

Донецкий ордена Трудового Красного Знамени
политехнический институт

На правах рукописи

ПАШКОВСКИЙ Петр Семенович

РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПРОГНОЗА
И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЭНДОГЕННЫХ ПОЖАРОВ
В ГЛУБОКИХ ШАХТАХ

Специальность 05.26.01 – "Охрана труда
и пожарная безопасность"

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Донецк – 1992



Работа выполнена в Научно-исследовательском институте
горноспасательного дела

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор

Айруни А.Т.

доктор технических наук,
профессор

Захаров Е.И.

доктор технических наук,
профессор

Ярембаш И.Ф.

Ведущая организация:

Институт физико-органической химии и углеродных соединений
Академии наук Украины

Защита состоится 23 ОКТАБРЯ 1992 г.

в 12 ч 20 мин на заседании специализированного
совета Д.068.20.02 при Донецком ордена Трудового Красного
Знамени политехническом институте по адресу:
340030, г. Донецк, ул. Артема, 58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
института.

Автореферат разослан 21 сентября 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор технических наук,
профессор

В.И.Черняев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работ. Переход угольных шахт на более глубокие горизонты выдвинул проблему борьбы с эндогенными пожарами в число основных в общей аварийности. По числу и причиняемому ущербу эндогенные пожары преобладают над другими видами аварий. Анализ статистических данных показывает, что эндогенная пожароопасность постоянно увеличивается, что можно объяснить усложнением горно-геологических условий и повышением температуры горных пород.

Особую актуальность приобрела проблема борьбы с эндогенными пожарами в шахтах Донецкого бассейна, где горные работы ведутся на глубинах около 1000 м на пластах с высокой выбросоопасностью в условиях повышенных температур и горного давления, что крайне осложняет реализацию мер предупреждения эндогенных пожаров, а в случае их возникновения — локализацию и тушение. В этих условиях каждый эндогенный пожар, как правило, связан с опасностью взрыва метановоздушной смеси.

Стало очевидным, что традиционно применяемые способы и средства прогноза эндогенной пожароопасности, обнаружения ранних признаков самовозгорания угля, профилактики и тушения пожаров с переходом горных работ на более глубокие горизонты стали менее эффективными. Так, например, около 10 % пожаров происходит на пластах угля, не отнесенного к категории самовозгорающихся, 60...70 % пожаров обнаруживается уже в развитом состоянии по появлению в горных выработках открытого огня, дыма и значительно превышающих норму содержания оксида углерода, 70...80 % пожаров тушится методом изоляции, что ведет к потере более 40 очистных забоев ежегодно. Объем консервируемых при этом запасов угля достигает 6 млн тонн.

В этой связи разработка и реализация в конкретных горно-геологических и горно-технических условиях высокоэффективных способов и средств прогноза, обнаружения ранних стадий, профилактики и тушения эндогенных пожаров является актуальной научной проблемой, имеющей важное народнохозяйственное значение, решение которой позволит повысить безопасность ведения горных работ и снизить материальные и трудовые затраты, связанные с ликвидацией подземных пожаров.

АНБ им. В. Стефанова
АН УРСР

В диссертационную работу вошли результаты многолетних исследований, выполненных под руководством и при непосредственном участии автора по тематическим планам работ ВНИИГД.

Целью работы является установление закономерностей формирования очагов самовозгорания угля в глубоких шахтах и разработка способов прогноза и предотвращения эндогенных пожаров.

Идея работы заключается в использовании, с одной стороны, совокупности физико-химических свойств угля, а с другой стороны - комплекса природных и горно-технических факторов, что позволяет установить в ходе ведения горных работ потенциально опасные по самовозгоранию угля зоны в пределах выемочных участков и реализовать в этих зонах при постоянном контроле температуры угля научно обоснованные технические решения по предупреждению эндогенных пожаров.

Методы исследований. Основными методами исследований являются аналитический и экспериментальный, базирующиеся на теории математической физики, теории подобия и газовой хроматографии, физическом моделировании и изучении в натуральных условиях процессов формирования очагов самонагревания угля.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Скорость низкотемпературного окисления углей определяется диффузией кислорода к внутренней поверхности угля. В этой связи диффузионное сопротивление служит показателем химической активности угля по отношению к кислороду.

2. Дробимость углей является одним из существенных параметров, способствующих развитию процесса самовозгорания углей. Между дробимостью углей и их удельной поверхностью существует функциональная зависимость.

3. Склонность угля к самовозгоранию определяется значением комплексного показателя, учитывающего реагирующую поверхность угля, скорость и теплоту реакции его окисления кислородом воздуха, а также критическую температуру самовозгорания.

4. Потенциально опасные по самовозгоранию угля зоны в пределах выемочных участков определяются условиями образования пожароопасных скоплений, критической мощностью, максимальной температурой самонагревания и инкубационным периодом самовозгорания угля.

5. Температура угля находится в функциональной зависимости от соотношения содержания этилена и ацетилена в шахтном воздухе, поступающем из очага самонагревания.

6. Знание закономерностей окислительной способности угля и основанная на них количественная оценка параметров эндогенной пожароопасности позволяют рационально использовать ценные средства борьбы с эндогенными пожарами.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

корректностью постановки задач, применением современного математического аппарата и вычислительной техники;

соответствием установленных закономерностей развития процессов самонагревания и самовозгорания угля в конкретных горно-геологических условиях основным физическим законам;

необходимым объемом экспериментального материала, полученного в шахтах и на специальных физических стендах и моделях при проведении исследований, связанных с разработкой способов и средств борьбы с эндогенными пожарами;

удовлетворительной сходимостью результатов математического моделирования с экспериментальными данными (расогласованность не более 10 %), соответствием результатов оценки склонности углей к самовозгоранию, критической мощности и инкубационного периода самовозгорания фактическим параметрам эндогенной пожароопасности вмесочных полей и участков;

широкой апробацией и внедрением во всех угольных бассейнах страны, и особенно в Донбассе, способов и средств борьбы с эндогенными пожарами.

Научная новизна исследований заключается в следующем:

обоснована возможность применения газовой хроматографии для изучения окислительной способности углей и получены новые качественные зависимости скорости окисления от температуры угля и его структурных особенностей. Это дало возможность разработать методы определения тепловых эффектов окисления, критической температуры и диффузионного сопротивления углей;

установлена количественная связь степени склонности угля к самовозгоранию и комплексного показателя, учитывающего дробимость, скорость окисления, критическую температуру и теплоту реакции взаимодействия кислорода с углем;

определены условия формирования пожароопасных скоплений угля, а также роль утечек воздуха через эти скопления и перераспределение их в результате тепловой депрессии очага самонагревания угля;

получены зависимости для определения в конкретных горно-геологических условиях технологических параметров предупреждения, локализации и тушения эндогенных пожаров с помощью газомеханических и твердеющих пен;

выявлены температурные зависимости выделения этилена и ацетилена при нагревании углей различных стадий метаморфизма. Это позволило разработать бесконтактный метод определения температуры самонагревания угля по данным анализа проб шахтного воздуха.

Научное значение работы заключается в следующем:

определена физическая сущность условий и закономерностей формирования очагов самонагревания и самовозгорания угля в конкретных горно-геологических условиях;

установлена взаимосвязь продуктов деструкции угля при его нагревании с температурой;

обоснованы и разработаны хроматографические методы исследования окислительной способности углей, методы оценки склонности углей и прогноза пожароопасности конкретных угольных скоплений, технология пенного способа борьбы с эндогенными пожарами и определения температуры угля по соотношению непредельных углеводородов.

Практическая ценность работы:

получены новые количественные параметры, позволяющие в глубоких шахтах прогнозировать места расположения и размеры пожароопасных зон в пределах выемочных и подготовительных участков в ходе ведения горных работ и на основании имеющихся данных принимать в этих зонах научно обоснованные технические решения при постоянной оценке их эффективности путем замера температуры угля;

предложен новый комплексный показатель оценки склонности углей к самовозгоранию. На его основе базируется отраслевая методика отнесения углей к категории самовозгорающихся;

определены технологические параметры применения газомеханических и твердеющих пен для предупреждения и тушения эндогенных пожаров;

создан принципиально новый бесконтактный метод и технические средства определения температуры угля по содержанию в рудничной атмосфере этилена и ацетилена;

разработаны отраслевые нормативно-технические документы, регламентирующие объем и сроки реализации профилактических мероприятий, а также порядок ведения горных работ на пластах угля, склонного к самовозгоранию.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Методы определения степени склонности углей к самовозгоранию, прогноза эндогенной пожароопасности в ходе ведения горных работ, критической мощности угольного скопления и инкубационного периода самовозгорания угля, а также температуры самовозгорания угля по соотношению непредельных углеводородов в шахтной атмосфере включены в "Методику определения склонности углей к самовозгоранию" (Донецк: ВНИИГД, 1991), "Руководство по прогнозу эндогенной пожароопасности выемочного поля (участка) в процессе ведения горных работ" (Донецк: ВНИИГД, 1991), "Руководство по определению стадий развития эндогенных пожаров в шахтах" (Донецк: ВНИИГД, 1987).

Технологические параметры применения газомеханических и твердеющих пен для предупреждения, локализации и тушения эндогенных пожаров вошли в "Руководство по борьбе с эндогенными пожарами на шахтах Минуглепрома СССР" (Донецк: ВНИИГД, 1990) и "Технологические схемы предупреждения и локализации эндогенных пожаров в шахтах Донбасса с помощью газомеханических и твердеющих пен" (Донецк: ВНИИГД, 1989).

Требования к отработке и изоляции пластов угля, склонного к самовозгоранию, включены в "Инструкцию по предупреждению и тушению подземных эндогенных пожаров на шахтах Донбасса" (Донецк: ЦЕНТИ Минуглепрома СССР, 1988) и "Типовые технологические схемы подготовки, отработки и изоляции шахтных полей и выемочных участков на крутопадающих пластах угля, склонного к самовозгоранию" (Донецк: ДонУТИ, 1986).

Аппаратура и методика определения микросодержаний этилена и ацетилена в шахтной атмосфере внедрена на шахтах Донбасса, Кузбасса, Карагандинского и Печорского бассейнов, а также месторождений Грузии и Дальнего Востока.

Апробация работы. Основные результаты научных исследований докладывались и получили положительную оценку на III Всесоюзной конференции "Процессы горения и проблемы тушения пожаров" (Москва, 1973); I Всесоюзной научно-производственной конференции "Предупреждение и тушение подземных пожаров" (Донецк, 1978); Всесоюзной научно-технической конференции "Совершенствование способов борьбы с эндогенными пожарами" (Прокопьевск, 1988); Республиканском научно-техническом семинаре "Профилактика и тушение пожаров на объектах народного хозяйства" (Севастополь, 1988); Научно-технической конференции "Разработка и внедрение новых средств и способов, обеспечивающих улучшение охраны труда и техники безопасности на промышленных предприятиях" (Свердловск, 1989); 23-й Международной конференции научно-исследовательских институтов по безопасности работ в горной промышленности (Вашингтон, 1989).

Разработанные средства определения микросодержаний этилена и ацетилена в шахтной атмосфере экспонировались на ВДНХ СССР, за два экспоната автором получены серебряная и бронзовая медали.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 53 научные работы, в том числе пять авторских свидетельств и две брошюры.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения и семи приложений, содержит 402 страницы машинописного текста, 69 рисунков и 38 таблиц. Список литературы содержит 243 наименования.

Автор выражает глубокую благодарность сотрудникам отдела борьбы с эндогенными пожарами НИИГД, инженерно-техническим работникам производственных объединений и шахт Донбасса, Управления Донецкого округа Госгортехнадзора Украины и военизированных горноспасательных частей Донецкой и Луганской областей за помощь в проведении исследований и внедрении их результатов в промышленность.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Основные положения теории самовозгорания углей, научные основы прогноза, обнаружения и профилактики эндогенных пожаров разработаны в трудах А.А.Скочинского, Л.Н.Быкова, В.С.Веселовского, В.М. Маевской, Г.Л.Стадникова. Дальнейшее развитие теоретические

основы самовозгорания углей, методов и средств их предупреждения и тушения получили в работах Е.И.Глузберга, В.И.Саранчука, Е.И.Захарова, Л.П.Белавенцева, В.А.Бонеецкого, В.Г.Игешева, В.В.Осокина, В.Я.Альперовича, Х.А.Баева, А.Б.Захарова, М.Г.Резника, сотрудников ИГД им. А.А.Скочинского, Макеевского и Восточного НИИ по безопасности работ, ВНИИГД, Карагандинского, Тульского, Донецкого политехнических институтов, ученых и исследователей Великобритании, Германии, Польши, США, Чехо-Словакии, Японии и других стран.

Эти работы определили направление научного поиска, расширили представление о процессе низкотемпературного окисления углей в шахтах и возможностях управления последним с целью предупреждения самовозгорания углей. Однако достигнутый уровень исследований и научных разработок не обеспечивает в полной мере решения проблемы борьбы с эндогенными пожарами, особенно в условиях глубоких шахт.

Первая глава работы посвящена анализу состояния проблемы борьбы с эндогенными пожарами на шахтах.

Ведение горных работ на больших глубинах выдвинуло проблему борьбы с эндогенными пожарами на одно из ведущих мест. Стало очевидным, что применяемый комплекс методов и средств управления процессом самовозгорания угля, включающий методы оценки склонности угля к самовозгоранию, прогноза эндогенной пожароопасности выемочных полей, обнаружения ранних признаков и контроля за ходом развития процесса самовозгорания угля, а также способы и средства предупреждения, локализации и тушения эндогенных пожаров требует дальнейшего совершенствования.

В качестве показателя склонности угля к самовозгоранию большинство исследователей предлагает константу скорости окисления угля или другие показатели, которые находятся в зависимости от константы скорости, например скорость тепловыделения, температурный коэффициент и др. Однако эти показатели не всегда удовлетворительно коррелируются с частотой возникновения пожаров.

Последнее можно объяснить следующим. Известно, что скорость процесса низкотемпературного окисления угля зависит не только от константы скорости потребления кислорода и его содержания, но и от реакционной поверхности, которая, в свою очередь, зависит от степени измельчения угля в реальных условиях при добыче, вне-

запных выбросах и обрушениях. В лабораторных же условиях показатель склонности угля к самовозгоранию измеряют для определенной фракции угля.

Кроме того, не учитываются такие важные показатели, как критическая температура самовозгорания, удельная поверхность и теплота реакции взаимодействия кислорода с углем.

Сказанное выше позволяет заключить, что для повышения достоверности метода оценки склонности угля к самовозгоранию необходим комплексный показатель, учитывающий как химические свойства угля, так и его текстуру.

В настоящее время в нашей стране и за рубежом используются различные способы прогноза пожароопасности. Отсутствие единого подхода к оценке эндогенной пожароопасности шахт привело к появлению многочисленных, в большинстве своем несопоставимых критериев оценки. Исходя из потребностей практики рационального расходования материальных средств на профилактику метод прогноза эндогенной пожароопасности должен быть универсальным и пригодным для любых регионов страны. Для этого метод прогноза должен основываться на современной теории самовозгорания угля, учитывающей физико-химические свойства угля, горно-геологические условия залегания пластов, горно-технические условия их отработки.

Созданные к настоящему времени математические модели не являются адекватными реальным процессам самонагревания и самовозгорания угля в выработанных пространствах, так как не учитывают многих факторов (теплообмен с окружающей средой, температурную зависимость физико-химических параметров окисления угля, условия формирования пожароопасных скоплений угля и доступа к ним кислорода, а также роль утечек воздуха через угольное скопление и перераспределение их в результате тепловой депрессии очага самонагревания угля).

Следует подчеркнуть, что известные методы прогноза эндогенной пожароопасности носят глобальный характер. Они оценивают пожароопасность шахтопласта в целом или отдельного выемочного поля, что при осуществлении профилактических мероприятий ведет к неоправданно излишним трудовым и материальным затратам, так как самовозгоранию угля подвержены только отдельные зоны угольных пластов. В этой связи необходимо вести поиски метода прогноза эндогенной пожароопасности, который бы обеспечил выделение в

пределах выемочных участков опасных по самовозгоранию мест в ходе ведения подготовительных и очистных работ.

К настоящему времени стало очевидным, что оксид углерода, хотя и общепризнанный индикатор процесса самовозгорания угля, но обладает рядом недостатков, основным из которых является то, что по его содержанию, как правило, не удается установить стадию развития процесса. Наиболее перспективным направлением в создании эффективного способа контроля за развитием процесса самовозгорания угля является использование соотношения двух индикаторных газов с примерно аналогичными физико-химическими свойствами.

Опыт применения для борьбы с эндогенными пожарами газомеханических и твердеющих пен показал в большинстве случаев их высокую эффективность. Однако область их применения может быть расширена при условии разработки научно обоснованных параметров их запуска в выработанное пространство (периодичность и объем запуска). Кроме того, должны быть установлены зоны эффективного действия пен.

Поставленная цель и основная идея работы, вытекающие из вышеизложенного состояния проблемы борьбы с эндогенными пожарами, определили необходимость решить следующие задачи и разработать:

1. Метод оценки склонности углей к самовозгоранию, для чего выбрать и обосновать параметры хроматографического опыта по определению окислительной способности углей;

исследовать физико-химические параметры (константа скорости реакции, диффузионное сопротивление) низкотемпературного окисления углей;

установить зависимость константы скорости реакции окисления от температуры и обосновать понятие критической температуры самовозгорания угля;

определить тепловые эффекты реакции взаимодействия кислорода с углем;

изучить взаимосвязь удельной поверхности с фракционным составом и дробимостью углей;

обосновать выбор комплексного показателя оценки склонности угля к самовозгоранию.

2. Метод прогноза опасности самовозгорания угля в конкретных горно-геологических условиях, для чего

исследовать условия образования пожароопасных скоплений угля;

установить критическую величину мощности угольного скопления, опасного по самовозгоранию;

исследовать тепловые и фильтрационные процессы в угольных скоплениях на основании математической модели, адекватной реальным процессам самонагрева и самовозгорания угля, которая учитывает теплообмен с окружающей средой, температурную зависимость физико-химических параметров окисляющегося угля, условия формирования пожароопасных скоплений угля, а также роль утечек воздуха через угольное скопление и перераспределение их в результате тепловой депрессии очага самонагрева угля;

определить инкубационный период самовозгорания углей;

разработать алгоритм прогноза опасности самовозгорания угля.

3. Технологию предупреждения и локализации эндогенных пожаров с помощью газомеханических и твердеющих пен, для чего определить границы зоны активного самонагрева угля в выработанном пространстве;

установить дальность продвижения потока пены в обрушенных породах;

исследовать влияние газомеханической пены на температурный режим выработанного пространства и определить продолжительность охлаждения очага самонагрева угля;

изучить утечки воздуха через выработанное пространство и обосновать выбор типа изолирующих полос;

разработать конструкцию и технологию возведения изолирующих полос из твердеющей пены для герметизации выработанного пространства выемочных участков.

4. Метод обнаружения признаков самонагрева угля и контроля за развитием эндогенных пожаров, для чего

составить математическую модель образования непредельных углеводородов (этилен, ацетилен) при нагревании углей;

исследовать кинетику выделения этилена и ацетилена при нагревании углей различных стадий метаморфизма;

исследовать конвективно-диффузионный массоперенос индикаторных компонентов в горных выработках шахт;

разработать способ и технические средства определения стадий развития самовозгорания угля.

Во второй главе описаны исследования процессов низкотемпературного окисления углей.

Вопрос о том, что определяет интенсивность окисления углей при низких температурах, представляет не только научный, но и прикладной интерес, так как от его правильного решения зависит выбор методов и средств предупреждения, локализации и тушения эндогенных пожаров.

Противоречивые взгляды на механизм окисления углей вызвали необходимость экспериментальной проверки. Для исследования окислительной способности углей нами был разработан хроматографический метод. Сущность метода в том, что в поток газа-носителя импульсно вводится кислород, который по мере продвижения вдоль хроматографической колонки, содержащей исследуемый уголь, вступает во взаимодействие с последним.

По полученным данным о количестве поглощенного кислорода и времени контакта его с исследуемым углем рассчитывается константа скорости окисления:

$$k_{\text{л}} = \frac{1}{t} \ln \frac{Q_{\text{вх}}}{Q_{\text{вых}}}, \quad (I)$$

где $k_{\text{л}}$ - константа скорости окисления угля, с^{-1} ; t - время контакта кислорода с углем, с ; $Q_{\text{вх}}$ - объем введенного кислорода, м^3 ; $Q_{\text{вых}}$ - объем не вступившего в реакцию кислорода, м^3 .

Для проведения исследований были выбраны и обоснованы следующие параметры хроматографического опыта: длина колонки 1,5 м, ее внутренний диаметр 0,04 м, скорость газа-носителя $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, доза кислорода $0,125 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, фракция угля 0,35...0,5 мм. Для углей Донбасса значения константы скорости окисления равны $(5...50) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. В условиях хроматографического опыта скорость окисления угля и среднедействующая объемная доля кислорода находились в прямой зависимости, что характерно для реакций, протекающих в диффузионной области. Изменение константы скорости химической реакции с увеличением температуры описывается уравнением Аррениуса. При нагревании угля до 100°C происходило увеличение константы скорости окисления примерно в 2...3 раза (таб. I).

Таблица I

Значения константы скорости окисления
угля при различных температурах

Производствен- ное объединение	Шахта	Сим- вол : плас- та	Константа скорости окисления $k_{\text{п}} \cdot 10^4, \text{с}^{-1}$ при температурах		Отноше- ние $\frac{k_{70}}{k_{25}}$
			25 °C	70 °C	
"Артемуголь"	"Александр- Запад"	l_3	25	62	2,48
		k_7	43	51	1,19
"Туковуголь"	"Юго-Запад- ная"	i_3	23	49	2,13
		i_3	17	49	2,88

Если принять в качестве лимитирующей стадии процесса окисления угля скорость химического взаимодействия кислорода с углем, константа, согласно правилу Вант-Гоффа, должна увеличиваться при нагревании на каждые 10 °C примерно в 2...4 раза. Однако в действительности этого не происходит, что позволяет предполагать о наличии диффузионного механизма взаимодействия кислорода с углем. Об этом же свидетельствует увеличение константы скорости окисления угля при увеличении скорости притока кислорода. С другой стороны, при изменении давления в системе в 1,5 раза значение константы скорости окисления оставалось практически постоянным.

Таким образом, для реакции низкотемпературного окисления углей молекулярным кислородом характерны все особенности, присущие реакциям, протекающим в диффузионной области. Учитывая это обстоятельство, на основе теории газовой хроматографии был разработан показатель, характеризующий свойства углей с точки зрения диффузионного сопротивления проникновению кислорода. Расчетная формула имеет вид

$$H_g = 0,18 \cdot 10^{-3} L \left(\frac{\mu_{0,5}}{i \cdot v_{\text{л}}} \right)^2 - 2, \quad (2)$$

где H_g - диффузионное сопротивление, мм; L - длина хроматографической колонки, м; $\mu_{0,5}$ - ширина пика кислорода, измеренная на половине высоты, мм; $v_{\text{л}}$ - скорость диаграммной ленты, мм/с.

Экспериментально установлена зависимость предложенного пока-

зателя от химической активности углей. В проведенных экспериментах Hg изменялось в широких пределах (от 0,5 до 34).

В литературе по рудничным пожарам под критической подразумевают температуру угля, выше которой происходит его быстрое окисление с последующим самовозгоранием. Считалось, что для большинства углей и торфа она находится в пределах 80 °С.

Исследование влияния температуры на окислительную способность показало, что для всех углей на графике зависимости константы скорости окисления от температуры (рис. I) имеется перелом, после которого процесс взаимодействия кислорода с углем резко ускоряется. Температуру точки перелома следует считать критической температурой самовозгорания угля.

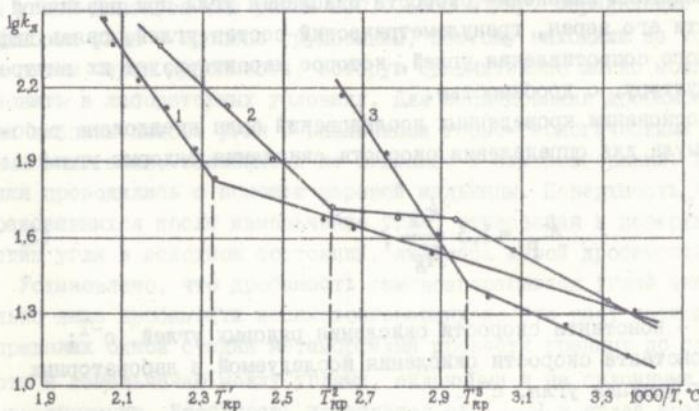


Рис. I. Зависимость константы скорости окисления угля от температуры:

- 1 - пласт m_3 шахты "Булавинская" ПО "Орджоникидзуголь";
- 2 - пласт l_2 шахты им. Артема ПО "Луганскуголь";
- 3 - пласт m_3 шахты им. Г.Капустина ПО "Лисичанскуголь"

Экспериментальными исследованиями критических температур самовозгорания угля установлено, что они колеблются от 50 до 150 °С. При этом, как правило, низкие критические температуры соответствуют пластам, на которых были часто случаи самовозгорания углей, а высокие — пластам, на которых самовозгорания не было или же пожары произошли в единичных случаях. Таким образом, критическая температура самовозгорания углей является одним из важных показателей, характеризующих способность угля самовозгораться.

Скорость окисления углей определяют в лабораторных условиях. При этом исследуются мелкие фракции углей, в то время как их фактический гранулометрический состав при обрушениях, внезапных выбросах, добыче весьма различен. Он обусловлен, прежде всего, дробимостью углей.

Поскольку определение гранулометрического состава углей сложно и громоздко, необходимо было разработать такой способ, который позволил бы определять скорость окисления рядовых углей по данным исследования их лабораторных проб. С целью его разработки были исследованы изменение скорости окисления угля при различной крупности его зерен, гранулометрический состав углей, связь диффузионного сопротивления углей, которое характеризует их внутреннюю структуру, с дробимостью.

На основании проведенных исследований была предложена рабочая формула для определения скорости окисления рядовых углей:

$$k_p = 1,3 \frac{k_d}{H_g}, \quad (3)$$

где k_p — константа скорости окисления рядовых углей, c^{-1} ;
 k_d — константа скорости окисления исследуемой в лабораторных условиях фракции угля, c^{-1} .

Определение теплоты низкотемпературного окисления углей для количественной оценки физико-химических процессов с давних пор привлекало внимание исследователей. Несмотря на то, что первые исследования в этой области были выполнены в начале нынешнего века, количество работ, посвященных определению теплоты низкотемпературного окисления углей, весьма незначительно. Последнее объясняется большими экспериментальными трудностями в определении малых тепловых эффектов, которые характерны для этого процесса.

Для измерения тепловых эффектов окисления углей молекулярным кислородом была разработана проточная система с импульсным дозированием кислорода. Установка сконструирована на базе хроматографа ЛХМ-8МД и дифференциального микрокалориметра ДАК I-I.

В проведенных экспериментах тепловой эффект взаимодействия кислорода с углем изменялся в довольно широких пределах ($12 \dots 120$) $\cdot 10^{-6}$ Дж/м³. Это позволяет сделать вывод, что принимать его значение при оценке тепловых процессов самонагревания угля величиной, фиксированной для различных углей, неправомерно.

Третья глава посвящена исследованию физико-механических свойств углей.

Наиболее важная геометрическая характеристика угля - величина его поверхности. Поглощение кислорода происходит не всей массой угля, а его поверхностью. Чем больше эта поверхность, тем выше скорость окисления угля.

Удельная поверхность исследовалась на специально сконструированной установке хроматографическим методом тепловой десорбции. Для углей Донбасса она равна $300 \dots 5000$ м²/кг. Определение поверхности угля - процесс трудоемкий, поэтому находили ее косвенным путем через дробимость, которую сравнительно легко можно установить в лабораторных условиях. Для исследования дробимости были выбраны пласты угля с различными горно-геологическими условиями залегания, склонные и не склонные к самовозгоранию. Испытания проводились с помощью шаровой мельницы. Поверхность частиц, образовавшихся после измельчения угля, отнесенная к поверхности частиц угля в исходном состоянии, являлась мерой дробимости.

Установлено, что дробимость самовозгорающихся углей значительно выше дробимости несамовозгорающихся. Это дает возможность в пределах одной стадии метаморфизма провести границу по способности к измельчению между углями, склонными и не склонными к самовозгоранию. Дробимость изменяется от $1 \dots 3$ у углей крайних стадий метаморфизма до $70 \dots 104$ у углей средних стадий метаморфизма.

Зная дробимость угля, можно определить его реакционную поверхность из выражения

$$S_p = \alpha \cdot S_{\text{вн}} \cdot D_y, \quad (4)$$

где S_p - реакционная поверхность, m^2 ; α - безразмерный коэффициент; $S_{вн}$ - внешняя поверхность частиц угля испытуемой в хроматографическом опыте фракции, m^2 ; D_y - дробимость угля.

Таким образом, на основании проведенных исследований разработаны способы получения данных, необходимых для количественной оценки процесса самонагрева угля.

В четвертой главе обоснован выбор комплексного показателя и сформулирована сущность нового метода оценки склонности углей к самовозгоранию.

Определять склонность углей к самовозгоранию следует исходя из сущности процесса, а она предопределена взаимным влиянием различных физико-химических и механических свойств, таких, как константа скорости окисления угля, тепловой эффект окисления, критическая температура самовозгорания, дробимость и реакционная поверхность. Каждый из перечисленных параметров отражает тот или иной аспект протекания окислительных процессов в угле, но не характеризует развитие процесса в целом.

Возникновение и развитие процесса самонагрева возможно при наличии достаточного скопления разрыхленных масс химически активного угля и притока к нему воздуха. Разогревание угля начинается сразу же, как только создаются условия для аккумуляции теплоты реакции окисления.

В дальнейшем при достижении определенной температуры, характерной для угля конкретного шахтопласта, происходит резкое ускорение скорости окисления и быстрый рост температуры. Возгорание угля может произойти за несколько часов. Время достижения этой температуры зависит как от ее абсолютного значения, так и от условий генерации тепла. При протекании процесса в адиабатических условиях скорость генерации тепла зависит от объемной доли кислорода, константы скорости окисления и реакционной поверхности угля. Из сказанного следует, что время достижения критической температуры может быть критерием оценки склонности углей к самовозгоранию, поскольку оно комплексно учитывает физико-химические и механические свойства твердого топлива. Это время может быть минимальным лишь в том случае, если вся генерируемая в процессе окисления угля теплота расходуется на его нагревание. В реальных же условиях, когда в основном наблюдаются политропные процессы, самовозгорание может наступить спустя значительный промежуток времени. Однако вполне очевидно, что, чем меньше время достиже-

ния углем критической температуры, тем больше вероятность его самовозгорания.

На основании решения уравнения теплового баланса в скоплении угля получена формула для определения комплексного показателя склонности углей к самовозгоранию:

$$U = \frac{C_y}{\alpha S_{\text{вн}} \varphi_0 q_0 k_0 C_{O_2} R} \left[-RT_0 e^{E/RT_0} + RT_{\text{кр}} e^{E/RT_{\text{кр}}} + E \left\{ \text{Ei} \left(\frac{E}{RT_0} \right) - \text{Ei} \left(\frac{E}{RT_{\text{кр}}} \right) \right\} \right], \quad (5)$$

где C_y - средняя удельная теплоемкость угля в интервале температур $(T_0 - T_{\text{кр}})$, Дж/(кг·К); q_0 - теплота реакции окисления угля, Дж/м³; C_{O_2} - объемная доля кислорода; R - универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T_0 - начальная температура окисления угля, К; $T_{\text{кр}}$ - критическая температура самовозгорания, К;

E - энергия активации процесса окисления угля, Дж/моль;

Ei - интегральная показательная функция.

Сопоставление полученных значений критерия U с количеством пожаров и группой эндогенной пожароопасности показывает, что между этими величинами существует тесная связь. Увеличение значения критерия U соответствует уменьшению эндогенной пожароопасности и наоборот. При этом видно, что существует пороговое значение критерия $U (U^{\text{п}})$, при превышении которого угольные пласты становятся непожароопасными, о чем свидетельствует отсутствие на них эндогенных пожаров.

Заключение о склонности угля к самовозгоранию проводится на основании сопоставления расчетных значений комплексного показателя U с пороговым значением $U^{\text{п}}$, определяемым для условий каждого угольного месторождения (табл.2). При этом учитываются объективные условия для оставления в выработанных пространствах при разработке угольных пластов пожароопасных потерь угля Π_y и ЭП на данном пласте в пределах исследуемого участка или на соседних участках с аналогичными горно-геологическими условиями.

На основе разработанной методики, согласно схеме, приведенной в табл. 2, переоценены шахтопласты Донбасса по степени склонности к самовозгоранию. Аналогичная работа проводится и в дру-

Схема определения склонности угля
к самовозгоранию

Склонность угля к самовозгоранию	Необходимые условия		
Склонен	$\frac{U^n - U}{U^n} \geq 0,1$	$-0,1 < \frac{U^n - U}{U^n} < 0,1$ Пу - есть ЭП - есть	$-0,1 < \frac{U^n - U}{U^n} < 0,1$ Пу - нет ЭП - есть
Не склонен	$\frac{U^n - U}{U^n} < -0,1$	$-0,1 < \frac{U^n - U}{U^n} < 0,1$ Пу - есть ЭП - нет	$-0,1 < \frac{U^n - U}{U^n} < 0,1$ Пу - нет ЭП - нет

гих угольных бассейнах. Следует отметить, что изложенный подход к оценке склонности углей к самовозгоранию дает самую высокую (более 95 %) сходимость с фактической пожароопасностью угольных пластов.

Пятая глава посвящена прогнозу опасности самовозгорания угля в конкретных горно-геологических условиях.

Анализ условий залегания и выемки угольных пластов, а также мест и причин возникновения эндогенных пожаров позволил выявить условия формирования пожароопасных скоплений угля и составить схему их образования (рис. 2). Представленная классификация позволяет приблизительно прогнозировать возможность образования скоплений угля, приводящих к возникновению эндогенных пожаров. Однако эндогенные пожары не происходят постоянно, а имеют эпизодический характер или же не возникают совсем. Поэтому необходимо было разработать методы определения условий, в которых скопления угля не приводят к повышению эндогенной пожароопасности и наоборот.

Анализ мест и причин самовозгорания угля показывает, что наибольшее число самовозгораний происходит в слоевых скоплениях, образующихся в результате обрушения угольных пачек и пропластков. Поэтому первой задачей при определении пожароопасности угольного скопления является определение критической (наименьшей) мощности угольной пачки, на которой самовозгорание еще возможно. Эту мощность можно определить, сделав допущение, что отвод теп-

СКОПЛЕНИЕ УГЛЯ

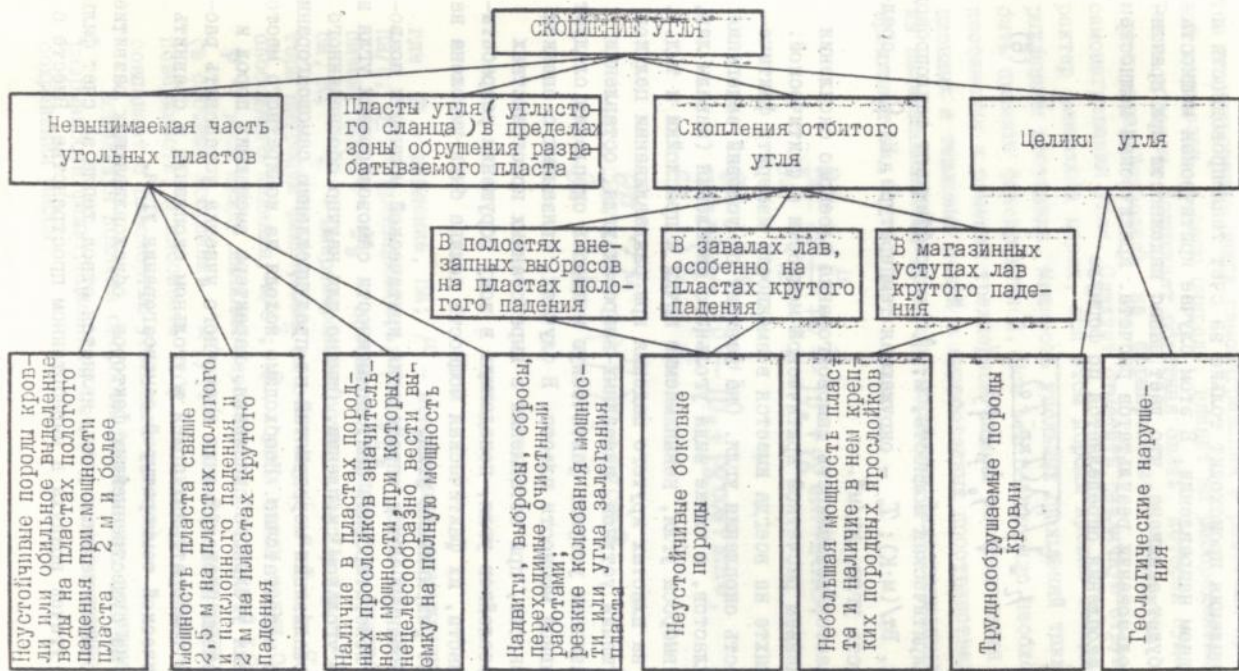


Рис. 2. Схема образований пожароопасных скоплений угля в выработанных пространствах

лоты от скопления происходит только за счет теплопроводности и только в одном направлении. В этом случае критическая мощность скопления будет занижена, что дает запас надежности при практическом использовании результатов расчета. Критическая мощность угольного скопления определяется по формуле

$$h = \sqrt{\frac{2\lambda(T_{кр} - T_0)}{\rho_0 k_p \bar{c} \rho_y}}, \quad (6)$$

где h - критическая мощность, м; λ - коэффициент теплопроводности угля, Вт/(м·К); T_0 - окружающая температура, К; ρ_y - средняя плотность угля, кг/м³.

Оценивается возможность самовозгорания слоевого скопления угля сравнением расчетной критической мощности с фактической. Однако в шахте не всегда имеется возможность измерить фактическую мощность скопления угля. Она зависит от условий залегания и выемки пластов, а также вида угольного скопления (завалы лав, внезапные выбросы угля, невнимаемые пачки и прослойки и т.д.). Например, на пластах крутого падения при раздавливании целиков угля, обрушении уступов, внезапных выбросах угля, оставлении его в магазинных уступах фактическую мощность скопления следует считать равной мощности пласта. В случаях, связанных с оценкой пожароопасности, при оставлении в выработанных пространствах пачек и прослоек угля, попадающих в зону обрушения разрабатываемого пласта, их фактическая мощность должна быть умножена на коэффициент разрыхления угля.

Разработанный метод определения критической мощности позволяет лишь констатировать факт возможности самовозгорания угля в конкретном угольном скоплении. Однако для научно обоснованного выбора и реализации мероприятий по предупреждению самовозгорания угля этого недостаточно. Необходимо исходя из конкретного месторасположения угольного скопления, характера вмещающих пород и принятой схемы проветривания выемочного участка установить распределение температурных полей в угольном скоплении и сравнить их с критической температурой самовозгорания угля.

Одним из существеннейших факторов, обуславливающих развитие процесса самонагревания угля, является отвод тепла за счет фильтрационных утечек воздуха в выработанном пространстве. Вместе с

тем возникновение очага самонагрева и развитие при этом тепловой депрессии, в свою очередь, влияет на распределение утечек. Таким образом, возникает обратная связь, которая существенно может воздействовать на формирование и развитие очага самонагрева угля. Следует отметить различную структуру и характер вмещающих пород, при этом породы кровли находятся в разрыхленном состоянии. Мощность угольных скоплений также не может быть принята фиксированной. Все это обусловило необходимость постановки и решения трехмерной задачи распределения фильтрационных и тепловых полей в выработанных пространствах. Исходя из вышеизложенного, уравнения движения фильтрационного потока принимают вид

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \left(\frac{\mu}{k} + \rho \frac{v}{l} \right) u_x + \rho g \sin \Psi \sin \Theta; \quad (7)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} = \left(\frac{\mu}{k} + \rho \frac{v}{l} \right) u_y + \rho g \cos \Psi \sin \Theta; \quad (8)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \left(\frac{\mu}{k} + \rho \frac{v}{l} \right) u_z + \rho g \cos \Theta, \quad (9)$$

где p - давление, Па; μ - коэффициент динамической вязкости, Па/с; k - проницаемость; $\rho = \frac{p}{RT_B}$ - плотность газозвушной смеси, кг/м³; T_B - абсолютная температура газозвушной смеси, К; l - макрошероховатость; u_x, u_y, u_z - проекции вектора скорости фильтрации на оси x, y и z ; g - ускорение свободного падения, м/с²; Θ - угол между осями Oz и Oz' ; Ψ - угол между линиями пересечения плоскостей xOy и $x'Oy'$ (в системе координат x', y', z' ось Oz' перпендикулярна земной поверхности, а плоскость xOy в системе координат x, y, z совпадает с плоскостью угольного пласта).

Используя понятия скорости фильтрации, запишем уравнение неразрывности фильтрационного потока, представляющее собой закон сохранения массы:

$$m \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{v}) = 0, \quad (\text{I})$$

где m - пористость, м; t - время, с; \bar{v} - скорость фильтрации, м/с.

Уравнение, описывающее распределение нестационарного температурного поля в выработанном пространстве можно записать в виде

$$(1-m) \rho_y c_y \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{m}{1-m} \rho c_p \operatorname{div}(T \cdot \bar{v}) = \lambda \operatorname{div} \operatorname{grad} T + q_0 \varepsilon(x, y, z) \rho_y k_0 C^{n_1} e^{-E/RT}, \quad (\text{II})$$

где C_p - теплоемкость газовой смеси, Дж/(моль·К); T - температура угля, К; $\varepsilon(x, y, z)$ - объемная доля угля в породе; C - объемная доля кислорода; n_1 - порядок реакции окисления.

Уравнение (II) отражает закон сохранения энергии при протекании окислительных процессов в выработанном пространстве.

Запишем уравнение конвективно-диффузионного массопереноса, характеризующее изменение содержания кислорода в выработанном пространстве в следующем виде:

$$m \frac{\partial C}{\partial t} + m \operatorname{div}(C \cdot \bar{v}) = \mathcal{D} \operatorname{div} \operatorname{grad} C - (1-m) \varepsilon(x, y, z) \rho_y k_0 C^{n_1} e^{-E/RT}, \quad (\text{I2})$$

где \mathcal{D} - коэффициент диффузии, м²/с.

Уравнение (I2) выражает баланс массы кислорода в выработанном пространстве при окислении угля. Уравнения (II) и (I2) описывают конвективно-диффузионный тепломассообмен в выработанном пространстве при протекании окислительных процессов.

Таким образом, разработана математическая модель, описывающая процесс самонагрева угля с учетом влияния развивающегося

температурного поля вокруг очага нагревания на распределение утекчек воздуха, что, в свою очередь, влияет на динамику развития и локализацию очага.

Для определения интересующих нас функций P , ρ , \bar{v} , C и T из уравнений (7)...(12) необходимо задать начальные и граничные условия. Задание начальных условий по форме не зависит от схемы проветривания. Поля концентраций кислорода и температур задаются на момент времени, служащий исходным для расчета.

Начальные условия:

$$\left. \begin{aligned} T(0, x, y, z) &= f_T(x, y, z); \\ C(0, x, y, z) &= f_C(x, y, z). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Граничные условия существенным образом зависят от схемы проветривания выемочного участка. Поэтому они были заданы отдельно для четырех наиболее распространенных схем проветривания. Для возвратноточной схемы проветривания с выпуском исходящей струи на целик угля граничные условия имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p_{\pi}}{\partial x} \Big|_{y=0} &= -|Q| \left(\frac{\rho \theta_1}{S^2} \left| \frac{dQ}{dx} \right| + \frac{\lambda_1 \rho \Pi}{S^3} Q \right) - \rho g \sin \psi \sin \theta; \\ \frac{dQ}{dx} &= - \int_0^H v_y dz, \quad \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0; \\ \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=0} &= 0, \quad \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=L_{\pi}} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial y} \Big|_{y=y_0} = 0; \\ \lambda_{\pi} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} &= -k_{\tau} (T_{\pi} - T); \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} T(\tau, x, 0, z) &= f_{T,0}(\tau, x, 0, z); \\ C(\tau, x, 0, z) &= f_{C,0}(\tau, x, 0, z); \\ T(\tau, x, y_0, z) &= T_{п,0}, \quad C(\tau, x, y_0, z) = C_{п,0}, \end{aligned} \right\}$$

где $P_{л}$ - давление воздуха в лаве, Па; Q - расход воздуха в лаве, m^3/c ; Θ_1 - коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скорости воздуха по сечению лавы; H - мощность угольного скопления, м; $L_{л}$ - длина лавы, м; y_0 - расстояние, после которого прососы воздуха через выработанное пространство практически отсутствуют, м; $\lambda_{п}$ - коэффициент теплопроводности пород почвы, Вт/(м·К); k_{τ} - коэффициент нестационарного теплообмена, Дж/($m^2 \cdot c \cdot K$); $T_{п}$ - температура вмещающих пород, К.

Для определения фильтрационных и тепловых полей в выработанных пространствах при самонагревании угля разработан алгоритм и программа расчетов на ПЭВМ.

Итак, если установлено, что расчетная температура в конкретных горно-геологических условиях превышает критическую, то самовозгорание угля неизбежно, и в этом случае необходимо определить время, в течение которого оно произойдет.

Самовозгоранию угля предшествует инкубационный период, продолжительность которого зависит от условий генерации и рассеивания теплоты в скоплении угля. Теория пока еще не обладает достаточными данными, необходимыми для определения фактического инкубационного периода самовозгорания угля. Однако они позволяют приближенно рассчитать инкубационный период, соответствующий адиабатическому процессу. При этом инкубационный период будет наименьшим.

Из-за малой теплопроводности углей при небольших утечках воздуха и значительных скоплениях угля адиабатический процесс близок к реальному. Расчетная формула для определения инкубационного периода имеет вид

$$\tau_y = \frac{c_y(T_{кр} - T_0) + 0,01 \cdot W^p \lambda' + \mu \mu'}{4,3 \cdot 10^4 \cdot k_p \cdot \bar{c} \cdot \varphi_0}, \quad (15)$$

где τ_y - инкубационный период самовозгорания угля, сут;

T_0 - температура угля в массиве до самонагрева, К; W^P - рабочая влажность угля, %; λ' - скрытая теплота испарения воды, Дж/кг; μ_y - природная газоносность угля, м³/кг; u' - теплота десорбции метана, Дж/м³.

Изложенный выше методический подход к прогнозу опасности самовозгорания угольных скоплений апробирован на шахтах Донбасса.

В шестой главе приведены исследования технологии предупреждения и локализации эндогенных пожаров с помощью газомеханических и твердеющих пен.

Эффект применения газомеханических и твердеющих пен не вызывает сомнения. Однако вопросы продвижения пен в обрушенных породах, их действие на очаги самонагрева угля в достаточной степени не изучены. Не разработаны методы определения параметров пенного способа предупреждения и тушения эндогенных пожаров, технология применения газомеханических и твердеющих пен для подавления очагов самонагрева угля.

Для описания движения пены использована система дифференциальных уравнений Н.Е. Жуковского, конкретизированная для различных вариантов подачи пены в обрушенные породы. При этом пена рассматривалась как однородная среда с изменяющимися реологическими характеристиками, а структура обрушенных пород - как функция пространственных координат.

Дополненная начальными и граничными условиями указанная система уравнений в конечно-разностной форме записи имеет вид

$$\left. \begin{aligned} V_{x,k}^{j+1} &= \left[-\frac{1}{\rho_k^j} \frac{P_{k+1}^j - P_k^j}{\Delta x_1} - \frac{g V_{x,k}^j}{k_\Phi(y)} - g \sin \alpha \right] \Delta t + V_{x,k}^j; \\ \rho_k^{j+1} &= \left[-\frac{V_{x,k+1}^j \rho_{k+1}^j - V_{x,k}^j \rho_k^j}{\Delta x_1} \right] \frac{\Delta t}{m(y)} + \rho_k^j; \\ P_k^{j+1} &= \Psi(\rho_k^{j+1}), \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где V_x - составляющая скорости движения пены, м/с; j - номер итерации по времени; k - номер итерации по пространственной координате, направленной от вентиляционного штреха по падению пласта; ρ - плотность пены, кг/м³; P - гидравлическое давление, Па; Δx_1 - шаг итерации по координате Ox_1 , м; $k_\Phi(y)$ - коэффициент фильтрации, м/с; α - угол залегания пласта, град; $m(y)$ - функция изменения пористости по простиранию пласта.

При исследовании влияния газомеханической пены на охлаждение очагов самовозгорания угля получено аналитическое выражение для определения температуры в пожароопасной зоне до и после подачи пены:

$$T = \begin{cases} [(T_0 + \alpha_3) e^{\beta t_0} - \alpha_3 + \alpha_1] e^{\beta_1 t_1} - \alpha_1, & x - c_{21} t_1 > c_{20} t_0; \\ [(T_0 + \alpha_3) e^{\beta(x - c_{21} t_1)/c_{20}} - \alpha_3 + \alpha_1] e^{\beta_1 t_1} - \alpha_1, & t_1 \leq x/c_{21}; \\ [(T_0 + \alpha_3) e^{\beta_1 x/c_{20}} - \alpha_1], & t_1 > x/c_{21} \end{cases} \quad (17)$$

при этом приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \alpha_3 &= \frac{\alpha_{20} T_0}{\beta}; & \beta &= \alpha'_1 - \alpha_{20}; & \alpha_1 &= \frac{\alpha_{21} T_0}{\beta_1}; \\ \beta_1 &= \alpha_{11} - \alpha_{21}; & c_{2i} &= \frac{\rho_i c_p W_i}{\rho_y c_{mi}}; & t_1 &= t - t_0; \\ \alpha'_1 &= \frac{q_0 \bar{c} b_0}{\rho_y c_{m0}}; & \alpha_{11} &= \frac{q_0 \bar{c} b_1}{\rho_y c_{m1}}; \\ \alpha_{2i} &= \frac{k_{\tau i}}{H \rho_y c_y}; & b_i &= \frac{U_i}{T}, \end{aligned}$$

где T' - температура в угольном скоплении, К; T_0 - температура вмещающих пород, К; t_0 - интервал времени от начала процесса самонагрева до начала подачи пены в выработанное пространство, с; X - пространственная координата, отсчитываемая по направлению пласта от конвейерного штрека, м; i - индекс ($i = 0$ до момента подачи пены; $i = I$ после подачи пены); ρ_i - плотность воздуха или пены, кг/м³; W_i - скорость воздуха или пены, м/с; $k_{\tau i}$ - коэффициент нестационарного теплообмена, учитывающий потери теплоты при контакте угля с воздухом или пеной, Дж/(м²·с·К); U_i - удельная скорость сорбции кислорода углем, м³/(кг·с).

Изменение реологических свойств пены при ее движении в пористой среде и в процессе охлаждения нагретого угля исследовано на двух лабораторных стендах. Предварительно исходя из уравнений движения пены, неразрывности и теплового баланса получены безразмерные комплексы, критерии подобия и масштабы моделирования. Это позволило корректно подготовить и провести эксперименты, а также переносить полученные результаты на натурные условия.

На крупномасштабном стенде исследована гидродинамика потоков пены, движущихся в пористой среде. В экспериментах применялись различные способы генерирования пен, полученных на основе пенообразователей, которые применяют в шахтах. Стенд заполнялся кусками породы трех диапазонов крупности. Проведенные эксперименты показали, что динамика движения пены в обрушенных породах существенно зависит от крупности кусков. При среднем их размере менее 0,03 м продвижение пены практически отсутствует. Полидисперсные пены при движении в пористой среде с частицами диаметром 0,03...0,15 м улучшают свою структуру. Анализ результатов экспериментов позволил получить зависимости кратности и динамической вязкости пены от ее стойкости и времени движения в пористой среде. Были получены также численные значения коэффициента $k_{\tau i}$ и распределение пожароопасных зон при различном размещении тепловых источников.

При определении дальности продвижения потока пены в обрушенных породах была обоснована возможность использования закона Дарси в качестве исходного уравнения и получена следующая зависимость:

$$L_{\Pi} = k_{\Phi} t_{\text{ж}} \sin \alpha + \sqrt{(k_{\Phi} t_{\text{ж}} \sin \alpha)^2 + \frac{4 P_{\Gamma} k_{\Phi} t_{\text{ж}}}{\rho_1 g}}, \quad (18)$$

где L_{Π} - г чность продвижения пены, м; $t_{\text{ж}}$ - стойкость пены, с; P_{Γ} - давление пены на выходе из пеногенератора, Па.

Продолжительность охлаждения очагов самонагрева угля определяется из выражения

$$t_{\text{ох}} = \frac{1}{\beta_1} \ln \left| \frac{\beta_1 T_{\text{оч}} + \alpha_{20} T_0}{\beta_1 T_{\text{к}} + \alpha_{20} T_0} \right|, \quad (19)$$

где $T_{\text{оч}}$ - температура очага самонагрева угля, К; $T_{\text{к}}$ - температура угольного скопления после охлаждения пеной, К.

Интенсивность подачи пены в обрушенные породы выработанного пространства определяется из выражения

$$j_{\Pi} = \frac{V_{\text{пз}}}{t_{\text{ох}}} = \frac{H \cdot L_{\Pi} (y_2 - y_1)}{t_{\text{ох}}}, \quad (20)$$

где L_{Π} - дальность подачи пены, м; y_1, y_2 - расстояние до ближней и дальней границ зоны активного самонагрева угля, м.

Таким образом, выполненные исследования позволили определить такие параметры пенного способа борьбы с эндогенными пожарами, как конфигурация области выработанного пространства, которую можно заполнить пеной, в частности дальность продвижения пены и границы пожароопасной зоны, продолжительность охлаждения очага самонагрева, интенсивность подачи пены и необходимое количество пеногенераторов.

Отработана технология применения газомеханических пен в условиях шахт "Красный Профинтерн" и им. 9-й пятилетки. Одна из технологических схем приведена на рис. 3.

Повышение эффективности применения газомеханических пен достигается при условии, что в комплексе с ее применением для борьбы с эндогенными пожарами используется герметизация выработанного пространства твердеющей пеной. Для этой цели разработана конструкция и технология возведения изолирующих полос из твердеющей пены.

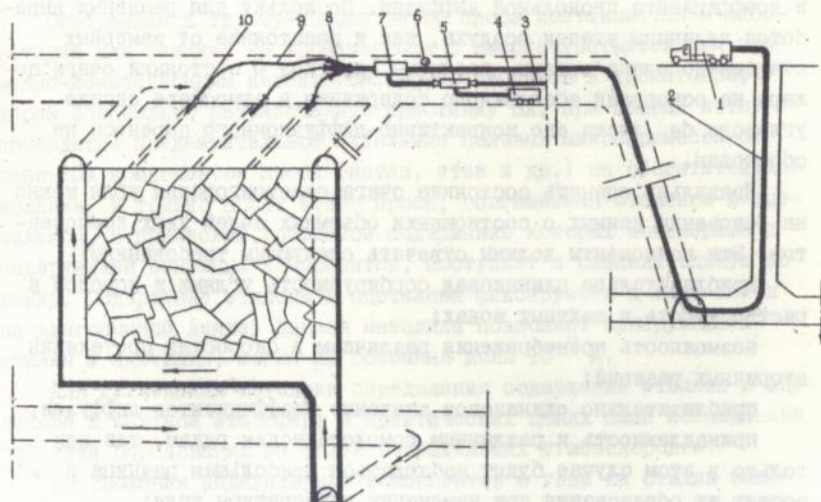


Рис. 3. Технологическая схема применения газомеханической пены:

1 - автогазификационная установка (АГУ); 2 - трубопровод подачи газообразного азота; 3 - водопровод; 4 - емкость с пенообразователем; 5 - пеносмеситель; 6 - манометр; 7 - генератор инертной пены; 8 - разветвление трехходовое РТ-80; 9 - гибкий рукав; 10 - скважина

Седьмая глава посвящена обнаружению признаков самонагрева угля и контролю за развитием эндогенных пожаров.

О стадии развития эндогенного пожара судят на основании абсолютного содержания в атмосфере выработок оксида углерода. В большинстве случаев считают, что объемная доля в атмосфере выработки 0,001 % оксида углерода соответствует началу самовозгорания угля, а 0,01 % оксида углерода - развившемуся процессу горения. Однако такая интерпретация данных газового состава атмосферы не имеет достаточного научного обоснования, она является лишь обобщением инженерного опыта. Объясняется это следующим. Содержание оксида углерода в горной выработке является функцией рас-

стояния точки замера от очага самовозгорания, скорости воздуха и коэффициента продольной диффузии. Поскольку для реальных выработок величины утечек воздуха, как и расстояние от замерных станций до очага пожара, различны, прогноз о состоянии очага пожара на основании абсолютного содержания в атмосфере оксида углерода без учета его конвективно-диффузионного переноса не обоснован.

Правильно оценить состояние очага самовозгорания угля можно на основании данных о соотношении объемных долей двух компонентов. Эти компоненты должны отвечать следующим требованиям:

приблизительно одинаковая сорбируемость углями и породой и растворимость в шахтных водах;

возможность пренебрежения различием в скоростях протекания вторичных реакций;

приблизительно одинаковое значение коэффициентов диффузии;

принадлежность к различным гомологическим рядам, так как только в этом случае будет наблюдаться наибольшая разница в скоростях их образования при изменении температуры угля;

возможность надежного обнаружения имеющимися аналитическими средствами разницы в скорости образования компонентов из угля при повышении температуры.

Наиболее полно изложенным требованиям отвечают этилен и ацетилен. Они принадлежат к различным гомологическим рядам, имеют близкие значения молекулярных весов, температуры кипения и растворимости в воде.

Для создания метода обнаружения признаков самонагревания угля необходимо было разработать способ обнаружения в шахтной атмосфере этилена и ацетилена, когда их объемная доля меньше достигнутого уровня (10^{-4} %). Сущность методики в следующем. Отбирают пробы для анализа, прокачивая газ через специально разработанную металлическую U - образную трубку-концентратор, заполненную сорбентом. При пропускании через трубку анализируемого газа в сорбенте происходит концентрирование микропримесей этилена и ацетилена. При этом количество адсорбированной при постоянной температуре примеси однозначно определяет ее содержание в газовой фазе. Срок хранения отобранной в трубку-концентратор пробы при обычных окружающих температурах практически не ограничен. Десорбция микропримесей из сорбента происходит только при нагревании трубки до температур, значительно превышающих окружающие.

Отобранная в трубку-концентратор проба доставляется в лабораторию для анализа на хроматографе с высокочувствительным пламенно-ионизационным детектором. Проба вводится в хроматограф через специально разработанную приставку ПХ, при помощи которой проводится предварительное отделение целевых микропримесей от основных компонентов пробы (метан, этан и др.) на обогатительной колонке. И только после этого проба, обогащенная этиленом и ацетиленом, с примесями, объемное содержание которых соизмеримо с содержанием основных компонентов, поступает в разделительную колонку. Содержание этилена и ацетилена фиксируется в виде пиков на диаграммной ленте. Данная методика позволяет обнаруживать этилен и ацетилен, когда их объемная доля 10^{-7} %.

Для применения методики определения содержаний этилена и ацетилена в шахтной атмосфере в практических целях была исследована кинетика образования из углей неопределенных углеводородов.

Соотношения индикаторных компонентов в газе на стадии самонагревания угля до его воспламенения исследовались на специально сконструированной установке, основной частью которой являлся изготовленный из нержавеющей стали реактор. Периодически, через каждые 50° , из реактора отбирались пробы газов и анализировались на содержание этилена и ацетилена. Подбор проб углей для исследования отражал их ряд метаморфизма и географию основных угледобывающих районов страны. При нагревании углей от комнатной температуры до воспламенения во всех экспериментах наряду с другими компонентами выделялись этилен и ацетилен. Объемная доля этилена возрастает в несколько тысяч раз, в то время как изменение объемной доли ацетилена невелико. Указанная закономерность наблюдалась для всех исследованных углей и описывается выражением

$$\frac{C_{\text{эт}}}{C_{\text{ац}}} = \frac{k_{10}}{k_{20}} e^{-(E_1 - E_2)/RT} \quad (21)$$

где $C_{\text{эт}}$ — объемная доля этилена, %; $C_{\text{ац}}$ — объемная доля ацетилена, %; k_{10}, k_{20} — соответственно предэкспоненты скоростей образования этилена и ацетилена, с^{-1} ; E_1, E_2 — соответственно энергия активации реакции образования этилена и ацетилена, Дж/моль.

Результаты экспериментальных исследований кинетики выделения непредельных углеводородов при нагревании углей различных марок обработаны с помощью ЭВМ (рис.4). Следует отметить, что данные зависимости справедливы только до температуры воспламенения летучих веществ угля. При загорании угля в условиях недостаточного доступа кислорода отношение содержания этилена и ацетилена в большинстве случаев становится близким к фоновому, а абсолютные значения во много раз превышают фоновые.

Для исключения погрешности при определении температуры угля по соотношению непредельных углеводородов, обусловленной влиянием массопереноса индикаторных компонентов по выработанному пространству и горным выработкам, нестационарностью тепловых

полей и наличием градиентов температур в скоплении угля, были проведены исследования конвективно-диффузионного массопереноса индикаторных компонентов в горных выработках. Это позволило установить возможные максимальные ошибки в определении температуры угля в зависимости от схемы проветривания выемочного участка и места расположения угольного скопления в выработанном пространстве. Эти ошибки равны 3...25 % от диапазона измерения.

Температура угля в очаге самонагрева определяется из выражения

$$T_y = T \left(1 + \frac{\Delta T}{100} \right) + T_0, \quad (22)$$

где T_y - температура угля, °C; T - температура, определяемая по соотношению этилена и ацетилена (см.рис.4), °C; ΔT - максимальная ошибка в определении температуры, %; T_0 - температура

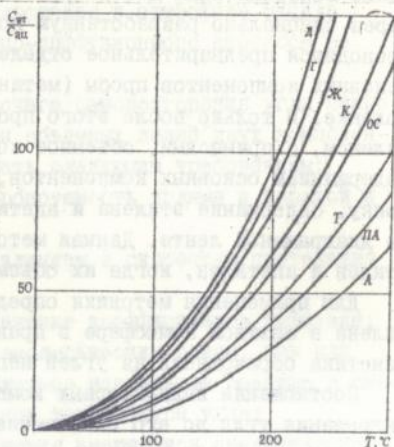


Рис. 4. Зависимость отношения этилена к ацетилену от температуры

вмещающих угольный пласт пород, °С.

Разработанный принципиально новый метод определения температуры угля в местах, не доступных для непосредственного наблюдения по анализу состава рудничной атмосферы, позволяет дать обоснованную интерпретацию стадий развития процесса самонагрева угля.

В восьмой главе дано технико-экономическое обоснование целесообразности реализации предложенных технических решений по управлению процессами самовозгорания угля в глубоких шахтах.

Переоценка с учетом нового методического подхода степени склонности к самовозгоранию углей Донбасса позволила снизить на 8 % количество шахтопластов, отнесенных к категории самовозгорающихся. Согласно предварительным данным по предложенному алгоритму прогноза пожароопасности не более 35 % угольных скоплений, оставляемых в выработанных пространствах, являются опасными по самовозгоранию. Укрупненные расчеты показывают, что применение информации о содержании непредельных углеводородов в шахтной атмосфере позволит на ранней стадии обнаруживать до 75 % эндогенных пожаров.

Итак, повышение достоверности прогноза склонности углей к самовозгоранию, проведение профилактических мероприятий только в потенциально опасных по самовозгоранию зонах и ранняя диагностика эндогенных пожаров позволяют в условиях шахт Донецкого бассейна получить экономический эффект в сумме 13,3 млн руб. в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании теоретических обобщений и экспериментальных исследований решена научная проблема, имеющая важное народнохозяйственное значение и заключающаяся в разработке научно обоснованных технических решений по созданию и широкому внедрению комплекса методов и средств прогноза, обнаружения и предотвращения эндогенных пожаров, особенно в условиях глубоких шахт, для повышения безопасности ведения горных работ и сокращения потерь подготовленных к выемке запасов угля.

Основные научные и практические результаты работы сводятся к следующему.

1. Разработан хроматографический способ исследования физико-химических свойств углей:

обоснован выбор параметров хроматографического опыта по определению окислительной способности углей;

изучены диффузионные свойства углей Донецкого бассейна. Установлено, что диффузионное сопротивление углей характеризует их структурные особенности и может служить показателем активности углей при низкотемпературном окислении;

создан способ определения скорости окисления рядовых углей по данным лабораторных испытаний их проб;

установлена температурная зависимость скорости окисления углей различных стадий метаморфизма, на основании чего разработан экспериментальный метод определения критической температуры самовозгорания. Показана связь значений критической температуры с частотой возникновения эндогенных пожаров в шахтах;

усовершенствован хроматографический метод определения тепловых эффектов окисления углей. Установлено отсутствие прямой функциональной связи между склонностью углей к самовозгоранию и интенсивностью тепловыделения при окислении, однако отдельные угли с высокой эндогенной пожароопасностью имеют и высокий тепловой эффект окисления.

2. Исследованы физико-механические свойства углей Донбасса: установлена функциональная связь между удельной поверхностью углей и фракционным составом;

найдена эмпирическая зависимость реагирующей поверхности угля при окислении от его дробимости. Экспериментально доказано существование взаимосвязи дробимости углей со степенью их склонности к самовозгоранию.

3. Обоснован выбор критерия оценки склонности углей к самовозгоранию, учитывающего константу скорости окисления, критическую температуру самовозгорания, теплоту реакции окисления и реагирующую поверхность угля, выражаемую через его дробимость, и разработана отраслевая методика классификации пластов по степени самовозгораемости. Согласно данной методике переоценена самовозгораемость угольных пластов Донбасса.

4. Установлена взаимосвязь природных факторов залегания угольных пластов и условий формирования пожароопасных скоплений угля. Показано, что пожароопасность конкретного угольного скопления определяется его месторасположением, размерами и возможной температурой самонагрева угля. Разработаны методы определения критической по самовозгоранию мощности угольного скопления

и инкубационного периода самовозгорания угля.

5. Найдено аналитическое решение задачи распределения температурных полей в угольных скоплениях при самонагревании угля в выработанных пространствах выемочных участков при различных схемах проветривания с учетом тепловой депрессии очага самонагревания угля. Создан алгоритм текущего прогноза эндогенной пожароопасности в ходе ведения горных работ, базирующийся на определении критической мощности угольного скопления, возможной температуры самонагревания и инкубационного периода самовозгорания угля.

6. Изучены закономерности движения газомеханической пены в обрушенном массиве и установлена степень ее влияния на температурный режим выработанного пространства. Получены зависимости, позволяющие определить дальность продвижения пены в обрушенных породах, продолжительность охлаждения очагов самонагревания и интенсивность подачи пены. На шахтах "Красный Профинтерн" ПО "Орджоникидзеуголь" и им. 9-й пятилетки ПО "Макеевуголь" отработана технология пенного способа борьбы с эндогенными пожарами.

7. Доказано существование функциональной зависимости между отношением этилена к ацетилену и температурой угля, не обусловленной временем нагревания угля и содержанием кислорода в шахтной атмосфере. Экспериментально доказано, что угли одной стадии метаморфизма в любом угольном регионе обладают одинаковой температурной зависимостью выделения этилена и ацетилена. Это позволило разработать принципиально новый метод определения температуры самонагревания угля по результатам анализа шахтной атмосферы. Метод и созданные для его реализации технические средства (приставка ПХ и трубка-концентратор) внедрены в основных угольных бассейнах страны.

Основные научные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. Альперович В.Я., Пашковский П.С., Эйнер Ф.Ф. Исследование скорости сорбции молекулярного кислорода каменными углями методом газовой хроматографии // Химия твердого топлива. - 1972. - № 5. - С.145-148.
2. Чунту Г.И., Альперович В.Я., Пашковский П.С. Склонность углей к самовозгоранию и ее прогноз // Безопасность труда в промышленности. - 1972. - №10. - С.27-29.
3. Инкубационный период самовозгорания углей / В.Я.Альперович, Г.И.Чунту, П.С.Пашковский и др. // Безопасность труда в

пром-сти. - 1973. - № 9. - С.43-44.

4. Альперович В.Я., Чунту Г.И., Пашковский П.С. Прогноз склонности углей к самовозгоранию по данным их испытаний в хромотографическом режиме // Горноспасательное дело: Сб.науч.тр. - Донецк: ВНИИГД, 1973. - Вып.7. - С.17-23.

5. Опре- ление опасности самовозгорания угля / В.Я.Альперович, Г.И.Чунту, П.С.Пашковский, Б.И.Кошовский // Горноспасательное дело: Сб.науч.тр. - Донецк: ВНИИГД, 1974. - Вып.9. - С.12-15.

6. Альперович В.Я., Чунту Г.И., Пашковский П.С. Определение скорости хемосорбции кислорода углями // Химия твердого топлива. - 1975. - № 6. - С.124-127.

7. Альперович В.Я., Чунту Г.И., Пашковский П.С. Критическая по самовозгоранию мощность слоевых потерь угля // Горноспасательное дело: Сб.науч.тр. - Донецк: ВНИИГД, 1976. - Вып. 12. - С.34-37.

8. Контроль за очагами эндогенных пожаров / В.Я.Альперович, Г.И.Чунту, П.С.Пашковский и др. // Безопасность труда в пром-сти. - 1976. - № 6. - С.25-26.

9. Контроль температуры в очагах пожаров по соотношениям концентраций этилена и ацетилен в газах / В.Я.Альперович, Г.И.Чунту, Б.И.Кошовский, П.С.Пашковский // Уголь Украины. - 1977. - № 1. - С.46-47.

10. Альперович В.Я., Пашковский П.С., Штукарина С.Е. Расчет распределения температур в выработанных пространствах шахт при самонагревании угля // Уголь. - 1979. - № 1. - С.13-15.

11. Альперович В.Я., Пашковский П.С. Физико-химическая сущность процессов, приводящих к повышению эндогенной пожароопасности // Способы и средства ведения горноспасательных работ: Сб.науч.тр. - Донецк: ВНИИГД, 1979. - Вып.16. - С.107-110.

12. Контроль температуры угля по непредельным углеводородам при тушении пожара / Е.М.Корень, В.Я.Альперович, П.С.Пашковский и др. // Способы и средства ведения горноспасательных работ: Сб.науч.тр. - Донецк: ВНИИГД, 1979. - Вып.16. - С.113-115.

13. Альперович В.Я., Пашковский П.С., Кошовский Б.И. Промышленное применение метода контроля температур в очагах самонагревания угля // Уголь Украины. - 1980. - № 3. - С.31-32.

14. О стадиях самонагревания угля / В.Я.Альперович, П.С.Пашковский, А.Е.Калюсский и др. // Методы и средства ведения горноспасательных работ: Сб.науч.тр. - Донецк: ВНИИГД, 1980. - Вып.17.-

С.72-76.

15. Совершенствование метода обнаружения ранних стадий самовозгорания и самонагрева углей по непредельным углеводородам / В.Я.Альперович, П.С.Пашковский, Б.И.Кошовский и др. // Методы и средства борьбы с эндогенными пожарами: Сб.науч.тр. - Донецк: ВНИИГД, 1981. - С.91-95.

16. Каледин Н.В., Пашковский П.С., Альперович В.Я. Условия образования пожароопасных скоплений угля в выработанных пространствах шахт Донбасса // Методы и средства борьбы с подземными пожарами: Сб.науч.тр. - Донецк: ВНИИГД, 1981. - С.99-103.

17. О роли диффузии кислорода в самовозгорании углей / Н.В.Каледин, В.Я.Альперович, П.С.Пашковский и др. // Разработка месторождений полезных ископаемых: Сб.ст. - Киев: Техника, 1982. - Вып.62. - С.108-113.

18. Каледин Н.В., Пашковский П.С., Альперович В.Я. Влияние условий залегания крутых пластов Донбасса на эндогенную пожароопасность // Уголь Украины. - 1982. - № 5. - С.39-40.

19. Каледин Н.В., Пашковский П.С., Лысенко Е.П. Предупреждение и тушение эндогенных пожаров методом торкретирования и тампонирования // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. - 1982. - № 5. - С.9-11.

20. Каледин Н.В., Шайтан И.А., Пашковский П.С. Полимерные материалы для борьбы с эндогенными пожарами // Безопасность труда в пром-сти. - 1983. - № II. - С.16-17.

21. Каледин Н.В., Пашковский П.С., Лысенко Е.П. Улучшение изоляции выработанного пространства при бесцеликовой выемке угля // Современные методы и средства противоаварийной защиты шахт: Сб.науч.тр. - Донецк: ВНИИГД, 1983. - С.35-41.

22. Каледин Н.В., Пашковский П.С., Кравец В.М. Предупреждение эндогенных пожаров на шахтах при щитовой выемке угля / Уголь Украины. - 1984. - № 4. - С.9-10.

23. Каледин Н.В., Пашковский П.С. Тушение эндогенных пожаров на шахтах: Обзор / ЦНИИУголь. - М., 1984. - Вып.3. - 48 с.

24. Каледин Н.В., Пашковский П.С., Шайтан И.А. Предупреждение самовозгорания угля при отработке мощных крутопадающих пластов горизонтальными слоями // Ведение горноспасательных работ и предупреждение аварий: Сб.науч.тр. - Донецк: ВНИИГД, 1984. - С.67-73.

25. Пашковский П.С., Кравец В.М., Тында Г.Б. Ликвидация самовозгорания угля в шахтах струями воды высокого давления // Уголь Украины. - 1985. - № 2. - С.36-37.

26. Определение критического для самовозгорания угля содержания кислорода / Н.В.Каледин, П.С.Пашковский, А.Е.Калюсский и др. // Совершенствование методов и средств ведения горноспасательных работ: Сб. науч. тр. - Донецк: ВНИИГД, 1985. - С.64-69.

27. Изоляция выработанного пространства действующего очистного забоя искусственными породными полосами / П.С.Пашковский, Г.А.Гусар, Е.П.Лысенко, Я.М.Семений // Профилактика и ликвидация аварий на шахтах: Сб. науч. тр. - Донецк: ВНИИГД, 1986. - С.22-26.

28. Исследование самонагрева угля и его локализация заливанием выработанного пространства / П.С.Пашковский, А.Е.Калюсский, Г.А.Гусар и др.; ВНИИ горноспасательного дела. - Донецк, 1987. - 7 с. - Деп. в ЦНИИУголь 14.12.87, № 4366.

29. Предупреждение и локализация эндогенных пожаров при отработке крутых пластов / Н.В.Каледин, П.С.Пашковский, В.Г.Богатырев и др. // Безопасность труда в пром-сти. - 1987. - № 8. - С.50-53.

30. Влияние инертных пен на развитие процессов самонагрева угля в выработанном пространстве / П.С.Пашковский, В.М.Кравец, Г.А.Гусар, В.Г.Богатырев // Тактика ведения горноспасательных работ и оснащение ВГСЧ: Сб. науч. тр. - Донецк: ВНИИГД, 1987. - С.52-58.

31. Определение интервалов пожароопасных скоростей фильтрации воздуха через выработанное пространство изолированного участка / П.С.Пашковский, Г.М.Шецер, В.М.Кравец, Г.А.Гусар // Горноспасательная техника и противоаварийная защита шахт: Сб. науч. тр. - Донецк: ВНИИГД, 1988. - С.60-64.

32. О применении закона Дарси для описания движения газомеханической пены в пористой среде / А.И.Козлюк, Н.В.Каледин, П.С.Пашковский и др.; ВНИИ горноспасательного дела. - Донецк, 1988. - 7 с. - Деп. в ЦНИИУголь 15.09.88, № 4707-уп.

33. Гидродинамика пен в пористой среде / П.С.Пашковский, В.М.Кравец, Г.А.Гусар и др. // Современные методы и средства ведения горноспасательных работ: Сб. науч. тр. - Донецк: ВНИИГД, 1989. - С.93-99.

34. Гидравлическое сопротивление и потери напора при течении высокочастотной пены в трубах малого сечения / П.С.Пашковский, В.Г.Богатырев, В.П.Засевский и др.; ВНИИ горноспасательного дела. - Донецк, 1989. - 7 с. - Деп. в ЦНИИУголь 4.11.89, №4985-уп.

35. Влияние схем проветривания выемочных участков на эндо-

тенную пожароопасность / Н.В.Каледин, И.А.Шайтан, П.С.Пашковский и др. // Безопасность труда в пром-сти. - 1990. - № 3. - С.48-50.

36. Разработка имитационной модели формирования и развития очага самонагрева угля в шахте / Н.В.Каледин, А.И.Козлюк, П.С.Пашковский и др.; ВНИИ горноспасательного дела. - Донецк, 1990. - 7 с. - Деп. в ЦНИЭИУголь 14.05.90, № 5123-уп.

37. Предупреждение и локализация эндогенных пожаров / П.С.Пашковский, В.М.Кравец, Г.А.Гусар и др. // Безопасность труда в пром-сти. - 1990. - № 6. - С.28-30.

38. Пашковский П.С., Кошовский Б.И., Коваль И.Н. Влияние дробимости на склонность угля к самовозгоранию / Уголь Украины. - 1990. - № 12. - С.29-30.

39. Критерий оценки склонности угля к самовозгоранию / П.С.Пашковский, Б.И.Кошовский, А.Е.Калюсский, И.Н.Коваль // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. - Донецк: ВНИИГД, 1990. - С.99-106.

40. Некоторые факторы склонности угля к самовозгоранию / П.С.Пашковский, И.Е.Болбат, И.А.Шайтан и др.; ВНИИ горноспасательного дела. - Донецк, 1991. - 7 с. - Деп. в ЦНИЭИУголь 20.02.91, № 5247.

41. Каледин Н.В., Пашковский П.С. Обнаружение и контроль за развитием и тушением эндогенных пожаров: Обзор / ЦНИЭИУголь. - М., 1991. - 60 с.

42. Условия охлаждения очагов самонагрева угля в выработанном пространстве / В.П.Засевский, П.С.Пашковский, Г.А.Гусар, А.Б.Бугаев // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. - Донецк: ВНИИГД, 1991. - С.44-50.

43. Пашковский П.С., Шайтан И.А., Коваль И.Н. Новый метод локального прогноза эндогенной пожароопасности выемочного участка в процессе ведения горных работ // Научно-технические достижения и передовой опыт в угольной промышленности: Ежемес. информ. сб. / ЦНИЭИУголь. - 1991. - № 10. - С.19-22.

44. Пашковский П.С. Исследование гидродинамики пенных потоков в пористой среде; НИИ горноспасательного дела. - Донецк, 1991. - 10 с. - Деп. в ЦНИЭИУголь 20.01.92, № 5346.

45. Пашковский П.С. Новый комплексный метод оценки склонности углей к самовозгоранию; НИИ горноспасательного дела. - Донецк, 1991. - 16 с. - Деп. в ЦНИЭИУголь 20.01.92, № 5347.

46. Пашковский П.С. Предпосылки создания метода обнаружения признаков самонагрева угля по соотношению индикаторных газов; НИИ горноспасательного дела. - Донецк, 1992. - 14 с. - Деп. в ЦНИЭУголь 18.03.92, № 5365.

47. Пашковский П.С. Математическое описание фильтрационных и тепловых процессов в выработанных пространствах шахт при самонагревании угля; НИИ горноспасательного дела. - Донецк, 1992. - 15 с. - Деп. в ЦНИЭУголь 22.04.92, № 5377.

48. Пашковский П.С. Управление процессами самовозгорания угля в глубоких шахтах // Уголь Украины. - 1992. - № 9. - С.

49. А.с. СССР 607051, Е 21 F 5/00. Способ обнаружения эндогенных пожаров в угольных шахтах / В.Я.Альперович, Г.И.Чунту, Б.И.Кошовский, П.С.Пашковский (СССР). - № 2056375/22-03; Заявлено 22.08.74; Опубл. 15.05.78, Бюл. № 18. - 3 с.

50. А.с. СССР 1320452, Е 21 F 5/00. Способ возведения пенопластовой перемычки / Н.В.Каледин, П.С.Пашковский, В.М.Кравец и др. (СССР). - № 4026778/22-03; Заявлено 24.02.86; Опубл. 30.06.87. Бюл. № 24. - 3 с.

51. А.с. СССР 1346820, Е 21 F 5/00. Способ предупреждения самовозгорания угля в выработанном пространстве / П.С.Пашковский, И.А.Шайтан, В.Т.Хорольский и др. (СССР). - № 4059871/22-03; Заявлено 21.04.86; Опубл. 23.10.87. Бюл. № 39. - 3 с.

52. А.с. СССР 1546668, Е 21 F 5/00. Способ предупреждения эндогенных пожаров при разработке крутых пластов щитовыми агрегатами / А.И.Козлюк, В.М.Кравец, П.С.Пашковский и др. (СССР). - № 4406048/22-03; Заявлено 11.04.88; Опубл. 28.02.90. Бюл. № 8. - 4 с.

53. А.с. СССР 1689644, Е 21 F 5/00. Способ определения склонности углей к самовозгоранию // А.Е.Калюсский, И.Н.Коваль, Б.И.Кошовский, П.С.Пашковский и др. (СССР). - № 4729075/03; Заявлено 09.08.89; Опубл. 07.11.91. Бюл. № 41. - 4 с.

Подписано к печати 02.07.92. Формат 60x90¹/₁₆. Офсетная печать
Усл.печ.л. 2,5. Тираж 160 экз. Заказ 906. Бесплатно

467466

AB 25.596

4 AB 25.596