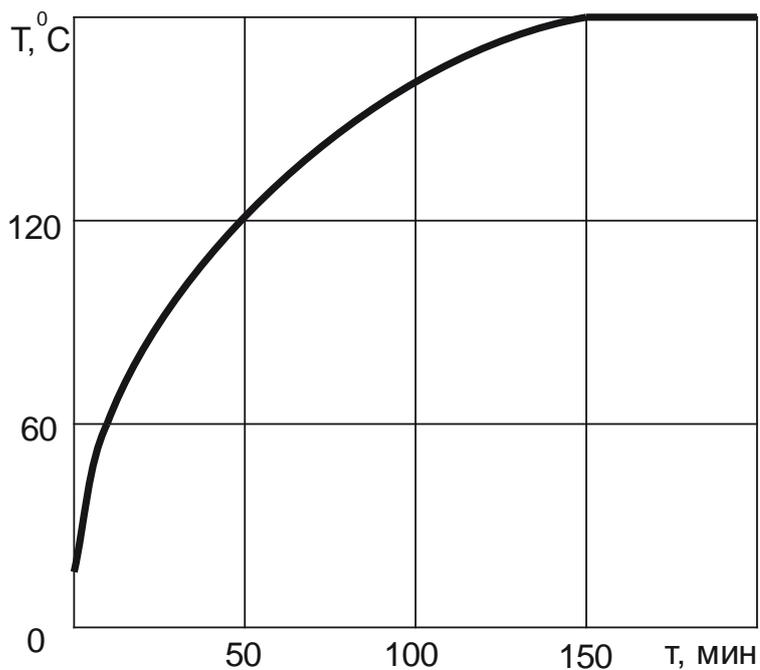


Рисунок 3.8 – Динамика разогрева навески угольной пыли при $U= 54 \text{ В}$, $T_{\text{печи}}= 146^\circ\text{C}$ для определения критической температуры

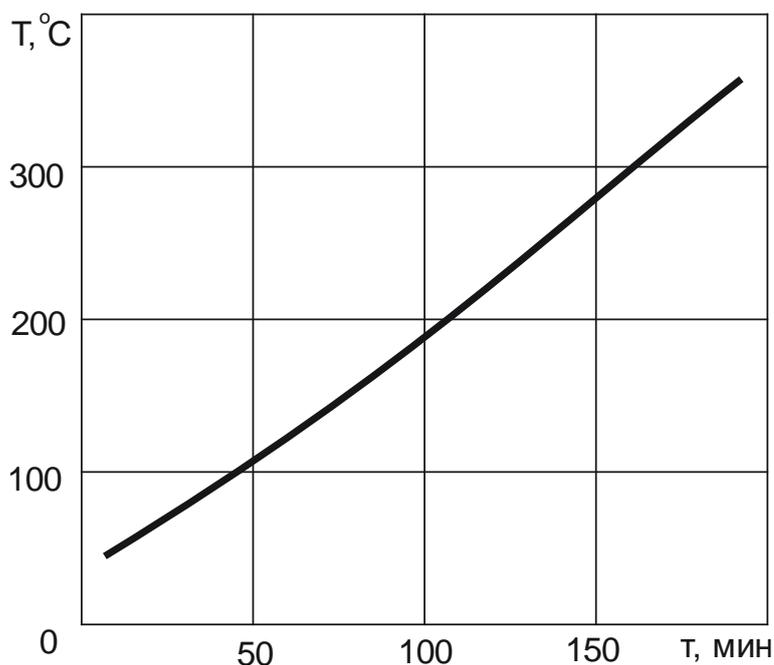


Рисунок 3.9 – Динамика разогрева навески угольной пыли при $U = 54$ В, $T_{\text{печи}} = 148$ °С для определения критической температуры

Анализируя графики, приведенные на рис. 3.7 – 3.9, можно сделать вывод, что по форме зависимости изменения температуры угольной пыли от времени можно оценить критическую температуру самовозгорания. Для критической температуры характерна практически линейная зависимость роста температуры со временем.

С учётом результатов, представленных на рис. 3.6 – 3.9, дальнейшие исследования по оценке влияния концентрации кислорода на температуру стабилизации очага нагревания были проведены при температуре пустой реторты 148 °С.

Концентрация примеси кислорода в азоте при продувке навесок пыли изменялась в пределах от 20,9 до 3,1 % (20,9 %; 15,7 %; 10,0 % и 3,1 %). Результаты исследований изменения температуры пробы угольной пыли при продувке газом с различным содержанием кислорода представлены на рис. 3.10. Эксперименты показали существенное влияние примеси кислорода в газе на динамику изменения температуры угольной пыли. Так, снижение концентрации кислорода (20,9 %, 15,7 %, 10,0 %, 3,1 %) в токе смеси его с азотом позволило стабилизировать температуру в нагреваемой пыли

соответственно на 330, 250 176 и 157 °С. При концентрации кислорода 20,9 % визуально отмечено возгорание навески пыли при температуре 330 °С, после чего эксперимент был прекращён. Скорость нагрева снизилась за счет уменьшения скорости сорбции кислорода при снижении его концентрации [71].

Динамика разогрева угольной пыли при концентрациях кислорода 15,7-20,9 % и 3,1-10,0 %, представленная на графиках рис 3.10, служит также основанием для вывода о том, что объектная или объёмная инертнизация очага азотом с примесью кислорода на уровне трёх-десяти процентов меняет характер его окисления. Температура навески стабилизировалась при 157-176°С, что незначительно, на 9-28 градусов, превышает температуру пустой реторты ($T_{п.р.}=148^{\circ}\text{C}$). Согласно [32] это может быть результатом перехода процесса из кинетической области в диффузионное окисление.

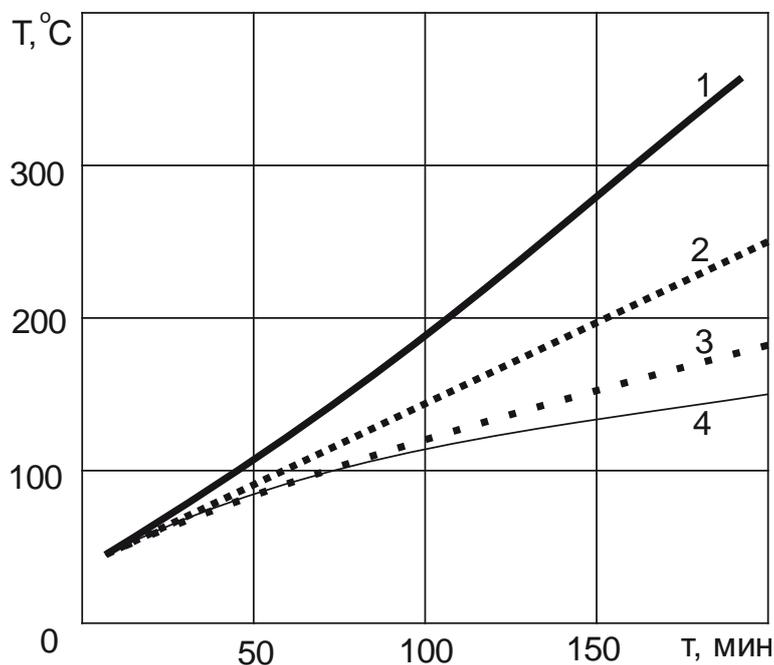


Рисунок 3.10 – Динамика разогрева навески угольной пыли при различной концентрации кислорода в подаваемом газе: :
1 – 20,9 %; 2 – 15,7 %; 3 – 10,0 %; 4 – 3,1 %

Аналогичные исследования влияния концентрации кислорода на динамику разогрева были проведены с пробами угля. Пробы угля разделяли до фракции 1-3 мм. Концентрация кислорода в азоте также

изменялась от 3,1 % до 20,9 %. Изменение времени нагрева пробы угля до определенной температуры в зависимости от концентрации кислорода в азоте приведено на рис. 3.11.

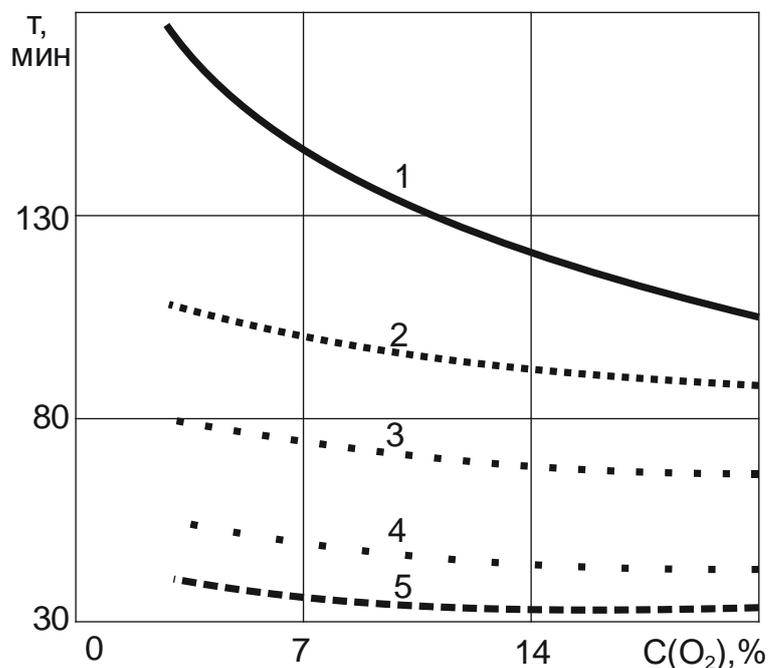


Рисунок 3.11 – Влияние концентрации кислорода в газе на длительность нагрева угля: 1 – до 300 °С; 2 – до 250 °С; 3 – до 200 °С; 4 – до 150 °С; 5 – до 100 °С;

Анализируя приведенные на рис. 3.11 данные, можно сделать вывод, что снижение концентрации кислорода в азоте существенно затормаживает нагрев пробы угля. Особенно заметное влияние содержание кислорода оказывает на время разогрева до температуры 300 °С.

3.3. Оценка влияния примеси кислорода в азоте на выделение индикаторных газов при самовозгорании угля

Обозначенная в настоящем разделе диссертации задача поставлена впервые. При больших объемах исследования влияния кислорода на сорбционную активность угля в работах [5, 7, 12, 13, 32, 71] основной их результат для проблемы применения инертных газов, в частности азота, сводился к определению концентрации примеси кислорода, исключаящей

самовозгорание скопления и обеспечивающей охлаждение уже возникшего очага пожара.

В работе [5], например, авторы утверждают, что процесс самонагревания угля не переходит в возгорание, если содержание кислорода снижается до 12-15 %. Если процесс находится на стадии возгорания, то содержание кислорода не должно превышать 5 %. В более ранней (1954 г.) работе [12] А.А. Скочинский и В.М. Огиевский верхний предел концентрации примеси кислорода в инертном газе, используемом для тушения эндогенного пожара, обозначили на уровне 2-3 %.

Газоаналитический метод является основным для обнаружения и контроля за ходом тушения очагов самовозгорания [72, 73, 74]. Индикаторными пожарными газами в шахтах являются оксид углерода, водород, этилен, ацетилен. Соотношение оксида углерода к водороду ($\text{CO}:\text{H}_2$) используется при оценке температуры очагов самовозгорания в Кузбассе [7]. В Донбассе для этой цели используется соотношение этилена к ацетилену ($\text{C}_2\text{H}_4:\text{C}_2\text{H}_2$).

Как отмечается в работе [7], не смотря на длительный опыт реализации, метод не лишён недостатков. Оксид углерода, например, фиксируется в рудничном воздухе при низкотемпературном окислении угля и пыли. В этом случае возможна ошибочная фиксация очага самовозгорания при его отсутствии на контролируемом участке. Подобная ошибка возможна и в случае, когда из-за плохой сорбции углем и породами и малой растворимости в воде оксид углерода в условиях качественной изоляции длительное время присутствует в рудничной атмосфере после ликвидации эндогенного пожара.

Примесь кислорода до 3 % присутствует в жидком азоте при использовании криогенной технологии для его получения и до 5 % при разделении воздуха с помощью молекулярных сит. Длительная продувка очагов самовозгорания азотом при наличии примеси кислорода будет влиять и на выделение индикаторных газов.

Количественная оценка этого влияния исследована для примеси кислорода 20,9 %, 18,7 %, 15,7 %, 12,0 %, 10,0 %, 5,0 % и 3,1 % [75, 76, 77]. В исследованиях использована установка, представленная на рис. 3.1. Методика эксперимента отличалась от использованной в разделе 3.2 тем, что температура навески, с учетом решаемой задачи, искусственно повышалась за счет увеличения напряжения на нагревательном элементе. Это позволило исследовать выделение индикаторных газов за пределами температуры стабилизации очага, которая имеет место для конкретной примеси кислорода.

Исследования газовой выделению из угля проводилось на пробах с размером частиц 1-3 мм. Результаты исследований выделения оксида углерода в зависимости от температуры угля при различном содержании кислорода в продуваемом газе, приведены на рис. 3.12. На рис. 3.13. показано изменение концентрации оксида углерода в исходящем газе в зависимости от содержания кислорода в подаваемой газовой смеси.

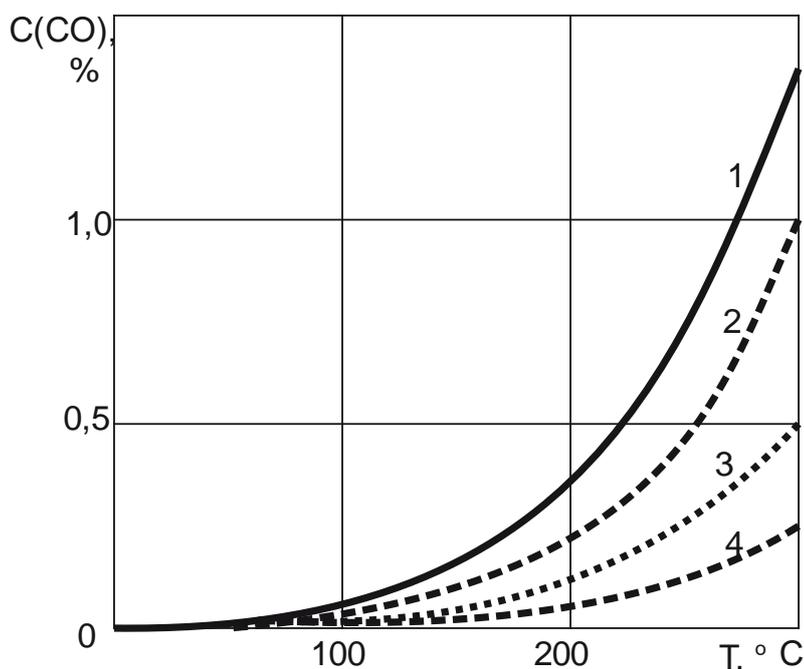


Рисунок 3.12 – Выделение оксида углерода в зависимости от температуры угля при содержании кислорода в азоте:
1 – 20,9 %; 2 – 15,7 %; 3 – 5,0 %; 4 – 3,1 %

Анализ полученных данных показывает, что с ростом температуры происходит увеличение концентрации выделяемого оксида углерода при всех исследуемых газовых смесях. Так, уже при 300 °C содержание оксида

углерода в исходящем воздухе может достигать 1,4 %. Изменение концентрации кислорода в поступающем газе в разогретый уголь также существенно влияет на концентрации выделяемого оксида углерода. Данный факт необходимо учитывать при контроле состояния очага самовозгорания в процессе применения азота для инертизации рудничной атмосферы. Причем чем выше температура угля, тем сильнее влияние концентрации кислорода на выделение оксида углерода.

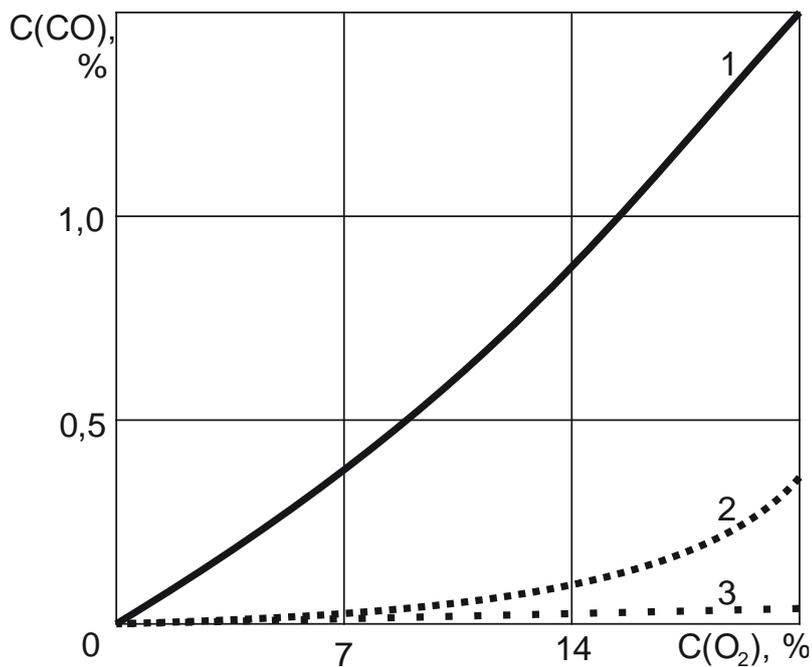


Рисунок – 3.13. Выделение оксида углерода из угля в зависимости от содержания кислорода в воздухе при температуре:
1 – 300 °С; 2 – 200 °С; 3 – 150 °С

Изменение содержания водорода в исходящем и нагреваемого угля газе в зависимости от температуры угля приведено на рис. 3.14. На рис. 3.15. показано влияние концентрации кислорода в подаваемом газе на содержание водорода в исходящем газе.

Приведенные на рис. 3.14 данные показывают, что существенный рост концентрации водорода начинается при температуре более 100 °С. Из угля данной марки выделяется сравнительно мало водорода, концентрация которого достигает 0,0035 % при нагреве пробы до 300 °С. Снижение концентрации кислорода в подаваемом в разогретый уголь газе существенно

уменьшает выделение водорода. Так, при концентрации кислорода 3,1 % при температуре 300 °С выделяется такое же количество водорода, как из угля при температуре 150 °С, продуваемом атмосферным воздухом. Поэтому при подаче азота, содержащего примесь кислорода, возникают сложности оценки состояния очага по концентрации выделяемого водорода.

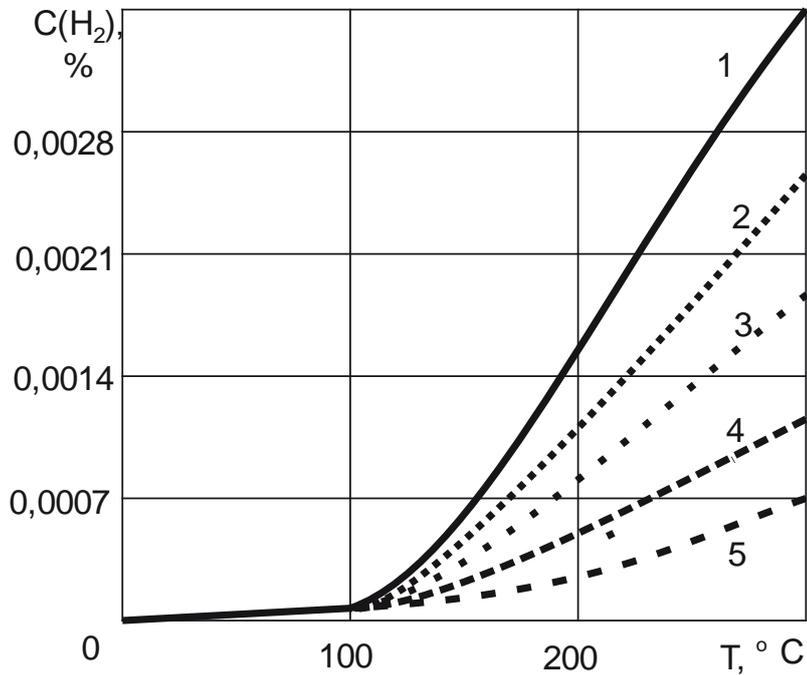


Рисунок 3.14 – Выделение водорода в зависимости от температуры угля при содержании кислорода:
1 – 20,9 %; 2 – 15,7 %; 3 – 10,0 %; 4 – 5,0 %; 5 – 3,1 %

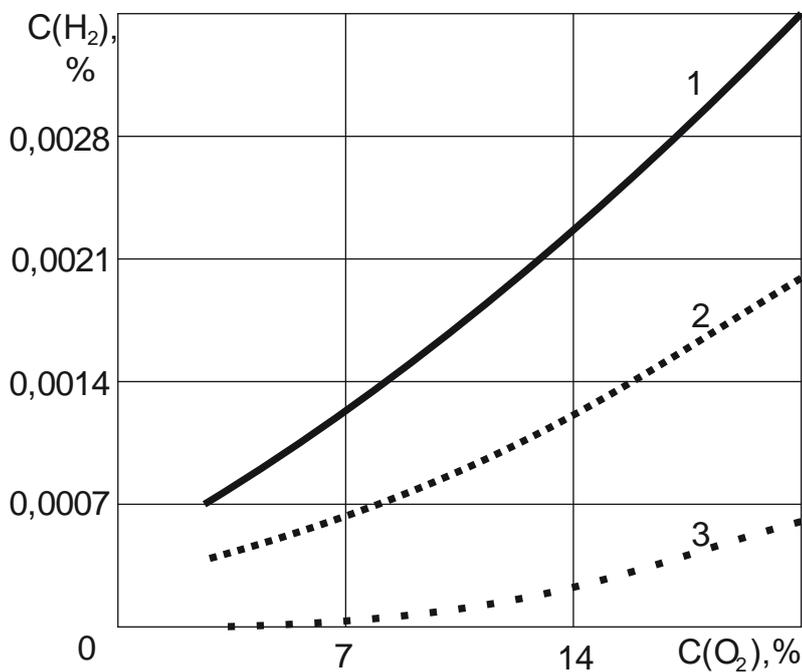


Рисунок 3.15 – Выделение водорода из угля в зависимости от содержания кислорода в воздуха при температуре:
1 – 300 °С; 2 – 200 °С; 3 – 150 °С

Учитывая существенное влияние примеси кислорода в азоте на выделение таких индикаторных газов процесса самовозгорания угля как оксид углерода и водород, было исследовано изменение отношения содержаний оксида углерода к водороду. Влияние температуры угля на соотношение выделяемых индикаторных газов приведено на рис. 3.16.

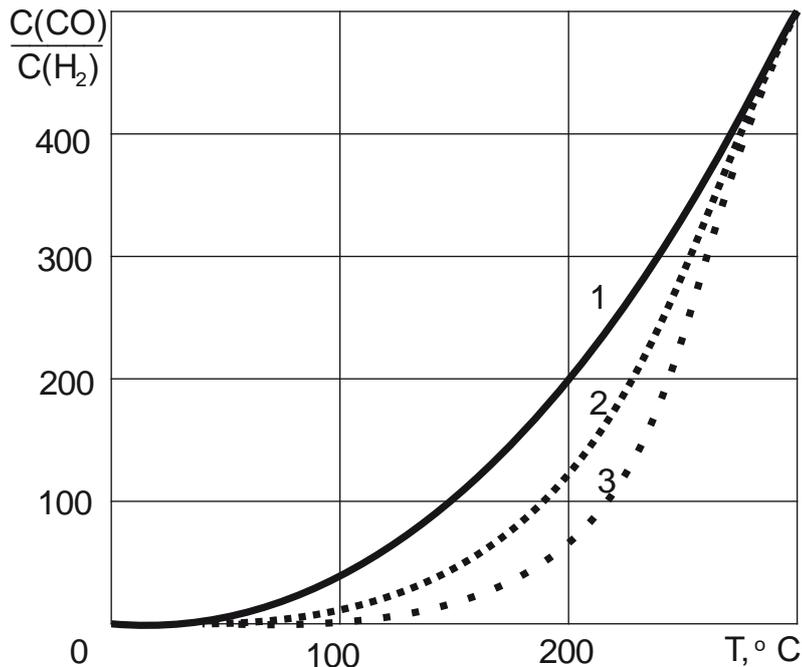


Рисунок 3.16 – Влияние температуры угля на отношение концентраций оксида углерода и водорода при содержании кислорода:
1 – 20,9 %; 2 – 10,0 %; 3 – 3,1 %

В таблице 3.1 показано влияние примеси кислорода в азоте на выделение оксида углерода из угля при температурах близких к критической самонагревания (101-103)⁰С и возгорания (284-303)⁰С.

Таблица 3.1 – Влияние концентрации кислорода в азоте на выделение оксида углерода в очаге самовозгорания угля

Температура, °С	Концентрация кислорода, %						
		20,9	18,7	15,7	12,0	10,0	5,0
	фракция 1-3 мм						

	концентрация оксида углерода						
101-103	0,0039	0,0032	0,0035	0,0032	0,0030	0,0021	0,0001
300-303	1,4	1,0	1,3	0,9	1,0	0,5	0,3320

По данным исследований можно сделать вывод о резком уменьшении выделения основного индикаторного газа, оксида углерода, используемого в Кузбассе при аттестации обстановки на аварийном участке как «пожар» (при $CO = 0,01 \%$ и выше). Наличие этого процесса снижает эффективность газоаналитического метода, особенно в условиях возможного разбавления контрольной пробы за очагом самовозгорания.

Использование показателя в виде соотношения концентраций оксида углерода и водорода ($CO:H_2$) существенно улучшает эффективность контроля температуры очага самовозгорания угля. При температуре около $300 \text{ }^\circ\text{C}$ этот показатель практически одинаков и не зависит от изменения концентрации кислорода (от 3 до 21 %) в подаваемом в очаг газе. Однако при меньших температурах ($100\text{-}200 \text{ }^\circ\text{C}$) концентрация кислорода сказывается на величине этого показателя, что может привести к ошибке в оценке температуры очага самовозгорания.

В Донбассе [74] контроль за температурой очага в стадиях самонагревания и возгорания ведётся по соотношению концентраций этилена и ацетилена ($C_2H_4:C_2H_2$). Использование этого показателя в использовании инертного газа для профилактики и тушения эндогенных пожаров также проблематично из-за уменьшения объёма их аналогично соотношению концентраций оксида углерода и водорода при низкой концентрации примеси кислорода.

Имеющиеся на оснащении ВГСЧ хроматографы позволяют определять этилен и ацетилен в рудничном воздухе при их концентрации $10^{-5} \%$. Согласно данным работы [78] образование ацетилена при термическом разложении метана начинается при температуре 453 K по следующей реакции:



Наиболее полное превращение метана в ацетилен происходит при температуре около 1773 К.

Прогрев навесок угля при температуре 20-370 °С служит косвенным подтверждением приведённых литературных данных. Ацетилен при их продувке воздухом обнаружен в концентрации 0,00001 % в пределах температур 203-223 °С. Снижение концентрации примеси до 3,1 % изменяет интервал температур обнаружения до более высоких значений – 280-285 °С.

По данным газоаналитических лабораторий ВГСЧ, при оценке фона индикаторных газов на склонных и весьма склонных к самовозгоранию шахтопластах, ацетилен в концентрации 10^{-5} % не был обнаружен ни разу. Этот индикаторный газ фиксируется только в аварийных участках.

С учётом практики применения индикаторных пожарных газов для обнаружения и контроля состояния эндогенных пожаров и выполненных в диссертации исследований специфичность образования ацетилена при определённой температуре (более 180-200 °С) делает возможным расширение области его использования в Кузбассе. Для этой цели можно рекомендовать применяемые в Донбассе трубки-концентраторы, наполненные активированным углем марки СКТ [79].

Повышение значимости ацетилена как индикаторного газа делает целесообразным внесение корректив в Правила Безопасности. Так, ПБ необходимо дополнить пунктом « При обнаружении в контрольных пробах ацетилена в концентрации 10^{-5} - 10^{-4} % работы на участке, кроме работ по локации, локализации и ликвидации очага самовозгорания, должны быть остановлены...».

3.4. Влияние примеси кислорода в азоте на выделение индикаторных газов при самовозгорании угольной пыли

Применение в шахтах все более мощной угледобывающей техники приводит к увеличению выделения угольной пыли. Частично образующаяся

угольная пыль осаждается на почву горных выработок. Способствует этому процессу применение орошения рабочих органов комбайна. Однако осевшая угольная пыль в конечном итоге оказывается в выработанном пространстве по мере подвигания очистного забоя.

Значительная часть угольной пыли, особенно мелкая фракция, остается в рудничном воздухе и переносится с утечками в выработанное пространство. Проницаемость выработанного пространства неоднородна, что сказывается на скорости фильтрации утечек воздуха. В местах повышенной проницаемости скоплений угля и горных пород скорость воздуха может существенно снижаться, что приводит к осаждению пыли. Поэтому в выработанном пространстве возможно образование локальных скоплений угольной пыли. Особенно велика вероятность образования скоплений угольной пыли в местах выхода скважин в обрушенную часть горных выработок.

Учитывая увеличенную сорбционную активность угольной пыли по отношению к кислороду, вероятность развития процесса самовозгорания в таких скоплениях возрастает. Причем длительность инкубационного периода самовозгорания угольной пыли может быть существенно меньше, чем у угля. Для предупреждения процесса самовозгорания и ликвидации возникших очагов эндогенных пожаров также целесообразно использовать подачу азота. Поэтому необходимо оценить эффективность использования индикаторных пожарных газов для обнаружения возникающих очагов и оценки их температуры.

Исследования проводились с угольной пылью фракций 0,2-0,4 мм. Прогрев проб угольной пыли осуществлялся на установке, приведенной на рис. 3.1. Реторту с пробами угольной пыли нагревали с одновременным продувом азотом с различной концентрацией кислорода. Содержание кислорода в азоте принимало следующие значения: 20,9 %, 18,7 %, 15,7 %, 12,0 %, 10,0 %, 5,0 % и 3,1 %. Прошедший через нагреваемую угольную пыль

газ отбирался и исследовался на содержание оксида углерода, водорода, предельных и непредельных углеводородов.

Изменение концентрации оксида углерода, выделяемой из угольной пыли, в зависимости от ее температуры приведено на рис. 3.17.

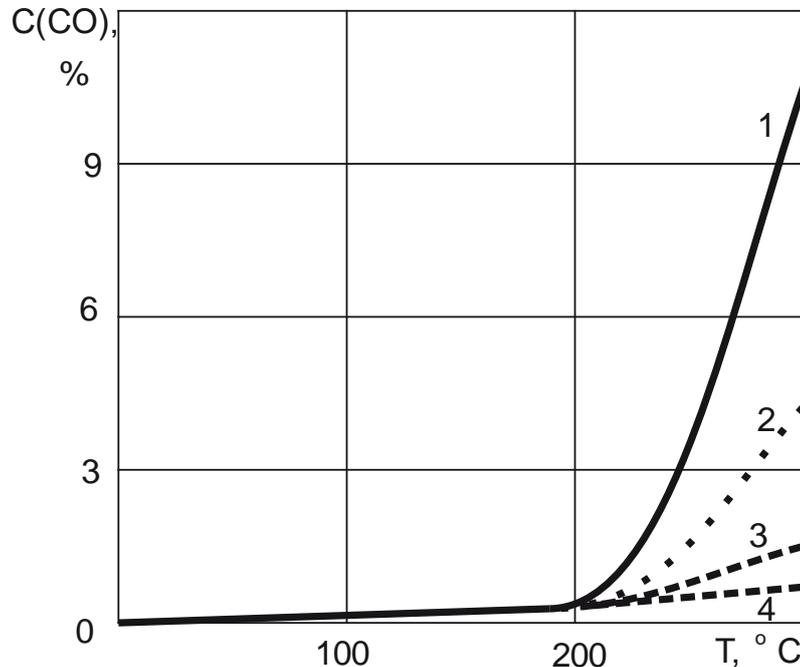


Рис. 3.17 – Выделение оксида углерода в зависимости от температуры угольной пыли при содержании кислорода:
1 – 20,9 %; 2 – 15,7 %; 3 – 10,0 %; 4 – 5,0 %

Из приведенных результатов видно, что существенное влияние содержание кислорода в азоте начинает оказывать на выделение оксида углерода в интервале температур 200-300 °C. Причем выделение оксида углерода из угольной пыли идет значительно интенсивней, чем из угля (рис. 3.12). Так, если содержание оксида углерода при продувке атмосферным воздухом нагретого до 300 °C угля составляло 1,4 %, то из нагретой до аналогичной температуры угольной пыли его концентрация достигла 10,5 %. Этот фактор необходимо учитывать при контроле очагов самовозгорания, возникающих в выработанном пространстве шахт.

В приводимой ниже таблице 3.2 показано влияние примеси кислорода в азоте на выделение оксида углерода из угольной пыли при нагреве до

близких к критическим температурам самонагрева (101-103) °С и возгорания (284-303) °С.

Влияние примеси кислорода в азоте на концентрацию выделившегося из угольной пыли оксида углерода приведено на рис. 3.18.

Таблица 3.2 – Влияние концентрации кислорода в азоте на выделение оксида углерода в очаге самовозгорания угольной пыли.

Темпе- ратура, °С	Концентрация кислорода, %						
	20,9	18,7	15,7	12,0	10,0	5,0	3,1
	фракция (-0,4-+0,2) мм						
	концентрация оксида углерода						
101-102	0,0198	0,0136	0,0148	0,0132	0,0129	0,0092	0,0047
280-284	10,2	8,9	4,2	2,2	1,6	0,7	0,2668

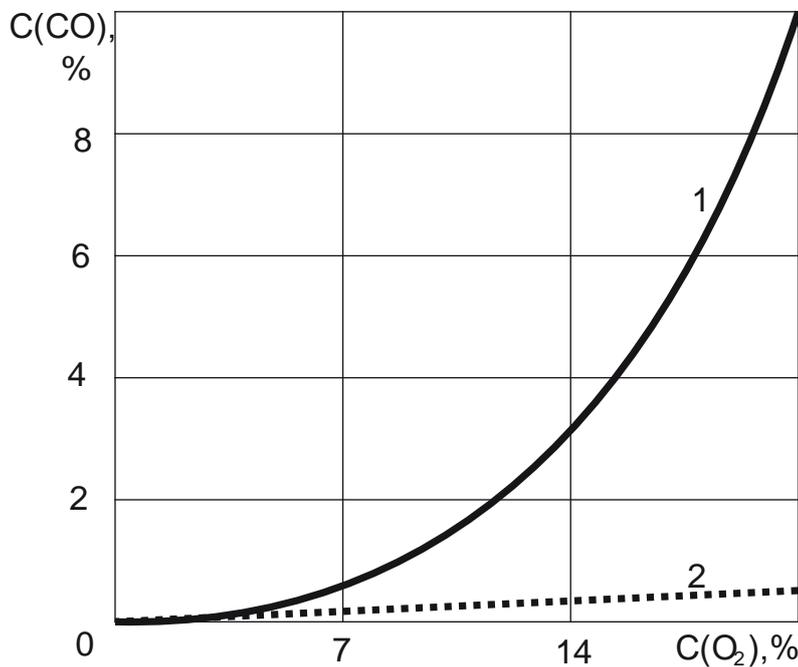


Рисунок 3.18 – Выделение оксида углерода из угольной пыли в зависимости от содержания кислорода в воздухе при температуре: 1 – 300 °С; 2 – 200 °С

Приведенные на рис. 3.18 зависимости свидетельствуют, что наибольшее влияние на выделение оксида углерода концентрация кислорода в подаваемом газе оказывает на очаг самовозгорания с температурой 300 °С.

При температурах очага самовозгорания менее 200 °С влияние примеси кислорода на концентрацию оксида углерода существенно снижается.

Влияние температуры на выделение из угольной пыли водорода, также являющегося индикатором процесса самовозгорания, приведено на рис. 3.19.

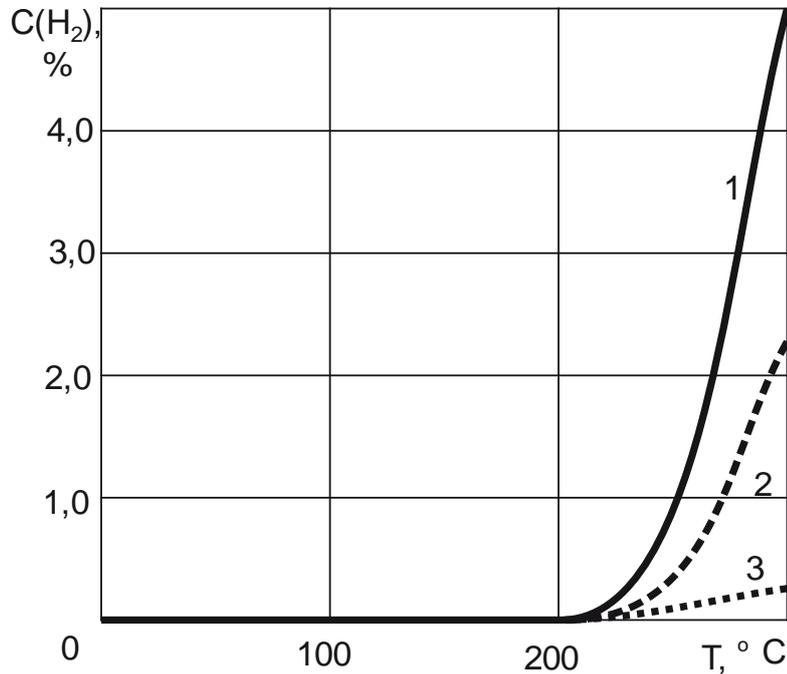


Рисунок 3.19 – Выделение водорода в зависимости от температуры угольной пыли при содержании кислорода:
1 – 20,9 %; 2 – 18,7 %; 3 – 15,7 %

Анализируя приведенные результаты исследования можно сделать вывод, что значительное влияние на выделение водорода из угольной пыли наблюдается в интервале температур от 200 до 300 °С. Падение содержания кислорода в рудничной атмосфере только на 2 % приводит к уменьшению концентрации водорода в два раза.

Сравнивая полученные результаты с выделением водорода из угля (рис. 3.14), необходимо отметить существенное увеличение интенсивности водорода из угольной пыли. Так, при температуре 300 °С концентрация водорода, выделившейся из угольной пыли, возрастает более чем в тысячу раз по сравнению с углем.

На рис. 3.20 показано изменение выделения водорода из угольной пыли с зависимости от содержания кислорода в продуваемом газе.

Приведенные на рис. 3.20 данные также свидетельствуют, что существенное влияние на выделение водорода из угольной пыли содержание кислорода в азоте оказывает после нагрева пробы более 200 °С.

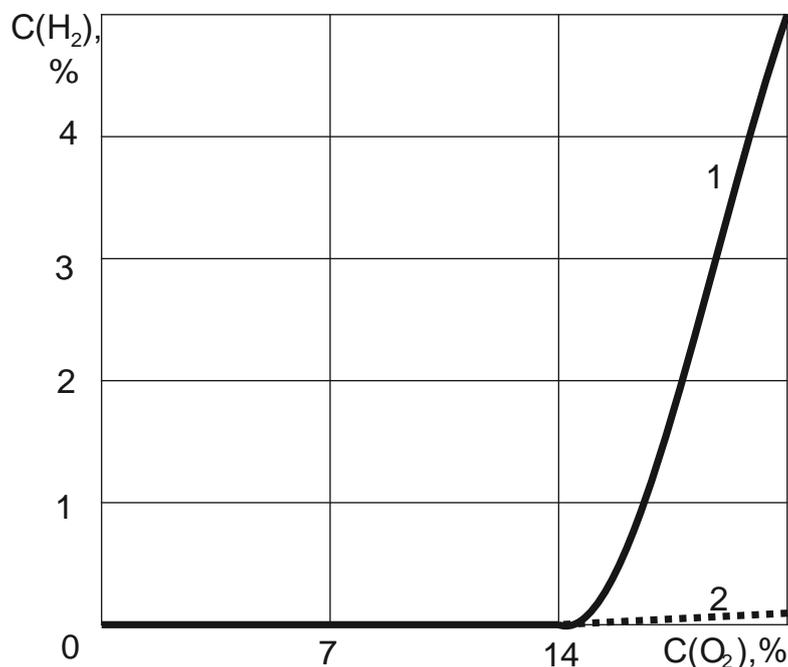


Рисунок 3.20 – Выделение водорода из угольной пыли в зависимости от содержания кислорода в воздухе при температуре: 1 – 300 °С; 2 – 200 °С

Учитывая существенное влияние примеси кислорода на выделение индикаторных газов из нагреваемой угольной пыли, на практике могут возникать трудности идентификации и оценки температуры очагов самовозгорания угольной пыли, возникающих в выработанном пространстве. Поэтому необходимо оценить, как изменяется соотношение оксида углерода и водорода при нагреве угольной пыли в газовой среде с различной концентрацией кислорода. Изменение величины отношения оксида углерода к водороду в зависимости от температуры навески угольной пыли приведено на рис. 3.21 [101].

Анализируя приведенные данные можно сделать вывод о существенном влиянии концентрации кислорода в рудничной атмосфере на

соотношение концентраций оксида углерода к водороду, выделяющихся из нагреваемой угольной пыли. Так, поступление в очаг самовозгорания атмосферного воздуха приводит к увеличению соотношений оксида углерода и водорода с ростом температуры до 200 °С, затем это соотношение снижается [101].

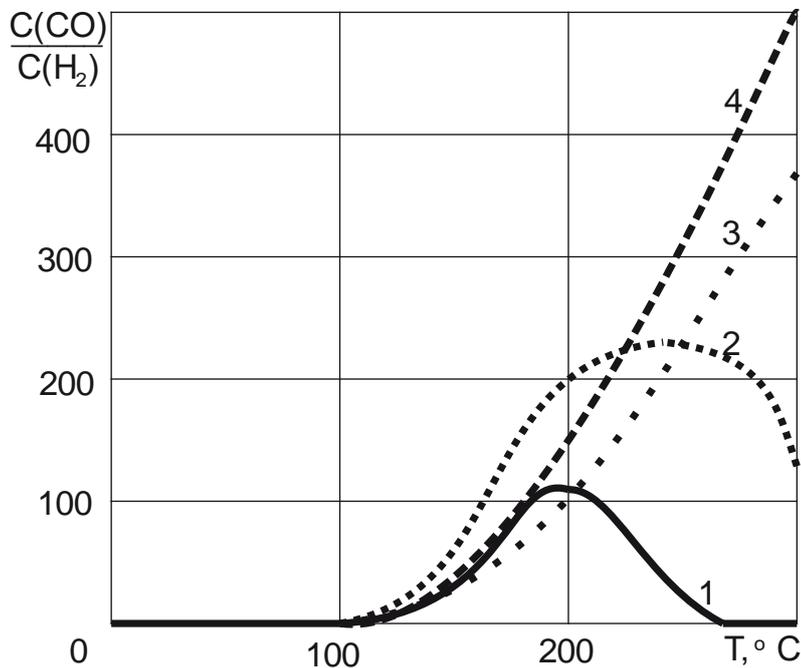


Рисунок 3.21 – Влияние температуры на отношение концентраций оксида углерода и водорода, выделяющихся из угольной пыли, при содержании кислорода: 1 – 20,9 %; 2 – 10,0 %; 3 – 5,0 %; 4 – 3,1 %

Уменьшение концентрации кислорода в азоте до 10 % способствует росту соотношения концентраций этих газов до температуры 250 °С. Дальнейшее нарастание температуры угольной пыли при сохранении концентрации кислорода на уровне 10 % сопровождается снижением соотношения оксида углерода и водорода. В случае уменьшения примеси кислорода в азоте до 5,0 % и менее наблюдается рост соотношения оксида углерода и водорода до температуры 300 °С. Причем, с понижением содержания кислорода в азоте соотношение этих концентраций этих индикаторных газов увеличивается [101].

3.5. Анализ результатов исследований

Газообразный азот используют во многих отраслях промышленности как инертную среду для химических реакций, при перекачке горючих жидкостей и т.д. В последние годы азот начали применять для профилактики и тушения эндогенных пожаров. Однако влияние азота на изменение кинетики сорбции кислорода углем практически не изучено. Есть некоторые сведения о сорбции азота каменными углями. В работе [80] авторы изучали сорбцию азота углем и породами при применении инертных газов для предупреждения взрывов при тушении эндогенных пожаров. Бессолицина Г.Г. и Денисенко В.Е. исследовали зависимость активности угля от влаги путём пропускания сухого и увлажнённого азота [81].

Азот является одним из элементов с самой низкой реакционной способностью вследствие высокой прочности молекулы. Учитывая высокую энергию диссоциации молекулы (225 ккал/моль), диссоциация азота начинает происходить лишь при температуре порядка 3000 К [82]. Диаметр молекулы азота лежит в пределах от $3,15 \text{ \AA}$ до $3,53 \text{ \AA}$. Устойчивость и инертность молекулы объясняется её электронным строением $:\text{N}=\text{N}:$.

В работе [83] утверждается, что при сорбции азота углем наблюдается полная обратимость точек сорбционного равновесия. Это свидетельствует о физическом характере сорбции азота. Веселовский В.С. также объяснял сорбцию азота его притоком в монолит угля не осложнённым химическим реагированием [13]. В своих исследованиях он установил, что величина удельной сорбции азота углем незначительна, хотя уголь относится к активным сорбентам, обладающим большой внутренней поверхностью (около 100-200 м²/г).

Молекула азота в противоположность молекуле кислорода является неполярной. Между азотом и веществом угля должно проявляться главным образом дисперсионное взаимодействие. Мак-Бен Дж.В. изучал сорбцию газов на активных углях, полученных искусственным путём.

По результатам его исследований количество удерживаемого вещества при нормальных условиях тем больше, чем выше молекулярный вес, температура кипения и критическая температура газа [84]. С этим согласуются данные, приведённые в работе [82]. Так активные угли сорбируют кислорода больше по отношению к азоту в 1,2 раза. Температура кипения и критическая температура для кислорода равны 91 К и 155 К, для азота соответственно 78 К и 126 К. Коэффициент диффузии кислорода и азота в воздухе одного порядка и равен 0,178 см²/с при температуре 293 К. Коэффициенты самодиффузии этих газов также практически равны при температуре 273 К [85].

Приведённые данные позволяли предположить, что обработка угля газообразным азотом из-за отсутствия химического взаимодействия между ними не окажет заметного влияния на сорбционную активность угля. Лабораторные исследования подтвердило это предположение. После обработки угля азотом при температуре 20 °С повышается его химическая активность в 1,2 раза за счёт дегазации угля, а также интенсивного испарения содержащейся в угле жидкости, увеличивающих свободную поверхность реагирования.

После вытеснения остаточных газов при продувке азот сорбируется активными поверхностными участками сорбента [80], тем самым предохраняя их от окисления. Энергия ван-дер-ваальсовых связей, за счёт которых осуществляется физическая сорбция неполярных молекул при температуре 293 К, равна 10 кДж/моль [86]. Поэтому при продувке воздухом сорбционного сосуда в течение 5 мин происходит вытеснение физически сорбированного углем азота кислородом воздуха. Последний интенсивно сорбируется активными центрами приповерхностного слоя сорбента.

Такое объяснение подтверждается результатами, полученными при изучении влияния азота на разогретые угли. Азот не повышает активность разогретых углей, так как они до обработки уже дегазированы высокой температурой.

Уменьшение сорбционной активности углей при температуре 293 К после обработки водой с сохранением этого эффекта до 1100 часов объясняется следующим образом. Уголь при обработке выдерживался в воде в течение 60 мин. За это время происходило насыщение поверхности угля молекулами воды, заполнение макропор и трещин сорбента. В данном случае речь идёт о, так называемой, внешней или свободной воде. Сорбционные процессы протекают в основном в микропорах, радиус которых равен 5 мкм.

В переходных порах с радиусом от 5 до 50 мкм наряду с сорбционными процессами протекают фильтрационные. Для макропор с радиусом более 50 мкм характерны процессы фильтрации. Объём микропор составляет более 50 % общего объёма всех пор [87]. Процесс окисления угля зависит от скорости диффузии кислорода к его внутренней поверхности [13], вода же, заполняя трещины и поры угля, тормозит диффузию кислорода и, тем самым, уменьшает способность угля окисляться. Коэффициент диффузии кислорода в воде в 7807 раз меньше, чем в воздухе и равен $2,28 \cdot 10^{-5}$ см²/с [88].

Резко выраженное в течение длительного (1748 ч) времени активирующее влияние дистиллированной воды на разогретый до температуры 613 К уголь объясняется её механическим воздействием. Охлаждающее действие воды на разогретый уголь приводит к его интенсивному растрескиванию при обработке, вследствие чего увеличивается взаимодействующая с кислородом поверхность. [64]

В разделе 3 впервые для двух фракций (уголь и пыль) исследовано изменение состава газообразных продуктов окисления угля в условиях нагревания и охлаждения очагов при их продувке инертным газом с примесью кислорода.

Результаты исследований позволяют сделать общий вывод о влиянии на объективность контроля за температурой в очаге как содержания примеси кислорода в используемом инертном газе, так и фракционного состава скопления.

Для средней фракции угля 0,0003 м при температуре 81-83 °С, принимаемую за критическую [89], выделение оксида углерода в 5,3 раза превышает таковое у более крупной фракции – 0,002 м. Разница в минимальных температурах появления в пробах водорода для этих двух фракций составляет 62 градуса (у угля – 143°С, у пыли – 81°С).

При концентрации примеси кислорода 3,1 % предельные значения температуры появления индикаторных газов и их количественные соотношения при сравнении двух фракций также имеют существенные отличия.

Поэтому совершенствование метода контроля за признаками самовозгорания угля в условиях объектной или объёмной инертизации выработанных пространств, как видно из результатов исследований прогрева угля и угольной пыли, должно включать в себя, прежде всего, дополнительный анализ содержания ацетилена с его сгущением от атмосферной концентрации $10^{-7}\%$ до $10^{-5}\%$ с использованием трубок-концентраторов [72, 79].

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕСИ КИСЛОРОДА В АЗОТЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ И ТУШЕНИЕ ОЧАГОВ САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ

Развитие процесса самовозгорания угля и эффективность тушения эндогенных пожаров зависит от множества факторов. В первую очередь к таким факторам относятся физико-химические свойства угольного скопления. Существенное воздействие на процесс самовозгорания оказывает воздействие внешней среды, особенно на стадии тушения очагов пожара, осуществляемых с помощью хладагентов.

Детальное исследование процесса развития и тушения очагов самовозгорания возможно только путем математического моделирования, позволяющего изменять любой параметр этого процесса. При натурном и физическом моделировании это невозможно. Кроме того, в лабораторных и производственных условиях моделировать эндогенный пожар опасно из-за выделения токсичных и горючих газов, а также возможности выхода процесса самовозгорания из под контроля. Поэтому для оценки влияния примеси кислорода на развитие и подавления процесса самовозгорания угля использовалось математическое моделирование.

4.1. Математическое описание процесса самонагревания при окислении угля

Склонность угля к низкотемпературному окислению обуславливает развитие процесса самонагревания с последующим самовозгоранием. Характер протекания этого процесса определяется физико-химическими свойствами угля: теплотой сгорания, удельной поверхностью, теплопроводностью, удельной теплоёмкостью, объёмной плотностью. Необходимым условием реализации процесса самонагревания является возможность накопления тепла, выделяющегося в процессе низкотемпературного окисления.

Скорость его протекания зависит от скорости химической реакции, поступления кислорода к реагирующей поверхности и от интенсивности теплообмена угольной частицы с внешней средой. Поскольку процессы окисления экзотермичны, в условиях затрудненного теплоотвода выделяющееся тепло идет на нагрев угля, ускоряя тем самым достижение критических условий самовозгорания.

Математическое описание процесса самонагрева должно учитывать основные условия его протекания.

Фильтрационное движение газовой смеси азота и кислорода в выработанных пространствах шахт, в которых могут находиться скопления угля и угольной пыли, относится к пространственному типу течений и должно описываться системой трёхмерных уравнений газовой динамики. Однако их численное решение таких уравнений зачастую невозможно из-за отсутствия необходимого оборудования. Поскольку нас в большей степени интересует процесс окисления угля в интервале температур от нормальной до возгорания, то его можно без существенной потери точности рассчитать в одномерной постановке. Схема области счета представлена на рис. 4.1.

Азот + кислород \rightarrow Скопление угля \rightarrow Азот + продукты окисления

Рисунок 4.1 – Схема области счета

Предполагается, что газовая смесь с заданными температурой, давлением, концентрацией кислорода и скоростью поступает в насыпку угля определённого фракционного состава, а затем выходит из него с другой температурой и меньшим содержанием кислорода, затраченным на окислительно-восстановительные реакции. Для описания процесса ограничимся уравнениями, описывающими поля температуры и концентрации кислорода.

Сделаем ряд физических допущений, значительно упрощающих математическую постановку задачи без существенной потери точности. Так, будем считать, что изменение концентрации кислорода на входе в скопление угля достигается путем ввода в воздушный поток соответствующего количества инертного газа.

Учитывая незначительные скорости фильтрации воздуха в выработанном пространстве, подаваемый инертный газ можно считать несжимаемым [90]. Пренебрежём также изменением плотности фильтрующегося газа в результате низкотемпературного окисления угля и угольной пыли, то есть пренебрежём изменением его состава в ходе протекания химических реакций. Тогда уравнение неразрывности можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial(\gamma\rho)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\gamma\rho V) = 0 \quad (4.1)$$

где t - время, с; ρ - плотность газа, кг/м³; V - фильтрационная скорость газа, м/с; x - координата вдоль угольной насыпки, м; γ - объёмная доля пустот в скоплении угля.

Примем аналитическое выражение силы сопротивления в пористой среде в форме:

$$F = \left(\frac{\mu}{a} + \frac{C_2 \cdot \rho}{2} |V| \right) \cdot V \quad (4.2)$$

где μ - коэффициент динамической вязкости газа, Па·с; C_2 - коэффициент внутреннего сопротивления, 1/м; a - проницаемость, м².

Согласно формуле Эргуна величины C_2 и a можно оценить из соотношений:

$$C_2 = \frac{3,5(1-\gamma)}{D_p \gamma^3}, \quad a = \frac{D_p^2 \gamma^3}{150(1-\gamma)^2} \quad (4.3)$$

где D_p - диаметр сферических частиц, м.

С учетом силы сопротивления (4.2) уравнение движения (фильтрации) запишется в виде:

$$\frac{\partial(\gamma\rho V)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\gamma(\rho V^2 + p)) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial V}{\partial x}\right) - \left(\frac{\mu}{a} + \frac{C_2 \cdot \rho}{2} |V|\right) \cdot V \quad (4.4)$$

где p - давление газа, Па.

В уравнении (4.4) имеются компоненты, учитывающие силы, возникающие за счет движения газа через частицы угольного скопления [91].

Самовозгорание насыпки угля произойдет в случае превышения тепловыделения над теплоотводом в окружающую среду. Поведение угольной насыпки в рассматриваемой нами ситуации может быть описано с помощью уравнения теплопроводности, включающего темп тепловыделения, скорость которого зависит от температуры по закону Аррениуса [64]:

$$(\gamma\rho_B c_B + (1-\gamma)\rho_V c_V) \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}((\rho_B c_B T + p) \cdot V) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x}\right) + u_0 \rho_V Q \cdot X_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4.5)$$

где T - температура, К; ρ_B, ρ_V - плотность воздуха и угольной частицы, соответственно, кг/м³; c_B, c_V - удельная теплоемкость воздуха и угля, соответственно, Дж/(кг·К); u_0 - удельная скорость сорбции кислорода углем, м³/(кг·с); λ_{eff} - эффективный коэффициент теплопроводности угольного скопления, Вт/(м·К); Q , -теплота сорбции кислорода углем, Дж/м³; X_0 - мольная доля кислорода; E -энергия активации, Дж/моль; R - универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Эффективный коэффициент теплопроводности и мольная доля кислорода вычисляются по следующим соотношениям [64].:

$$\lambda_{\text{eff}} = \gamma\lambda_B + (1-\gamma)\cdot\lambda_V \quad (4.6)$$

$$X_0 = \frac{Y_0/W_0}{Y_0/W_0 + Y_N/W_N} \quad (4.7)$$

где λ_B, λ_V - эффективный коэффициент теплопроводности воздуха и угольной частицы, соответственно, Вт/(м·К); Y_0, Y_N - массовая доля кислорода и азота, соответственно.

Аналогично запишем уравнение, описывающее изменение массовой доли кислорода в угольной насыпке с учетом реакции окисления, следующей закону Аррениуса:

$$\frac{\partial(\gamma\rho_B Y_0)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\gamma\rho_B Y_0 V) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \rho_B D \frac{\partial Y_0}{\partial x} \right) - \gamma\rho_B u_0 \rho_V \cdot X_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4.8)$$

где D - коэффициент диффузии кислорода, м²/с.

Таким образом, полная система уравнений, описывающих одномерное движение газа в угольной насыпке с учетом процесса ее самонагревания, запишется в виде [64].:

$$\frac{\partial(\gamma\rho)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\gamma\rho V) = 0 \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial(\gamma\rho V)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\gamma(\rho V^2 + p)) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial V}{\partial x} \right) - \left(\frac{\mu}{a} + \frac{C_2 \rho}{2} |V| \right) \cdot V \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial(\gamma\rho_B Y_0)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\gamma\rho_B Y_0 V) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma\rho_B D \frac{\partial Y_0}{\partial x} \right) - \gamma\rho_B u_0 \rho_V \cdot X_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4.11)$$

$$(\gamma\rho_B c_B + (1-\gamma)\rho_V c_V) \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}((\rho_B c_B T + p)V) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + u_0 \rho_V Q \cdot X_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4.12)$$

$$p = \rho \cdot RT \quad (4.13)$$

Известное уравнение состояния (4.13) является замыкающим. Система пяти уравнений (4.9)- (4.13) позволяет определить пять неизвестных величин ρ, V, Y_0, T, p .

Начальными условиями процесса являются:

$$\text{при } t=0 \text{ и } x>0: \quad \rho = \rho_B, \quad V=V_0, \quad Y_0 = Y_0, \quad T= T_0. \quad (4.14)$$

На левой границе:

$$\text{при } x = 0 \text{ и } t > 0: \quad \rho = \rho_B, \quad V=V_0, \quad Y_0 = Y_0, \quad T= T_0. \quad (4.15)$$

На правой границе:

$$\text{при } t > 0: \quad \left. \frac{\partial Y_0}{\partial x} \right|_{x=L} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = 0, \quad \left. \frac{\partial V}{\partial x} \right|_{x=L} = 0, \quad \left. \frac{\partial \rho}{\partial x} \right|_{x=L} = 0. \quad (4.16)$$

4.2. Моделирование влияния фракционного состава скопления угля на процесс его разогрева при продувке азотом с примесью кислорода

Оценка влияния содержания кислорода в рудничной атмосфере на процесс самовозгорания производилась практически всеми исследователями, работавшими над решением проблемы профилактики и тушения пожаров от самовозгорания угля [5, 7, 12, 13]. Как и при аналогичных исследованиях влияния размера фракции угля на сорбционную активность, в анализируемых работах отсутствуют противоречивые результаты. Отмечена прямолинейная зависимость скорости сорбции кислорода углем с ростом его концентрации. Однако при оценке естественного (изоляция) или искусственного способа (инертизация) снижения концентрации кислорода в районе формирования очага самонагревания выводы исследователей не однозначны [63].

В частности, в работе [13] негативно оценивается возможность способа газовой профилактики за счёт окислительной дезактивации угля при нагнетании в выработанное пространство инертных (топочных) газов с низким содержанием кислорода. На интенсивное протекание реакции

окисления угля в условиях высоких концентраций кислорода указывают также данные исследований В.М. Маевской, приведённые в работах [5, 26]. Однако при этом отмечается, что при низких температурах очага самонагревания, 30–40°C, термостабилизация возможна при концентрации кислорода в газовой смеси до 10%. При более высоких температурах, на стадии возгорания, его содержание не должно превышать 5% [63].

Кроме того, в работе [5] отмечается, что на интенсивность развития процесса самовозгорания угля при любой зафиксированной концентрации кислорода оказывает влияние скорость газовой струи. Её увеличение до оптимальных значений, по утверждению авторов, приводит к снижению скорости разогрева скопления угля за счёт конвективного выноса тепла. Оптимальные (неопасные) значения скоростей воздуха обозначены как менее 0,001 м/с и более 0,015 м/с. К малоопасным отнесены скорости 0,0010 – 0,0016 м/с. К опасным – от 0,0016 – 0,0150 м/с [63].

Влияние управляемых факторов: концентрации кислорода и скорости газовой смеси на температуру стабилизации очага самонагревания, исследованы в работе [7] В.Г. Игишевым [63].

Для всех выше обозначенных работ характерно различие методик исследований, позволяющих производить лишь качественную оценку исследуемых факторов. Этим и вызвана необходимость оценки фракционного состава скопления угля на процесс его разогрева путём математического моделирования. При этом исследования ограничены двумя фракциями: (-3,0 +1,0) мм и (-1,0 +0,0) мм. Первая из них характеризует фракцию, используемую при оценке константы сорбции кислорода углем [92]. Вторая фракция с верхним пределом 1,0 мм, согласно терминологическому словарю [58], ограничивает верхний размер угольной пыли [63].

Более поздние исследования, выполненные при сравнительной оценке химической активности угля фракции (-5 +1) мм и пыли фракции (-1 +0,2) мм подтвердили активирующий эффект его измельчения до пылевидных

фракций . Испытания проведены по методике, изложенной в работе [92], при температуре 23 °С, атмосферном давлении 753 мм. рт. ст., влажности воздуха – 50%. Марка угля Д, пласт 7, ООО «Разрез «Пермяковский» [63].

Результаты эксперимента приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Изменение удельной скорости сорбции углем в зависимости от размера частиц [63]

№	Размер фракции, мм	Удельная скорость сорбции кислорода, см ³ /(г·ч)
	3 – 5	0,2066
	1 – 3	0,2981
	0,2 – 1	0,9291

Экспериментальные данные, приведенные в табл. 4.1, свидетельствуют о том, что химическая активность угольной пыли в первые 24 часа её окисления в 4,4 раза превышает таковую для угля фракции (3 -5) мм. Поэтому справедливы предположения о том, что такое различие влияет на длительность инкубационного периода и на температуру стабилизации процесса самонагревания и возгорания скопления при использовании азота с примесью кислорода для целей профилактики и тушения эндогенных пожаров [63].

Для подтверждения обозначенных предположений система уравнений (3.9-3.16) решалась численным методом [93, 94, 95, 96] с использованием стандартного пакета FLUENT. В качестве исходных данных были приняты следующие параметры газового потока и скопления [63].

Примесь концентрации кислорода в азоте на входе в скопление изменялась в пределах от 1 % до 21 % (1%, 3%, 5%, 10%, 15%,21%). Скорость фильтрации газа в скоплении равнялась 0,001 м/с и 0,002 м/с.

Частицы угля и пыли приняты сферической формы со средним диаметром соответственно 0,002 и 0,0003 м. Удельные скорости сорбции кислорода углем и пылью принимались равными $1,96 \cdot 10^{-7}$ и $4,9 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с})$. Теплота сорбции кислорода углем равнялась $12,5 \text{ МДж/м}^3$ [63].

Начальная температура угля и пыли равнялась 285 К. Энергия активации 30000 Дж/моль. Объёмная доля пустот принята 0,476 и 0,259 с учётом предельных значений теоретической пористости согласно Л.С. Лейбензону [97]. Плотность угля и пыли в расчетах принимались равной 800 кг/м^3 . Коэффициент теплопроводности насыпки угля и угольной пыли равнялась $0,07 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Удельная теплоёмкость угля и угольной пыли равна $1,05 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ [63].

Результаты решения для скопления угольной пыли размером 0,1 м, имеющего средние размеры частиц 0,0003 м, приведены на рис 4,2. [98] Скорость фильтрации газа через скопление равна 0,001 м/с, примесь кислорода в газе равна 1 %. Шаг по времени при расчете принят равным 60 мин. Температура газовой смеси и угольного скопления в начальный момент равна 285 К. Скорость нагревания скопления пыли при обозначенных параметрах рассчитывалась в интервале времени до 64000 мин (41,7 суток) [63].

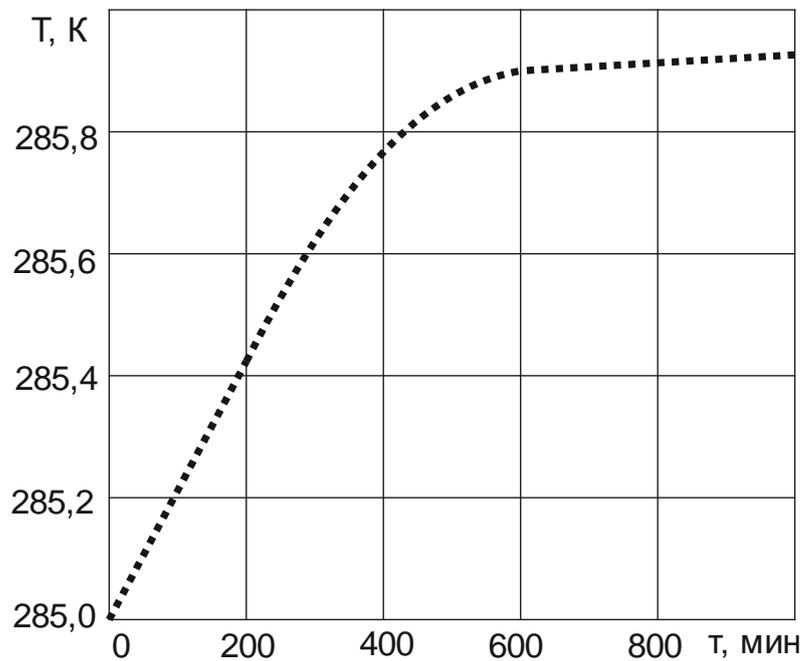


Рисунок 4.2 – Динамика разогрева скопления угольной пыли при скорости фильтрации газа 0,001 м/с с примесью кислорода 1 %

По результатам решения системы уравнений очевидно, что в течение 41,7 суток скопление пыли нагрелось только на 0,9 градуса. Причем наибольший рост температуры происходил за первые 600 минут. Затем наступило тепловое равновесие с окружающей средой и температура стабилизировалась

За то же время при концентрации кислорода 3 % температура стабилизировалась на уровне 287,9 К. При повышении концентрации кислорода до 5, 10, 15 и 21 % максимально достигнутая температура угольной пыли продолжала повышаться (рис. 4.3) [63].

Изменение скорости разогрева угля в зависимости от концентрации кислорода в фильтрующемся газе (скорость газа 0,01 м/с) приведено на рис. 4.4. Из результатов решения уравнений следует, что с увеличением концентрации кислорода в газе скорость разогрева угольного скопления возрастает.

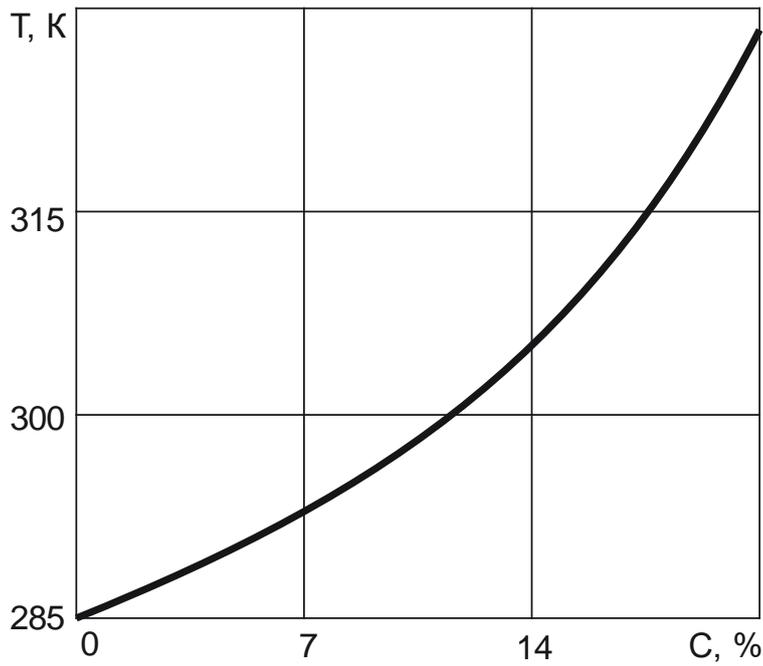


Рисунок 4.3 – Влияние концентрации кислорода на максимально достигаемую температуру угольной пыли.

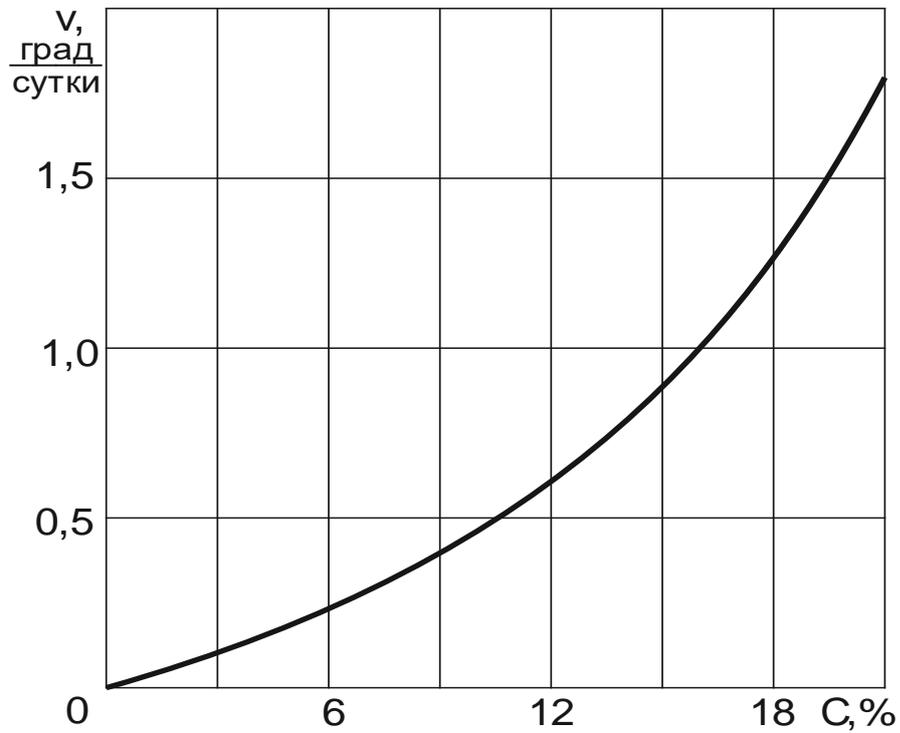


Рисунок 4.4 – Изменение скорости разогрева угольной пыли в зависимости от концентрации кислорода в газе при скорости фильтрации 0,001 м/с

В таблице 4.2 приведены результаты расчёта для пылевого скопления с одним изменённым параметром. Скорость фильтрации газа увеличена в 2 раза – до 0,002 м/с.

Таблица 4.2 – Изменение скорости разогрева угольной пыли в зависимости от концентрации кислорода в газе при скорости фильтрации 0,002 м/с

№	Концентрации кислорода в газе, %	Изменение скорости разогрева угольной пыли, град/сутки
1	1	0,01
2	3	0,05
3	5	0,09
4	10	0,20
5	15	0,33
6	21	0,51

Сравнение полученных результатов показало, что увеличение скорости газа с 0,001 м/с до 0,002 м/с замедляет разогрев скопления угольной пыли из-за увеличения выноса генерируемого тепла потоком газа. По данным математического моделирования получены также зависимости скорости нагревания скопления угля фракции 0,002 м от концентрации примеси кислорода при скорости фильтрации газа 0,001 м/с и 0,002 м/с. Результаты приведены на рис. 4.5.

Из представленных результатов видно, что скорость разогрева угольной пыли намного больше, чем у скопления угля. Однако качественно результаты идентичны таковым для пыли фракции 0,0003 м и наблюдается замедление разогрева скопления угля с ростом скорости фильтрующегося газа.

Из полученных результаты можно сделать вывод, что предотвратить развитие процесса самовозгорания можно не только снижением

концентрации кислорода, но и увеличением скорости фильтрации газа через угольное скопление.

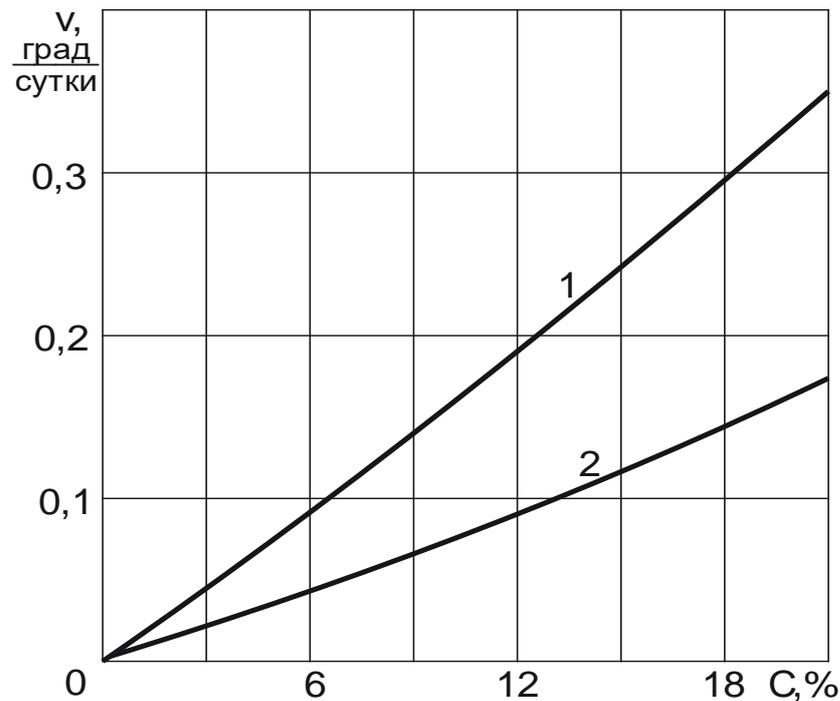


Рисунок 4.5 – Изменение скорости разогрева угля в зависимости от концентрации кислорода в газе:

1 – скорость газа 0,001 м/с; 2 – скорость газа 0,002 м/с

Для угля, как и для пыли, скорости нагревания сравнивались в интервале времени 600-34200 мин (23,3 суток). При этом установлено, что с ростом концентрации примеси кислорода с 1,0 % до 21,0 % они увеличиваются в 50 - 60 раз. Однако это возрастание для пыли фракции 0,0003 м идёт со скоростью в 3 - 5 раз быстрее, чем у угля фракции 0,002 м [63].

Одновременно для обеих фракций на верхнем пределе концентрации кислорода зафиксировано уменьшение скорости нагревания скоплений при увеличении скорости фильтрации газа с 0,001 м/с до 0,002 м/с. Для пыли скорость нагрева снизилась с 1,80 до 0,51 градуса в сутки (в 3,5 раза). Для угля - с 0,360 до 0,171 градуса в сутки (в 2,1 раза) [63].

Анализ представленных результатов свидетельствует о том, что при выше обозначенных параметрах моделирования при скорости фильтрации

газа 0,001 м/с и концентрации $O_2=10$ % температура самонагрева скопления пыли через 30,8 суток стабилизируется на уровне 297 К. При скорости 0,002 м/с температура стабилизации снижается до 289 К уже через 7 суток. При концентрации кислорода 21 % температура 327,55 К достигается при скорости фильтрации газа 0,001 м/с через 23,3 суток. Нарастание температуры идёт практически равномерно со скоростью 1,8 градуса в сутки. При такой скорости обозначенная в [60] критическая температура самонагрева скопления пыли 353 К ($80^{\circ}C$) будет достигнута через 44,4 суток [63].

Увеличение скорости фильтрации газа в 2 раза, до 0,002 м/с, позволяет стабилизировать температуру скопления пыли через 10 суток на уровне 296 К ($23^{\circ}C$). Для угольного скопления фракции 0,002 м при наличии примеси кислорода 15 % температура через 25 суток стабилизировалась на уровне 290 К. С увеличением скорости фильтрации газа до 0,002 за те же 25 суток температура превысила начальную на 2,83 градуса. Фильтрация газа с примесью кислорода 21 % при скорости 0,001 м/с привела к росту температуры до 290,84 К. При скорости 0,002 м/с – до 289,11 К [63].

Приведённые в настоящем разделе данные позволяют, с учётом принятых допущений при математическом моделировании, сделать следующую качественную оценку влияния фракции угля и пыли, скорости фильтрации инертного газа и примеси в нём концентрации кислорода на скорость самонагрева скопления и стабилизацию его температуры:

- угольная пыль с размером частиц до тысячи микрон обладает высокой химической активностью и является катализатором самовозгорания как однородных скоплений, так и скоплений с различным фракционным составом [63];

- эффективность инертизации мест формирования пылевидных скоплений азотом с повышением скорости фильтрации может быть достигнута при концентрации примеси кислорода до 10 % [63];

- температура стабилизации очага самонагрева в исследованном примере при возрастании скорости фильтрации с 0,001 до 0,002 м/с снизилась с 297 до 289 К [63].

Скорость фильтрации азота, концентрация примеси кислорода в нём, и фракционный состав скопления комплексно влияют на процесс его самонагрева. Фракционный состав скопления угля в выработанном пространстве относится к разряду неуправляемых. Поэтому из перечисленных факторов стабилизацию температуры ниже критической можно обеспечить за счёт повышения скорости фильтрации инертного газа и снижения примеси в нём кислорода. Однако количественные значения последних являются оптимальными только для конкретных скоплений. При концентрации примеси кислорода 21 % имел место рост температуры пыли при скорости 0,001 м/с, которую по рекомендациям [5, 26] принято считать неопасной.

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение скорости фильтрации газа в заданных пределах существенно замедляет темпы роста температуры в скоплениях угля и угольной пыли за счет выноса генерируемого тепла конвективным потоком газа. Большая сорбционная активность угольной пыли приводит к разогреву скопления до критической температуры 80 °С через 45 суток. При концентрации кислорода 10-15% процесс самонагрева существенно замедляется, температура в скоплении стабилизируется, и достичь критической температуры не удастся [64].

В процессе моделирования также исследовалось влияние обработки угля увлажненным азотом на процесс самовозгорания. Через скопление угля фильтровался воздух с концентрацией кислорода 21%. Константа скорости сорбции кислорода не окисленным углем после обработки сухим азотом равнялась $0,0621 \text{ см}^3/(\text{г}\cdot\text{ч})$, а после подачи насыщенного влагой азота составила $0,0426 \text{ см}^3/(\text{г}\cdot\text{ч})$. Расчет показал, что после подачи увлажненного азота и восстановления поступления свежего воздуха скорость повышения температуры угольным скоплением снизилась в 1,5 раза. В реальных

условиях следует ожидать большего эффекта замедления процесса самовозгорания из-за потерь выделяемого тепла на испарение жидкости, вносимой увлажненным азотом [64].

4.3. Исследование динамики охлаждения очага самовозгорания угля при его продувке азотом с примесью кислорода

Задача решалась на модели, описанной уравнениями (4.9) - (4.16). Модель, состоящая из угля, имела частицы, равные 0,002 м. Частицы угольной пыли равнялись 0.0003 м. Частицы приняты сферической формы. Начальными условиями установлена температуры очага самовозгорания, равная 383 К. Длин прогретой зоны равна 0,1 м. Затем начиналась подача в очаг самовозгорания инертного газа с добавкой кислорода. Скорость газа изменялась в пределах от $1,67 \cdot 10^{-4}$ до $41,7 \cdot 10^{-4}$ м/с. Концентрация примеси кислорода в азоте составляла 1,0; 2,0; 3,0; 5,0 и 10 %. Результаты расчёта изменения температуры скопления угля с очагом самовозгорания под действие подачи азота со скоростью $16,7 \cdot 10^{-4}$ м/с приведены на рис. 4.6. Концентрация кислорода в азоте равнялась 10 %.

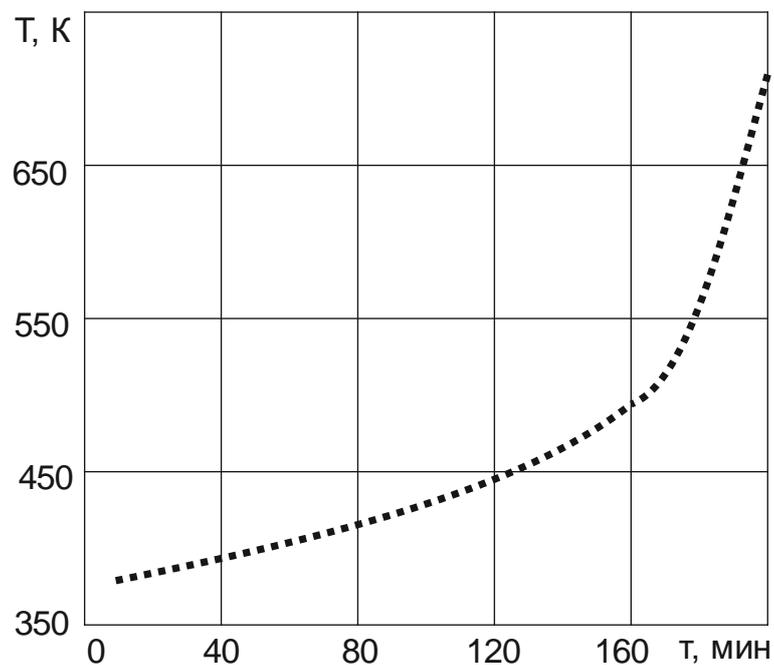


Рисунок 4.6 – Изменение температуры скопления угля при подаче азота с содержанием кислорода 10 % и скорости $16,7 \cdot 10^{-4}$ м/с

Анализ полученных данных показывает, что подача азота с таким содержанием кислорода и скоростью не способна охладить очаг самовозгорания. Температура угля продолжает увеличиваться. Моделирование подачи азота с теми же параметрами в очаг самовозгорания угольной пыли приведено на рис. 4.7.

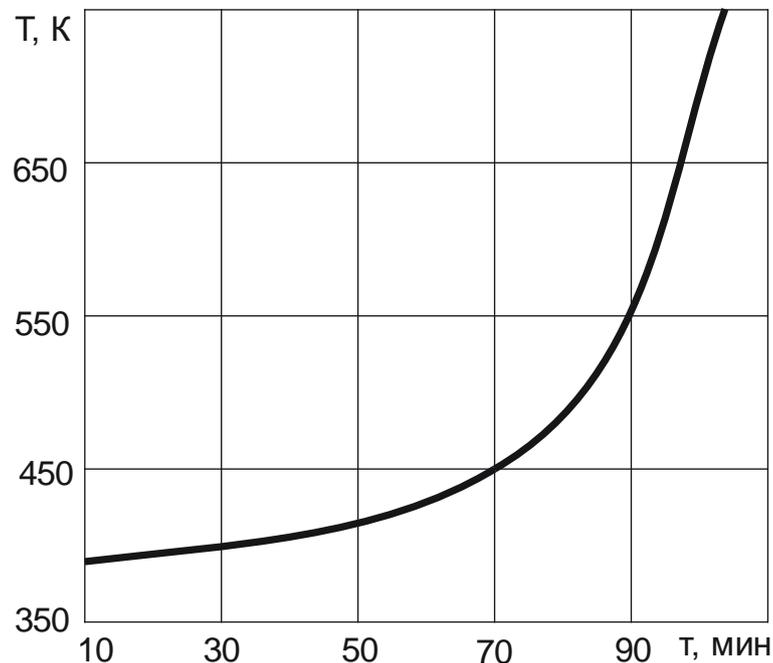


Рисунок 4.7 – Изменение температуры скопления угольной пыли при поступлении азота с примесью кислорода 10 % и скорости $16,7 \cdot 10^{-4}$ м/с

Из представленных на рис. 4.7 данных видно, угольная пыль при подаче азота с концентрацией кислорода 10 % и скоростью $16,7 \cdot 10^{-4}$ м/с также продолжает разогреваться. Причем интенсивность нагрева у угольной пыли больше, чем у угля.

На следующем этапе моделировалась подача в очаг самовозгорания угля азота с концентрацией кислорода 3,0 %. Скорость подачи азота была увеличена до $41,7 \cdot 10^{-4}$ м/с. Влияние азота с такими параметрами на изменение температуры скопления угля приведено на рис. 4.8.

Из проведенных расчетов следует, что в начале, в течение 150 часов, температура угля незначительно повышается. Затем начинается быстрое охлаждение скопления угля в течение около 100 минут. Общее время

охлаждения скопления угля с очагом самовозгорания составило около 300 минут.

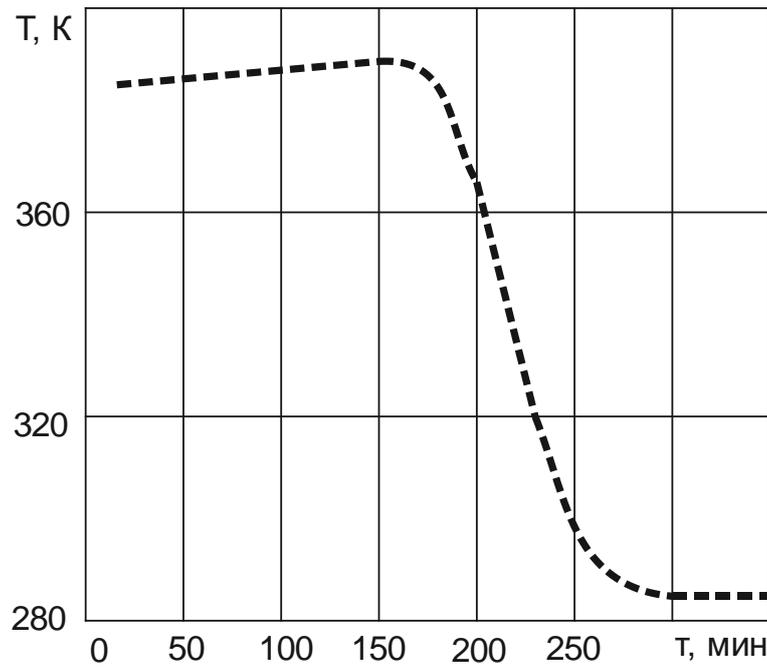


Рисунок 4.8 – Изменение температуры скопления угля при подаче азота с содержанием кислорода 3 % и скорости $41,7 \cdot 10^{-4}$ м/с

Воздействие азота с добавкой 3,0 % кислорода и той же скоростью фильтрации на скопление угольной пыли с очагом самовозгорания приведено на рис. 4.9.

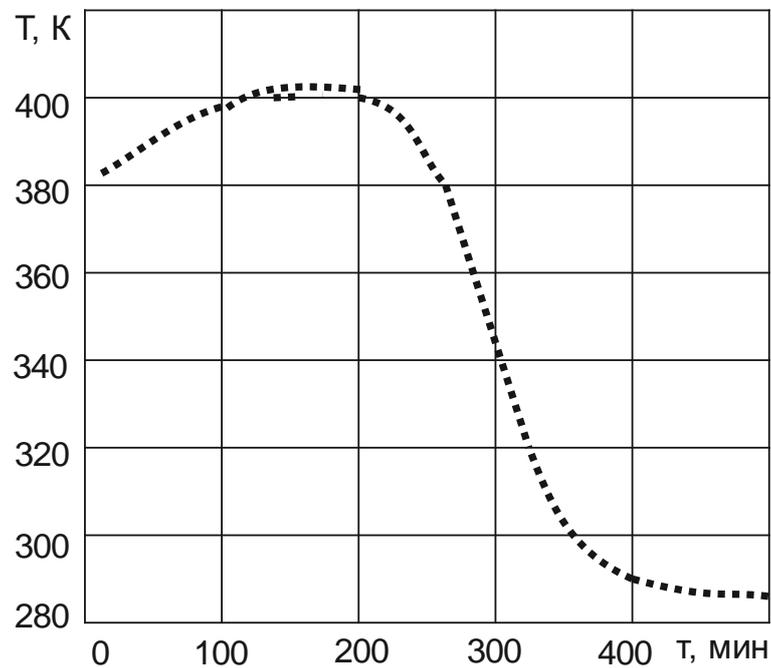


Рисунок 4.9 – Изменение температуры скопления угольной пыли при подаче азота с содержанием кислорода 3 % и скорости $41,7 \cdot 10^{-4}$ м/с

Сравнение результатов, представленных на рис 4.8 и 4.9, показывает, что очаг самовозгорания, возникший в угольной пыли, охладить сложнее, чем в скоплении угля. Моделирование показало, что скопление угольной продолжает нагреваться еще в течение 200 минут, а ее температура превысила 400 К. Затем начинается снижение температуры скопления, которое продолжается около 200 минут, что в два раза больше, чем у скопления угля.

Полученные данные свидетельствуют о том, что при скоростях фильтрации газа $1,67 \cdot 10^{-4}$ - $16,7 \cdot 10^{-4}$ м/с и концентрации примеси кислорода 1% и 2% для угольной пыли и угля с размерами частиц соответственно 0,0003 м и 0,002 м фиксируется рост температуры очага самовозгорания. При этом скорость разогрева пылевого скопления в 1,5 раза выше, чем угля. Эти результаты делают понятным требования к чистоте инертного газа, которые имеют место при транспортировке пожароопасных грузов на морских судах. Они дифференцированы от свойств груза: для сырой нефти содержание кислорода в инертном газе не должно превышать 5 %, а для сжиженных газов и некоторых химических веществ – 0,5 %.

Исследования, выполненные с использованием математической модели (4.9) - (4.16), показывают, что при инертизации скоплений угля и угольной пыли, имеющих температуру 13 °С, подачей азота с содержанием кислорода до 10 % приводит к стабилизации температуры на уровне 16–24 °С.

При использовании подобной смеси для скоплений угля и угольной пыли с начальной температурой 383 К (рис. 4.6, 4.7) при скорости фильтрации $16,7 \cdot 10^{-4}$ м/с охлаждения не происходит. Имеет место разогрев скоплений до температуры 675 – 725 К.

Понижение концентрации примеси кислорода до одного-двух процентов также не исключает роста температуры скоплений, если скорость

фильтрации инертного газа не превышает $2,78 \cdot 10^{-4}$ м/с. Увеличение скорости до $41,7 \cdot 10^{-4}$ м/с позволяет охладить очаги самонагреваний при примеси кислорода 3 % до температуры 298 К (25⁰С) за 10,5 и 14,5 суток соответственно для скоплений угля и пыли. Скорость остывания, как и скорость нагревания, зависят от фракционного состава. Скопление угольной пыли при принятых параметрах моделирования остывает в 1,4 раза медленнее, чем угольное.

Данные, приведённые на рис. 4.6 – 4.9, подтверждают сделанный в разделе 4.2 вывод о необходимости управления температурой скоплений угля и пыли при их инертизации азотом как снижением концентрации примеси кислорода, так и увеличением скорости фильтрации газовой смеси.

При этом очевидно невозможность использовать в качестве критерия эффективности, как способа изоляции, так и способа тушения эндогенных пожаров концентрацию кислорода в изолированном участке на уровне 3 %. Поддержание концентрации кислорода в рудничной атмосфере на пожарном участке при этом значении, без дополнительного отвода тепла за счёт увеличения подачи инертного газа, обеспечивает лишь сохранение температуры очага самовозгорания на уровне достигнутой в момент изоляции аварийного участка. Увеличение темпа подачи азота в изолированный участок, как это видно на графиках рис. 4.8 – 4.9, приводит к остыванию очага при концентрации примеси кислорода около 3 %.

4.4 Анализ результатов исследований

Исследуемая в настоящей работе система «уголь-(азот+примесь кислорода)» является гетерогенной. Для подобных систем характерно стремление к термодинамическому равновесию. Поэтому задача управления этим процессом сводится к объяснению механизма и установлению параметров факторов, обеспечивающих равновесное состояние со стабилизацией температуры в очаге ниже температуры его возгорания. В

частности в работе [32] математическое моделирование позволило получить уравнение регрессии, описывающее влияние влажности угля, его химической активности, скорости фильтрации воздуха и концентрации в нём кислорода на температуру стабилизации зоны reagирования гетерогенной системы.

Основной вывод по работе сводится к тому, что комплекс профилактических мер, реализуемых в пожароопасных выемочных полях, в качестве приоритетной должен включать снижение концентрации кислорода в газе, фильтрующемся через скопление разрыхленного угля.

Для управления процессом стабилизации температуры в уже сформировавшемся очаге самовозгорания угля, на практике рекомендуется воздействовать не только на концентрацию примеси кислорода в азоте, но и на скорость фильтрации инертного газа в выработанном пространстве. При этом для принятых в работе исходных данных математического моделирования и лабораторных исследований можно сделать следующие выводы:

- при содержании кислорода в азоте менее 9,7 % происходит диффузионное окисление угля с низкими температурами стабилизации;

- при концентрации кислорода менее 3 % самовозгорание угольного скопления практически не происходит даже при газа со скоростью около $1,6 \cdot 10^{-4}$ м/с;

- продувка сформировавшегося очага ($T=383$ К) приводит к прекращению роста температуры и охлаждению скопления при концентрации примеси кислорода 3 % в условиях увеличения фильтрации газа до 41,7 м/с [101].

Ранее выполненные исследования [7, 13] использовали фракции угля 1-3 мм, при оценке его сорбционной активности. В рамках настоящей работы параллельно проведены исследования со скоплениями, имеющими средний диаметр фракции 0,002 м и 0,0003 м. Сравнение полученных результатов позволяет утверждать, что стабилизация температуры очага самовозгорания может иметь место при примеси кислорода в инертном газе до 10-15 %.

Превышение над рекомендуемым нормативом 3 % достигает 7- 12%, что значительно расширяет возможности использования газоразделительных установок для объектной инертизации скоплений угля в выработанном пространстве. Кроме отмеченного, сравнение результатов окисления угля указывает на сокращение инкубационного периода самонагрева его скоплений в случае их формирования с примесью угольной пыли. Такой процесс может иметь место на пути движения метановоздушной смеси в выработанном пространстве при реализации комбинированных и прямоочных схем проветривания.

По результатам исследований очевидна значимая роль скорости фильтрации смеси инертного газа с кислородом на скорость самонагрева скоплений угля и пыли и возможность стабилизации их температуры ниже температуры возгорания. Однако полученные данные не позволяют, как это сделано в работе [5], однозначно нормировать нижний и верхний предел безопасных скоростей фильтрации газовой смеси. В частности, при моделировании процесса самонагрева угольной пыли при фильтрации воздуха со скоростью 0,001 м/с, критическая температура самовозгорания достигнута через 44,4 суток. В работе [26] эта скорость обозначена как предельная для категории «неопасных».

Исследования, выполненные в разделе 4.3 настоящей диссертации, подтвердили ранее известное по результатам работы [32] положение о необходимости резкого, до 1,0 %, ограничения примеси кислорода в азоте при его использовании для охлаждения уже сформировавшегося очага самовозгорания. Одновременно подтверждена возможность управления этим процессом за счёт увеличения скорости фильтрации газа. Так в работе [7] показано, что увеличение скорости фильтрации газа с $1,67 \cdot 10^{-4}$ м/с до $16,7 \cdot 10^{-4}$ м/с позволяет охлаждать очаги при примеси кислорода в азоте до 5,0 % [64].

Но, как показали результаты моделирования, этот вывод справедлив только для скоплений, сформированных из угля фракции (-3,0 +1,0) мм. В

скоплении угольной пыли со средним размером частиц 0,3 мм при его продувке газом с подобными параметрами наблюдается рост температуры.

По данным, приведённым на графиках при продувке скоплений с очагами самовозгорания инертным газом с примесью кислорода 3,0 %, очевидно влияние фракции угля на скорость их остывания. Скопление угольной пыли остывает в 1,4 раза медленнее, чем угольное.

Навеска со средним размером фракции 0,3 мм (0,0003 м) массой 60 г, использованная в разделе 4.4 при оценке влияния содержания примеси кислорода в азоте на уровне 20,9 %, 15,7 %, 10,0 % и 3,1 %, представляет собой реально возможное скопление угольной пыли. Поэтому представляет научный и практический интерес сравнение данных о стабилизации температуры при его продувке со скоростями, имевшими место при исследовании процесса в лабораторных условиях и на математической модели.

При диаметре реторты 5 (рис. 3.1), равном 40 мм, скорость фильтрации газа при его расходе 0,5 л/мин составляет $66,3 \cdot 10^{-4}$ м/с. В таблице 3.7 приведены данные, согласно которым при концентрации примеси в азоте 3,1 % при такой скорости фильтрации пыль не загорается. Температура её навески стабилизируется на уровне 158 °С, что превышает температуру подогрева реторты на 10 градусов. Это значит, что в реальных условиях шахт продувка нагретых до 110°С скоплений пыли и угля с такой скоростью, для $V_{\phi} = 41,7 \cdot 10^{-4}$ м/с, обеспечит их охлаждение.

Применяемые в Кузбассе воздухоразделительные установки типа МВа-1 имеют производительность 1250 м³/час при концентрации примеси кислорода 3,0. Если принять исследованные на математической и лабораторной модели скорости фильтрации газа $(41,7-66,3) \cdot 10^{-4}$ м/с за оптимальные, то объектная инертизация эффективна как для целей профилактики, так и для охлаждения уже возникших очагов при площади фильтрации по обрушенным породам и скоплениям угля 52,3-83,2 м². Подобные условия имеют место при реализации комбинированных схем

проветривания на уровне примыкания обрушенных пород к зонам отжима межластных целиков.

5. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ПРОФИЛАКТИКИ И ПОДАВЛЕНИЯ ОЧАГОВ САМОВОЗГОРАНИЯ В ВЫРАБОТАННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

5.1. Установки для получения азота

Применение высокопроизводительной угледобывающей техники приводит к увеличению размеров обрабатываемых угольных столбов, что способствует росту объемов выработанного пространства. Для инертизации атмосферы выработанного пространства необходимо подавать азот с производительностью, необходимой для снижения концентрации кислорода до необходимых значений. Соответственно возрастают требования к содержанию кислорода в подаваемом азоте.

Азот не имеет запаха и вкуса. Из-за неполярности молекулы азот практически не растворим в воде. Азот может взаимодействовать с металлами. По отношению к кислороду азот инертен. Реакции взаимодействия между азотом и кислородом происходят при температуре более 2000 °С, поэтому при пожарах азот является инертным газом.

Существуют несколько способов получения азота. Так азот можно получить в результате химических реакций. Например, азот образуется при взаимодействии насыщенных растворов хлорида аммония и нитрита натрия по следующей реакции:



При горении аммиака также можно получить азот:



Разложением азидов щелочных металлов можно получать наиболее чистый азот. Так, разложение азида натрия происходит по следующей реакции:



Для получения азота можно использовать восстановление оксида меди (II) аммиаком при температуре около 700 °С:



За счет взаимодействия различных веществ можно получить азот без примеси кислорода. Однако объемы азота, получаемого с помощью химических реакций незначительны, поэтому не используются на производстве.

Значительные объемы азота можно получать с помощью криогенного разложения воздуха, методом адсорбции и с помощью мембранных установок.

Криогенный способ получения азота предложен более ста лет назад и осуществляется путем постепенного охлаждения воздуха до жидкого состояния. Перед охлаждением атмосферный воздух очищают от механических примесей и удаляют пары воды и углекислый газ (рис.5.1) [98]. Затем смесь газов сжимают компрессором, а в холодильной установке температура воздуха постепенно снижается до перехода смеси газов, составляющих атмосферный воздух, в жидкое состояние. Разделение воздуха на составляющие газы происходит в ректификационной установке за счет различной температуры кипения газов. Так, температура кипения азота составляет -195,8°С, а кислорода -183°С. Данный способ разделения воздуха позволяет также получать инертный газ аргон.

К недостаткам криогенного метода относят необходимость дорогостоящего оборудования, большую площадь необходимых помещений для размещения оборудования, высокую стоимость получаемого жидкого газа. Поэтому данный метод экономически оправдан для получения больших объемов кислорода и азота. Обычно, криогенные установки используются крупными предприятиями химической и металлургической

промышленности. На химических предприятиях используют азот для получения аммиака NH_3 или других удобрений. На металлургических предприятиях криогенным методом получают кислород для выплавки металлов, а азот является побочным продуктом.

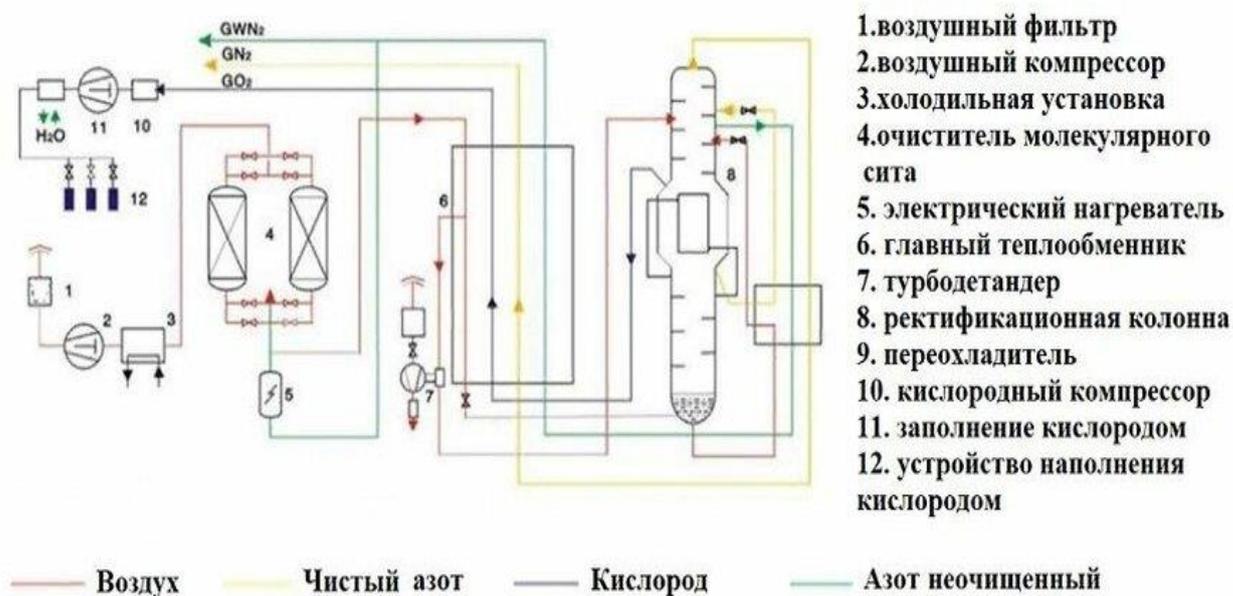


Рисунок 5.1 – Схема получения азота криогенным способом

К преимуществам криогенного метода разделения воздуха можно отнести возможность получения азота высокой чистоты. Для такого оборудования характерна высокая производительность и возможность получения больших объемов газа.

Для перевозки жидкого азота к шахте можно использовать криогенные цистерны, установленные на железнодорожных платформах или автомобильных шасси. Давление газа внутри криогенных цистерн поддерживается равным атмосферному давлению. Недостатком такой перевозки является постоянное испарение и потеря азота в атмосферу во время транспортировки и хранения.

Характеристики криогенных емкостей, используемых для хранения и транспортировки жидкого азота, приведены в табл. 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1 – Характеристика криогенных емкостей типа ТРЖК

Модель	ТРЖК-2У	ТРЖК-3М	ТРЖК-7У	ТРЖК-8М	ТРЖК-5М
Вместимость, м ³	1,15	8,0	1,83	2,75	5,6
Масса азота, кг	900	6100	1430	2100	4200
Максимальное давление, Мпа	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Потери при хранении, кг/ч	0,62	1,75	0,73	0,60	1,50

Таблица 5.2 – Характеристика криогенных емкостей типа ЦТК

Модель	Объем, м ³	Масса азота, кг	Масса емкости, кг
ЦТК-0,5/0,25	0,5	380	250
ЦТК-1/0,25	1,0	900	930
ЦТК-1,6/0,25	1,6	1430	850
ЦТК-2/0,25	2,0	1800	3050
ЦТК-2,5/0,25	2,5	2100	1800
ЦТК-5/0,25	5,0	3847	2500
ЦТК-8/0,25	8,0	6156	3050
ЦТК-10/0,25	10,0	7695	6050

Емкости криогенные с жидким азотом устанавливают у места подачи в шахту, например, у скважины, пробуренной в выработанное пространство. Для получения газа используют газификаторы холодные криогенные (ГХК), позволяющие испарять жидкий азот за счет теплообмена с окружающей атмосферой.

Адсорбционный метод разделения воздуха на составляющие его газы основан на различиях размерах молекул составных частей воздуха. В состав

адсорбционной установка для получения азота входят емкости, заполненные адсорбентом, являющимся молекулярными ситами (рис. 5.2) [98].

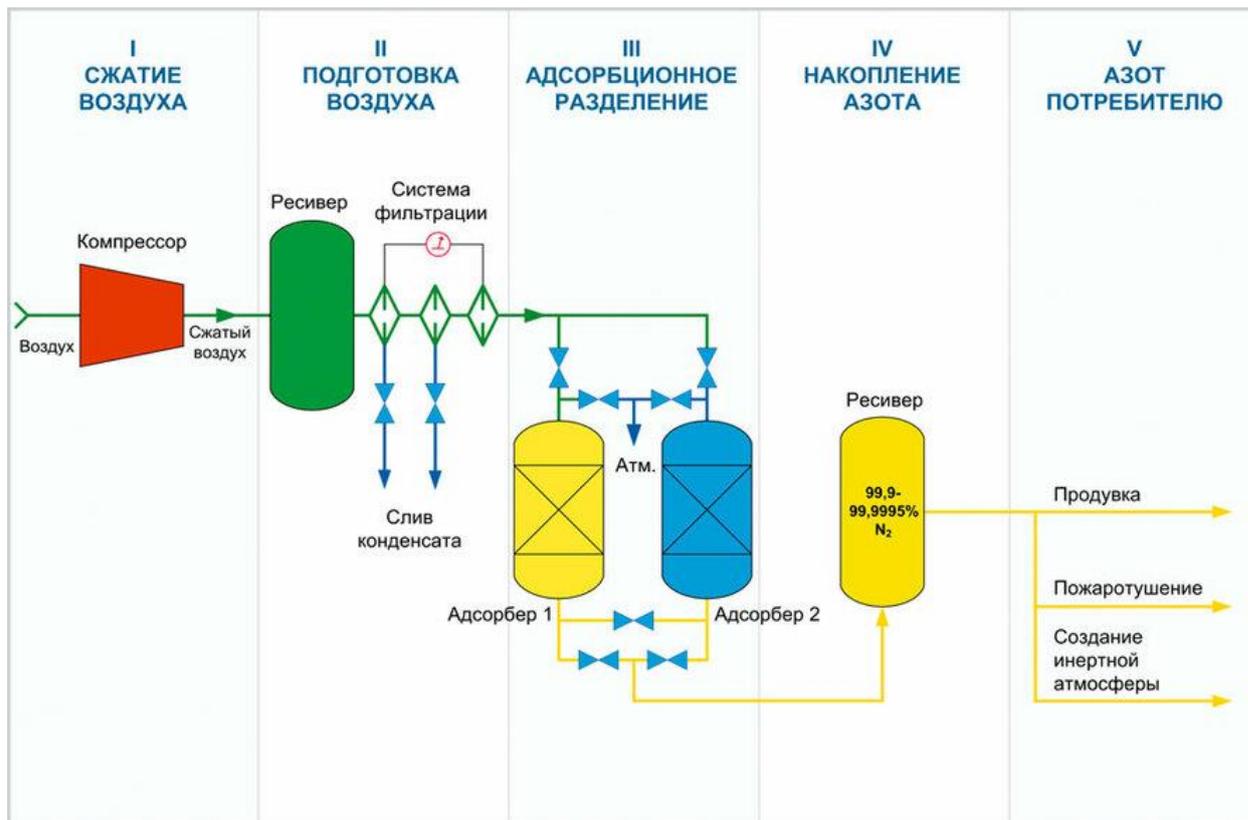


Рисунок 5.2 – Схема получения азота адсорбционным способом

Адсорбент представляет собой углеродистые пористые зерна, имеющие размер до 3 мм. Входной размер пор в адсорбере составляет около 3 ангстрем. В эти поры могут проникать только молекулы кислорода, имеющие диаметр 2,9 А, где и задерживаются. Молекулы азота имеют больший диаметр (около 3,1 А), поэтому они не проникают в поры, а проходят через слой адсорбера.

Адсорбер имеет ограниченную емкость пор, поэтому периодически возникает необходимость регенерации адсорбента путем удаления скопившихся молекул кислорода. Регенерацию адсорбера осуществляют путем быстрого сброса давления газа, что приводит к выходу молекул кислорода из пор. Для увеличения производительности и непрерывности получения азота имеется несколько емкостей с адсорбером, периодически меняющих режимы работ с рабочего на регенерацию адсорбента.

Недостатком адсорбционных установок получения азота является невысокая производительность, сложность получения газа высокой степени очистки. Оборудование также довольно громоздко и занимает большие площади.

Мембранные установки для разделения воздуха состоят из модулей, обычно имеющих цилиндрическую форму. Внутри этих модулей параллельно размещено множество полых волокон, в которые подается воздух. Волокна выполнены из таких полимерных материалов, как полиимид, полисульфон, полифенилоксид. Предварительно очищенный и сжатый воздух подается в мембранный модуль, где равномерно распределяется по всем отдельным волокнам, поступая в их внутренний объем (рис. 5.3).

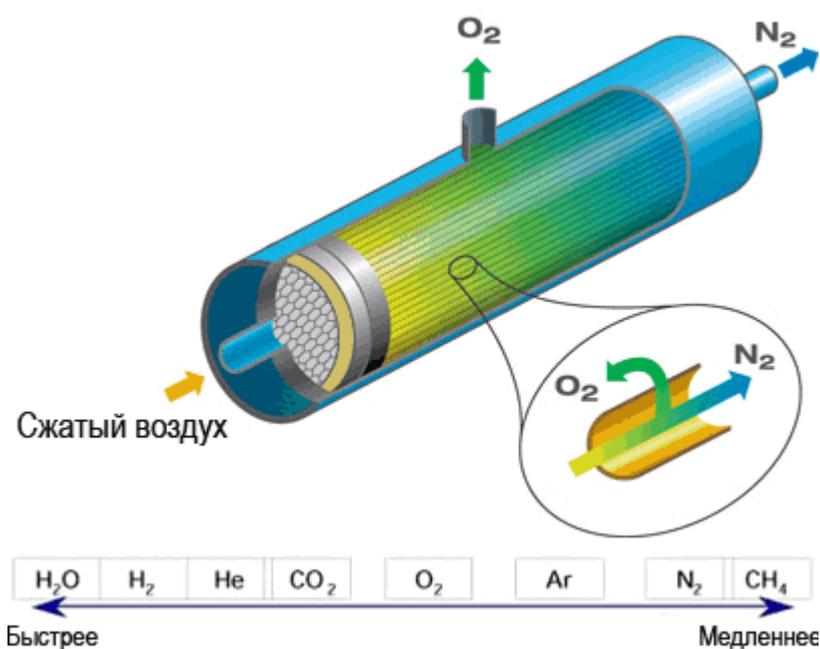


Рисунок 5.3 – Схема получения азота мембранным способом

Через поры в стенках волокон быстрее и легче всего диффундируют молекулы газов, имеющих минимальный размер (воды H_2O , водорода H_2 и гелия He). Со средней скоростью через поры стенок волокон проходят молекулы кислорода, а также углекислого газа CO_2 . Внутри волокон мембран остаются молекулы азота, а также аргона. Установка мембранного разделения воздуха (рис. 5.4) состоит из компрессора для сжатия воздуха,

адсорбера, фильтров для очистки воздуха, нагревателя и мембранных модулей.

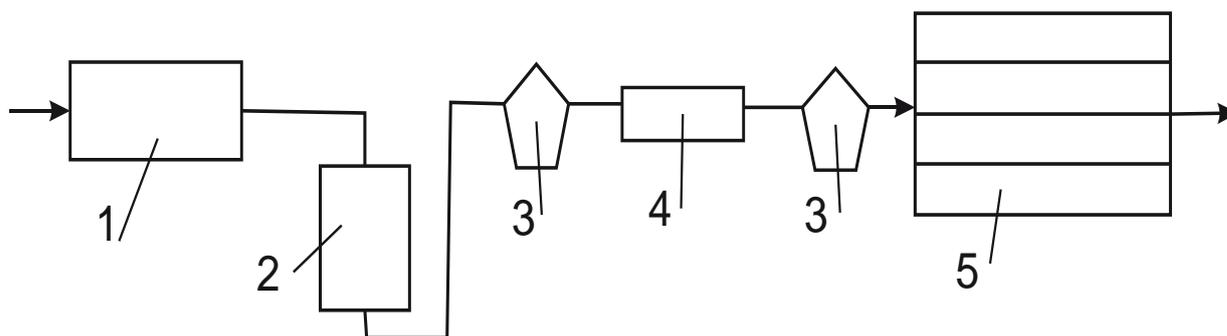


Рисунок 5.4 – Схема мембранной установки для получения азота:
1 – компрессор; 2 – адсорбер; 3 – фильтры; 4 – нагреватель;
5 – мембранный модуль

Недостатком мембранных установок разделения воздуха является высокая чувствительность к загрязнению воздуха, особенно попаданию компрессорного масла. Существуют ограничения по чистоте получаемого азота.

К преимуществам мембранной разделительной установки относится небольшой размер, простота конструкции и работы, высокая производительность по азоту.

Производительность мембранных разделительных установок по азоту зависят от количества примесей кислорода к получаемому газу [99, 100, 101]. С повышением чистоты азота уменьшается производительность установок. В табл. 5.3 приведены характеристики некоторых мембранных установок.

Из приведенных в табл. 5.3 данных видно, производительность установок существенно зависит от чистоты получаемого азота. Поэтому информация о концентрации азота, необходимой для предупреждения процесса самовозгорания или подавления возникших очагов, позволит выбрать оптимальную производительность установки и минимизировать затраты на борьбу с эндогенными пожарами.

Таблица 5.3 – Технические характеристики мембранных воздуходелительных установок по азоту

Модель	Производительность, нм ³ /ч, в зависимости от чистоты азота								Вес, кг
	90%	95%	96%	97%	98%	99%	99,5%	99,9%	
МВА-1,4-95-80	175	80	66	54	42	30	20	10	120
МВА-1,4-95-160	350	160	132	108	84	60	40	20	140
МВА-1,4-95-240	525	240	198	162	126	90	60	30	160
МВА-1,4-95-320	700	320	264	216	168	120	80	40	180
МВА-1,4-95-400	875	400	330	270	210	150	100	50	200
МВА-1,4-95-480	1050	480	396	324	252	180	120	60	220
МВА-1,4-95-560	1225	560	462	378	294	210	140	70	240
МВА-1,4-95-640	1400	640	528	432	336	240	160	80	260
МВА-1,4-95-720	1575	720	594	486	378	270	180	90	280

5.2 Использование азота для получения пены

Подача азота в выработанное пространство действующих выемочных участков может повысить опасность ведения горных работ из-за возможности поступления инертного газа в действующие горные выработки

и снижения концентрации кислорода в атмосфере, где могут находиться шахтеры. Для предотвращения выхода азота из выработанного пространства необходимо снизить проницаемость обрушенных горных пород вдоль линии забоя. Среди возможных способов изоляции выработанного пространства действующих выемочных участков наиболее перспективным является создание пенных завес. Заполненная пеной зона может перемещаться вслед за линией забоя или сохранять свое местонахождение в выработанном пространстве. Поэтому необходимо исследовать изоляционное действие такой завесы, а также влияние пены на сорбционную активность угля по отношению к кислороду.

Эффективность защитного действия пенной завесы от выноса азота в действующие выработки будет зависеть от времени существования пены. Однако при генерации пены одновременно происходит обратный процесс – ее распад. Разрушение пены происходит из-за постепенного стекания пенообразующей жидкости, приводящего к уменьшению толщины пленок и снижению их прочности. Изменение объема генерируемой пены с учетом ее распада описывается уравнением [102]:

$$dV_{\Pi} = Qd\tau - \frac{V_{\Pi}d\tau}{C_V}, \quad (5.1)$$

где V_{Π} - объем генерируемой пены, м³; Q - производительность пеногенератора, м³/ч; τ - время работы пеногенератора, ч; C_V - стойкость пены, ч.

Решение уравнения (5.1) позволяет рассчитать сохраняющийся объем пены V_{Π} при работе пеногенератора за время τ :

$$V_{\Pi} = QC_V (1 - e^{-\tau/C_V}). \quad (5.2)$$

Производительность пеногенератора по пене зависит от расхода пенообразующей жидкости и кратности получаемой пены:

$$Q = qK, \quad (5.3)$$

где K – кратность пены; q – производительность по пенообразующей жидкости, $\text{м}^3/\text{ч}$.

При $\tau = \infty$ из уравнения (5.2) получаем выражение для расчета максимального объема пены, генерируемого пеногенератором:

$$V_{\max} = QC_v = qKC_v . \quad (5.4)$$

При нагнетании в равномерно пронизанное выработанное пространство, благодаря большой вязкости и малой плотности, пена равномерно распространяется от точки подачи. Учитывая, что пена находится только в порах скопления пород, в выработанном пространстве образуется максимальный объем пены сферической формы с параметрами:

$$V_{\max} = qKC_v = \frac{4}{3}\pi R^3 P, \quad (5.5)$$

где R - радиус объема выработанного пространства, заполненного пеной, м; P - пористость выработанного пространства.

Объем пены, рассчитанный по выражению (5.5), образуется при бесконечно долгой работе пеногенератора. Для снижения длительности подачи пены до приемлемых уровней, необходимо уменьшить зону обработки. Исследования показали, что с этой целью необходимо ввести поправочный коэффициент (A), равный 0,6 – 0,7. Исходя из (5.5), радиус создаваемой пеной завесы в выработанном пространстве можно определить по выражению:

$$R = \left(\frac{3AqKC_v}{4\pi P} \right)^{1/3}. \quad (5.6)$$

Уравнение (5.4) показывает, что объем пенной завесы определяется произведением кратности на стойкость пены. Для определения параметров пены использовалась установка, позволяющая получать пену средней кратности, приведенная в ГОСТ Р 50588-2012. Согласно методике, используемой в ГОСТ, за устойчивость пены принималось время, необходимое для выделения из пены 50% используемого пенообразующего

раствора. Кратность пены равнялась отношению объема образуемой пены к объему пенообразующей жидкости. В качестве основы пенообразующего раствора использовалась питьевая вода с добавкой различных поверхностно активных веществ (ПАВ). Результаты исследования стойкости и кратности пен, получаемых с использованием различных ПАВ, приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4 – Параметры пены в зависимости от вида ПАВ

Используемый ПАВ	Концентрация ПАВ, %	Кратность пены	Устойчивость пены, с	$M=KC_V$
ПО-1НСВ	1	85	220	18700
ПО-6НСВ	6	80	230	18400
ПО «Эльффор»	6	61	190	11590
ПО-6ТС	6	60	189	11340
ПО-6ЦТ/АР	6	65	190	12350
ПО-6РЗ	6	40	160	6400

Полученные результаты показали, что наиболее эффективным ПАВ для генерации пены является ПО-1НСВ. Для получения максимального объема пены достаточно 1% этого ПАВ. В ходе исследований также установлено, что с увеличением жесткости воды наблюдается снижение кратности пены.

Проведенные эксперименты показали, что для оценки изолирующего действия пены более приемлемым параметром пены является не устойчивость, определяемая по времени стекания 50% пенообразующей жидкости, а стойкость, равная времени существования пены. Так, пена сохраняла свой объем и после стекания половины пенообразующей жидкости. Замеры показали, что для разрушения 50% объема пены на основе ПО-1НСВ потребовалось 7 минут.

Для оценки влияния пенной обработки на сорбционную активность угля по отношению к кислороду использовался метод В.С. Веселовского [12].

Получаемой пеной обрабатывалась проба угля с размером частиц 1-3 мм. Затем проба угля выдерживалась при температуре 20-25 °С в сорбционном сосуде. Для сравнения воздействия пены на уголь параллельно исследовали изменение сорбционной активности не обработанного угля, а также влияние обработки питьевой водой. Величина сорбционной активности угля оценивалась по удельной скорости сорбции кислорода, рассчитываемой по формуле (2.1). Результаты исследования приведены в табл. 5.5 [102].

Таблица 5.5 – Константа скорости сорбции кислорода углем, см³/(г·ч)

Время сорбции, ч	Вид обработки угля			
	Не обработан	Водой	1% раствор ПО-1НСВ	6% раствор ПО-6НСВ
24	0,0972	0,0387	0,0312	0,0302
72	0,0635	0,0268	0,0213	0,0218
120	0,0474	0,0196	0,0157	0,0149

Анализ полученных результатов показывает, что обработка пеной снижает сорбционную активность угля по отношению к кислороду более чем в три раза, что позволяет применять пену в качестве антипирогена. Менее эффективно на уголь действует вода. По полученным результатам можно сделать вывод, что антипирогенное действие пены обусловлено покрытием поверхности угольных частиц пленкой воды. Причем наличие ПАВ увеличивает размер покрытой жидкостью поверхности за счет снижения поверхностного натяжения воды.

Оценка воздухопроницаемости скопления угля после обработки пеной проводилась на лабораторной установке, включающей емкость, наполненную углем фракцией 5-10 мм, баллон со сжатым воздухом, а также манометр и ротаметр для измерения перепада давления и скорости воздуха. В процессе эксперимента измеряли перепад давления воздуха на входе и выходе насыпки угля при постоянном расходе воздуха. Замеры показали, что

пропитка скопления угля пеной делает ее практически непроницаемой для воздуха

Для восстановления расхода воздуха потребовалось увеличить перепад давления газа более чем в 47 раз (с 59 Па в скоплении без пены до 2790 Па после подачи пены). Последующие исследования показали, что конкретный перепад давления воздуха, необходимый для разрушения пены, изменяется в зависимости от фракции угля, кратности пены. С течением времени избыточное давление воздуха, необходимое для разрушения пены снижается. В ходе экспериментов также установлено, что стойкость пены, поданной в скопление угля, больше, чем у пены, находящейся в емкости.

Концентрация кислорода в выработанном пространстве, инертизируемом путем подачи азота, будет определяться утечками воздуха, поступающими из действующих горных выработок, количеством подаваемого азота и объемом метана, выделяющегося из угля и вмещающих пород. Общий объем поступающего в выработанное пространство газа можно определить из уравнения:

$$Q_{\Gamma} = Q_{\text{У}} + Q_{\text{А}} + Q_{\text{М}}, \quad (5.7)$$

где $Q_{\text{У}}$ – утечки воздуха из действующих выработок, $\text{м}^3/\text{с}$; $Q_{\text{А}}$ – расход подаваемого в выработанное пространство азота, $\text{м}^3/\text{с}$; $Q_{\text{М}}$ – интенсивность выделения метана, $\text{м}^3/\text{с}$.

Количество кислорода, поступающего в выработанное пространство можно рассчитать по формуле:

$$Q_{\text{К}} = Q_{\text{У}} C_{\text{КУ}} + Q_{\text{А}} C_{\text{КА}}, \quad (5.8)$$

где $C_{\text{КУ}}$ – концентрация кислорода в воздухе, поступающем с утечками в выработанное пространство, %; $C_{\text{КА}}$ – концентрация кислорода в азоте, подаваемом в выработанное пространство, %.

Концентрацию кислорода, образующаяся при подаче азота, можно определить из уравнений (5.7) и (5.8):

$$C_{\text{К}} = \frac{Q_{\text{У}} C_{\text{КУ}} + Q_{\text{А}} C_{\text{КА}}}{Q_{\text{У}} + Q_{\text{А}} + Q_{\text{М}}}, \quad (5.9)$$

В случае подачи пены в выработанное пространство концентрация кислорода в выработанном пространстве рассчитывается по формуле:

$$C_K = \frac{Q_V C_{KV} + Q_A C_{KA} + Q_{II} C_{KII}}{Q_V + Q_A + Q_M + Q_{II}}, \quad (5.10)$$

где Q_{II} – производительность пеногенератора, м³/с; C_{KII} – концентрация кислорода в газовой фазе пены, %.

При генерации пены может использоваться атмосферный воздух, а также азот различной степени чистоты, имеющий примеси кислорода.

Расчеты показывают, что создание пенных завес в выработанном пространстве позволяют существенно снизить опасность выноса азота и метана в действующие горные выработки. Одновременно происходит снижение концентрации кислорода в выработанном пространстве за счет уменьшения прососов воздуха из действующих горных выработок, что повышает эффективность борьбы с процессом самовозгорания угля на различных стадиях развития.

5.3. Разработка технологических схем подачи азота в выработанное пространство

Технологические схемы представляют собой графическую и техническую части, которые определяют процесс и параметры получения конечного продукта, в нашем случае азота и пены, позволяющего обеспечить инертизацию выработанного пространства при профилактике, локализации и тушении пожаров от самовозгорания угля [103, 104, 105, 110, 119].

При выполнении настоящей работы использовалась современная технология получения азота с помощью полуволоконных модулей. Мембранная воздухораспределительная установка МВа-1, впервые использованная в Кузбассе для борьбы с подземными пожарами, имела следующую техническую характеристику [110].

Производительность используемой установки составляла 600 н.м³/ч при чистоте азота 99,5 %. При повышении производительности до 1000м³/ч

чистота азота равнялась 98 %. Давление азота на выходе равно 1,3 МПа. Площадь размещения установки составляет 36 м². Масса установки –18 т. . Для эксплуатации требуется помещение, имеющее температуру от +5°С до +35°С и относительную влажность воздуха не более 80% [110].

Воздух в установку забирается из атмосферы компрессором и подается в ресиверы. Затем из воздуха удаляют влагу и подают в мембранный модуль. Остаточный газ с повышенным содержанием кислорода поступает из мембранного модуля в атмосферу. Схема локализации и тушения очага самовозгорания, возникшего в отработанном и изолированном участке, приведена на рис. 5.5. Для подачи азота можно использовать мембранную воздухоразделительную установку или криогенную емкость с жидким азотом, который газифицируют перед подачей в шахту.

Источник азота 5 размещают у скважины 4, пробуренной с поверхности в выработанное пространство 1 с очагом самовозгорания 2 аварийного подземного участка, изолированного от действующих горных выработок перемычкой 3. Данную схему можно использовать и для предотвращения развития процесса самовозгорания в выработанном пространстве, если методом изоляции не удастся добиться снижения концентрации кислорода до требуемого уровня.

В случае невозможности или сложности бурения скважин с земной поверхности подачу азота в выработанное пространство изолированного участка можно осуществлять через трубы, проложенные из действующих горных выработок (рис. 5.6).

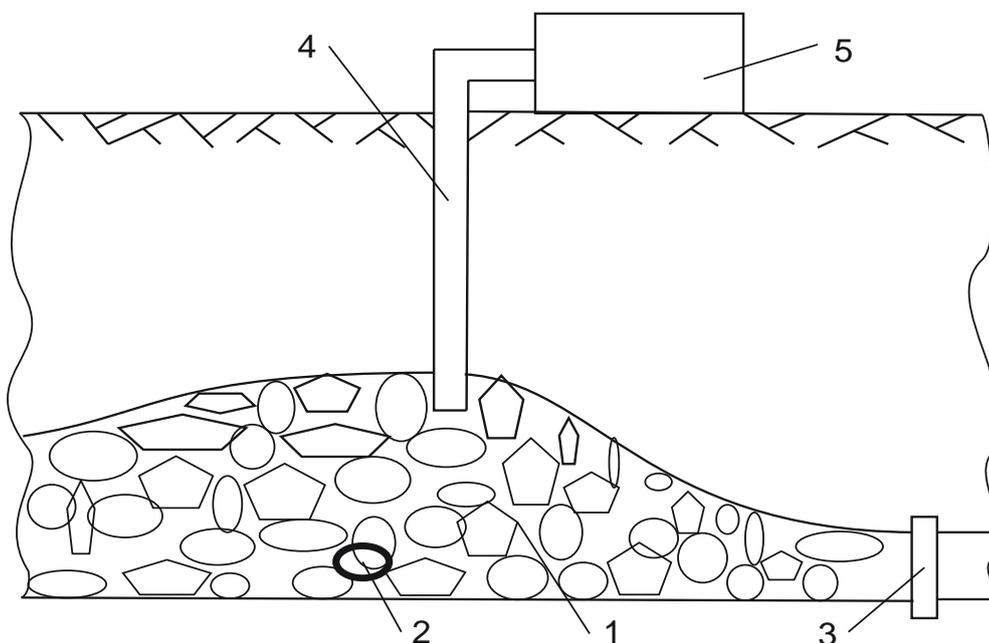


Рисунок 5.5 – Схема инертизации атмосферы отработанного и изолированного участка: 1 – выработанное пространство; 2 – очаг самовозгорания; 3 – изолирующая перемычка; 4 – скважина, пробуренная с поверхности; 5 – установка подачи азота

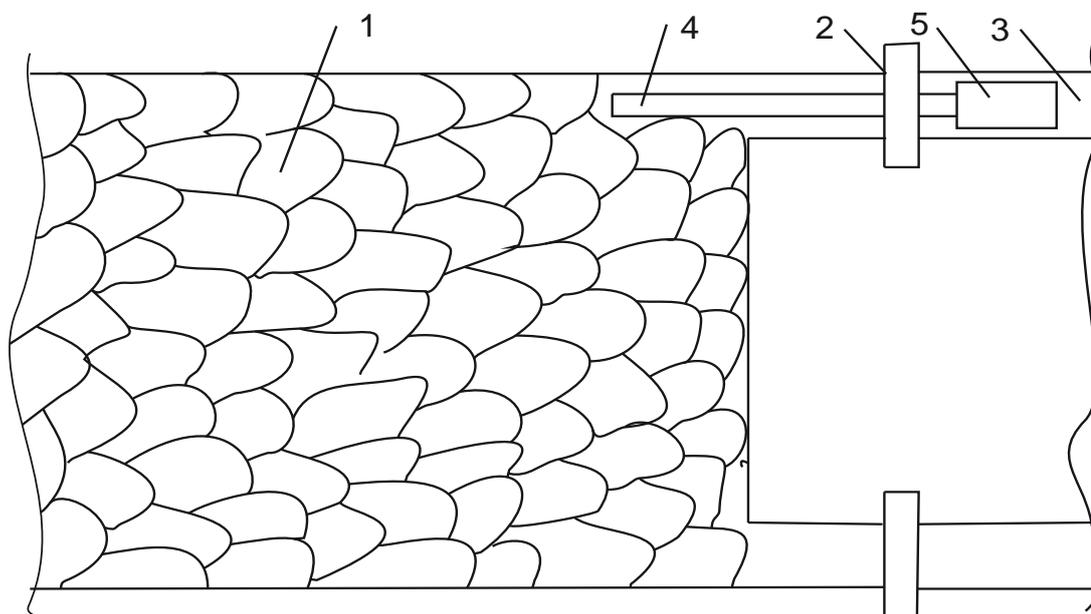


Рисунок 5.6 – Схема подачи азота в изолированное выработанное пространство из горных выработок: 1 – выработанное пространство; 2 – изолирующая перемычка; 3 – горная выработка; 4 – трубопровод для подачи азота; 5 – установка выдачи азота

Для инертизации изолированного участка в выработанное пространство 1 прокладывают трубу 4 из горной выработки 3. Затем выработанное пространство изолируют перемычкой 2, а к трубе 4 подключают источник

азота 5. Состав газов в изолированном пространстве контролируют через пробоотборники, установленные в перемычках.

Для инертизации атмосферы действующих участков можно использовать схему, приведенную на рис. 5.7. Схема предусматривает создание пенной завесы между действующими горными выработками и атмосферой выработанного пространства участка, инертизируемой подачей азота. Подача азота и пены в выработанное пространство происходит через скважины, пробуренные с земной поверхности.

Схема включает угольный пласт 1, обрабатываемый угледобывающим комплексом 2, выработанное пространство 3, в которое с поверхности бурят скважину 4 для подачи азота и скважину 6 для подачи пены. Подача азота происходит от установки 5, а пену нагнетают из пеногенератора 7.

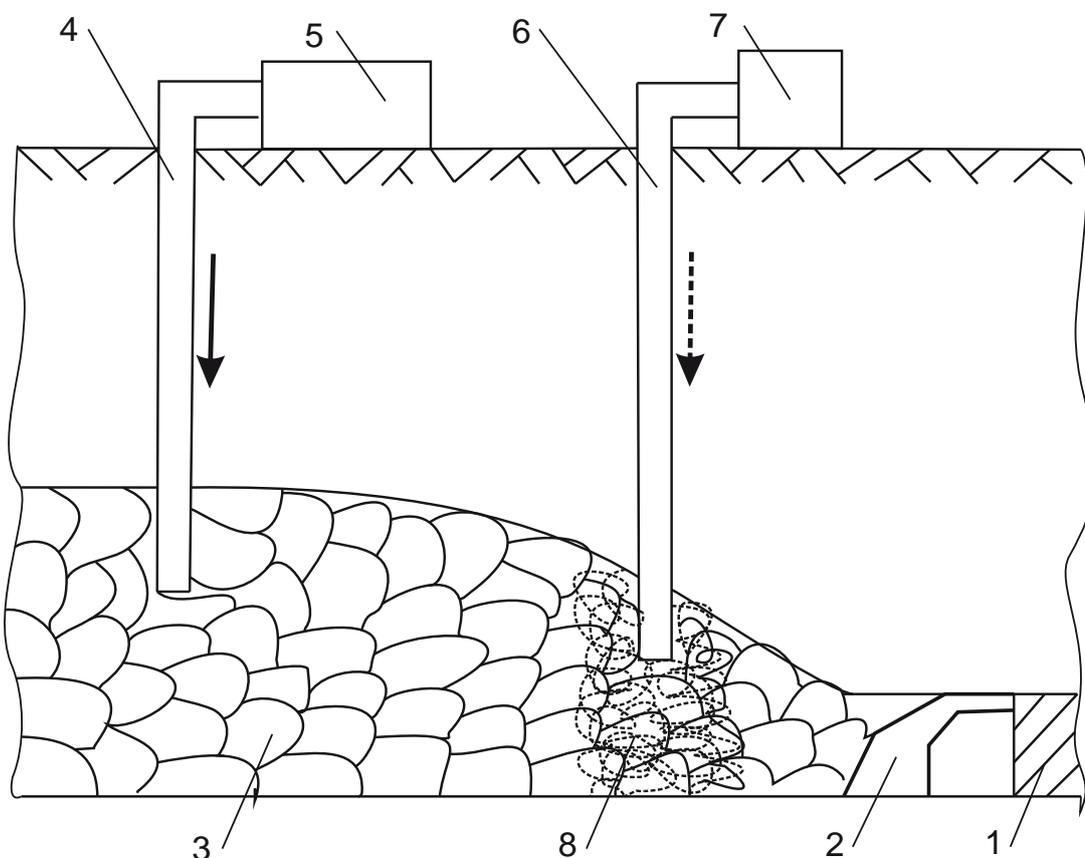


Рисунок 5.7 – Схема подачи азота в выработанное пространство действующего участка под защитой пенной завесы: 1 – обрабатываемый угольный пласт; 2 – угледобывающий комплекс; 3 – выработанное пространство; 4 – скважина для подачи азота; 5 – установка подачи азота; 6 – скважина для подачи пены; 7 – пеногенератор; пенная завеса

В случае сложности реализации подачи азота и пены с земной поверхности инертизацию атмосферы выработанного пространства можно осуществлять из действующих горных выработок. На рис. 5.8 представлена схема создания пенных завес в выработанном пространстве с вентиляционного и конвейерного штреков. Азот можно нагнетать из двух или одного штрека. Пеногенератор и установка выдачи азота устанавливаются с горных выработках. Образующиеся пенные завесы препятствуют попаданию азота в действующие горные выработки.

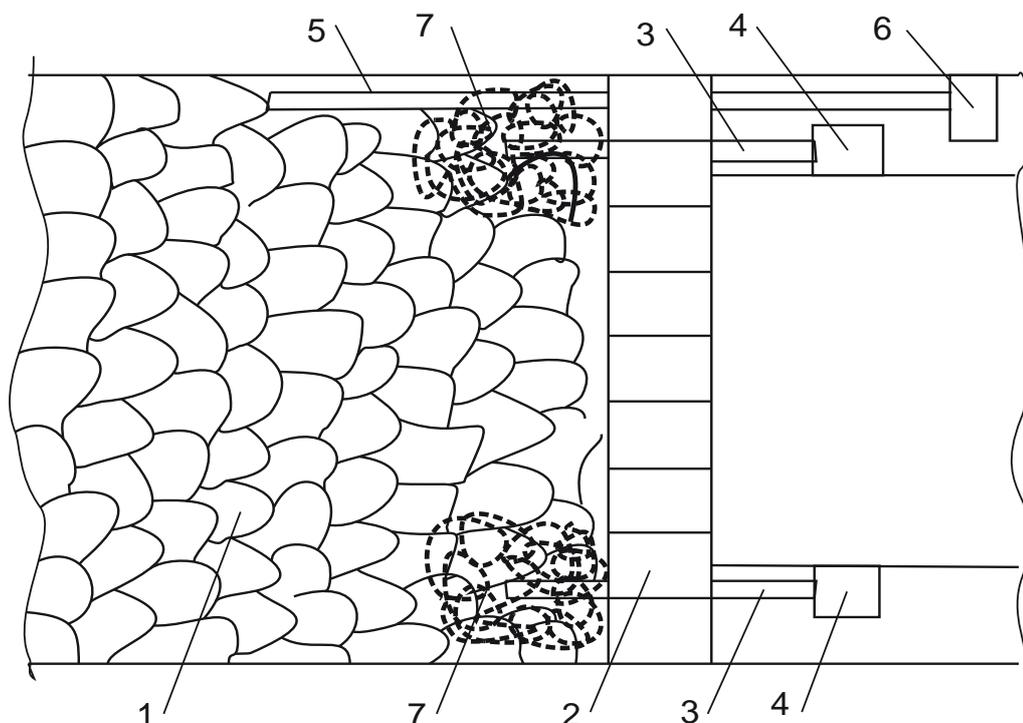


Рисунок 5.8 – Инертизация выработанного пространства под защитой пены из подземных выработок: 1 – выработанное пространство; 2 – угледобывающий комплекс; 3 – трубопровод подачи пены; 4 – пеногенератор; 5 – трубопровод подачи азота; 6 – установка подачи азота; 7 – пенная завеса

Снизить вынос азота в действующие выработки позволяет схема инертизации атмосферы выработанного пространства действующего участка, приведенная на рис. 5.9.

Схема включает выработанное пространство 1 отрабатываемого угледобывающим комплексом 3 угольного пласта 2. Для предотвращения процесса самовозгорания или подавления очага самонагрева в выработанное пространство бурят скважину 4 для подачи азота из установка

подачи азота 5. С целью снижения выноса азота в действующие выработки в выработанное пространство также бурят скважину 6, через которую отводят газовую смесь с помощью вентиляционной установки 7. Благодаря вентиляционной установке снижается вынос метана в действующие выработки и уменьшается количество кислорода, попадающее в выработанное пространство с утечками воздуха.

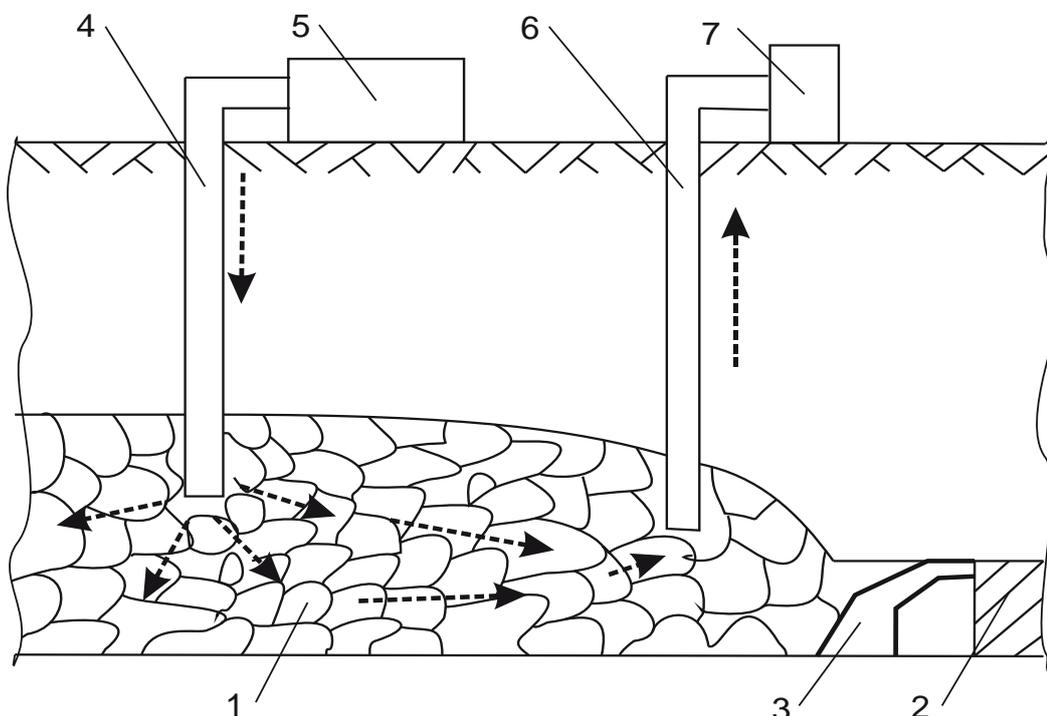


Рисунок 5.9 – Схема подачи азота в выработанное пространство действующего участка: 1 – выработанное пространство; 2 – обрабатываемый угольный пласт; 3 – угледобывающий комплекс; 4 – скважина для подачи азота; 5 – установка подачи азота; 6 – скважина для отвода газовой смеси; 7 – вентиляционная установка

Схема, приведенная на рис. 5.9, может работать и в другом режиме. С поверхности на угольный пласт бурится ряд скважин (4, 6). Скважины, выбуренные в кровлю пласта впереди очистного забоя, перекрываются заглушками. На первой скважине от забоя (6) монтируется установка (7) для отсоса части струи с примесью метана и угольной пыли, образующихся в процессе выемки угля. В результате в породах под газоотсасывающей скважиной образуется скопление мелкодисперсной угольной пыли [110].

По мере отработки лавы вскрывается новая скважина и на неё переключается газоотсасывающая установка. На отработанной скважине (4)

монтируется воздуходелительная установка (5) типа МВа-1, которая дезактивирует угольную пыль и инертизирует атмосферц. Профилактическая работа ведётся в два этапа. На первом этапе, с учётом высокого дезактивирующего эффекта при обработке неокисленного угля и угольной пыли антипирогенами на водной основе [7], в скважину (4) подаётся инертная пена. После наработки критического объёма пены в скважину подаётся только инертный газ [110].

Расстояние между дегазационными скважинами на практике изменяется в пределах 30-70 м. Частая передвижка установки МВа-1 требует больших временных и стоимостных затрат. В связи с этим очевидна необходимость определения для конкретной установки трёх основных параметров: максимальная дальность подачи инертного газа по используемому трубопроводу; максимальная длина транспортирования инертной пены; максимальный объём пены, генерируемый МВа-1 с производительностью 1000 м³/ч [110].

Для оценки первого параметра воспользуемся методикой, приведённой в работе [106]. В качестве исходных принимаем: производительность установки – 16,6 м³/мин; давление на выходе-1,3 МПа; диаметр трубопровода-100 мм. При приведённой длине трубопровода диаметром 100 мм, равной 50 км, пропускная способность в 16,6 м³/мин обеспечивается при давлении в трубопроводе 0,5 Мпа [110].

Приведённая длина определяется по уравнению

$$L = k_1 \cdot l_1 + k_2 l_2 + \dots + k_n l_n , \quad (5.11)$$

где k -коэффициент приведения труб различного диаметра к трубам 150 мм; $l_1 \dots l_n$ -длины труб диаметром более или менее 150 мм.

Для труб диаметром 100 мм коэффициент k равен 8,4. Тогда очевиден вывод, что даже при давлении в трубопроводе в 2,6 раза меньшем достигаемого установкой МВа-1, обеспечивается транспортировка азота на длину в 59 км. Это значит, что с одной точки размещения технические характеристики установки МВа-1 позволяют использовать инертный газ с

производительностью в 16,6 м³/мин на всей длине выемочных столбов, которая в отдельных случаях достигает 3,0 км [110].

Динамика движения пен по трубам исследована в работах [32, 106, 107, 108, 109]. Принятая в них реологическая модель исходит из предположения, что пена является неньютоновской жидкостью, с достаточно жесткой структурой, способной сопротивляться любому напряжению τ , не превышающему τ_0 . При $|\tau_0| > \tau_0$ пена ведёт себя как обычная ньютоновская жидкость при напряжении сдвига $\tau - \tau_0$.

В работе [109] для труб диаметром 100 мм давление пены в трубопроводе P_1 определяется по уравнению [110]:

$$P_1 = \sqrt{\frac{k \cdot Q_n^2 \cdot P_0 l}{D} + P_2^2}, \quad (5.12)$$

где k - обобщённый коэффициент гидравлического трения, равный произведению коэффициента трения на плотность (принимается по экспериментальным данным равным 6,4 кг/м³); Q_n - расход пены, м³/мин; P_0 - атмосферное давление (кгс/см²); P_2 - давление в начале рассчитываемого участка (у скважины) кгс/см²; D - коэффициент, равный 2178 м⁵ ($6,97 \cdot 10^9 \cdot R^5$).

Для горизонтального участка максимальная длина транспортирования пены кратностью 100 при начальном давлении 13,3 кгс/см², производительности 18,2 м³/мин и давлении в устье скважины 5 кгс/см², определена по зависимости [110]:

$$l = \frac{D(P_1^2 - P_2^2)}{k \cdot Q_n^2 \cdot P_0}, \text{ м} \quad (5.13).$$

По результатам вычислений имеем $l_{\max} = 146$ м, на основании чего делаем вывод, что установка МВа-1 с одной точки стоянки обеспечивает нагнетание пены в скважины, пробуренные в радиусе до 150 м. При расстояниях более 150 м пеногенераторы должны располагаться непосредственно у скважин, к которым под давлением не менее 0,5 МПа подводится азот [110].

Для реализации способов подавления очагов самовозгорания угля в выработанном пространстве азотом целесообразно использовать методы определения местонахождения очагов с помощью поверхностной газовой съемки [111, 112, 113, 114], выявляющей аномалии радона и индикаторных пожарных газов в почве.

5.4. Реализация технологической схемы на пласте 67 шахты «Галдинская-Западная-1»

Пласт 67 мощностью 4,2-5,9 м с углом падения $5-23^{\circ}$ залегает в 33 м ниже отработанного пласта 68. Уголь пласта весьма склонен к самовозгоранию. Угольная пыль взрывчата. Инкубационный период самовозгорания равен 61 суткам. С глубины 200 м относится к угрозам по горным ударам. В соответствии с классификацией по ГОСТ 25543-88 уголь пласта 67 относится к марке «Д» (длиннопламенный).

Эндогенная пожароопасность лавы характеризуется следующими факторами. Так, при среднем значении мощности 4,85 м вынимаемая мощность пласта составляла 4 м. По проекту в почве и кровле пласта оставались пачки угля размером (0,3-0,4) м и (0,4-0,5) м соответственно.

Дегазация выработанного пространства осуществлялась по комбинированной схеме с отводом метана с помощью ПДУ (передвижных дегазационных установок). При этом утечки воздуха достигали $150\text{ м}^3/\text{мин}$ (производительность ВВН-150). На пути движения метановоздушной смеси (МВС) к скважинам, пробуренным с поверхности через 80-120 м, формировались скопления угольной пыли, которая выполняла роль катализатора самонагрева обрушающейся подкровельной пачки угля.

Вакуум-насос ВВН-150 создаёт разрежение 0,0147 МПа. В этом случае неизбежны подсосы воздуха с поверхности к скоплениям угля и угольной пыли по затрубному пространству и неплотностям стыков обсадных труб.

Следствием этого может быть возникновение очага самовозгорания вблизи отработанной скважины. Подобные случаи имели место в Кузбассе.

Фактором, снижающим эндогенную пожароопасность лавы, является высокая скорость подвигания очистного забоя (11 м в сутки, 330 м в месяц) при плановой нагрузке 12000 т в сутки. Однако этот фактор не компенсирует влияния на эндогенную пожароопасность высокого уровня потерь угля по мощности пласта и катализирующего влияния угольной пыли. Подтверждением этому является возникновение очага самонагревания, признаки которого были обнаружены в лаве 68-15 на вышележащем пласте 68.

В связи с этим произведена оценка возможной аэродинамической связи между выработанными пространствами лав 67-04 и 68-15. Безопасное расстояние по фактору образования воздухопроводящих трещин по аналогии с водными объектами [115] определялось по уравнению:

$$H_m = 20(m + 0,5\sum m_i), \quad (5.14)$$

где m , m_i - вынимаемые мощности отрабатываемого и вышележащих отработанных пластов, м.

Между пластами 68 и 67 последних нет. Тогда безопасное по аэродинамической связи расстояние будет равно 80 м ($20 \times 4,0$), что в 2,4 раза больше, чем фактическое (33 м) расстояние по нормали до пласта 68.

Таким образом, расчёты подтверждают наличие аэродинамической связи между пластами и необходимость разработки дополнительных мер, снижающих негативное влияние этого фактора на эндогенную пожароопасность.

В качестве такой меры, наряду с общепринятыми (подача в выработанное пространство жидкого и твёрдого аэрозоля) в «Паспорте выемочного участка лавы 67- 04 пласта 67», для предупреждения активизации самонагревания угля и пыли в лаве 68-15 и возможного его перепуска при «шнуровом» горении метана в горные выработки лавы 67-04 была регламентирована подача азота и инертной пены в выработанное

пространство лавы воздуходелительной установкой через отработанную дегазационную скважину.

При этом установка МВа-1 должна была включаться в работу при подходе к проекции контура ликвидированного очага самонагрева на пласте 68 на нижележащий пласт 67.

Первичная посадка основной кровли в лаве 67-04 произошла на длине 71 м от монтажной камеры. Оценка фона индикаторных газов произведена 18.11.2009 г. Результаты приведены в таблице 5.6. Температура воздуха во всех замерах равнялась 12 °С, этилен, ацетилен и пропилен отсутствовали.

Таблица 5.6.- Фоновые значения содержания индикаторных газов и температуры в лаве 67-04

Наименование выработки	CO ₂	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈
Конвейерный штрек	0,1	20,7	0,0000	0,0000	0,473	0,00041	0,00002
Лавы (забой)	0,1	20,7	0,0000	0,0000	0,511	0,00041	0,00002
Лавы (куток)	0,3	20,0	0,0009	0,0000	0,865	0,00074	0,00021
Вентиляционный штрек (участок)	0,1	20,5	0,0000	0,0000	0,640	0,00049	0,00007
Вентиляционный штрек (из лавы)	0,1	20,6	0,0000	0,0000	0,623	0,00048	0,00006
Конвейерный штрек, перем.	1,0	17,4	0,0005	0,0000	0,821	0,00078	0,00028
Вентиляционный штрек, перем.	1,2	17,2	0,0005	0,0000	0,956	0,00107	0,00035

Выемочный столб лавы 67-04 имеет длину 1550 м. Пятнадцать дегазационных скважин располагались в 30 м от вентиляционного штрека. Воздухоразделительная установка была запущена в работу 28.11. на скважину № 322. Второй точкой стоянки является скважина № 323 (с 11.12.) К скважине № 324 (третья точка стоянки) установка переместилась 27.01.

Профилактическая обработка выработанного пространства вблизи каждой скважины сводилась к следующему. На первом этапе производилась

дезактивация угольной пыли, скопившейся под скважиной. При расстоянии между скважинами 100 м, производительности вакуум-насоса 150 м³/мин и технически допустимом уровне запылённости в лаве 140 мг/м³ суточный вынос пыли в выработанное пространство составлял 30,3 кг. За десять суток лава подвигалась на расстояние между скважинами 100 м. За это время накопление пыли на пути движения МВС достигало 303 кг.

Время нагнетания инертной пены в скважину регламентировалось максимальным объёмом её наработки пеногенератором. Согласно [7] объём пены (V_n), генерируемый за время работы пеногенератора (τ), определялся по уравнению (5.4).

По экспериментальным данным [116] время полного разрушения пены кратностью 60-120 в выработанном пространстве не превышает 24 ч. По уравнению (5.4) за это время установкой будет наработано 63 % максимального объёма инертной пены (16511 м³). При интервале теоретической пористости обрушенных пород $0,259 \leq m \leq 0,476$ [97] этим объёмом пены обрабатывалось от 34700 до 63800 м³ выработанного пространства.

С учётом вышеизложенного время нагнетания пены для дезактивации угольной пыли, скопившейся при работе дегазационной установки, было ограничено одними сутками. Согласно [70] химическая активность угля после обработки пеной снижается в 2,6 раза. При этом эффект дезактивации по сравнению с другими антипирогенами на жидкой основе на 25-30 % выше за счёт лучшего смачивания угля.

При нагнетании пены, наряду с дезактивацией угля и угольной пыли исключаются утечки воздуха в зоне её распространения. Этот эффект, в частности, был зафиксирован на шахтах «Опортуна» и «Инноминада» в Испании [116] при ликвидации пожаров. После нагнетания пены в выработанное пространство на аварийных лавах его эквивалентное отверстие уменьшалось в 10 раз, что позволило резко снизить приток кислорода к очагам и обеспечить их локализацию.

После прекращения нагнетания пены в скважину № 322 подавался азот с производительностью 1000 м³/ч. Компрессия, создаваемая в донной части скважины, способствовала ликвидации аэродинамической связи пласта 67 с пластом 68 и с поверхностью по негерметичным стыкам обсадных труб и затрубному пространству.

По аналогичной схеме производились профилактические работы на второй точке стоянки (скважина № 323). После подачи пены в скважину № 324 общая схема работ была изменена. Установка МВа-1 была оставлена у скважины до конца отработки лавы. Инертный газ подавался последовательно в скважины № 325-327, 334-340. Длина трубопровода диаметром 100 мм составила 975 м. Пеногенераторы монтировались непосредственно у скважин после демонтажа установки ВВН-150.

Контроль за эффективностью работ вёлся путём набора контрольных проб воздуха из-за перемычек, возведённых на конвейерном (№ 241) и вентиляционном (№ 244) штреках за монтажной камерой лавы 67-04. Их результаты сведены в таблицу 5.7.

Таблица 5.7 – Состав атмосферы за перемычками №№ 241, 244.

Дата	Перемычка	СО ₂	О ₂	СО	Н ₂	СН ₄
21.11.	241	1,0	17,4	0,0005	0,0000	0,821
	244	1,2	17,2	0,0005	0,0000	0,956
09.12.	241	1,2	17,3	0,0000	0,0000	3,8
	244	1,4	16,8	0,0010	0,0000	1,616
11.12.	241	1,8	15/7	0,0000	0,0000	4,1
	244	2,0	15,01	0,0015	0,0000	1,757
09.01.	241	2,5	12,0	0,0000	0,0000	10,0
	244	2,6	10,2	0,0000	0,0000	9,0
26.01.	241	3,8	8,8	0,0000	0,0000	10,1
	244	4,1	8,5	0,0000	0,0000	5,4
27.01.	241	3,4	10,3	0,0000	0,0000	8,4

	244	4,3	8,2	0,0000	0,0000	5,5
28.01.	241	2,6	9,3	0,0000	0,0000	7,0
	244	4,1	8,4	0,0000	0,0000	5,5
03.02.	241	3,1	10,2	0,0000	0,0000	9,9
	244	3,8	8,9	0,0000	0,0000	6,0
21.02.	241	5,5	8,1	0,0000	0,0000	9,5
	244	4,9	8,5	0,0000	0,0000	4,0

Как видно из табл. 5.7 лавы 67-04 по состоянию на 21.02. работала без признаков самонагрева угля и угольной пыли. Из-за невозможности подхода к перемычкам дальнейший контроль, вплоть до отработки лавы в июне вёлся по точкам, в которых определено фоновое содержание индикаторных газов (табл. 5.6).

Признаков самонагрева угля в отработанной части лавы 67-04 также не зафиксировано. Содержание оксида углерода не превышало 0,0005-0,0009 %. Для сравнения: очаг самонагрева в лаве 68-15 обнаружен по наличию оксида углерода в выработанном пространстве в пределах 0,005-0,010 %.

Оценка влияния очистных работ и принимаемых мер профилактики в лаве 67-04 на очаг самонагрева на вышележащем пласте 68 произведена по результатам приповерхностных радоновых съёмок. В активной фазе самонагрева плотность потока радона (ППР) на поверхности достигала 1080 мБк/(м²·с). После ликвидации очага и в процессе отработки нижележащей лавы 67-04 максимальное значение ППР не превышало 285 мБк/(м²·с).

С 28.11. г. по 10.06. г под защитой азота и инертной пены в лаве 67-04 было добыто 1,6 млн. т. угля. При этом израсходовано 4 млн. 680 тыс. нм³ азота и 100 т пенообразователя. Внедрение новой технологической схемы позволило безаварийно отработать пожароопасную лаву 67-04 и предупредить рецидив пожара в лаве 68-15. Суммарные затраты на

генерацию пены и азота, обслуживания пеногенераторов и воздухоразделительной установки в пересчёте на 1 т добычи угля составили 20,09 руб.

При этом установлено, что стоимость 1 м³ азота, нагнетаемого в шахту установкой МВа-1, в 3,2 раза ниже стоимости 1 м³ азота, генерируемого на криогенных установках типа АГУ-8К (соответственно 5 руб. 80 коп и 18 руб. 68 коп) [110].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи повышения эффективности профилактики и ликвидации очагов самовозгорания в шахтах путем инертизации выработанных пространств на основе изучения влияния факторов, обеспечивающих термодинамическое равновесие со стабилизацией температуры в очаге ниже температуры возгорания, что имеет существенное значение для обеспечения безопасности труда при угледобыче.

Основные научные результаты исследований позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Разнонаправленные меры борьбы с газом и эндогенными пожарами в последние годы обострили проблему защиты выемочных полей от самовозгорания угля из-за внедрения схем проветривания с отводом метана и угольной пыли по выработанному пространству. Отложения пыли на пути движения метановоздушной смеси резко повысили значимость этого фактора на эндогенную пожароопасность лав. При работе газоотсасывающих установок вынос пыли в выработанное пространство достигает 90-100 кг в сутки.

2. Углубление горных работ увеличивает эндогенную пожароопасность выемочных полей шахт Кузбасса. На больших глубинах профилактика и тушение очагов самовозгорания угля жидкими антипирогенами, в том числе и глинистой пульпой, не эффективны из-за технических трудностей бурения скважин с поверхности в пожароопасные зоны выработанного пространства. В этих условиях основной мерой воздействия на тепловой баланс скопления угля и угольной пыли является снижение концентрации кислорода за счёт использования газообразного азота в качестве инертной среды.

3. Лабораторными исследованиями установлено, что обработка свежееобнаженного угля сухим азотом повышает его сорбционную

активность по отношению к кислороду за счет испарения жидкости, ведущего к увеличению свободной поверхности угля. Увлажненный азот снижает активность такого угля и может использоваться для профилактики самовозгорания. Обработка предварительно прогретого угля уменьшает его сорбционную активность по отношению к кислороду.

4. При повышении температуры из угольной пыли выделяется значительно больше оксида углерода и водорода, чем из угля. Подача азота в очаг самовозгорания угля снижает выделение таких индикаторных газов, как оксид углерода и водород, что затрудняет контроль состояния очагов в выработанном пространстве. Однако по соотношению концентраций оксида углерода и водорода можно оценивать температуру очагов даже при незначительной примеси кислорода в азоте.

5. При инертизации пожароопасных зон выработанного пространства управляемыми факторами являются содержание примеси кислорода и скорость фильтрации газа. Задача управления процессом самовозгорания сводится к установлению параметров, обеспечивающих термодинамическое равновесие в очаге самовозгорания со стабилизацией температуры в нем ниже температуры возгорания.

6. Выполненные исследования влияния примеси кислорода в азоте в скоплении угля фракции 1-3 мм и угольной пыли фракции 0,2-0,4 мм на скорость его самонагрева позволили установить, что с ростом примеси кислорода с 1,0% до 21,0 % она увеличивается в 50-60 раз. Однако это возрастание для пыли фракции 0,0003 м идет со скоростью в 3-5 раз быстрее, чем у угля фракции 0,002 м.

7. На основе исследований охлаждающего воздействия на очаг самовозгорания установлено, что поток азота с примесью кислорода до 10 % при скорости фильтрации $1,67 \cdot 10^{-4}$ м/с не даёт требуемого эффекта охлаждения очагов в угле и угольной пыли. Увеличение скорости до $41,7 \cdot 10^{-4}$ м/с позволяет охладить очаги самонагрева при примеси кислорода в газе 3 % за 10,5 и 14,5 суток соответственно для скопления угля и пыли.

Скорость остывания, как и скорость нагревания, зависят от фракционного состава. Скопление угольной пыли при принятых параметрах моделирования остывает в 1,4 раза медленнее, чем угольные.

8. Разработанные рекомендации были апробированы при ликвидации очага самовозгорания подачи газообразного азота на ОАО «Шахта Полысаевская». Промышленное внедрение показало, что применение разработанных мероприятий повышает эффективность и безопасность работ при борьбе с самовозгоранием угля в шахтах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Манукян П.А. Подземные пожары в угольных шахтах. Углетехиздат. – 1947. – 111 с.
2. Бузиков М.Д. Предупреждение эндогенных пожаров на мощных каменноугольных пластах южного Кузбасса. Углетехиздат. – 1949. – 140 с.
3. Захаров А.Б., Судакович Л.С. Эндогенные пожары на шахтах Кузбасса. ЦИТИ. Москва. – 1954. – 20 с.
4. Дмитриук Н.Ф. и др. Борьба с подземным пожарами от самовозгорания угля. ЦИТИ. – 1962. – 127 с.
5. Линденау Н.И., Маевская В.М., Крылов В.Ф. Происхождение, профилактика и тушение эндогенных пожаров.- М.: Недра, 1977.- 319 с.
6. Егошин В.В., Кухаренко Е.В., Александрович И.Ф. Предупреждение и тушение эндогенных пожаров на шахтах Кузбасса. Кемеровское книжное издательство.- Кемерово, 1994.- 354 с.
7. Игишев В.Г. Борьба с самовозгоранием угля в шахтах.- М.: Недра, 1987.- 176 с.
8. Захаров А.Б. и др. Основные причины возникновения эндогенных пожаров на шахтах Прокопьевско-Киселёвского района Кузбасса. Технология и экономика угледобычи. 1964, № 87.
9. Храмцов В.И. и др. Снижение эндогенной пожароопасности при комбинированном проветривании очистных забоев. Борьба с авариями в шахтах. Выпуск 16. Кемерово, Кузбассвузиздат. – 2003. – С. 36-39.
10. Соболев В.В. Установление закономерностей процессов пылеобразования при работе высокопроизводительной угледобывающей техники. Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук. Кемерово. НЦ ВостНИИ. – 2002. – 47 с.
11. Путилин А. Новейшие данные о самонагревании угля. Издательство «Уголь и руда». Харьков, Киев. – 1933. – 32 с.
12. Скочинский А.А., Огиевский В.М. Рудничные пожары . Углетехиздат., 1954.387 с.

13. Самовозгорания промышленных материалов / В.С.Веселовский, Н.Д.Алексеева, Л.Н.Виноградова и др.- М.: Наука, 1964.- 246 с.
14. Физические основы самовозгорания угля и руд / В.С.Веселовский, Л.Н.Виноградова, Г.Н.Орлеанская и др.- М.: Наука, 1972.- 148 с.
15. Научные основы борьбы с самовозгоранием углей / В.С.Веселовский, Г.А.Орлеанская, Е.А.Терпюгова и др. - М.: Наука, 1964.- 52 с.
16. Прогноз и профилактика эндогенных пожаров / В.С.Веселовский, Л.Н.Виноградова, Г.Н.Орлеанская и др. - М.: Наука, 1975.- 159 с.
17. Портола В.А., Игишев В.Г., Син С.А., Овчинников А.Е. Анализ аварийности и пожароопасности угольных шахт. Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2018. – № 4. – С. 36-42.
18. Игишев В.Г., Син С.А. Современное состояние проблемы с эндогенными пожарами в шахтах Кузбасса // Уголь. – 2012. – № 7. – С. 108–110.
19. Портола В.А. Способы обнаружения и локации очагов подземных пожаров / В.А. Портола, А.А. Дружинин, В.И. Храмцов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. – № 1. – С. 103-108.
20. Бреденбрух Э. Основные вопросы предупреждения, обнаружения и борьбы с подземными пожарами в каменноугольной промышленности ФРГ. Доклад на III Международном конгрессе в г. Зальцбурге. Перевод с немецкого. Кемерово, ВостНИИ. – 1963. – 18 с.
21. Бот В. Производственные мероприятия по предупреждению рудничных пожаров. «Глюкауф». – 1962. – № 24. – С. 32-35.
22. Гофбауэр И. Борьба с подземными пожарами. Перевод с чешского. Госгортехиздат. – 1962. – 28 с.

23. Мюллер Р. Способы предотвращения пожаров от самовозгорания угля в погашенных шахтных выработках и в лавах, отрабатываемых с обрушением кровли. «Глюкауф». – 1967. – № 22. – С. 45-48.

24. Оцука К. Исследование веществ, инъецируемых на поверхность угля для предотвращения его самовозгорания. Механизм подавления самовозгорания. ВИНТИ, перевод № 36959131, 1968. – 16 с.

25. Широков А.П. Мероприятия по предупреждению пожаров на шахтах ЧССР. «Безопасность труда в промышленности». – 1961. – № 6. – с. 18-21.

26. Маевская В.М. Прогноз эндогенной пожароопасности при разработке угольных пластов. Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук. Кемерово. КузПИ. – 1970. – 46 с.

27. Белавенцев Л.П. Аэрозольная профилактика эндогенных пожаров в угольных шахтах. Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук. Кемерово. – 1988. – 47 с.

28. Бонецкий В.А. Основы пожаробезопасного ведения горных работ на базе исследований аэротермодинамики обрушенных пород и деформированного массива. Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук. Л. – 1984. – 36 с.

29. Попов В.Б. Обоснование пожаробезопасных параметров вентиляционных систем метанообильных шахт. Диссертация в виде научного доклада на соискание учёной степени доктора технических наук. Кемерово. – 2002 – 56 с.

30. Егошин В.В. Разработка рациональных технических решений для предупреждения и тушения эндогенных пожаров на шахтах Кузбасса. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук в форме научного доклада. – Новосибирск. – 1989, 43 с.

31. Портола В.А. Обоснование и разработка способов обнаружения, локации и контроля за ходом тушения очагов самовозгорания угля в шахтах.

Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук. Кемерово. – 2002. – 40 с.

32. Игишев В.Г. Управление аэротермодинамическими процессами в очагах самовозгорания угля при локализации эндогенных пожаров в угольных шахтах. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук в форме научного доклада. Кемерово. – 1989. – 39 с.

33. Агроскин А.А. Физика угля. «Недра». – 1965. – 352 с.

34. Печук И.М., Маевская В.М. Эндогенные пожары в Донецком бассейне.- М.: Углетехиздат. – 1954. – 275 с.

35. Чернов О.И., Черкасов В.С., Миронов Н.П. Критический объём самовозгорания сухих и увлажнённых углей. ФТПРПИ. 1968. – № 2. – С.48-55.

36. Чернов О.И., Белавенцев Л.П., Скрицкий В.А., Эйнер Ф.Ф. Влияние влаги на развитие самовозгорания угля. Безопасность труда в промышленности. 1982. – № 5. – С. 34-36.

37. Портола В.А. Влияние профилактического увлажнения на процесс самовозгорания угля // ФТПРПИ.- 1984.- № 3.- С. 108-110.

38. Портола В.А. Оценка влияния некоторых факторов на процесс самовозгорания угля // ФТПРПИ.- 1996.- № 3.- С. 61-68.

39. Захаров А.Б., Моисеев В.А. О пожароопасности щитовой системы разработки. Вопросы безопасности в угольной промышленности. ВостНИИ. Кемерово. – 1962. – № 2. – С.57-61.

40. Белавенцев Л.П. Применение антипирогенов в виде аэрозолей для профилактики эндогенных пожаров в шахтах. Борьба с эндогенными пожарами в шахтах.- Кемерово: книжное изд-во, 1984.-с.36-45.

41. Портола В.А. Влияние применяемых в шахтах составов на склонность угля к самовозгоранию / Портола В.А., Храмцов В.И., Ярош А.С. // Вестник КузГТУ. – 2016. – № 1. – С. – 63-67.

42. Портола В.А. Влияние антипирогенов на сорбционную активность разогретого угля / Портола В.А., Торосян Е.С. // Вестник КузГТУ. – 2016. – № 3. – С. – 15-20.

43. Портола В.А., Храмцов В.И. Влияние применяемых в шахтах составов на склонность угля к самовозгоранию. Безопасность труда в промышленности. – 2017. – № 2. – С. 56–59.

44. Руководство по применению способов торможения развития самовозгорания угля в выработанном пространстве выемочных полей шахт. – Кемерово: ВостНИИ, 1986. – 60 с.

45. Миллер Ю.А. и др. Исследование режима эжектирования воздуха в заиловочных скважинах. – в сб. Борьба с газом, внезапными выбросами и пожарами в шахтах. Т. 24. Кемерово. – 1975. – С. 183-187.

46. Егошин В.В. и др. Предупреждение и тушение пожаров на шахтах Кузбасса. Кемерово. – 1994. – 354 с.

47. Гапанович Л.Н. и др. О целесообразности применения закладки при разработке мощных угольных пластов. В кн. Разработка месторождений полезных ископаемых. «Недра». – 1965. – С. 28-32.

48. Захаров А.Б. и др. Использование средств вентиляции для предупреждения утечек воздуха на запожаренных и профилактических участках. Технология и экономика угледобычи. 1964. – № 87. – С. 18-23.

49. Игишев В.Г., Портола В.А. Оценка параметров пены, необходимых для тушения очагов самовозгорания // ФТПРПИ.- 1993.- № 4.- С. 74-78.

50. Игишев В.Г., Портола В.А. Параметры подачи пены при профилактике самовозгорания угля / /Безопасность труда в промышленности.- 1987. - № 2.- С. 31.

51. Куглер У. и др. Ликвидация пожара в шахте «Osterfeld» с применением азота. «Глюкауф». - 1975. - № 10. - С. 467-472.

52. Леман Г. Инертные газы для борьбы с подземными пожарами. «Глюкауф». - 1979. - № 8. - С. 357.

53. Шнейдерман С.Дж. Симпозиум по разработке мощных и крутых пластов. « Уорлд коул» - 1980. - т. № 11. - С.4-8.

54. Берг Х. Результаты Международной конференции по научным исследованиям в области безопасности работ в горной промышленности в Пекине. «Глюкауф». – 1989. - № ¾. - С. 4-12.

55. Бот В. и др. Ликвидация рудничных пожаров методом инертизации на шахтах, входящих в зону обслуживания Главной горноспасательной станции в Эссене, с 1974 по 1989 гг. «Глюкауф». – 1990. - № 5/6. - С . 49-52.

56. Портола В.А., Галсанов Н.Л. Расчет процесса охлаждения очага самовозгорания угля инертными составами. Вестник КузГТУ. – 2013. - № 3. - С. 58-62.

57. Галсанов Н.Л., Портола В.А. Распространение инертных составов в выработанном пространстве шахт. Вестник КузГТУ. – 2013. - № 6. - С. 80-83.

58. Портола В.А. Оценка эффективности тушения скоплений угля различными хладагентами / Портола В.А., Галсанов Н.Л. // Вестник КузГТУ. - 2014. - № 2. - С. 181-185.

59. Portola V., Galsanov N. Inert compositions for underground fire fighting in mines. Chinese Coal in the XXI Century: Mining 2014. Taishan Academic Forum – Project on Vine Disaster Prevention and Control. Mining, Green and Safety, October 17-20, 2014. Qingdao, China, Atlantis press, Amsterdam – Paris – Beijing, 2014. – P. 356-360.

60. Померанцев В.В., Шагалова С.Л., Резник В.А., Кушнаренко В.В. Самовозгорание и взрывы пыли натуральных топлив. Ленинград, «Энергия». - 1978.-144 с.

61. Портола В.А. Опасность самовозгорания угольной пыли. Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 6. – С. 36–39.

62. Портола, В.А. Влияние степени измельчения угля на самовозгорание и выделение газов. / В.А. Портола, А.А. Бобровникова, Т.Н. Старикова // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2020. Сборник материалов XVIII Международной научно-практической

конференции, 24-25 ноября 2020 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: А.А. Хорешок (отв. редактор), В.А. Колмаков [и др.]. – Кемерово, 2020.

63. Син С.А., Портола В.А. Влияние фракционного состава угля на процесс его разогрева. Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сборник трудов V Междун. науч.-практ. конф.: в 2-х т. /Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 381 с. С. 244-246.

64. Син С.А., Портола В.А., Игишев В.Г. Повышение эффективности применения азота для борьбы с самовозгоранием угля в шахтах. Уголь. – 2018. – № 5. – С. 51–57.

65. Портола В. А. Обоснование и разработка способов обнаружения, локации и контроля за ходом тушения очагов самовозгорания угля в шахтах: дис. ... д-ра техн. наук. — Кемерово, 2002. — 317 с.

66. Portola V.A. Assessment of the effect of some factors on spontaneous coal combustion. Journal of Mining Science. 1996. 32(6). P. 536-541.

67. Инструкция по определению инкубационного периода самовозгорания угля. Серия 05. Выпуск 38. – М., 2013. – 24 с.

68. Син С.А. Влияние азота на длительность самовозгорания угля. Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2020. Сборник материалов XVIII Международной научно-практической конференции, 24-25 ноября 2020 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: А.А. Хорешок (отв. редактор), В.А. Колмаков [и др.]. – Кемерово, 2020.

69. Син С.А. Компенсация активизирующего влияния угольной пыли на эндогенную пожароопасность выемочных полей / Син С. А. // Вестник Кузбасского гос. тех. унив., 2011. – № 1. – С. 26-28.

70. Игишев В.Г. , Белавенцев Л.П., Портола В.А. и др. Разработка и внедрение новых способов профилактики, локации и локализации очагов

самовозгорания угля в действующих выемочных полях шахт Кузбасса. Кузбассвуиздат. Кемерово. – 2006. – 100 с.

71. Син С.А. Под защитой азота. Деловой Кузбасс. 2011. – № 5-6. – С. 39-41.

72. Руководство по борьбе с эндогенными пожарами на шахтах Минуглепрома СССР, Донецк. ВНИИГД. – 1990. – 223 с

73. Эндогенные пожары на угольных шахтах Донбасса. Предупреждение и тушение. Инструкция. Донецк, НИИГД. – 1997. – 71 с.

74. Руководство по определению стадий развития эндогенных пожаров в шахтах. Донецк. ВНИИГД. – 1987. – 59 с.

75. Игишев В.Г., Карлов И.Д., Син С.А. Влияние примеси кислорода в азоте на выделение оксида углерода в очагах самовозгорания угля и угольной пыли. Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. – № 2. – С. 104-106.

76. Игишев В.Г., Шлапаков П.А., Хаймин С.А., Син С.А. Выделение индикаторных газов при окислении угля на стадиях самонагревания и беспламенного горения. Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2015. – № 4. – С. 55-59.

77. Син С.А. Снижение выделения опасных газов от очагов самовозгорания угля. В сборнике: Экологические проблемы промышленно развитых и ресурсодобывающих регионов: пути и решения. Сборник трудов II Всероссийской молодежной научно-практической конференции. - 2017. - С. 123.

78. Демидов П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П.. Горение и свойства горючих веществ. М. «Химия». – 1981,-272 с.

79. Пашковский П.С., Греков С.П., Зинченко И.Н.. Актуальные вопросы борьбы с самовозгоранием угля. Донецк. – 2012. – 655 с.

80. Сулла М.Б.. Соколов Э.М., Горб В.Ю. Поглощение азота углем и породами, - В кн.: Поглощение инертных газов в горных выработках. Тула-Донецк. – 1969. – С. 68-100.

81. Бессолицина Г.Г., Денисенко В.Е. Влияние влаги на процессы окисления угля.- Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. М. 1971. – № 7. – С.25-27
82. Неницеску К. Общая химия.- М.: Мир. – 1968. – 816 с.
83. Эттингер И.Л. Газоёмкость ископаемых углей.- М.: Недра. – 1966. – 223 с.
84. Мак-Бен Дж.В. Сорбция газов и паров твёрдыми телами.- М.-Л.: Гостеххимиздат. – 1934. – 397 с.
85. Денисов Е.Т. Кинетика гомогенных химических реакций. М.: Высшая школа. – 1978. – 367 с.
86. Красовицкая Т.И. Электронные структуры атомов и химическая связь.-М.: Просвещение. – 1980 – 224 с.
87. Хавова В.И., Аксёнова Э.М. Поглощение кислорода сухим и увлажнённым углем, предварительно насыщенным метаном.-Вопросы безопасности в угольных шахтах. Сб. научн. Трудов ВостНИИ. 1966. – т. 7. – С.146-152.
88. Краткий справочник химика.-М.-Л.: Химия. – 1964. – 620 с.
89. Инструкция по применению схем проветривания выемочных участков шахт с изолированным отводом метана из выработанного пространства с помощью газоотсасывающих установок. М., 2012, ЗАО НТЦ ПБ, 128 с. серия 05, выпуск 21.
90. Турбулентность, принципы и применение/Под ред. У.Фроста, Т. Моулдена.- М.: Мир. – 1980. – 536 с
91. Пучков Л.А. Аэродинамика подземных выработанных пространств.- М.: Изд-во Московского госуд. горного университета. – 1993. – 267 с.
92. Горбатов В.А., Игишев В.Г., Попов В.Б. и др. Защита угольных шахт от самовозгорания угля. Кемерово. Кузбассвуиздат. – 2001. – 132 с.
93. Самарский А.А. Теория разностных схем.- М.: Наука, 1977.- 656 с.

94. Саульев В.К. Интегрирование уравнений параболического типа методом сеток.- М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1960.- 324 с.
95. Годунов С.К., Рябенский В.С. Разностные схемы.- М.: Наука, 1977.- 439 с.
96. Берковский Б.М., Ноготов Е.Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена.- Минск: Наука и техника, 1976.- 144 с.
97. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М. «Гостехиздат». – 1947. – 244 с.
98. Син С.А. Математическое моделирование процесса самовозгорания угля. Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: Материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. [Электронный ресурс] / Под ред.: К. С. Костикова. – Кемерово : КузГТУ, 2021.
98. Кабанова Р.И., Петрушов Е.Н. Способы получения азота для борьбы с авариями в шахтах. Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: Материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. [Электронный ресурс] / Под ред.: К. С. Костикова. – Кемерово : КузГТУ, 2021.
99. Син С.А. Применение азота в практике борьбы с самовозгоранием угля в шахтах Кузбасса. Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2009. – № 1. – С. 93-96.
100. Портола В.А., Син С.А., Полуэктов А.А. Использование воздухоразделительных установок для борьбы с авариями в шахтах. Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах : Материалы VIII Межд. научно-практ. конф. (Том 1). Кемерово, 12 нояб. 2009г. /отв. Ред. В.Ю.Блюменштейн; Кузбас. гос. техн. ун-т, -Кемерово, 2009,-275 с. - С. 90-92
101. Син С.А. Защита выемочных полей шахт Кузбасса от самовозгорания угля способом инертизации выработанных пространств // Уголь. – 2010. – № 6. – С. 16–19.

102. Син С.А., Портола В.А., Игишев В.Г. Повышение безопасности и эффективности использования азота для борьбы с самовозгоранием угля в выработанном пространстве шахт. Уголь. – 2019. – № 2. – С. 11–14.

103. Патент № 2406825 от 18.05.2009. Оpubл. 20.12.2010. Бюл. № 35. Способ предупреждения эндогенных пожаров в выработанном пространстве действующих очистных забоев. Син С.А.

104. Портола В.А., Син С.А. Профилактика и тушение эндогенных пожаров на шахтах Кузбасса. Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сб. трудов IV Междун. науч.-практ. конф. с элементами научной школы для молодых ученых: в 2-х т./ Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 654 с. (с. 471-473).

105. Син С.А., Игишев В.Г., Портола В.А. Влияние азота на процесс самовозгорания угля. Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: Материалы X Междунар. науч. практ. конф. Кемерово, 28-29 нояб. 2013 г. / Отв. ред. В.Ю. Блюменштейн; зам. отв. ред. Л.А. Шевченко; КузГТУ. – Кемерово, 2013. С.77-79.

106. 66. Руководство по применению инертных газов при ликвидации пожаров в шахтах. Донецк. ВНИИГД. – 1989. – 190 с.

107. Игишев В.Г. О предупреждении и тушении эндогенных пожаров пеной. «Уголь». – 1977. – № 3. – с. 60-63.

108. Уилкинсон У.И. Неньютоновские жидкости. М. «Мир». – 1964. – 216 с.

109. Горбатов В.А., Игишев В.Г., Попов В.Б. и др. Технологические схемы профилактики, локализации и тушения эндогенных пожаров в угольных шахтах. Кемерово. Кузбассвуиздат.- 2002. –180 с.

110. Син С.А. Профилактика самовозгорания угля воздуходелительными установками. В сборнике: Экологические проблемы промышленно развитых и ресурсодобывающих регионов: пути и решения. Сборник трудов III Всероссийской молодежной научно-

практической конференции. Под редакцией С.Г. Костюк. 2018. С. 217.1-217.4.

111. Портола В.А. Обнаружение, локация и контроль за эндогенными пожарами с поверхности // Уголь.- 1998.-№ 6.- С. 48-50.

112. Портола В.А. Параметры газовых аномалий над подземными источниками газовыделений // Безопасность труда в промышленности.- 1996.- № 3.- С. 31-33.

113. Портола В.А. Методы контроля за состояние очагов подземных пожаров // Безопасность труда в промышленности.- 1998.- № 9.- С. 26-27.

114. Portola V.A. Gas anomalies above underground gas sources. Journal of Mining Science. 1996. 32(3). P. 212-218.

115. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. М., Недра. – 1981. – 288 с.

116. Козлюк А.И., Хорольский В.Т., Кушнарёв А.М., Лебедев В.И.. Ликвидация пожаров на шахтах «Инноминада» и «Опортуна». Безопасность труда в промышленности. – 1980. - № 3. - С. 14-16.

117. Игишев В.Г., Син С.А., Карлов И.Д. Профилактика самовозгорания угольной пыли с применением твердого аэрогеля. Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2013. – № 2. – С. 85-87.

118. Портола В.А., Бобровникова А.А., Син С.А., Игишев В.Г. Особенности выделения индикаторных пожарных газов при подаче азота в очаг самовозгорания угля// Безопасность труда в промышленности. — 2022. — № 4. — С. 47–52. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-4-47-52

119. Портола В.А., Син С.А. Технологические схемы профилактики самовозгорания угля в выработанном пространстве. В сборнике: Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2022. Сборник материалов XIX Международной научно-практической конференции. Редколлегия: А.А. Хорешок (отв. редактор), А.И. Фомин [и др.]. Кемерово, 2022. С. 110.1-110.4.

