

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

Син Сергей Александрович

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

Специальность 2.10.3 Безопасность труда
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Кемерово – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева».

Адрес: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор, В.А. Портола, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

кандидат технических наук

Ведущая организация: Федеральное государственное казенное учреждение "Национальный горноспасательный центр МЧС России»

Защита состоится «___» _____ 2024 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС»

по адресу: г. Москва, Ленинский проспект, 6, стр. 2, ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и на сайте

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,
кандидат технических наук

Перфильева Е.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Высокая потребность в угле приводит к увеличению его добычи в России, достигшей 440 млн. т в 2018 г. При этом значительно возрастает долевое участие Кузбасса в планируемом приросте добычи угля. По итогам 2019 года в бассейне добыто 250 миллионов 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 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 влажностью 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. Найден 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, обрабатывающим 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Процесс самовозгорания угля зависит физико-химических свойств самого полезного ископаемого, а также от условий теплообмена и параметров окружающей среды. Учитывая опасность эндогенных пожаров для угольных шахт, изучением особенностей процесса самовозгорания и разработкой способов предотвращения и ликвидации таких аварий занимались видные отечественные ученые. Существенный вклад в развитие теории и практики борьбы с эндогенными пожарами в шахтах внесли А.А. Скочинский, В.М. Огиевский, П.А. Манукян, И.М. Печук, В.С. Веселовский, Л.Н. Быков, М.Д. Бузиков, А.Б. Захаров, Г.Л. Стадников, М.П. Зборщик, Е.И. Глужберг, С.П. Кузьминский, П.С. Пашковский, В.И. Саранчук и др.

Особенно много эндогенных пожаров возникало на шахтах Кузбасса, где добыча угля осуществлялась в сложных горно-геологических условиях. Исследованием процесса самовозгорания угля, разработкой новых способов предупреждения, обнаружения и подавления очагов занимались Л.П. Белавенцев, В.А. Бонецкий, А.С. Голик, В.В. Егошин, В.Г. Игишев, В.С. Лудзиш, В.М. Маевская, Ю.А. Миллер, Д.Ю. Палеев, В.Б. Попов, В.А. Портола, О.И. Чернов, и др. Внедрение результатов исследований привело к снижению количества эндогенных пожаров в шахтах.

Применение новой угледобывающей техники, технологии и изменение условий добычи угля вызвало увеличение объемов выработанного пространства, что снизило эффективность применяемых способов борьбы с самовозгоранием угля. Одним из перспективных направлений предупреждения и подавления эндогенных пожаров в шахтах является применение инертных газов. Наиболее распространенным инертным газом является азот, способный заполнять большие объемы выработанного пространства и снижать концентрацию кислорода до безопасных значений. Однако получаемый азот содержит примеси кислорода, поэтому необходимо исследовать влияние азота с различным содержанием кислорода на развитие процесса самовозгорания, а также на выделение пожарных газов.

Исследования влияния обработки азотом на сорбционные свойства угля проводились в условиях низкотемпературного окисления угля марки Д с использованием методики В.С. Веселовского. За показатель химической активности угля принималась константа скорости сорбции кислорода, определяемая по уравнению:

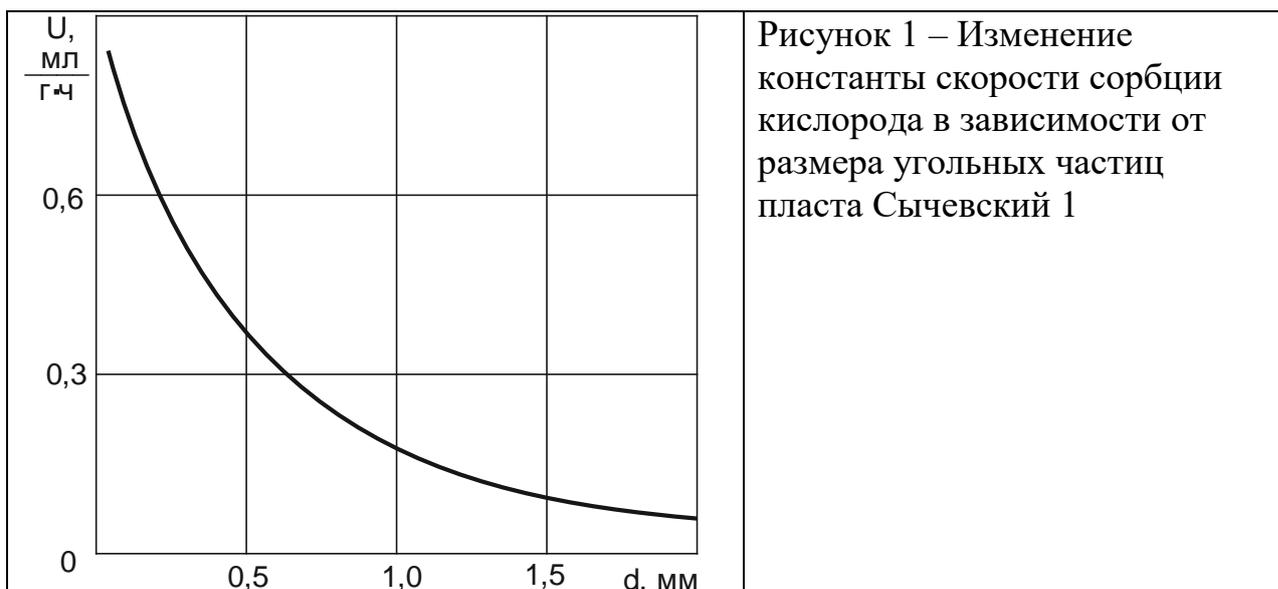
$$U = -\frac{V}{H \cdot \tau} \cdot \ln \frac{(100 - C_0)C_a}{C_0(100 - C_a)}, \text{ см}^3/(\text{Г} \cdot \text{ч}), \quad (1)$$

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

В ряде случаев более иллюстративной является оценка удельной сорбции кислорода, определяемой по уравнению:

$$M = V(C_0 - C_a)/H, \text{ см}^3/\text{Г}, \quad (2)$$

Изменение константы скорости сорбции кислорода, полученной через 24 часа, в зависимости от размера частиц приведено на рис. 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. Поэтому вероятность самовозгорания угольной пыли резко увеличивается.

Для изучения влияния азота на химическую активность угля исследовалась сорбция кислорода естественного угля и угля, обработанного азотом и дистиллированной водой. Результаты исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние азота на константу скорости сорбции угля

Время от начала сорбции, τ, ч.	Вид обработки		
	необработанный	азотом	дистиллированной водой
	U, см ³ /(г·ч)	U, см ³ /(г·ч)	U, см ³ /(г·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

Из результатов исследований видно, что удельная скорость сорбции кислорода углем, обработанным газообразным азотом, выше, чем у необработанного. Активирующее влияние азота на уголь можно объяснить тем, что подаваемый азот не содержит влаги. Поэтому его подача приводит к интенсивному испарению жидкости, находящейся в угле, а 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 распыление воды в подаваемый азот, что приведет к ее испарению и насыщению газа водяным паром.

Для предотвращения испарения содержащейся в угле воды необходимо в сухой азот подать количество воды, определяемое по выражению

$$D \geq 0,622 \frac{P_1 e^{-L/(RT)}}{P_0 - P_1 e^{-L/(RT)}} \quad (3)$$

где D – влагосодержание газа, кг/кг. P_0 – барометрическое давление воздуха, Па; P_1 – постоянная, Па; L – удельная теплота парообразования, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – термодинамическая температура, К.

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.

Для оценки воздействия увлажненного азота на уголь была проведена третья серия экспериментов. Пробы не окисленного и предварительно прогретого угля обрабатывались насыщенным влагой азотом в количестве 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. 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.

На рис. 2 показано изменение длительности инкубационного периода самовозгорания угля в зависимости от концентрации кислорода в рудничной атмосфере. 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.

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 уголь марки Д подвергался термической обработке до температуры 613 К, а после охлаждения помещался в сорбционный сосуд.

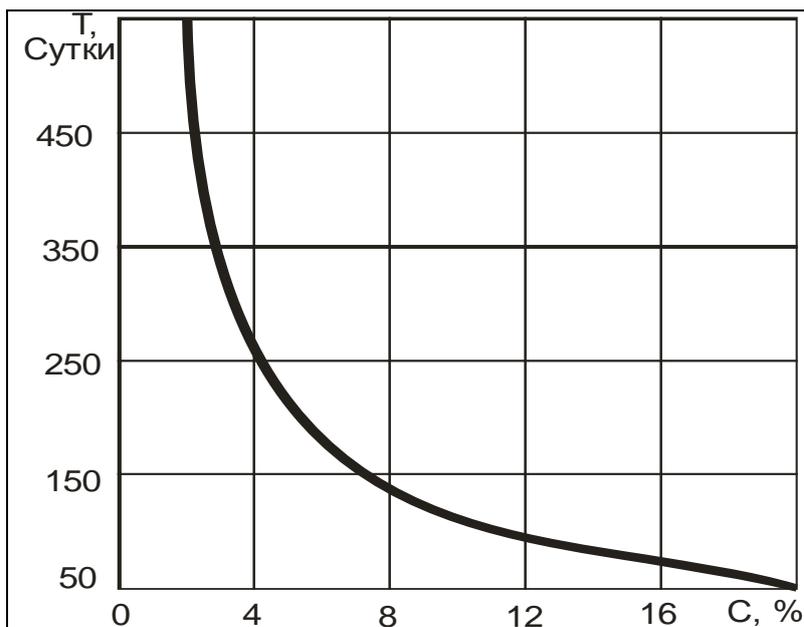


Рисунок 2 – Изменение инкубационного периода самовозгорания угля в зависимости от концентрации кислорода в окружающем газе

Результаты исследований изменения удельной сорбции кислорода углем после охлаждения во времени представлены на рис. 3.

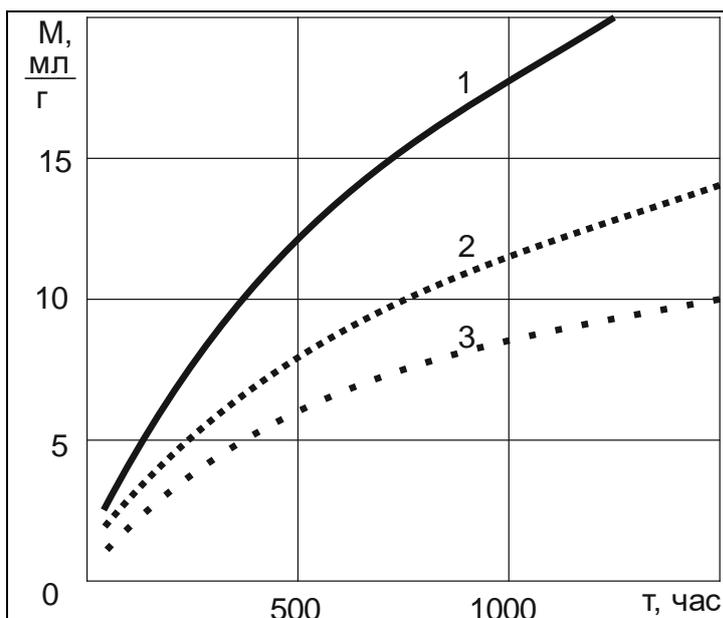


Рисунок 3 – Изменение удельной сорбции кислорода углем марки КЖ после охлаждения (разогрев до температуры 613 К):
1 – обработанный водой;
2 – необработанный;
3 – обработанный азотом

Приведённые результаты показывают, что прогрев угля существенно увеличивает сорбционную активность угля по отношению к кислороду. Через сутки константа скорости сорбции кислорода прогретого угля была в 1,66 раз больше, чем у не прогретого угля. Однако затем произошло быстрое снижение сорбционной активности предварительно прогретого угля. Обработка азотом угля, предварительно разогретого до температуры 340 °С, снижает его химическую активность в 1,2 – 1,5 раза. Несовпадение воздействия азота с результатами в первой серии экспериментов можно объяснить следующим образом. Так, прогретый уголь не содержит влаги, поэтому подача сухого азота не изменяет площадь свободной поверхности

его пор. При обработке часть азота остается в порах угля, что затрудняет проникновение кислорода к активным центрам.

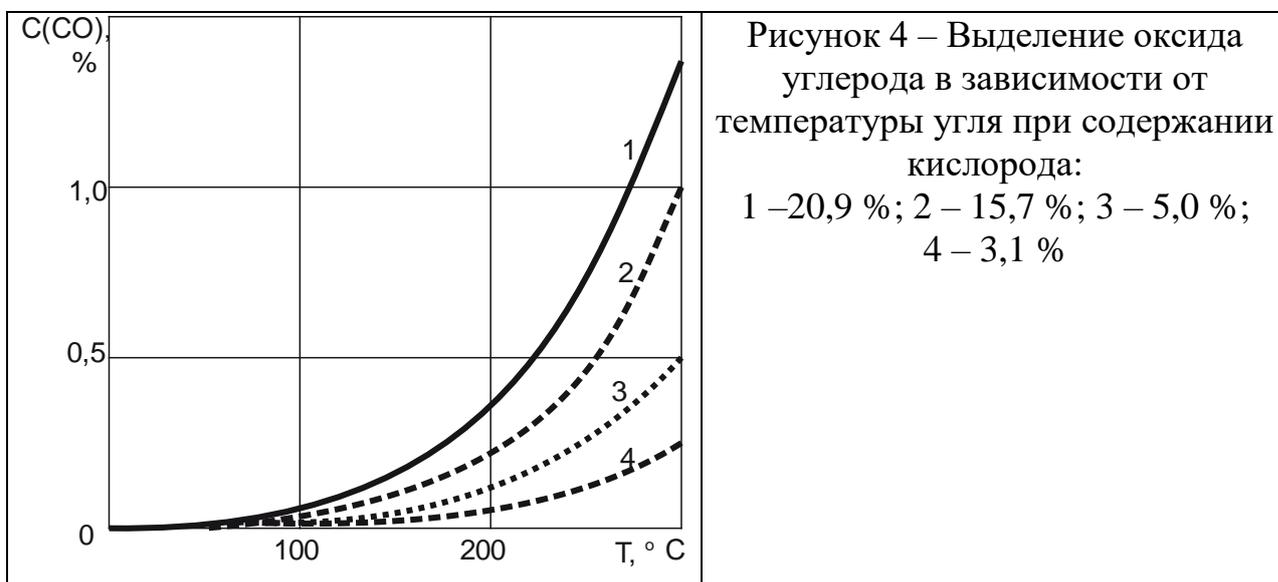
Дистиллированная вода проявляет активизирующее действие на предварительно разогретый уголь, увеличивая его сорбционную активность в 1,3 – 2,4 раза. Объяснить такое изменение свойств угля можно механическим действием воды. Так, охлаждающее действие воды на разогретый уголь приводит к его интенсивному 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.

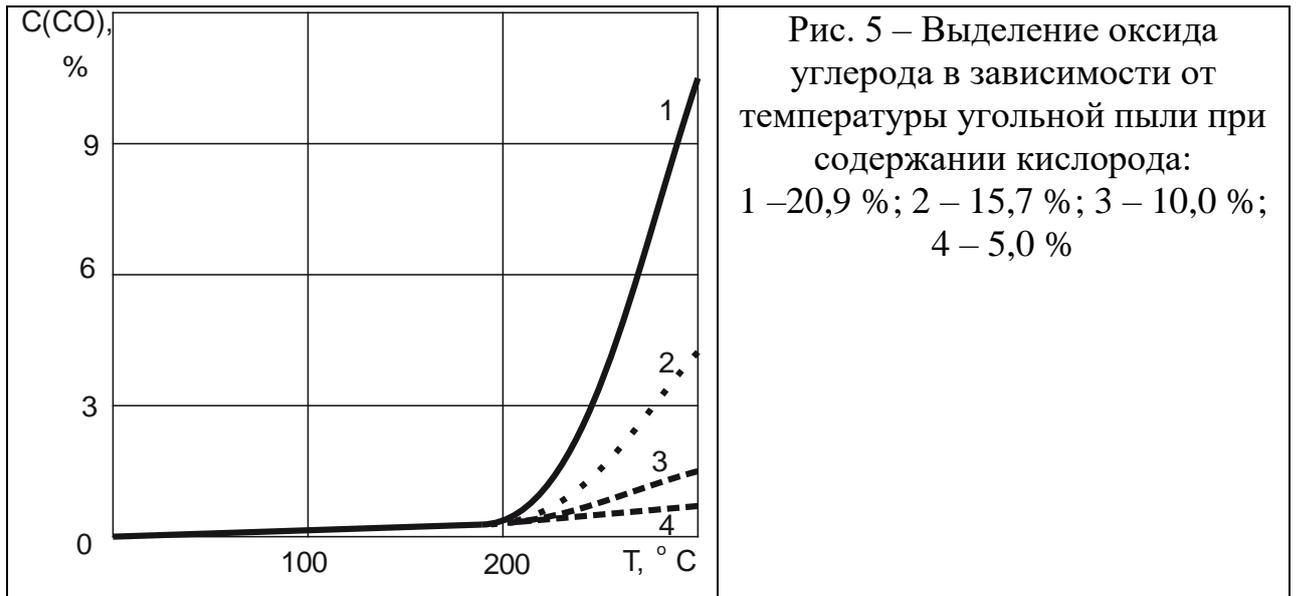
Таким образом, проведенными исследованиями установлено, что обработка сухим азотом снижает сорбционную активность по отношению к кислороду прогретого угля в 1,2-1,5 раза, но увеличивает активность свежееобнаженного угля за счет испарения влаги, а увлажненный азот уменьшает его активность в 1,2 – 1,6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

Газоаналитический метод заложен в нормативной основе обнаружения и контроля за ходом тушения эндогенных пожаров. Основными индикаторными газами являются оксид углерода и водород. Однако подача азота в очаг самовозгорания может существенно изменить выделение пожарных из-за снижения концентрации кислорода.

Исследования выделения пожарных газов проведены в условиях нагрева пробы угля марки Д (фракция 1-3 мм) и угольной пыли (фракция 0,2-0,4 мм) в интервале температур 293 – 673 К.

Для исследования использовались составы с содержанием кислорода 20,9 %, 18,7 %, 15,7 %, 12,0 %, 10,0 %, 5,0 % и 3,1 %. Результаты исследований выделения оксида углерода в зависимости от температуры угля при различном содержании кислорода в продуваемом газе, приведены на рис. 4, а из угольной пыли на рис.5.

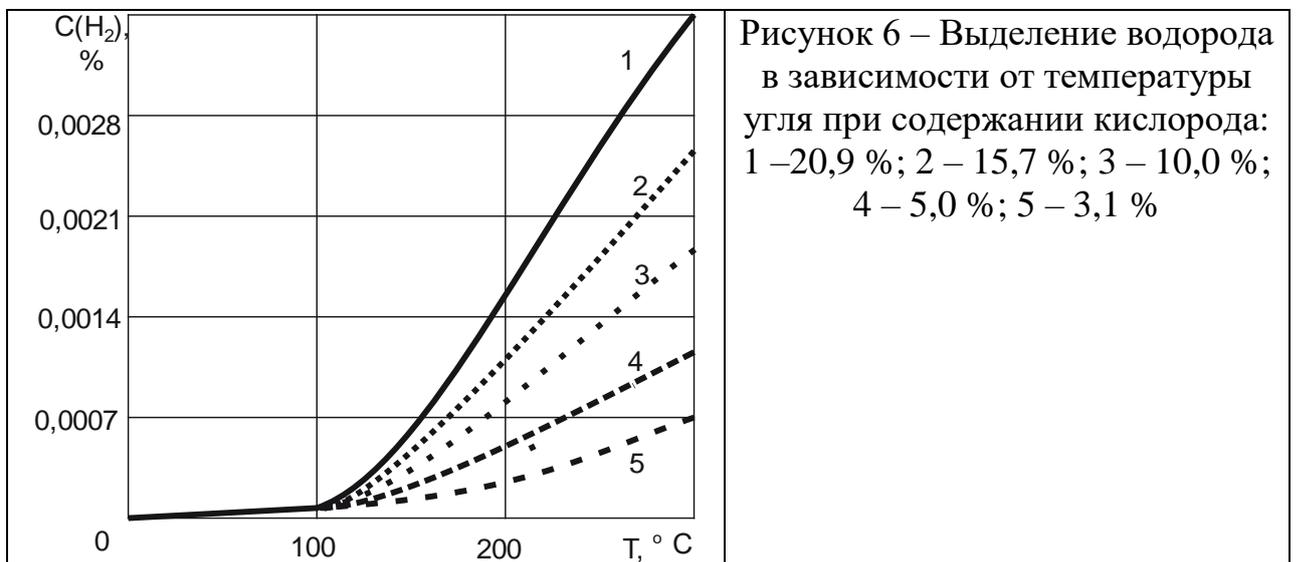


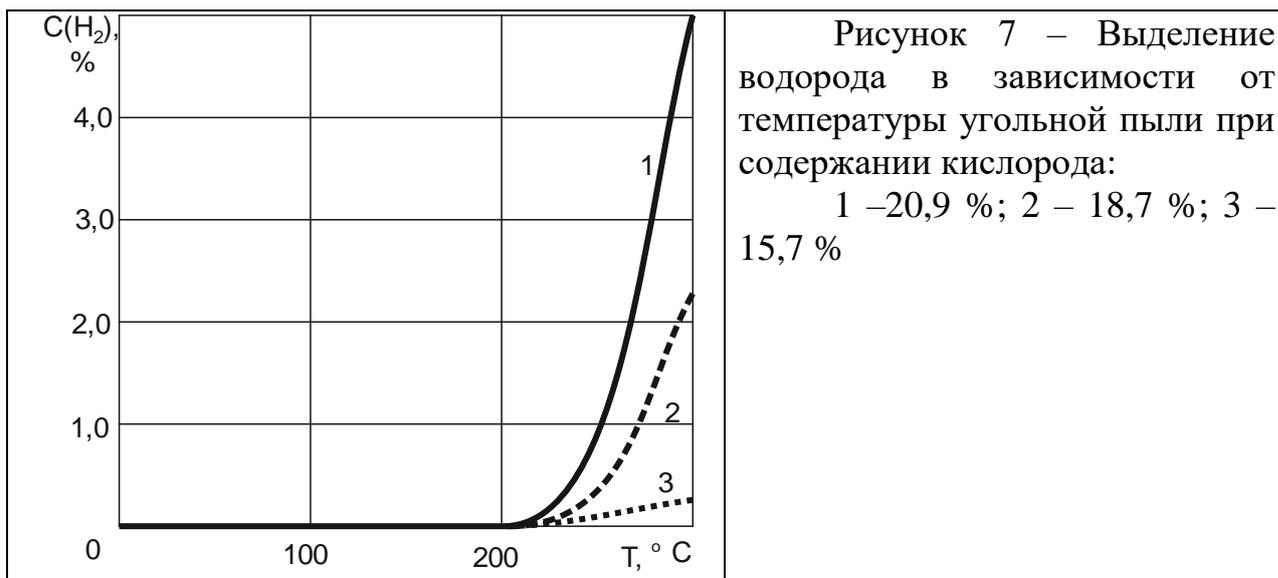


Анализ полученных данных показывает, что с ростом температуры происходит увеличение концентрации выделяемого оксида углерода из угля и угольной пыли для всех исследуемых газовых смесей. Причем выделение оксида углерода из угольной пыли идет значительно интенсивней, чем из угля. Так, если содержание оксида углерода при продувке атмосферным воздухом нагретого до 300 °С угля составляло 1,4 %, то из нагретой до аналогичной температуры угольной пыли его концентрация достигла 10,5 %.

Изменение содержания кислорода в поступающем газе в разогретый уголь также существенно влияет на концентрации выделяемого оксида углерода, что необходимо учитывать при контроле состояния очага самовозгорания в процессе применения азота для инертнизации рудничной атмосферы. С падением примеси кислорода в азоте снижается концентрация оксида углерода. Причем чем выше температура угля, тем сильнее влияние концентрации кислорода на выделение оксида углерода.

Изменение содержания водорода в исходящем из нагреваемого угля и угольной пыли газе приведено на рис. 6 и 7.

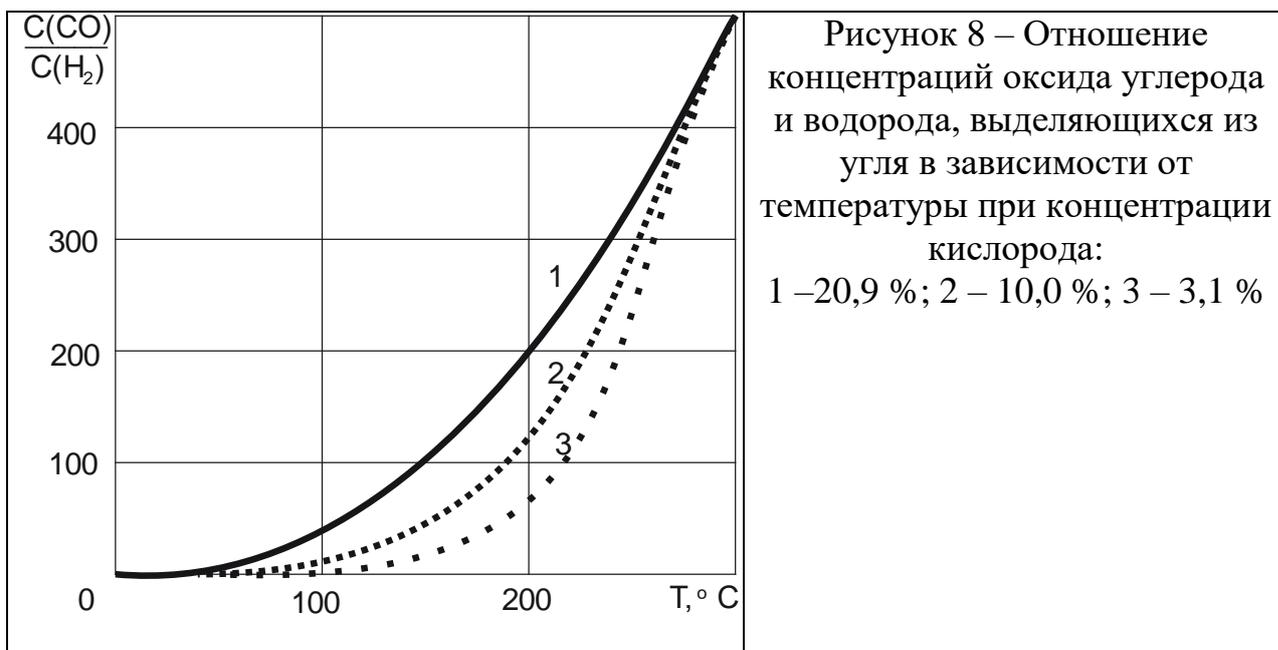




Приведенные на рис. 6 и 7 данные показывают, что существенный рост концентрации водорода начинается при температуре угля более 100 °С, а из угольной пыли при нагреве более 200 °С. Из угля данной марки выделяется сравнительно мало водорода, концентрация которого достигает 0,0035 % при нагреве пробы до 300 °С. Интенсивность выделения водорода из угольной пыли значительно больше, и при сопоставимой температуре концентрация водорода достигает 5 %. Так, при температуре 300 °С концентрация водорода, выделившейся из угольной пыли, возрастает более чем в тысячу раз по сравнению с углем.

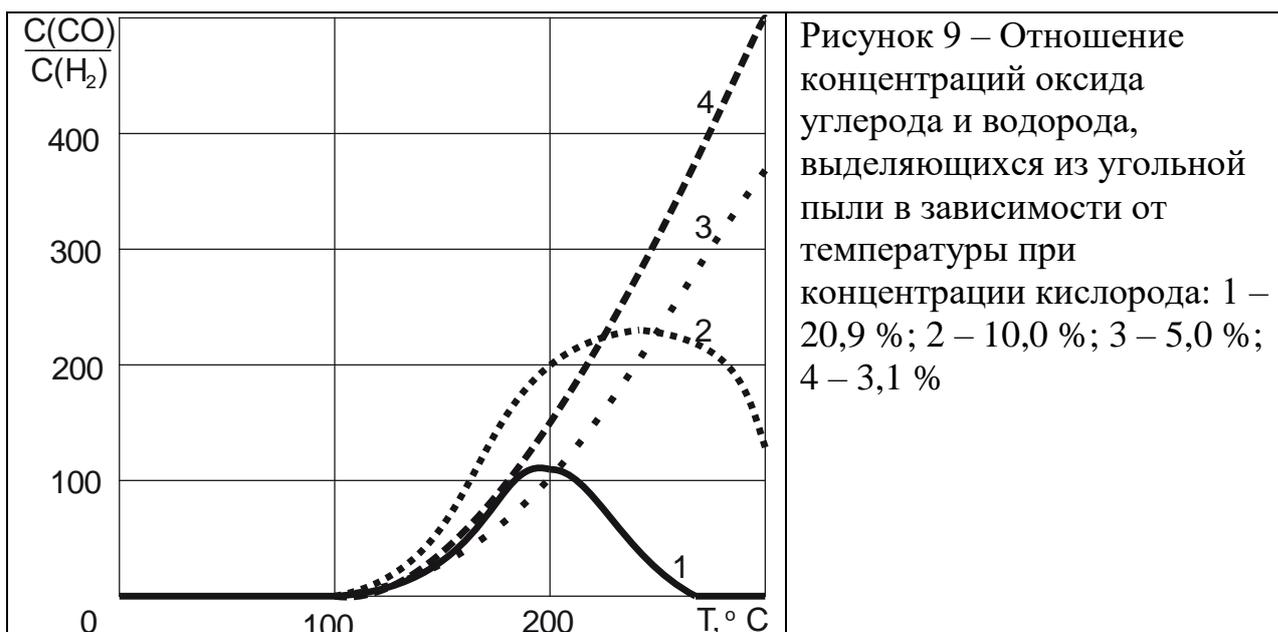
Снижение концентрации кислорода в азоте, подаваемом в разогретый уголь и угольную пыль, существенно уменьшает выделение водорода. Так, из угля при концентрации кислорода 3,1 % при температуре 300 °С выделяется такое же количество водорода, как из угля при температуре 150 °С, продуваемом атмосферным воздухом. Снижение концентрации кислорода в рудничной атмосфере только на 2 процента приводит к уменьшению выделения водорода из угольной пыли в два раза.

Учитывая существенное влияние примеси кислорода на выделение индикаторных газов из нагреваемых угля и угольной пыли, на практике могут возникать трудности идентификации и оценки температуры очагов самовозгорания скоплений, возникающих в выработанном пространстве. Поэтому было исследовано, как изменяется соотношение оксида углерода и водорода при нагреве угля и угольной пыли в газовой среде с различной концентрацией кислорода. Изменение величины отношения оксида углерода к водороду в зависимости от температуры навески угля приведено на рис. 8.



По данным исследований можно сделать вывод, что использование показателя в виде соотношения концентраций оксида углерода и водорода ($\text{CO}:\text{H}_2$) существенно улучшает эффективность контроля температуры очага самовозгорания угля. При температуре около 300 °С этот показатель практически одинаков и не зависит от изменения концентрации кислорода (от 3 до 21 %) в подаваемом в очаг газе. Однако при меньших температурах (100-200 °С) концентрация кислорода сказывается на величине этого показателя, что может привести к ошибке в оценке температуры очага самовозгорания.

Изменение величины отношения оксида углерода к водороду в зависимости от температуры навески угольной пыли приведено на рис. 9.



Анализируя приведенные данные можно сделать вывод о существенном влиянии содержания 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 300 °С, и это отношение незначительно отличается от пробы нагреваемого угля.

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 на уровне 10 % приводит к падению соотношения оксида углерода и водорода. В случае падения содержания 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.

Таким образом, проведенными исследованиями установлено, что 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 как критерий для контроля состояния очагов самовозгорания.

Исследование влияния примеси кислорода в азоте на процесс самовозгорания угля осуществлялось методом математического моделирования. Система уравнений, описывающих одномерное фильтрационное движение газа в угольной насыпке с учетом процесса ее самонагрева, запишется в виде:

$$\frac{\partial(\gamma\rho)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\gamma\rho V) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\gamma\rho V)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\gamma(\rho V^2 + p)) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial V}{\partial x}\right) - \left(\frac{\mu}{a} + \frac{C_2\rho}{2}|V|\right) \cdot V \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\gamma\rho_B Y_0)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\gamma\rho_B Y_0 V) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\gamma\rho_B D \frac{\partial Y_0}{\partial x}\right) - \gamma\rho_B u_0 \rho_Y \cdot X_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (6)$$

$$(\gamma\rho_B c_B + (1-\gamma)\rho_V c_V) \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}((\rho_B c_B T + p)V) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x}\right) + u_0 \rho_Y Q \cdot X_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (7)$$

$$p = \rho \cdot RT \quad (8)$$

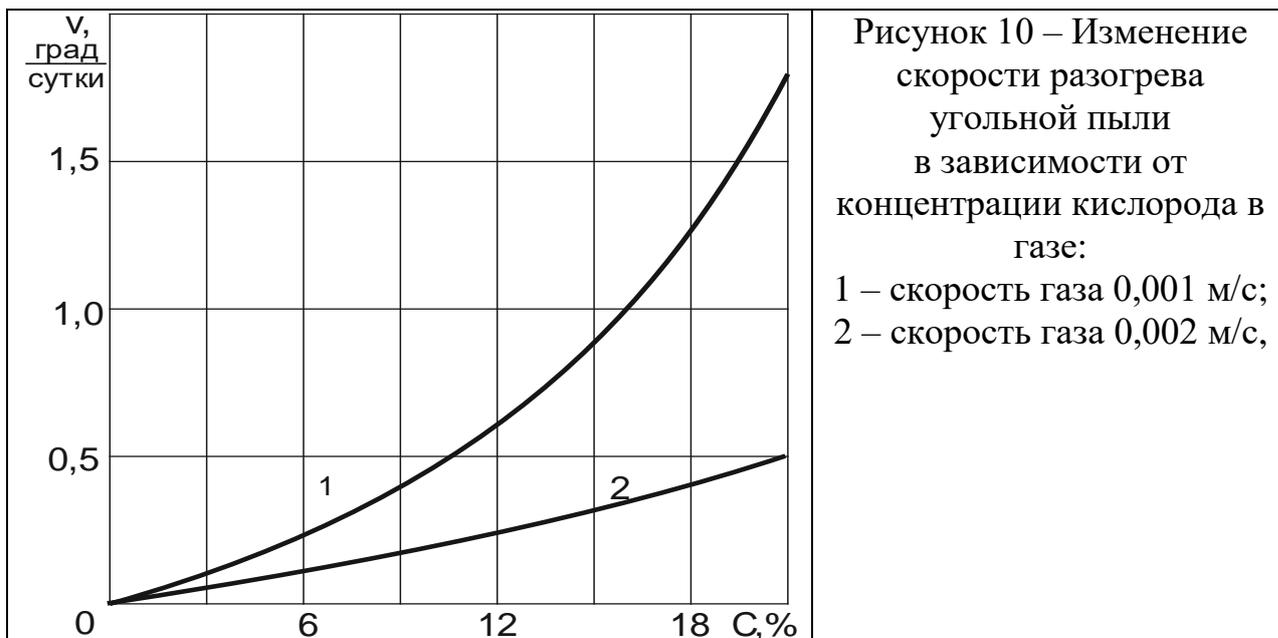
$$\text{при } t=0 \text{ и } x>0: \quad \rho = \rho_B, \quad V=V_0, \quad Y_0 = Y_0, \quad T=T_0. \quad (9)$$

$$\text{при } x=0 \text{ и } t>0: \quad \rho = \rho_B, \quad V=V_0, \quad Y_0 = Y_0, \quad T=T_0. \quad (10)$$

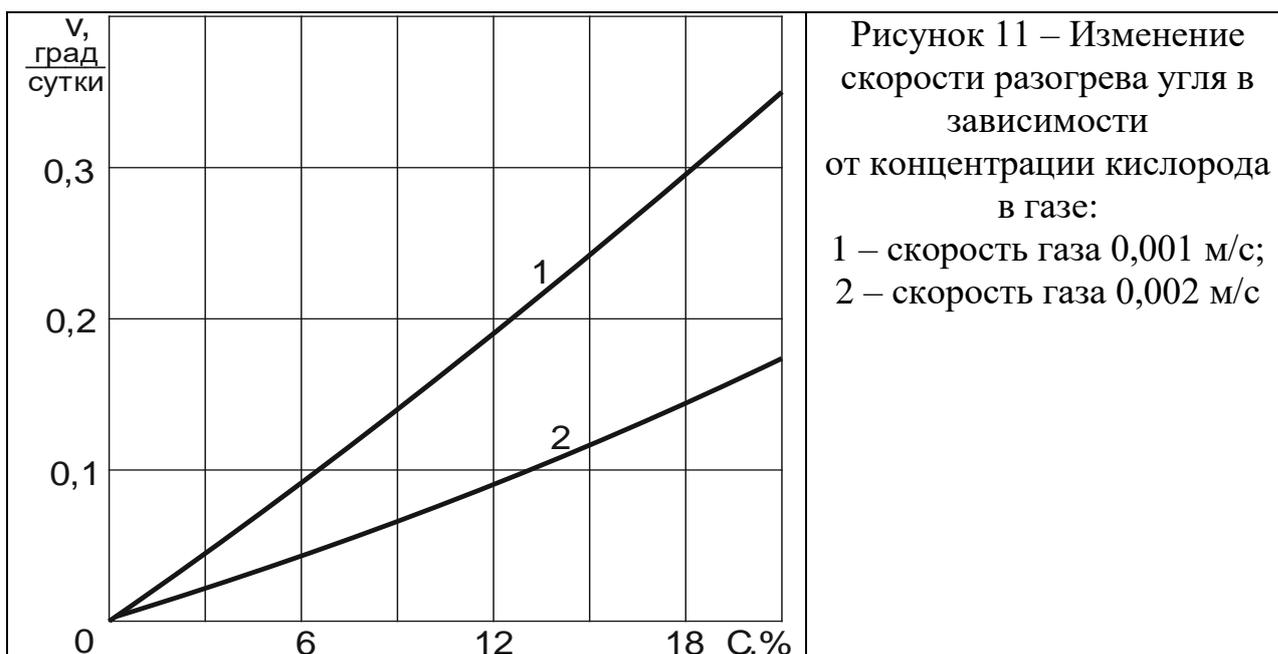
$$\text{при } t>0: \quad \frac{\partial Y_0}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0, \quad \frac{\partial \rho}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0. \quad (11)$$

Начальная температура угля и пыли равнялась 285 К. Энергия активации 30000 Дж/моль. 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 $12,5 \text{ МДж/м}^3$. Изменение скорости разогрева угольной пыли в зависимости от концентрации кислорода в фильтрующемся газе при скоростях газа 0,001 и 0,002 м/с приведено на рис. 10. Из результатов решения уравнений следует, что с увеличением концентрации кислорода в газе скорость разогрева угольного скопления возрастает.



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. 11.



Сравнение полученных результатов показало, что увеличение скорости газа с 0,001 м/с до 0,002 м/с замедляет разогрев скопления угля и угольной пыли из-за увеличения выноса генерируемого тепла потоком газа. 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). Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что предотвратить возникновение очагов самовозгорания можно не только снижением концентрации кислорода, но и увеличением скорости фильтрации газа через угольное скопление.

Приведённые 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:

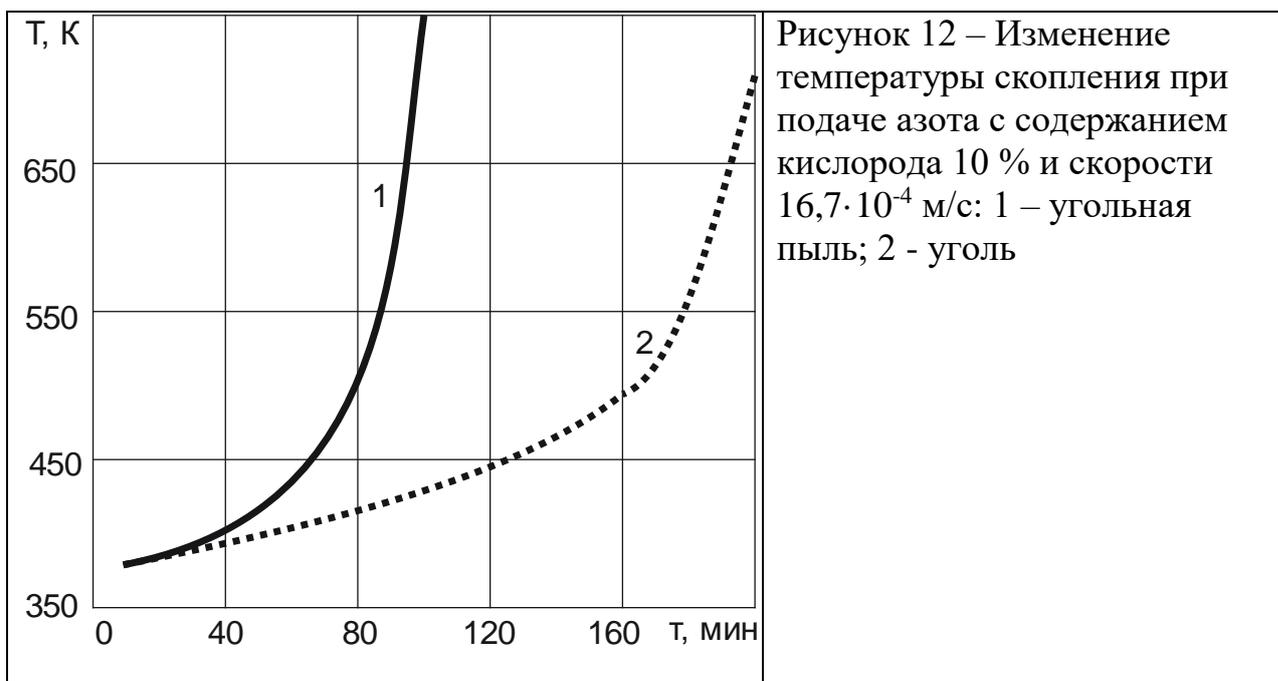
- угольная пыль с размером частиц до тысячи микрон обладает высокой химической активностью и является катализатором самовозгорания как однородных скоплений, так и скоплений с различным фракционным составом;

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

- 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.

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 см³/(г·ч), а после подачи насыщенного влагой азота составила 0,0426 см³/(г·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.

Также проведено моделирование поведения очага самовозгорания при подаче азота с примесью кислорода. Начальная температура очага самовозгорания равна 383 К, а длина 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 10⁻⁴ до 41,7 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 и угольной пыли с очагом самовозгорания под действие подачи азота со скоростью 16,7·10⁻⁴ м/с приведены на рис. 12. Концентрация кислорода в азоте равнялась 10 %.



Анализ полученных данных показывает, что подача азота с таким содержанием кислорода и скоростью не способна охладить очаг самовозгорания. Температура угля и угольной пыли продолжает увеличиваться. Причем интенсивность нагрева угольной пыли выше, чем угля.

На следующем этапе моделировалась подача в очаги самовозгорания угля и угольной пыли азота с примесью кислорода 3,0 %. Скорость подачи азота была увеличена до $41,7 \cdot 10^{-4}$ м/с. Изменение температуры скопления угля и угольной пыли при таких параметрах азота приведены на рис. 13.

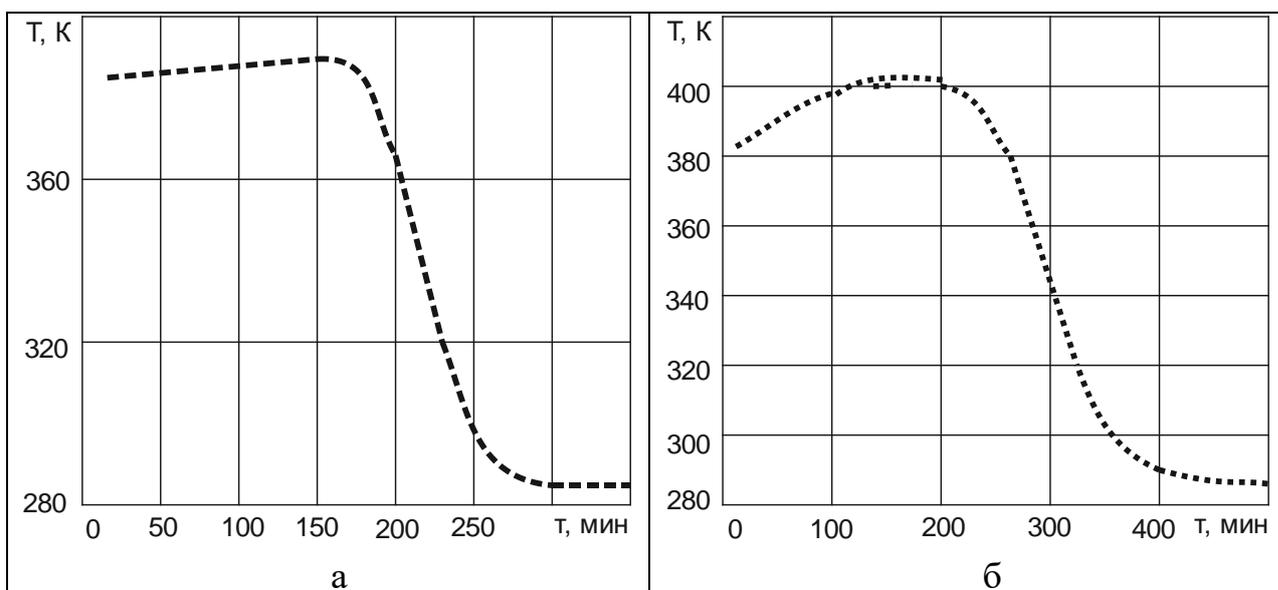


Рисунок 13 – Изменение температуры очага при подаче азота с содержанием кислорода 3 % и скорости $41,7 \cdot 10^{-4}$ м/с: а – скопление угля; б – угольная пыль

Из представленных результатов моделирования 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. Очаг самовозгорания, возникший в угольной пыли, охладить сложнее, чем в скоплении угля. Моделирование показало, что скопление угольной пыли 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 %.

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.

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 приводит к остыванию очага при концентрации примеси кислорода около 3 %.

Таким образом, проведенными исследованиями установлено, что предотвращения развития процесса самовозгорания угля и угольной пыли на любой стадии развития можно добиться снижением содержания кислорода в подаваемой смеси 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. Оптимальные значения определяющих параметров могут быть установлены на основе разработанной модели.

На основе полученных результатов разработаны и внедрены на шахтах Кузбасса технологические схемы профилактики и подавления самовозгорания угля способом инертнизации выработанных пространств в условиях применения комбинированной схемы проветривания очистных забоев. Подача азота в выработанное пространство может осуществляться с поверхности или из горных выработок.

Снизить вынос азота в действующие выработки позволяет схема инертнизации атмосферы выработанного пространства действующего участка, приведенная на рис. 14. Схема включает скважину для подачи азота, а для снижения выноса азота в действующие выработки бурят дополнительную скважину с целью отвода газовой смеси вентиляционной установкой, что снижает вынос метана в действующие выработки и уменьшается количество кислорода, попадающее в выработанное пространство с утечками воздуха.

Разработанные рекомендации по режимам подачи азота были апробированы на ОАО «Шахта Полысаевская» при ликвидации очага самовозгорания. Опыт применения показал, что полученные расчетные зависимости дают адекватные результаты и с другими марками угля.

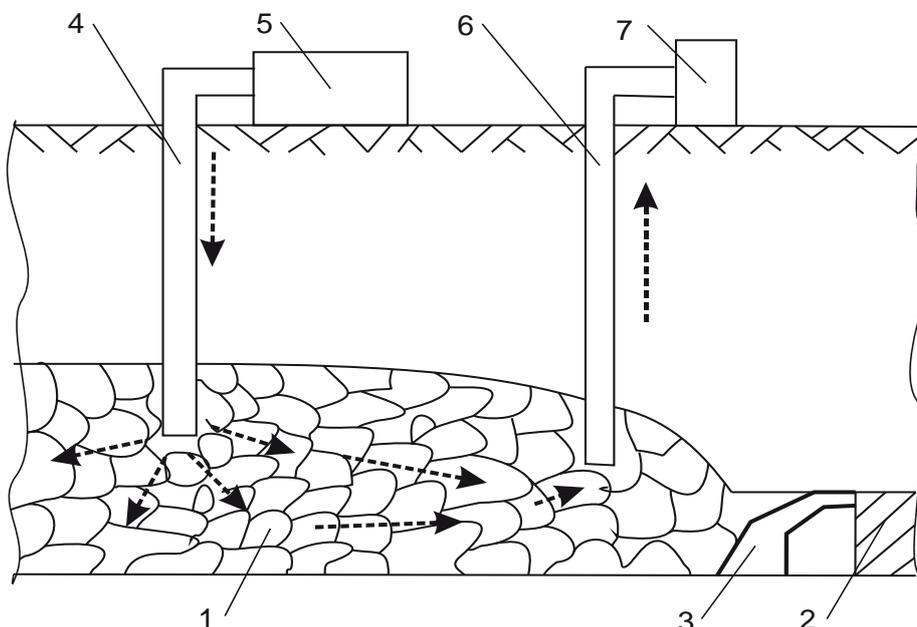


Рисунок 14 – Схема подачи азота в выработанное пространство действующего участка: 1 – выработанное пространство; 2 – отработываемый угольный пласт; 3 – угледобывающий комплекс; 4 – скважина для подачи азота; 5 – установка подачи азота; 6 – скважина для отвода газовой смеси; 7 – вентиляционная установка

Схема, приведенная на рис. 14, может работать и в другом режиме. На первом этапе в скважину (4) может подаваться инертная пена, что снизит

сорбционную активность угля и угольной пыли. После наработки критического объёма пены в скважину подаётся только инертный газ.

На разработанную технологию получен патент: «Способ предупреждения эндогенных пожаров в выработанном пространстве действующих очистных забоев» (RU 2406825 C1 опубликовано 20.12.2010 г в Бюллетене № 35).

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 идёт 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 подачей 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 научных трудов

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ при Минобрнауки РФ

1. 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.

2. Син С.А. Защита выемочных полей шахт Кузбасса от самовозгорания угля способом инертизации выработанных пространств // Уголь. – 2010. – № 6. – С. 16–19.

3. Игишев В.Г., Син С.А. Современное состояние проблемы с эндогенными пожарами в шахтах Кузбасса // Уголь. – 2012. – № 7. – С. 108–110.

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

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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

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

Статьи в сборниках, журналах и материалах конференций

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

13. Син С.А. Применение азота для борьбы с самовозгоранием угля в шахтах // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 1. – С. 167–171.

14. 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

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

16. 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).

17. 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.

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

19. 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.

20. Син С.А. Профилактика самовозгорания угля воздухоразделительными 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.

21. 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.

22. 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. Костилова. Кемерово : КузГТУ, 2021.

23. 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