

На правах рукописи



ВОЛБЕРГ Александр Владимирович

**НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ОКИСЛЕНИЕ УГЛЕЙ
И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ
ИХ САМОНАГРЕВАНИЕ ПРИ ОТРАБОТКЕ МОЩНЫХ
УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ**

**Специальность 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет» (ТулГУ), г. Тула.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
КАЧУРИН Николай Михайлович.

Официальные оппоненты:

ГЕНДЛЕР Семен Григорьевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург, профессор кафедры безопасность производств;

ЛИСКОВА Мария Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ), г. Пермь, доцент кафедры.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово.

Защита диссертации состоится «19» июня 2019 г. в 14 час 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.271.04 при Тульском государственном университете по адресу: 300012, г. Тула, просп. Ленина, 90, 6-й уч. корпус, ауд. 220.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тульского государственного университета.

Автореферат разослан « 8 » апреля 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  Стась Галина Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Анализ технологий разработки мощных пологих пластов показывает, что в мировой практике пласты мощностью более 3,5 м отрабатывают двумя технологическими схемами: разработка пластов наклонными слоями, получившая наибольшее распространение и с выпуском подкровельной толщи угля. При слоевой отработке запасов мощных пластов, имеющей достаточно большое разнообразие и технологических особенностей, используются очистные механизированные комплексы, созданные для пластов средней мощности, которые достигают максимальной нагрузки на забой 15-20 тыс.т/сут при мощности отрабатываемого пласта 2,8-3,5 м, а при увеличении вынимаемой мощности до 4,5-5,2 м средняя суточная нагрузка на комплексный механизированный забой (КМЗ) снижается в 1,2-1,6 раза. В настоящее время в отечественной и зарубежной науке и практике проводятся исследования технологии отработки мощных пологих пластов одним подсечным слоем длинными КМЗ с выпуском угля из подрабатываемой подкровельной толщи в забой.

Положительными факторами применения технологии является: высокая производительность пласта, низкий удельный объем проведения подготовительных выработок, возможность управления качеством горной массы за счет селективной выемки угольных пачек и исключения присечки боковых пород, при этом возникает ряд негативных явлений: большая высота очистного забоя и подготовительных выработок, что приводит к отжиму угля, повышенной опасности работ, увеличению массы забойного оборудования и крепи; высокие потери угля (до 50 %) из-за оставления предохранительных угольных пачек между слоями, в подкровельной толще и у почвы пласта; высокая пожароопасность, большие затраты на профилактику и ликвидацию пожаров; динамический характер блочного обрушения пород основной кровли при недостаточном заполнении выработанного пространства обрушенными породами непосредственной кровли.

Для снижения эндогенной пожароопасности как одного из главных недостатков технологии необходимо исследовать закономерности самонагревания угля, а также возникновения эндогенных пожаров в выработанном пространстве очистных участков.

Поэтому исследования низкотемпературного окисления углей и теплофизических процессов, вызывающих их самонагревание при отработке мощных угольных пластов, являются весьма актуальными и позволят повысить эффективность прогноза и профилактики эндогенных пожаров при отработке мощных угольных пластов Кузбасса.

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с тематическим планом НИР Научно-образовательного центра по проблемам рационального природопользования при комплексном освоении минерально-сырьевых ресурсов ТулГУ, Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (рег. номер 2.2.1.1/3942) и Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»

на 2009-2013 годы (гос. контракт № 02.740.11.0319), а также тематическими планами НИР АО «СибНИИ-Углеобогащения».

Целью работы являлось уточнение существующих закономерностей низкотемпературного окисления углей и теплофизических процессов, вызывающих самовозгорание угольных скоплений при отработке мощных угольных пластов для обеспечения безопасности горных работ по фактору эндогенной пожароопасности.

Идея работы заключается в том, что обеспечение безопасности горных работ по фактору эндогенной пожароопасности основывается на достоверных оценках и адекватных математических моделях низкотемпературного окисления углей и теплофизических процессов, вызывающих самовозгорание угольных скоплений при одностадийной технологии отработки мощных пологих пластов с управляемым выпуском угля из межслоевых и подкровельных пачек.

Основные научные положения работы заключаются в следующем:

1 Системные принципы технологии снижения риска эндогенных пожаров в угольных шахтах основываются на моделировании риска по физико-химическому и теплофизическому факторам, а также моделировании низкотемпературного окисления при появлении предвестников самовозгорания угля и выявления очагов самонагрева угля на ранней стадии развития.

2 Потери угля в выработанном пространстве вызывают процесс низкотемпературного окисления вещества угля и самонагревание угольного слоя в аэродинамически активной зоне обрушения пород кровли, при этом нестационарное поле температуры угольного слоя при самонагревании описывается уравнением теплопроводности с экспоненциальным источником тепловыделения, а продольный профиль температуры имеет точку максимума, мигрирующую вглубь рассматриваемого угольного слоя.

3 Эмпирические закономерности, отражающие связь константы скорости взаимодействия кислорода с углем и коэффициента эффективной диффузии кислорода в угле, с факториальными признаками, во-первых, свидетельствуют о том, что эта связь, как правило, нелинейная, и, во-вторых, позволяют выявить группу физико-химических свойств угля, которые являются наиболее значимыми факториальными признаками.

Новизна основных научных и практических результатов:

усовершенствованы методические положения экспериментальных исследований и моделирования низкотемпературного окисления углей и теплофизических процессов, вызывающих самонагревание угля при отработке мощных угольных пластов Кузбасса;

разработана математическая модель самонагрева угольного слоя в аэродинамически активной зоне обрушения пород кровли, отличающиеся тем, что нестационарное поле температуры угольного слоя при самонагревании описывается уравнением теплопроводности с источником, мощность которого изменяется в пространстве по экспоненциальному закону;

доказано, что при самонагревании угольного слоя в аэродинамически активной зоне обрушения пород кровли продольный профиль температуры имеет

точку максимума, мигрирующую вглубь рассматриваемого угольного слоя;

обоснована физическая модель и математическое описание прогнозной оценки эндогенной пожароопасности, отличающаяся тем, что динамика показателей, влияющих на эндогенную пожаробезопасность, оценивается в результате вычислительных экспериментов и ситуационного анализа;

предложены математические модели и алгоритмы оценки низкотемпературного окисления углей и теплофизических процессов, вызывающих самонагревание угля при отработке мощных угольных пластов Кузбасса;

Научное значение работы состоит в установлении особенностей влияния горно-геологических, геомеханических и технологических факторов на процессы низкотемпературного окисления углей и теплофизические процессы, вызывающих самонагревание угля при отработке мощных угольных пластов.

Обоснованность и достоверность теоретических положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

корректной постановкой задач исследования, применением классических методов математической физики, математической статистики, теории вероятностей и современных достижений вычислительной математики;

удовлетворительной сходимостью результатов прогноза с фактическими данными (отклонение не превышает 20 %) и большим объемом вычислительных экспериментов;

значительным объемом шахтных наблюдений, а также результатами анализа плановых замеров;

положительными результатами практического использования.

Научное значение работы состоит в установлении особенностей влияния горно-геологических, геомеханических, конструктивных и технологических факторов на процессы зоны дегазации и гидравлического разрушения подкровельной толщи и управляемость выпуска горных пород на подзавальный конвейер очистного механизированного комплекса для обоснования рациональных технологических параметров, обеспечивающих повышение эффективности и безопасности одностадийной отработки запасов полезного ископаемого.

Практическая ценность работы состоит в обосновании методов оценки эндогенной пожароопасности и разработке практических рекомендаций по снижению вероятности самовозгорания угля при отработке мощных угольных пластов Кузбасса.

Личный вклад автора диссертации в выполнение исследований заключается в постановке задач исследований, обосновании математических моделей, проведении вычислительных и лабораторных экспериментов, разработке практических рекомендаций по снижению эндогенной пожароопасности при отработке мощных угольных пластов Кузбасса.

Реализация научных результатов. Результаты исследований использованы: при отработке запасов мощного пологого пласта 21 в условиях шахты «Ольжерасская-Новая» АО «УК Южный Кузбасс». Научные и практические результаты были использованы в Тульском государственном университете при выполнении НИР по федеральной и межрегиональным научно-техническим

программам, а также включены в учебно-методические материалы для студентов, обучающихся по специальности «Горное дело».

Апробация работы. Научные положения и практические рекомендации диссертационной работы в целом, и отдельные ее разделы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры геотехнологий и строительства подземных сооружений ТулГУ (г. Тула, 2014 - 2018 гг.); ежегодных научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава ТулГУ (г. Тула, 2014 - 2018 гг.); международных конференциях по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики (г. Тула, 2014 - 2017 гг.); технических советах шахты «Ольжерасская-Новая» (2006-2012 гг.); на научных семинарах кафедры «Подземная разработка пластовых месторождений» НИТУ МИСиС (г. Москва, 2014-2016 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе 2 статьи в издании, входящем в международную систему цитирования Web of Science, и 4 статьи в изданиях, определенных перечнем ВАК Минобрнауки России.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит список литературы из 216 наименований, 14 таблиц и 38 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Решением проблемы низкотемпературного окисления углей и теплофизических процессов, вызывающих самонагревание угля при подземной разработке угольных месторождений занимались научные коллективы ИПКОН РАН, ИУ СО РАН, Санкт-Петербургского горного университета, МИСиС, КузГТУ, ТулГУ и др. Значительный вклад в создание теоретической и практической базы развития технологии разработки мощных пологих пластов и формирование научных представлений о пожарной безопасности при отработке мощных пологих пластов внесли отечественные ученые: академик РАН К.Н. Трубецкой, чл.-корреспонденты РАН Д.Р. Каплунов, В.И. Клишин, В.Н. Захаров, профессора В.Я. Альперович, Х.А. Баев, Л.Н. Быков, В.С. Веселовский, В.Н. Вылегжанин, С.Г. Гендлер, Е.И. Глузберг, Е.И. Захаров, Н.М. Качурин, А.Д. Климанов, Н.И. Линденау, В.М. Маевская, Э.М. Соколов и др.

Аналитический обзор показал, что существующие подходы к совершенствованию безопасной разработки мощных пологих угольных пластов не отражают динамики теплофизических процессов, обусловленных низкотемпературным окислением углей подкровельной и межслоевой пачки. Следовательно, вопросы низкотемпературного окисления углей и теплофизических процессов, вызывающих самонагревание угля при подземной разработке угольных месторождений, требуют дальнейшего развития и совершенствования.

Современное состояние знаний по рассматриваемой проблеме, цель и идея работы обусловили необходимость постановки и решения следующих задач.

1 Провести анализ и обобщение существующей базы данных для оценки риска самонагревания угля и возникновения эндогенных пожаров на шахтах Кузбасса, а также дать оценку их последствий.

2 Обосновать физическую модель и математическое описание низкотемпературного окисления угля, провести математическое моделирование поглощения кислорода веществом угля в целиках и выработанных пространствах, и динамики диффузионных потоков кислорода, поступающего в угольные скопления.

3 Уточнить математические модели теплофизики процесса самовозгорания угля и формирования эндогенной пожароопасности на очистных и подготовительных участках.

4 Определить константы скорости низкотемпературного окисления на модельных угольно-породных смесях и оценить значения эффективного коэффициента диффузии кислорода в угле. Провести лабораторные и вычислительные эксперименты.

5 Разработать структурно-функциональную схему подсистемы оценки категории опасности по фактору самовозгорания угля на очистных участках. Усовершенствовать методические положения оценки пожароопасности технологии отработки мощных пологих пластов и систем выемки угля с выемкой подсечного слоя и выпуском горной массы подкровельной толщи, разработать мероприятия и рекомендации по снижению эндогенной пожароопасности.

Статистический анализ возникновения подземных пожаров в угольных шахтах показывает, что эффективность существующих методов для прогнозирования риска эндогенных пожаров, обусловленных самовозгоранием угля, физическая модель и математическое описание угрозы возникновения пожароопасных ситуаций в горных выработках и выработанных пространствах очистных участков угольных шахт является неудовлетворительной.

Поэтому необходимо развивать системные принципы технологии снижения риска эндогенных пожаров в угольных шахтах, которые основываются на моделировании риска по физико-химическому и теплофизическому факторам, а также моделировании низкотемпературного окисления при появлении предвестников самовозгорания угля. Анализ структуры риска возникновения эндогенного пожара (ЭП) позволяет записать концептуальную формулу в следующем виде: $R_{ЭП} = P_{ЭП} \cdot U$, где $R_{ЭП}$, $P_{ЭП}$ – риск и вероятность возникновения ЭП соответственно; U - ущерб от возникновения ЭП.

В целом же системный подход к снижению риска и локализации последствий возникновения ЭП в угольных шахтах сводится к решению следующих научных и практических задач.

- Обоснование алгоритмов и разработка комплекса программных средств для моделирования процессов низкотемпературного окисления угля и его самонагревания в целиках и выработанных пространствах.

- Совершенствование технологии обследования объектов опасных по фактору самовозгорания угля.

- Обоснование алгоритмов и разработка комплекса программных средств для моделирования тепломассообмена в угольных целиках и выработанном

пространстве в реальном масштабе времени при нормальных и аварийных режимах эксплуатации шахты.

- Совершенствование технологии определения склонности углей к самовозгоранию, а также диффузионных свойств и константы скорости низкотемпературного углей.

- Обоснование моделей динамики тепломассообмена в пожароопасных объектах, разработка алгоритмов и комплекса программных средств моделирования тепломассообмена в угольных целиках и выработанных пространствах высокопроизводительных угольных шахт.

- Обоснование моделей динамики кислорода в горных выработках угольных шахт.

- Совершенствование компьютерной технологии разработки, уточнения и реализации плана ликвидации аварии для пожароопасных шахт.

- Разработка и внедрение технологии снижения последствий возникновения ЭП в угольных шахтах.

Результаты исследований диффузионного переноса газов в пористых сорбирующих средах показывают, что уголь в угольных целиках и выработанных пространствах будет взаимодействовать с кислородом воздуха в режиме низкотемпературного окисления. Взаимодействие кислорода с угольным веществом в целиках и выработанных пространствах происходит за счет проникновения кислорода в пористую структуру вещества и диффузионного переноса газовых молекул в микропорах и по внутренним поверхностям твердого скелета. Система внутренних пор является в этом случае транспортными каналами для проникновения газов внутрь твердого вещества. Молекулы кислорода будут сорбироваться твердыми поверхностями транспортных каналов, а затем вступать в химические реакции с веществом угля.

С этой точки зрения, практический интерес представляет нестационарная одномерная диффузия в полуограниченном пространстве. Для этих условий получена следующая зависимость:

$$c_k(x, t) = 0,5c_{k(в)} \left[\exp\left(-x\sqrt{u_{k(0)}\Gamma_k^{-1}D_k^{-1}}\right) \operatorname{erfc}\left(0,5D_k^{-0,5}xt^{-0,5} - \sqrt{u_{k(0)}t\Gamma_k^{-1}}\right) + \exp\left(x\sqrt{u_{k(0)}\Gamma_k^{-1}D_k^{-1}}\right) \operatorname{erfc}\left(0,5D_k^{-0,5}xt^{-0,5} + \sqrt{u_{k(0)}t\Gamma_k^{-1}}\right) \right], \quad (1)$$

где c_k , $c_{k(в)}$ – объемная концентрация кислорода в газовой смеси, содержащейся в порах угля и концентрация кислорода в воздухе соответственно; $u_{k(0)}$ – начальная скорость сорбции кислорода; Γ_k – константа Генри для процесса сорбции кислорода веществом угля; D_k – коэффициент диффузии кислорода в угле; x , t – пространственная координата и время соответственно.

Для моделирования динамики диффузионного потока кислорода в вещество угля целиков и выработанных необходимо использовать 1-й закон Фика, в соответствии с которым установлено, что

$$j_k|_{x=0} = c_{k(в)}\sqrt{D_k} \left[(\pi t)^{-0,5} \exp\left(-u_{k(0)}\Gamma_k^{-1}t\right) + \sqrt{u_{k(0)}\Gamma_k^{-1}} \operatorname{erf}\left(\sqrt{u_{k(0)}\Gamma_k^{-1}t}\right) \right], \quad (2)$$

где $j_k|_{x=0}$ – диффузионный поток кислорода, поступающего в вещество угля.

Для автоматизированного расчета нестационарного поля концентраций кислорода в слое вещества угля целиков и выработанных пространств, и динамики диффузионного потока кислорода, поступающего в целики и слой угля в выработанном пространстве, разработан комплекс программных средств, который реализуется в прикладном пакете Mathematica 2.2.

Разработанное математическое обеспечение было использовано для проведения вычислительного эксперимента, в котором коэффициент эффективной диффузии изменялся от $10^{-7} \dots 10^{-6}$ м²/с, а отношение начальной скорости сорбции кислорода веществом угля целиков и выработанных пространств к константе Генри от 10^{-4} до $5 \cdot 10^{-2}$ 1/с. Результаты вычислительных экспериментов показывают, что объемная концентрация кислорода в веществе угля монотонно убывает, а диффузионный поток кислорода, поступающего в вещество угля, стремится к некоторому постоянному значению, которое достигается через достаточно большое время. Численно это предельное значение можно определить как асимптоту функции (2) $j_{K(\infty)} = \lim_{t \rightarrow \infty} j_K|_{x=0} = c_{K(\infty)} \sqrt{u_{K(0)} D_K \Gamma_K^{-1}}$.

Возможные технологические схемы лабораторных исследований процесса низкотемпературного окисления угля реализуются в адсорберах открытого или закрытого типа. Практические наблюдения показали, что для снижения трудоемкости лабораторных исследований целесообразно использовать адсорбер закрытого типа. Установлено, что в этом случае

$$a(t) = \frac{\Gamma_K (C_0 K + a_0 k_a)}{K + k_a \Gamma_K} + \frac{(a_0 - C_0 \Gamma_K) k_a}{K + k_a \Gamma_K} \exp[-(K + k_a \Gamma_K) t], \quad (3)$$

$$C(t) = \frac{C_0}{K + k_a \Gamma_K} \{K + k_a \Gamma_K \exp[-(K + k_a \Gamma_K) t]\}, \quad (4)$$

где a – объем кислорода, сорбированного единичной массой угля; $a_0 = \text{const}$ – начальная сорбция кислорода, обусловленная тем, что процесс поглощения кислорода может пойти гораздо раньше, чем уголь окажется в адсорбере и тогда $a(0) = a_0 = \text{const}$; K – константа скорости сорбции кислорода углем; k_a – коэффициент, учитывающий скорость уменьшения концентрации кислорода в адсорбере закрытого типа; C – концентрация кислорода в адсорбере закрытого типа, $C(0) = C_0 = \text{const}$.

Зависимости (3) и (4) позволяют полностью воспроизвести процесс, протекающий в адсорбере закрытого типа. Поэтому данные зависимости целесообразно использовать в качестве математических моделей для решения обратных задач при оценке численных значений константы скорости низкотемпературного окисления и углового коэффициента изотермы сорбции Генри.

Для измерения изменения концентрации кислорода, сорбированного углем, необходимо устройство, состоящее из термостата, реакционной камеры, манометра, источника опорного давления, а также хроматограф для детального изучения газовых проб. Установлено, что конструкция реакционной камеры, должна обеспечивать протекание процесса окисления частиц угля размером не более 0,1 мм, в кинетической области. Константа скорости низкотемпературно-

го взаимодействия кислорода с угольно-породными смесями определена по 32 пробам различного состава. В качестве факториальных признаков, влияющих на величину константы скорости, исследовались показатели технического анализа угольно-породных смесей и их петрографические свойства, концентрация кислородосодержащих групп. На рисунке 1 представлена характерная кинетика концентрации кислорода в адсорбере закрытого типа.

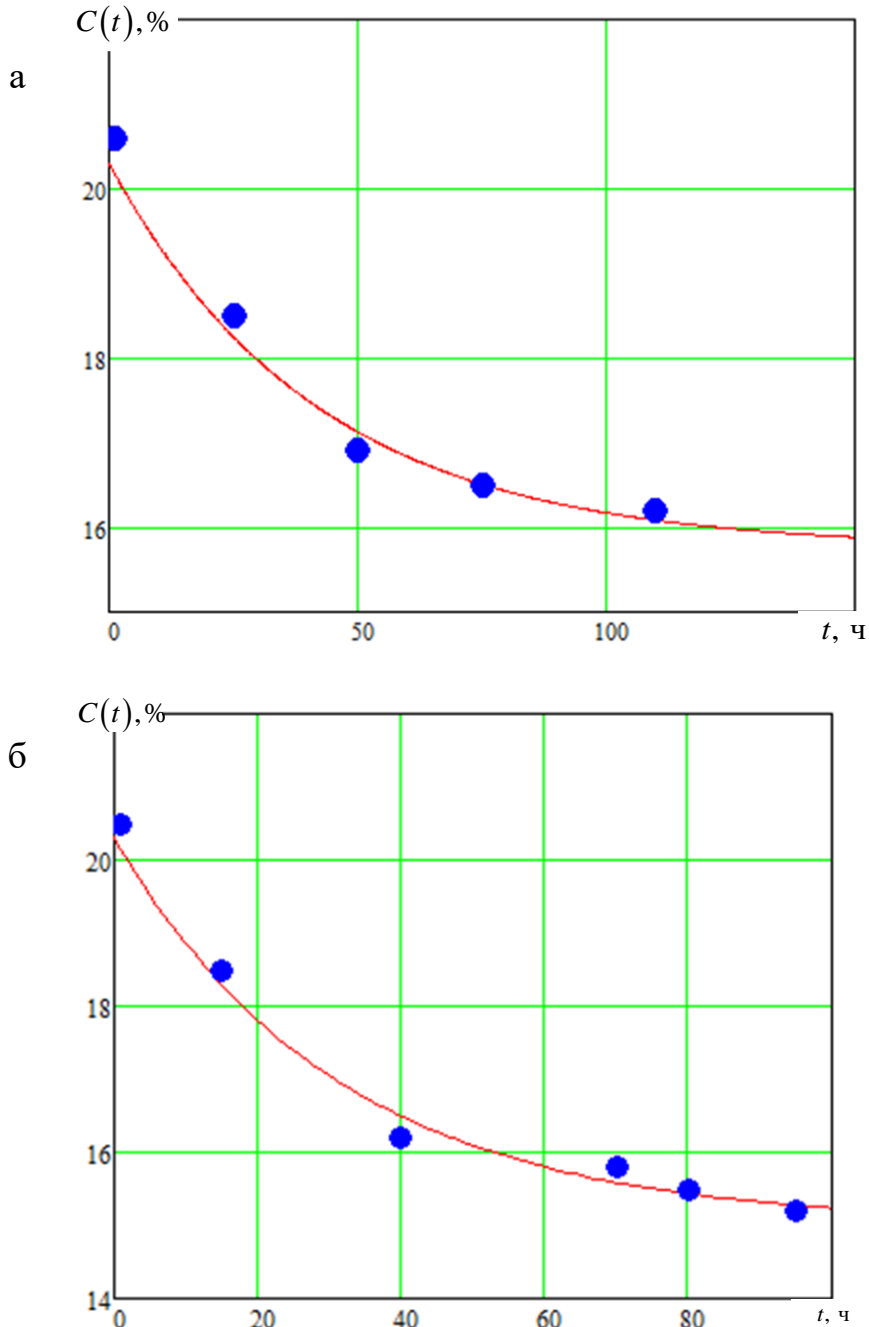


Рисунок 1 - Кинетика концентрации кислорода в адсорбере закрытого типа:
а – процесс при температуре 25 °С; б – процесс при температуре 40 °С

Результаты экспериментальных данных свидетельствуют о том, что склонность углей к окислению зависит от их петрографического состава (таблица). Химическая активность клареновых углей, как правило, выше, чем дюреновых и кеннелей, что еще раз подтверждают данные исследований, выпол-

ненных ранее. Это указывает на существование связи химической активности углей и содержания в них микрокомпонентов группы витринита. Так, химическая активность клареновых углей с содержанием витринита 68...80 % в среднем в 2 - 3 раза выше, чем дюреновых углей с содержанием витринита 43...54 % и кеннелей.

Лабораторные исследования коэффициента диффузии кислорода в угле позволили получить следующую эмпирическую формулу:

$$D_k = \left(10,97828 + 2,21942 \exp(0,070844 R_k) + 1,28323 \times \right. \\ \left. \times \exp(0,22887 S) - 2,53868 (0,60063 + 0,00308 A_y)^{-1} + 72,37784 W^{-1,0967} - \right. \\ \left. - 9,9550 V_l^{0,12052} + 66,18845 V_t^{-0,64987} - 0,00504 F - 0,09047 \{Sm + Vt\} \right), \quad (5)$$

где R_k – концентрация кислородсодержащих групп;

S, F, A_y, W – содержание серы и фюзенита в угле, зольность и влажность угля соответственно;

V_t, V_l и $\{Sm + Vt\}$ – петрографические характеристики угля.

Зависимость константы скорости низкотемпературного окисления угольно-породных смесей от их петрографического состава

Петрографический тип	Содержание витринита, %	Константа скорости низкотемпературного окисления угольно-породной смеси $10^3 K, 1/c$	
		Максимальное значение	Среднее значение
Кларены	68 ... 80	2,03	0,76
Дюрено-кларены	55 ... 62	1,23	0,65
Кларено-дюрены	48 ... 51	1,73	0,45
Дюрены	43 ... 54	1,33	0,32

Аналитическое исследование распространения тепла в угольном массиве в зоне очага самовозгорания угля выполнено с учетом того, что размеры предохранительных и междуштрековых целиков, выемочных столбов и панелей в плане значительно превышают среднюю мощность пласта, поэтому процесс теплопереноса с достаточной точностью можно считать двумерным. При этом очаг самовозгорания в начальной стадии имеет небольшие размеры и, таким образом, представляет собой точечный источник тепла, связанный с атмосферой горных выработок через обнаженную поверхность угольного пласта. Время развития очага эндогенного пожара на порядки превышает время измерений тепловых характеристик угольного массива, поэтому целесообразно рассматривать стационарное поле температуры, обусловленное действием очага пожара в плоском полубесконечном пространстве. Стационарное температурное поле угольного пласта описывается уравнением Лапласа: $\Delta T = 0$, где T – температура угольного пласта; $\Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$ – оператор Лапласа. Температуру обнаженной поверхности пласта можно считать практически постоянной, то есть $T(x, 0) = T_c = \text{const}$. Решение уравнения Лапласа для данного граничного усло-

вия позволило определить расстояние до очага эндогенного пожара по формуле: $R = 2\lambda_y \sigma \varepsilon (\alpha q_{u.\max})^{-1} (t_0 - t_\varepsilon) (546 + t_c + t_\varepsilon) \left[(273 + t_c)^2 + (273 + t_\varepsilon)^2 \right]$, где λ_y – теплопроводность угля; α – коэффициент поверхностной теплоотдачи; $q_{u.\max}$ – максимальное значение плотности теплового потока на поверхности обнажения угольного пласта; σ – постоянная Стефана-Больцмана; ε – излучательная способность поверхности обнажения угольного массива; t_0, t_c, t_ε – значения температуры угля в очаге, поверхности обнажения угольного пласта и воздуха в выработке по шкале Цельсия. Если известны максимальная плотность теплового потока и плотность потока $q_1 = 0,5q_{u.\max}$ в точке x_1 , температура угля в очаге ЭП: $t_0 = t_c + 0,5\alpha x_1 q_{u.\max} \left\{ \lambda_y \sigma \varepsilon (546 + t_c + t_\varepsilon) \left[(273 + t_c)^2 + (273 + t_\varepsilon)^2 \right] \right\}$.

В процессе самонагрева угольных целиков и угольных скоплений в выработанных пространствах имеет место латентный (инкубационный) период развития. Известно, что в начальной стадии окисления углей происходит лишь поглощение кислорода и почти не выделяется никаких легких продуктов. Зависимость (2.26) позволяет представить источник тепловыделения в следующем виде: $w_0 = j_{k(\infty)} q F_{y.c} / V_{y.c}$, где q – тепловой эффект поглощения кислорода углем; $F_{y.c}$, $V_{y.c}$ – площадь поверхности и объем угольного скопления соответственно. При этом зависимость (1) показывает уменьшение концентрации кислорода по мере удаления от внешней поверхности угольных целиков и угольных скоплений в выработанных пространствах. Следовательно, математическая модель самонагрева угольных целиков и угольных скоплений в выработанных пространствах можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_y \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{w_0}{c\rho} \exp(-kx), \quad (6)$$

$$T(x, 0) = T_0 = \text{const}, \quad T(0, t) = T_c = \text{const}, \quad \lim_{x \rightarrow \infty} T \neq \infty, \quad (7)$$

где a_y – температуропроводность угля.

Решение уравнения (6) для условий (7) получено в виде:

$$\begin{aligned} & [T(x, t) - T_0](T_c - T_0) = \text{erfc} \left[0,5x(a_y t)^{-0,5} \right] - w_0 \left[\lambda k^2 (T_c - T_0) \right] \times \\ & \times \left\{ \left[\text{erfc} \left[0,5x(a_y t)^{-0,5} \right] - \exp(-kx) - 0,5 \exp(k^2 at - kx) \text{erfc} \left[k\sqrt{at} - 0,5x(a_y t)^{-0,5} \right] \right] + \right. \\ & \left. + 0,5 \exp(k^2 at + kx) \text{erfc} \left[k\sqrt{at} - 0,5x(a_y t)^{-0,5} \right] \right\}. \quad (8) \end{aligned}$$

Результаты вычислительных экспериментов показывают, что продольный профиль температуры угольных целиков и угольных скоплений в выработанных пространствах имеет точку экстремума, являющуюся максимальной температурой угля в данный момент времени. Эта точка перемещается вглубь угольного скопления, а максимальная температура угля растет. Таким образом, проводя вычислительные эксперименты в процессе теплового мониторинга угольных целиков и угольных скоплений в выработанных пространствах, мож-

но прогнозировать теплофизические процессы в угольных целиках и угольных скоплениях в выработанных пространствах по фактору возникновения эндогенных пожаров.

Предлагаемый способ определения опасности возникновения эндогенных пожаров при отработке мощных угольных пластов заключается в установлении категории и степени пожароопасности по времени достижения критической температуры угля, отличающийся тем, что определяют начальную температуру угля и температуру угля на контакте с шахтной атмосферой, определяют диффузионный поток кислорода в угольный слой, находящийся в выработанном пространстве, измеряют тепловой эффект поглощения кислорода углем, площадь поверхности и объем угольного слоя, определяют теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, мощность теплового источника и плотность угля, оценивают коэффициент затухания продольного профиля кислорода в выработанном пространстве, а опасность возникновения эндогенного пожара прогнозируют, используя следующее соотношение (8).

По результатам вычислительного эксперимента определяют время достижения максимальной температуры угольного слоя в выработанном пространстве и если эта температура менее 1 года, то категория пожароопасности – **A**, а степень пожароопасности – «Чрезвычайно опасно». Если же время достижения максимальной температуры угольного слоя в выработанном пространстве от 1 года до 5 лет, то категория пожароопасности – **B**, а степень пожароопасности – «Опасно». Если время достижения максимальной температуры угольного слоя в выработанном пространстве более 5 лет, то категория пожароопасности – **C**, а степень пожароопасности – «Неопасно».



Рисунок 2 - Структурно-функциональная схема подсистемы оценки категории опасности по фактору самовозгорания угля на очистных участках

Структурно-функциональная схема подсистемы оценки категории опасности по фактору самовозгорания угля на очистных участках представлена на рисунке 2.

Разработан единый подход и усовершенствована система мониторинга аэрогазодинамических и теплофизических процессов, обусловленных геомеханическими процессами сдвига и обрушения подкровельной пачки и вмещающих пород. Разработаны комплекты математических моделей и комплексы программных средств для оценки эффективности профилактических мероприятий, что повышает эффективность САПР технической экспертизы на всех этапах проектирования и эксплуатации угольных месторождений.

На практике доказана эффективность системы комплексного мониторинга опасности по фактору самовозгорания угля на очистных участках действующих шахт, включающая подсистемы мониторинга аэрогазодинамических и тепловых процессов.

Уточненные аэрогазодинамические и теплофизические закономерности, характеризующих возможности самовозгораний угольных скоплений, позволяют усовершенствовать систему мониторинга безопасности горных работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате комплексных теоретических и экспериментальных исследований уточнены существующие закономерности низкотемпературного окисления углей и теплофизических процессов, вызывающих самовозгорание угольных скоплений при отработке мощных угольных пластов для обеспечения безопасности горных работ по фактору эндогенной пожароопасности, что имеет важное значение для угольной промышленности России.

Основные выводы и рекомендации заключаются в следующем.

1 Важнейшей подсистемой технологии снижения риска и локализации последствий возникновения эндогенных пожаров (ЭП) является компьютерная технология оценки динамики температурного режима угольных целиков и угольных скоплений в выработанном пространстве. Адаптация уравнений теплообмена в угольных целиках и угольных скоплениях в выработанном пространстве к конкретным горно-геологическим условиям, как правило, позволяет сформулировать адекватные краевые условия и ввести допущения, упрощающие эти уравнения.

2 Вероятность безаварийной работы по фактору самовозгорания угля в общем виде подчиняется закону Пуассона. При этом длительность безаварийной работы по этому виду аварий является оценкой времени безотказной работы защитного экрана от самовозгорания угля и возникновения ЭП, следовательно, периодичность профилактических мероприятий по фактору самовозгорания угля определяется величиной времени безотказной работы мероприятий по профилактике ЭП.

3 Процессы диффузионного переноса кислорода в целиках и выработанных пространствах необходимо учитывать при оценке эндогенной пожароопас-

ности, т.к. интенсивность этих процессов при фиксированном уровне внешних воздействий зависит от диффузионного сопротивления среды, в которой распространяется кислород. Диффузионное сопротивление вещества углю движению через него кислорода можно характеризовать коэффициентом эффективной диффузии, так как в реальных условиях наблюдается как кнудсеновская, так и фольмеровская диффузия, а разделить эти два вида диффузионного переноса чрезвычайно сложно.

4 Нестационарные одномерные поля концентрации кислорода в угольных целиках и выработанном пространстве являются результатом решения уравнения диффузии кислорода в твердой фазе, учитывающего сорбцию газа угольным веществом в целиках и выработанных пространствах. Вычислительные эксперименты наглядно свидетельствуют о монотонном убывании функции распределения кислорода и диффузионного потока и их стремлении к некоторому асимптотическому значению.

5 Дифференциальное уравнение теплопроводности в целиках и угольных скоплениях в выработанном пространстве, описывающее в общем виде поле температуры в целиках и угольных скоплениях в выработанном пространстве, а также связывающее низкотемпературное окисление с полем температур посредством источника тепловыделения, позволяет решать различные практические задачи, в том числе, и определение местоположения действующего очага ЭП.

6 Разработана математическая модель взаимодействия кислорода с углем, представляющего собой многостадийную, гетерогенную реакцию, которую условно можно разделить на несколько стадий. При этом изотерма адсорбции кислорода углем оказывает сильное влияние на ход кинетической кривой. Таким образом, без предварительных данных о величине константы Генри сложно предсказать возможность статистически верно выбрать модель сорбции.

7 Склонность углей к низкотемпературному окислению характеризуется константой скорости этого процесса. А оценку опасности возникновения эндогенных пожаров получают из решения системы уравнений тепломассопереноса в угольном пласте или угольном скоплении. Анализ данных, полученных в результате вычислительных экспериментов, показал, что предложенная модель развития возникшего очага самонагревания отражает все возможные направления протекания процесса.

8 Вычислительный эксперимент, проведенный на основе информации о склонности углей к низкотемпературному окислению, позволяет определить пожаробезопасные условия ведения горных работ, в том числе и условия пожаробезопасного хранения угля на складах. В целом подход к решению рассмотренной задачи должен отвечать требованию использования всей базы знаний о самовозгорании угля без потери информации о закономерностях процесса на этапе его формализации.

9 Эмпирические закономерности, отражающие связь константы скорости взаимодействия кислорода с углем, с факториальными признаками, во-первых, свидетельствуют о том, что эта связь, как правило, нелинейная, и, во-вторых, позволяют выявить группу физико-химических свойств угля, которые

являются наиболее значимыми факториальными признаками. Аналогичный вывод может быть сделан по эмпирическим закономерностям, отражающим связь коэффициента диффузии кислорода в угле, с факториальными признаками.

10 Профилактика самовозгорания угля в выработанном пространстве производится путём выполнения комплекса мер, включающего: обработку краевых частей угольных целиков водным раствором антипирогена; подачу газообразного азота (инертной пены) в выработанное пространство; поддержание скорости подвигания очистного забоя не менее 61 м/мес; исключение аэродинамической связи выработанного пространства с действующими выработками; уменьшение притока воздуха в выработанное пространство; компенсирование потери влаги в выработанном пространстве путем нагнетания водных растворов антипирогена в виде аэрозолей.

Основные научные и практические результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

1 Определение местоположения очага самовозгорания в угольном массиве / Н.М. Качурин, А.Ю. Ермаков, В.И. Ефимов, А.В. Волберг // *Безопасность труда в промышленности*. 2016. №3. С.44-46.

2 Склонность углей к низкотемпературному окислению и оценка опасности возникновения эндогенных пожаров / Н.М. Качурин, А.Ю. Ермаков, В.И. Ефимов, А.В. Волберг // *Безопасность труда в промышленности*. 2016. №4. С. 36-38.

3 Риск самовозгорания угля и опасность эндогенных пожаров на шахтах Кузбасса / Г.В. Стась, А.В. Волберг, Е.В. Смирнова, М.П. Ганин // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2017. Вып. 3. С. 93-103.

4 Склонность углей к низкотемпературному окислению и мониторинг эндогенной пожароопасности шахт / М.В. Грязев, Н.М. Качурин, Е.И. Захаров, А.В. Волберг // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2017. Вып. 4. С. 109-120.

5 Волберг А.В., Ермаков А.Ю. Разработка способа и устройства для определения константы скорости низкотемпературного окисления угля // *Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ): сб. науч.-техн. работ сотрудников ООО «Сибниинуглеобогащение»*. Юбилейный XXV Международный симпозиум «Неделя горняка-2017». М. Горная книга. 2017. № 4. С. 347-355.

6 Волберг А.В., Ермаков А.Ю. Физико-химическое обоснование определения константы скорости низкотемпературного окисления углей // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) (ГИАБ): сб. науч.-техн. работ сотрудников ООО «Сибниинуглеобогащение»*. Юбилейный XXV Международный симпозиум «Неделя горняка-2017». М. Горная книга. 2017. № 4. С. 361-366.

7 Ефимов В.И., Вибе Ю.В., Волберг А.В. Локализация подземных пожаров путем инертизации выработанных пространств на шахтах Кузбасса // 4-я Международная конференция по проблемам рационального природопользования. «Проблемы создания экологически рациональных и ресурсосберегающих технологий добычи полезных ископаемых и переработки отходов горного производства». Тула. ТулГУ. 2018. С. 116 – 128.

Изд. Лиц. ЛР №020300 от 12.02.97. Подписано в печать 26.03.2019 г.

Формат бумаги 60x84. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 16. Тираж 100 экз. Заказ

Тульский государственный университет. 300012, г.Тула, пр. Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ. 300012, г. Тула, пр. Ленина, 95.