

Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и
ликвидации последствий стихийных бедствий
Донецкой Народной Республики

Государственное бюджетное учреждение
«Научно-исследовательский институт «Респиратор» Министерства по делам
гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий
стихийных бедствий Донецкой Народной Республики»
(ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР»)

На правах рукописи

Головченко Евгений Александрович

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА САМОНАГРЕВАНИЯ
УГЛЯ В КРАЕВОЙ ЧАСТИ УГОЛЬНОГО МАССИВА
ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК**

Специальность 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность
(по отраслям) (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк–2022

Работа выполнена в Государственном бюджетном учреждении «Научно-исследовательский институт «Респиратор» Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики» (ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР»), г. Донецк

Научный руководитель: **Греков Святослав Павлович**
доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник
ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР», г. Донецк

Официальные оппоненты: **Портола Вячеслав Алексеевич**
доктор технических наук, профессор кафедры аэрологии, охраны труда и природы Кузбасского государственного технического университета (КузГТУ), РФ.

Гусар Геннадий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика им. В.В. Пака» ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

Ведущая организация: Государственное бюджетное учреждение «Институт физики горных процессов

Защита диссертации состоится «08» декабря 2022 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.027.01 при ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР» по адресу: 283048, г. Донецк, ул. Артема, 157, корп.1, каб. 401.

Тел. +38(062)332-78-01, +38(062)332-78-18, факс +38(062)332-78-78.

E-mail: respirator@mail.dnmchs.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР» по адресу: 283048, г. Донецк, ул. Артема, 157, корпус 2, к. 208, адрес сайта ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР»: <http://respirator.dnmchs.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.027.01
кандидат технических наук

И.Г. Старикова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. С переходом угольных шахт на более глубокие горизонты, глубиной отработки более 1000 м, количество эндогенных пожаров, несмотря на увеличение объемов профилактических мероприятий, остается на достаточно высоком уровне (1-3 пожара в год).

Необходимо учесть, что глубина ведения горных работ сама по себе, как физический параметр не может влиять непосредственно на частоту возникновения эндогенных пожаров, но с увеличением глубины ухудшаются горно-геологические условия залегания пластов угля и горнотехнические условия их отработки.

В подготовительных горных выработках, пройденных по пласту на больших глубинах (1000 м и более) уголь характеризуется повышенной дробимостью, пониженными показателями прочности и высокой химической активностью. Очаги самонагрева в нарушенном угле возникают не сразу при его обнажении, а после того как вокруг подготовительной выработки сформируется зона упругих деформаций.

Выработки в таких условиях деформируются интенсивно, развиваются системы трещин давления и отжима, по которым мигрирует воздух. Все это способствует росту площади обнаженных поверхностей угля, проникновению кислорода из атмосферы выработки за счет его фильтрации и диффузии в поры краевой части, сорбции и окислению на поверхности угля и как следствие возникновению очага самонагрева (самовозгорания), нагревание начинается на глубине 0,2-0,5 м от поверхности, где затруднен теплообмен.

Случаи самонагрева и самовозгорания угля в краевой части неоднократно фиксировались на различных шахтах Донбасса, в том числе на шахте им. А.Ф. Засядько, им. А.А. Скочинского, им. Н.П. Баракова, «Молодогвардейской» и др.

Следует подчеркнуть, что известные методы прогноза эндогенной пожароопасности носят общий 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.

Поэтому исследование эндогенной пожароопасности в краевой части угольного массива глубоких шахт является весьма актуальным.

Степень разработанности темы. Работа проводилась в соответствии с планами работ ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР» по следующим темам №1990210775 «Разработать Методику прогноза эндогенной пожаробезопасности выемочных участков в процессе ведения горных работ», №19050808030 «Разработать СОУ «Прогноз эндогенной пожароопасности горных работ в зонах геологических нарушений. Методика расчета», №11810026 «Выполнить исследования процессов теплонакопления в краевой

части угольного массива и разработать технологические схемы предупреждения самовозгорания угля в краевой части угольного массива» при непосредственном участии автора в качестве научного руководителя.

В диссертационную работу вошли результаты научных исследований процессов самонагрева угля и эндогенной пожаробезопасности, которые выполнены в НИИГД «Респиратор» при участии автора в качестве исполнителя в соответствии с Целевой комплексной отраслевой программой «Создание эффективных и надежных способов и средств профилактики и ликвидации аварий и защиты работников в аварийных ситуациях» на 1996-2005 годы и «Программой повышения безопасности работ на угледобывающих и шахтостроительных предприятиях», утвержденной Постановлением Кабинета Министров Украины от 29.03.2006 №374 с изменениями от 18.05.2011 №52.

Цель и задачи исследований. Цель работы - раскрытие зависимостей формирования зон повышенных температур и разработка на этой основе метода оценки пожароопасности краевой части угольного массива глубоких шахт.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо решить **следующие основные задачи:**

- исследовать процессы теплонакопления в краевых частях угольного массива;
- провести экспериментальные исследования кинетических параметров самовозгорания угля в краевых частях угольного массива;
- исследовать пожароопасность краевой части угольного массива;
- разработать метод определения пожароопасных мест;
- установить места расположения и размеры пожароопасных зон, для разработки метода оценки пожароопасности краевой части угольного массива.

Объектом исследований являются процессы теплонакопления в разрушенных краевых частях угольного массива глубоких шахт.

Предмет исследований – условия возникновения и развития очагов самонагрева в краевых частях угольного массива глубоких шахт.

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что:

1. Впервые предложено понятие - скорость тепловыделения сорбента (угля) при его окислении, с учетом степени разделения адсорбированного и вступившего в реакцию окисления кислорода.

2. По результатам экспериментов адсорбции и расчетов хемосорбции углем кислорода установлена тесная корреляционная связь скорости тепловыделения (отличающейся от ранее известной, количеством вступившего в реакцию в результате окисления кислорода) и числом произошедших эндогенных пожаров, что позволяет при учете теплоотдачи угольного скопления, рассчитать температуру в нем и вероятность возникновения эндогенного пожара в конкретных условиях шахт.

3. Впервые разработан метод оценки эндогенной пожароопасности краевой части угольного пласта в подготовительных выработках, который включает в себя аналитический расчет ширины разрушаемой краевой части угольного пласта, определение по номограммам в критериальном виде ожидаемой максимальной температуры, места ее нахождения и времени инкубационного периода самовозгорания, что характеризует степень пожароопасности краевой части угольного массива и позволяет посредством принятия конкретных технических решений предотвратить самовозгорание угля.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Теоретическая значимость работы заключается в том, что:

- сформулирована задача теплонакопления в краевой части пласта в подготовительной выработке и разработан численный метод решения системы нелинейных уравнений тепломассобмена в краевой части пласта с критериями подобия;
- получена система алгебраических уравнений, которая позволяет численным методом, с заданными начальными и граничными условиями, шаг за шагом по времени определять распределение температуры и концентрации кислорода вглубь краевой части пласта;
- разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния краевой части угольного пласта на больших глубинах.

Практическая значимость обусловлена актуальностью работы и следующими результатами:

- разработан номограммный метод оценки пожароопасности краевой части угольного массива, разработанный метод включает в себя аналитический расчет ширины разрушаемой краевой части угольного пласта, определение по номограммам в критериальном виде ожидаемой максимальной температуры, места ее нахождения и времени инкубационного периода самовозгорания, что характеризует степень пожароопасности краевой части угольного массива в подготовительных выработках на больших глубинах. Разработанный метод позволяет повысить пожарную безопасность на предприятиях угольной отрасли;
- установленное местонахождение пожароопасных зон в краевой части угольного массива позволяет целенаправленно сосредотачивать материальные средства на выполнение профилактических мероприятий только в опасных зонах, за счет чего значительно снижаются материальные затраты на предупреждение эндогенных пожаров и повышение уровня безопасности горных работ.

Основные результаты работы вошли в «Методику прогноза эндогенной пожаробезопасности выемочных участков в процессе ведения горных работ», СОУ «Прогноз эндогенной пожароопасности горных работ в зонах геологических нарушений. Методика расчета», и в «Технологические схемы предупреждения самовозгорания угля в краевой части угольного массива».

Методология и методы исследования.

При выполнении данной диссертационной работы были использованы: анализ и обобщение литературных источников по вопросам теплонакопления в угольных скоплениях, профилактики и тушения эндогенных пожаров, а при выборе и обосновании направления исследований – методы математического и числового моделирования процессов самонагрева угля. Для разработки метода определения пожароопасных мест были использованы элементы газовой хроматографии для экспериментального определения параметров окисления угля и методы экономического анализа – при оценке предлагаемых решений

Положения, выносимые на защиту:

1. Новый методический подход к вопросу исследования процессов теплонакопления в краевой части угольного пласта, в основу которого положена разработанная математическая модель, характеризующая диффузией кислорода в порах вглубь пласта, хемосорбцией с выделением тепла и теплоотдачей в окружающую среду и сравнением полученных результатов с данными экспериментальных исследований.

2. Впервые на основе многочисленных экспериментов по адсорбции кислорода газонасыщенными углями шахтопластов Донбасса раскрыта взаимосвязь между поглощенным углем кислородом и вступившим в реакции окисления, зависящая от степени метаморфизма угля, что позволяет рассчитать величину тепловыделения и вероятность возникновения эндогенного пожара.

3. Метод оценки пожароопасности краевой части угольного массива с учетом мощности пласта, глубины его разработки, объемного веса вмещающих пород, влажности угля, выхода летучих и температуры окружающих пород.

Степень достоверности и апробация результатов диссертации.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена соответствием полученных зависимостей основным физическим законам и установившимся представлениям о протекании тепломассобменных процессов в угле, необходимым и достаточным объемом лабораторных данных, полученных с помощью средств измерительной техники с программным обеспечением, повышающим точность анализа, удовлетворительной сходимостью расчетных и экспериментальных данных по определению температуры угля (максимальная ошибка не превышает 10%), а также согласованностью результатов работы с известными теоретическими и экспериментальными данными других исследователей, полученными другими методами.

Основные результаты работы на отдельных этапах ее выполнения и в целом докладывались, обсуждались и получили одобрение на Международной конференции «Математическое моделирование в образовании, науке и производстве» (Тирасполь, 2017), 1-ой Республиканской научной конференции «Безопасность в чрезвычайных

ситуациях» (Донецк, 2017), Международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» (Новокузнецк, Россия, 2022) и ученом Совете Государственного бюджетного учреждения «Научно-исследовательский институт «Респиратор» (2019,2020,2021).

Личный вклад соискателя состоит в формировании научной задачи, цели и научных положений работы, проведении теоретических исследований. Автор организовывал и непосредственно участвовал в проведении экспериментальных исследований кинетических параметров самовозгорания угля.

Публикации. Основные результаты диссертационных исследований изложены в 19 печатных работах, в том числе: 17 работ опубликованы в рецензируемых изданиях ВАК Минобрнауки ДНР и 2 доклада в материалах международных научных конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, основной части (из четырех разделов), заключения (с основными выводами), списка литературы из 122 наименований и 1 приложения. Работа изложена на 138 страницах машинописного текста, содержит 31 рисунок и 18 таблиц

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, представлены цель и задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе выполнен анализ процессов формирования и развития очагов самовозгорания в угольных скоплениях, в том числе в краевой части угольного массива, приведен обзор и анализ условий возникновения и тушения эндогенных пожаров, рассмотрены способы их предотвращения и тушения в угольных шахтах.

Современные системы и методы прогноза самовозгорания угля базируются на работах В.С. Веселовского, В.М. Маевской, В.И. Саранчука, П.С. Пашковского, С.П. Грекова, Б.И. Кошовского, И.Н. Зинченко и их последователей. Результатом этих исследований установлено, что одна из главных ролей в процессе самонагревания угля принадлежит тепломассобменным процессам, происходящим в угле. Сорбционные процессы и теплонакопление являются источником самонагревания угля и последующем его переходе в самовозгорание.

Рост эндогенной пожароопасности при переходе угольных шахт на более глубокие горизонты многие исследователи связывают непосредственно с усложнением горно-геологических и горнотехнических условий. В тоже время развитие угольных шахт Донбасса связано с ежегодным углублением горных работ на 20-25 м. При этом на каждые 100 м увеличения глубины ведения разработок возрастает в среднем на 3 м³/т суточной добычи относительная метанообильность, а это в свою очередь вызывает

необходимость увеличения дебита подаваемого в шахту воздуха, что ведет к росту утечек воздуха и соответственно росту эндогенной пожароопасности даже на пластах угля не склонного к самовозгоранию.

Необходимо учесть, что глубина ведения горных работ сама по себе, как физический параметр не может влиять непосредственно на частоту возникновения эндогенных пожаров, но с увеличением глубины ухудшаются горно-геологические условия залегания пластов угля и горнотехнические условия их отработки.

В подготовительных горных выработках, пройденных по пласту на больших глубинах (1000 м и более) уголь характеризуется повышенной дробимостью, пониженными показателями прочности и высокой химической активностью. Очаги самонагревания в нарушенном угле возникают не сразу при его обнажении, а после того как вокруг подготовительной выработки сформируется зона упругих деформаций. Выработки в таких условиях деформируются интенсивно, развиваются системы трещин давления и отжима, по которым мигрирует воздух. Все это способствует росту площади обнаженных поверхностей угля, проникновению кислорода из атмосферы выработки за счет его фильтрации и диффузии в поры краевой части, сорбции и окислению на поверхности угля и как следствие возникновению очага самонагревания (самовозгорания), нагревание начинается на глубине 0,2 - 0,5 м от поверхности, где затруднен теплоотвод.

Анализ результатов ранее выполненных теоретических исследований процесса самонагревания угля показывает, что большинство существующих математических моделей отличаются прежде всего, недостаточной изученностью влияния отдельных составляющих процесса (теплообмена с вмещающими породами и горными выработками, тепловой депрессии очага самовозгорания и испарения влаги); упрощением математического описания кинетики сорбции и массопереноса, отсутствием универсальных методов, позволяющих реализовать сложные модели, представляющие собой системы нелинейных нестационарных уравнений массо-теплопереноса, практически не учитывают особенности низкотемпературного окисления, не учитывают в уравнениях химической кинетики влияние шахтных условий.

На основании результатов выполненного анализа сформулированы цель и задачи исследований в диссертационной работе.

Второй раздел посвящен теоретическим исследованиям процесса теплонакопления в краевых частях угольного массива подготовительных горных выработок.

На основе уравнения теплопроводности (1) в двух направлениях при отсутствии конвективного переноса, поставлена задача, теплонакопления и фильтрации через сравнительно небольшие скопления угля

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial y} \right) + F, \quad (1)$$

где ρ – плотность пористого тела, кг/м^3 ; c – удельная теплоёмкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$; T – температура пористого тела, K ; τ – время, с ; x – продольная координата вглубь угольного пласта, м ; y – вертикальная координата вкrest пласта, м ; λ_1 – коэффициент теплопроводности пористого тела вглубь пласта, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$; λ_2 – коэффициент теплопроводности пористого тела вкrest пласта, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$; F – плотность источников или стоков теплоты, $\text{Вт}/\text{м}^3$.

Полученная путем преобразований уравнения (1) система уравнений (2) является замкнутой, так как содержит три уравнения с тремя неизвестными, подлежащими определению, функциями T , C и Z . Для получения решения уравнений системы (2) необходимо добавить начальные и граничные условия.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \alpha(T_0 - T) + kqZ ; \\ \frac{\partial C}{\partial \tau} = D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \beta(Z - C) ; \\ \frac{\partial Z}{\partial \tau} = \beta(C - Z) - kZ . \end{array} \right. \quad (2)$$

Примем, что на момент разрушения краевой части пласта температура в ней равнялась температуре окружающих пород, а кислород в образовавшихся порах и на поверхности частиц угля отсутствовал:

$$\begin{array}{l} 1) T(x, 0) = T_0; \\ 2) C(x, 0) = 0; \\ 3) Z(x, 0) = 0 \end{array} \quad (3)$$

На поверхности пласта, на контакте его с вентиляционным потоком, примем температуру и концентрацию кислорода равной температуре и концентрации в потоке воздуха соответственно $T_0(\text{K})$ и C_0 ($\text{моль}/\text{м}^3$):

$$\begin{array}{l} 4) T(0, \tau) = T_0; \\ 5) C(0, \tau) = 0. \end{array} \quad (4)$$

На контакте разрушенной краевой части пласта с остальной его частью примем при $x = l$ температуру равной температуре пород, а градиент концентрации кислорода в порах равным нулю, как условие воздухонепроницаемости нетронутой части пласта:

$$\begin{array}{l} 6) T(l, \tau) = T_0 ; \\ 7) \frac{\partial C(l, \tau)}{\partial x} = 0 . \end{array} \quad (5)$$

Таким образом, при постановке задачи теплонакопления в краевой части пласта в подготовительной выработке учтены в соответствии с современными представлениями:

- фильтрация и диффузия кислорода в порах вглубь пласта в зависимости от режима проветривания выработки;
- сорбция и десорбция кислорода в пористом теле как газообмен между порами и поверхностью частиц угля;
- процессы окисления угля на поверхности частиц угля;
- процессы теплонакопления в краевой части угольного пласта.

Для математического моделирования процесса теплонакопления в краевой части угольного массива, систему уравнений (2) представим в безразмерном виде

$$\left. \begin{array}{l} - \\ - \\ - \\ - \end{array} \right| \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} + \alpha(1 - \bar{T}) + kqC_0 \bar{Z}; \\ \frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} = D_1 \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + \beta(\bar{Z} - \bar{C}) \\ \frac{\partial \bar{Z}}{\partial \tau} = \beta(\bar{C} - \bar{Z}) - k\bar{Z}, \end{array} \quad (6)$$

где $\bar{T} = T / T_0$ – безразмерная температура; $\bar{C} = C / C_0$ – безразмерная концентрация кислорода в порах сорбента; $\bar{Z} = Z / C_0$ – безразмерная концентрация кислорода на поверхности частиц сорбента.

Численно решая систему (6) с учетом конечных разностей, начальных и граничных условий (7) - (8) и энергии активации, получим систему (9)

Начальными условиями примем

$$1) \bar{T}_m^0 = 1; \quad 2) \bar{C}_m^0 = 0; \quad 3) \bar{Z}_m^0 = 0. \quad (7)$$

Граничные условия можно представить виде:

$$4) \bar{T}_0^n = 1; \quad 5) \bar{C}_0^n = 1; \quad 6) \bar{T}_M^n = 1; \quad 7) \bar{C}_M^{n+1} = \bar{C}_{M-1}^{n+1}. \quad (8)$$

$$\left. \begin{array}{l} - \\ - \\ - \end{array} \right| \begin{array}{l} \bar{T}_m^{n+1} = \frac{\bar{T}_m^n + Fo_1(\bar{T}_{m-1}^n - 2\bar{T}_m^n + \bar{T}_{m+1}^n) + \bar{\alpha} + \bar{k}\bar{q}\bar{Z}_m^n}{1 + \bar{\alpha}}; \\ \bar{C}_m^{n+1} = \frac{\bar{C}_m^n + Fo_1 \frac{D_1}{a_1} (\bar{C}_{m-1}^n - 2\bar{C}_m^n + \bar{C}_{m+1}^n) + \bar{\beta}\bar{Z}_m^n}{1 + \bar{\beta}}; \\ \bar{Z}_m^{n+1} = \frac{\bar{Z}_m^n + \bar{\beta}\bar{C}_m^n}{1 + \bar{\beta} + \bar{k}}, \end{array} \quad (9)$$

где $Fo_1 = a\Delta\tau/\Delta x^2$ – схемное число Фурье; $\bar{\alpha} = \alpha\Delta\tau$ – безразмерный коэффициент теплообмена с окружающим массивом; $\bar{k} = k \exp(-\bar{E}/\bar{T})\Delta\tau$ – безразмерный коэффициент скорости окисления угля; $\bar{E} = E/RT_0$ – безразмерный коэффициент энергии активации; $\bar{q} = qC_0/T_0$ – относительная теплота реакции окисления угля; $\bar{\beta} = \beta\Delta\tau$ – безразмерный коэффициент сорбции кислорода на поверхности частиц угля.

Для более детального изучения процессов теплонакопления в краевой части пласта в горной выработке эти параметры свяжем с критериями моделирования. Используем применяемый при изучении нестационарной теплопередачи критерий Фурье, который является безразмерным комплексом и имеет смысл обобщённого времени: $Fo = a\tau/l^2$.

Введем критерий Предводителя – безразмерный комплекс, характеризующий интенсивность тепловыделения при процессах окисления по сравнению с температуропроводностью: $Pd = kl^2/a$, а также число Лыкова, как отношение между процессами диффузии и температуропроводности: $Lu = D_1/a$.

Введём в рассмотрение термодиффузионный критерий – аналог числа Био, который будет указывать на интенсивность теплообменных процессов между угольным пластом и породным массивом: $Bi = \alpha l^2/a$.

Полученная система алгебраических уравнений (9) позволяет, с заданными начальными и граничными условиями (7) и (8), шаг за шагом по времени определять распределение температуры и концентрации кислорода вглубь краевой части пласта.

На рисунке 1 представлены результаты моделирования распределения безразмерной температуры вглубь краевой части пласта в различное время с момента его разгрузки без учёта энергии активации угля.

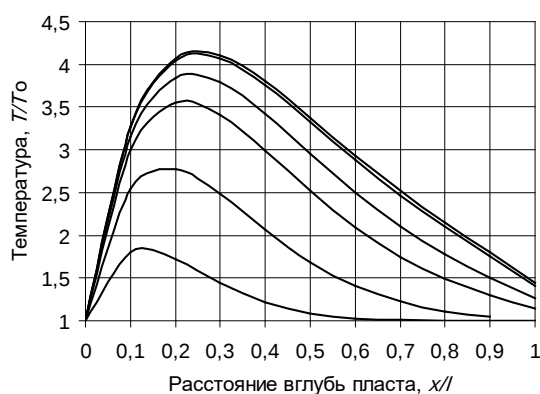


Рисунок 1. Распределение безразмерной температуры вглубь краевой части пласта в различное время с момента его разгрузки при $Fo = 0,04; 0,08; 0,14; 0,2; 0,8; 1,0$ снизу вверх

При моделировании приняты следующие исходные данные: $k/\beta = 1$; $D_1/a = 1$; $qC_0/T_0 = 25$. Как видно, на границе с нетронутым массивом температура не равна начальной температуре T_0 в силу теплопроводности вне зависимости от наличия зоны разгрузки.

На рисунке 2 представлены результаты моделирования динамики температуры во времени на различных расстояниях от обнажённой поверхности пласта.

На рисунке 3 представлены результаты моделирования распределения установившихся относительных концентраций кислорода в порах и на поверхности частиц угля.

Сравнение полученных результатов аналитического и численного решений показывает, что и в том, и в другом случае идёт быстрое увеличение температуры вглубь пласта с выходом на максимум где-то при числах Фурье $Fo = 0,2 - 0,3$ (рисунок 1). После этого температура медленно снижается вглубь пласта, особенно при возникновении горения.

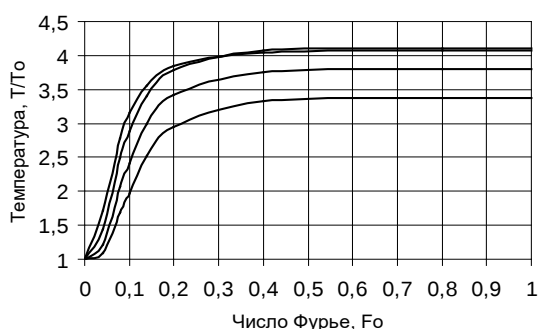


Рисунок 2 Динамика относительной температуры на различных расстояниях от обнажённой поверхности пласта ($x/l = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ слева направо)

Что касается концентраций кислорода поглощенного кислорода, то они имеют максимум, как и следовало ожидать, на контакте угольного пласта с вентиляционным потоком. В глубину пласта концентрации поглощенного и прореагировавшего с углем кислорода медленно снижаются.

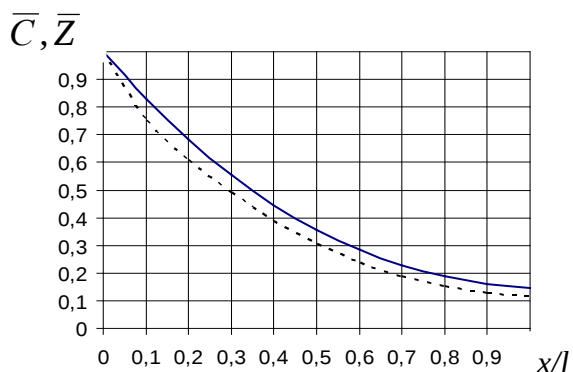


Рисунок 3 Распределение установившихся относительных концентраций кислорода в порах (сплошная линия) и на поверхности частиц угля (прерывистая линия)

В отличие от известного аналитического решения аналогичной задачи, когда принималась на правой границе температура, равной температуре в глубине пород, при численном эксперименте эта температура отнесена ещё дальше, как это и должно быть в реальности. Кроме того, результаты численного эксперимента показывают, что рост температуры начинается вблизи от обнажённой поверхности пласта и её максимум смещается вглубь его. В то же время аналитическое решение задачи показывает обратную картину, что вызывает сомнения.

Следует отметить, что все исследования проведены при максимальной скорости окисления угля без учёта энергии активации. Это позволяет вследствие нелинейности задачи получить решение задачи только численным методом.

На рисунке 4 представлены результаты моделирования распределения безразмерной температуры вглубь краевой части пласта в различное время с момента его разгрузки с учётом энергии активации угля. Как видно, постепенное увеличение энергии активации (принято $E/RT_0 = 2$ вместо $E/RT_0 = 0$) приводит к более медленному самонагреванию и меньшему максимуму температуры.

Ещё более меняется картина тепломассообмена, если предположить, что коэффициент диффузии зависит от размеров частиц угля и становится всё меньше. Так, принято $D_1/a = 0,22$ вместо $D_1/a = 1$.

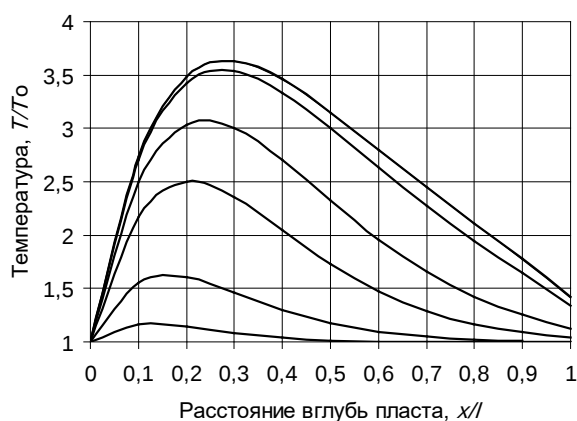


Рисунок 4 Распределение безразмерной температуры с учётом энергии активации вглубь краевой части пласта в различное время с момента его разгрузки при $Fo = 0,04; 0,08; 0,14; 0,2; 0,8; 1,0$ снизу вверх

На рисунке 5 приведены результаты моделирования распределения установившихся относительных концентраций кислорода в порах и на поверхности частиц угля при учёте энергии активации и ухудшении диффузии кислорода вглубь угольного пласта.

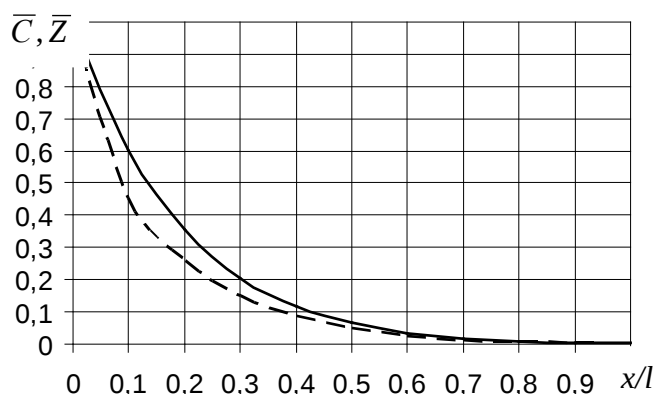


Рисунок 5 Распределение установившихся относительных концентраций кислорода при его диффузии в порах (сплошная линия) и на поверхности частиц угля (прерывистая линия)

Сравнивая данные моделирования распределения концентраций кислорода при разных коэффициентах диффузии (рисунок 3 и рисунок 5), можно убедиться, что во втором случае даже посередине зоны разгрузки концентрация кислорода менее 0,1.

Результаты моделирования показывают, что в этом случае при уменьшении диффузии кислорода вглубь угольного пласта возгорание может не возникнуть, как показано на рисунке 6

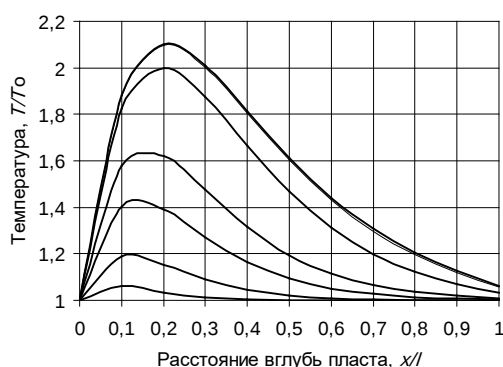


Рисунок 6. Распределение безразмерной температуры при ухудшении диффузии кислорода с учётом энергии активации вглубь краевой части пласта в различное время с момента его разгрузки при $Fo = 0,04; 0,08; 0,14; 0,2; 0,8; 1,0$ снизу вверх

В этом случае максимум температуры достигает значения $T_m/T_0 = 2,1$, что при начальной температуре $T_0 = 300$ К получим $T_m = 630$ К (357°C). Это говорит о том, что если температура начала горения составляет 400°C , то самовозгорания не произойдёт.

Таким образом, предложенный численный метод решения задачи теплонагрева краевой части пласта показывает, что он правильно отражает процессы тепломассобмена и даёт возможность их рассматривать при любых условиях (с учётом энергии активации и ухудшении диффузии кислорода вглубь пласта в зависимости от фракционного состава угольной массы)

В результате проведенных теоретических исследований процессов теплонакопления поставлена задача теплонакопления в краевой части пласта в подготовительной выработке, где учтены:

- диффузия кислорода в порах вглубь пласта в зависимости от размеров частиц угля;
- сорбция и десорбция кислорода в пористом теле как газообмен между порами и поверхностью частиц угля;
- процессы окисления угля на поверхности частиц угля в зависимости от энергии активации;
- процессы теплонакопления в краевой части угольного пласта.

Разработан численный метод решения системы нелинейных уравнений тепломассобмена в краевой части пласта с критериями подобия.

Получена система алгебраических уравнений, которая позволяет численным методом, с заданными начальными и граничными условиями, шаг за шагом по времени определять распределение температуры и концентрации кислорода вглубь краевой части пласта.

Установлено по данным численных экспериментов, что самонагревание начинается у поверхности краевой части пласта со смещением максимума температуры вглубь угольного массива и теплопередачей в неразгруженную зону. Также установлено, что с

увеличением энергии активации уменьшается максимум температуры до критического состояния, что позволяет делать прогноз эндогенной пожароопасности в подготовительной выработке на больших глубинах.

Третий раздел работы посвящен экспериментальным исследованиям кинетических параметров самовозгорания угля. Исследования проводились для подтверждения адекватности полученных результатов теоретических исследований процессов теплонакопления в краевой части угольного массива.

Рассмотрена константа скорости окисления является одним из основных параметров, характеризующих склонность углей к самовозгоранию. Для определения констант скоростей сорбции кислорода углями, нами был использован хроматографический метод, сущность метода заключается в том, что в поток газа-носителя импульсно вводится кислород, который по мере движения вдоль хроматографической колонки, содержащий исследуемый уголь, вступает с ним во взаимодействие, импульсный ввод кислорода на слой угля обуславливает своеобразие протекания гетерогенных реакций в хроматографических условиях, значительно усложняя кинетический анализ.

Выражение для определения скорости окисления угля имеет вид:

$$k_{T_1} = \frac{D_p \cdot 10^{-3} \cdot 0,04}{t_{rj} \cdot \gamma} \cdot \ln \frac{\bar{S}_{O_2}^{rp}}{\bar{S}_{O_2}} \quad (10)$$

где k_{T_1} – константа скорости окисления угля при заданной температуре, $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с})$; D_p – дробимость угля, ед, γ – плотность угля, $\text{кг}/\text{м}^3$, $\bar{S}_{O_2}^{rp}$ – среднее значение площади пика кислорода при градуировке, м^2 , $\bar{S}_{O_2}$ – среднее значение пика кислорода не вступившего во взаимодействие с углем, м^2 , t_{rj} – продолжительность контакта кислорода с углем, с, определяется по формуле: $t_{rj} = t_{уд} - t_0$, $t_{уд}$ – продолжительность удерживания кислорода в условиях, хроматографического опыта, с, t_0 – продолжительность прохождения дозой кислорода «мертвого» объема газовой колонки, с.

По полученным данным о количестве поглощенного кислорода и времени контакта его с исследуемым углем рассчитывается константа скорости хемосорбции кислорода. Полученные константы скорости окисления данным методом характеризуют реакционную поверхность угля только для фракционного состава $0,25 \div 0,5$ мм. Окисление угля как гетерогенный процесс представляет собой химическое взаимодействие кислорода с реакционной поверхностью, осложненное целым рядом физических явлений, протекающих вблизи внешней поверхности угольной частицы и в ее порах. Скорость процесса, при прочих равных условиях, зависит от величины реагирующей поверхности, которая зависит от дробимости угля.

Формула для расчета дробимости имеет вид

$$D_p = 5 \cdot 10^{-2} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{d_i} \quad (11)$$

где d – средний диаметр частиц исходного угля, м, m – масса исходного угля, кг, m_i – масса данного класса угля при ситовом анализе, кг, d_i – средний диаметр частиц данного класса, м, n – количество фракций угля.

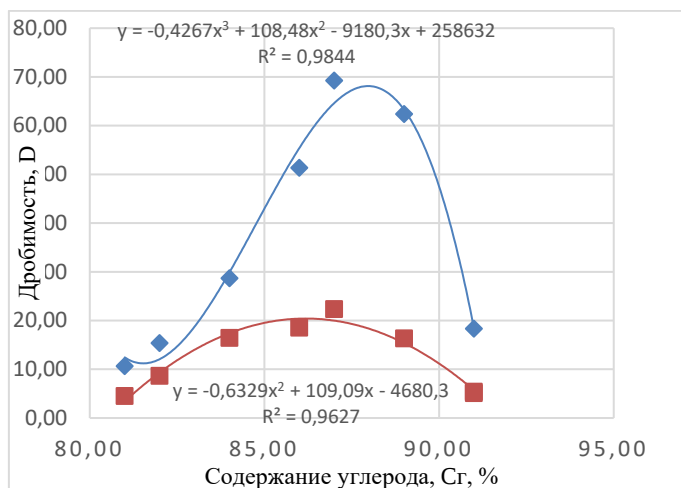


Рисунок 7. Зависимости дробимости угля D от содержания в нем углерода C_g
 ◆ – угли, склонные к самовозгоранию,
 ■ – угли не склонные к самовозгоранию.

Анализ полученных результатов позволяет отметить, что дробимость углей различной степени склонности к самовозгоранию изменяется от 1-3 у углей крайних стадий метаморфизма (марки А) до 70-80 у углей средней стадии метаморфизма (марки Ж, К). Относительная погрешность определения дробимости не превышает 15%.

Из данных представленных на рисунке 8, следует что для более крупных фракций константа скорости окисления почти линейно возрастает с уменьшением диаметра фракции, но начиная с некоторого диаметра, наблюдается отклонение линейной зависимости между обратным значением диаметра фракции и константой скорости окисления. Причем последняя стремится к постоянному значению с ростом степени измельчения. Такое явление можно объяснить тем, что зерно угля пронизано порами различной длины, по которым происходит движение кислорода и его взаимодействие с поверхностью этих пор.

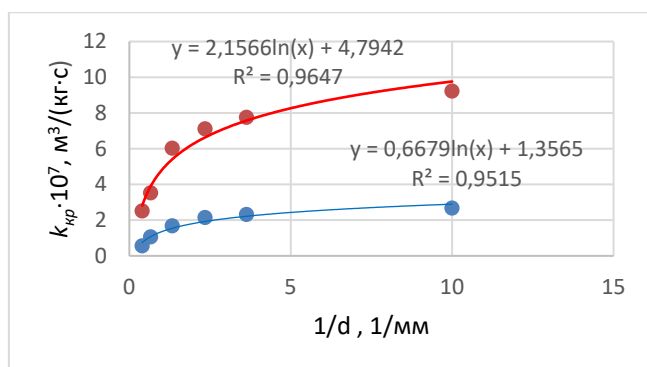


Рисунок 8. Зависимость константы скорости окисления ($k_{кр} \cdot 10^7, \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с})$) от фракционного состава угля ($1/d, 1/\text{мм}$) пласта k_5 шахты имени Н.П. Баракова при различных температурах:

— 100 °С,
 — 70 °С.

Предложенный метод определения критической температуры самовозгорания угля и его энергии активации, учитывающий скорость разложения поверхностных уголь-кислородных комплексов, позволяет повысить точность определяемых параметров более чем на 30%.

Используя результаты определения константы скорости окисления углей, можно определить значение энергии активации и предэкспоненциального множителя в интервале температур от начальной температуры T_0 до критической $T_{кр}$ по формулам:

$$E = \frac{R \cdot (\ln k_{кр} - \ln k_l)}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{кр}}} \quad (12)$$

$$k_0 = k_l \cdot e^{\frac{E}{RT_0}} \quad (13)$$

где E – энергия активации процесса окисления, Дж/моль, R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К), $k_{кр}$ – константа скорости окисления угля при критической температуре, c^{-1} , k_l – константа скорости окисления угля при начальной температуре лабораторного опыта, c^{-1} , $T_{кр}$ – критическая температура самовозгорания угля, К, T_0 – начальная температура окисления, К, k_0 – предэкспоненциальный множитель, м/с

Результаты определения критических температур самовозгорания угля, констант скорости окисления и энергии активации различных углей приведены в таблице 1.

Таблица 1.

№ п/п	Шахта	Плaст	Марка угля	Критическая температура, К	$k_{кр} \cdot 10^7$, $m^3/(кг \cdot c)$	Энергия активации, Дж/моль
1	имени А.Ф. Засядько	m_3	К	379,0	7,90	15200
2	имени Челюскинцев	m_3	ДГ	393,0	0,88	14700
3	имени А.А. Скочинского	h_6^1	К	366,0	7,71	15100
4	имени М.И. Калинина	h_{10}^B	ОС	395,0	0,11	15400
5	имени Г.Г. Капустина	m_3	Д	353,0	7,20	14800
6	имени В.И. Ленина	l_1	К	378,0	0,21	15200
7	«Калиновская-Восточная»	l_1	ОС	385,0	0,34	14800
8	«Холодная Балка»	h_{10}^B	Т	395,0	0,12	14200
9	«Чайкино»	m_3	Ж	354,0	8,00	15600
10	«Комсомолец Донбасса»	l_4	Т	412,0	0,12	14600
11	«Молодогвардейская»	k_2^H	Ж	368,0	2,11	15200
12	«Самсоновская-Западная»	k_2	Ж	385,0	2,24	14700
13	имени Н.П. Баракова	k_5^H	Ж	352,0	5,75	14400
14	«Суходольская-Восточная»	i_3^1	К	403,0	0,13	13400
15	«Прогресс»	h_7	А	416,0	0,06	14800

Экспериментальное определение критических температур самовозгорания углей шахтопластов ДНР и ЛНР показало, что они для различных углей колеблются в довольно широком диапазоне – от 70 до 120°C. При этом, как правило, низкая критическая температура соответствует пластам угля склонного к самовозгоранию и на которых были частые случаи эндогенных пожаров, а высокая – пластам угля не склонных к самовозгоранию.

Исследованиями динамики адсорбции кислорода углем преследовалась задача определить скорость перемещения фронта адсорбции для последующего расчета возможности самовозгорания угля на его фронте.

Для поиска искомых функций распределения адсорбата использовался фенолинологический метод устанавливающий функциональные зависимости между величинами, характеризующими процесс с макроскопической точки зрения, с некоторыми допущениями:

- подвижная фаза несжимаема;
- убыль компонентов адсорбции столь мала, что возможно пренебречь изменениями плотности потока вследствие его адсорбции;
- движение потока адсорбтива осуществляется в одном направлении с постоянной скоростью.

Для описания интенсивности поглощения положим вначале, что в единичном объеме содержится количество зерен адсорбента N радиусом R . Тогда можно записать

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} = 4\pi r^2 N D_1 \frac{\partial c^*}{\partial r} \Big|_{r=R}, \quad (14)$$

где c^* — концентрация примеси в порах сорбента в газообразной фазе.

Математическая модель, характеризующая взаимосвязь величины c^* с концентрациями адсорбированной примеси a_1 и a_2 , имеет вид

$$D_1 \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c^*}{\partial r} \right) - \beta_1 (\gamma_1 \partial c^* - a_1) - \beta_2 (\gamma_1 \partial c^* - a_2) = \frac{\partial c^*}{\partial t}, \quad (15)$$

$$\partial a_1 / \partial t = \beta_1 (\gamma_1 \partial c^* - a_1) - k_1 a_1 a_{10}^*, \quad (16)$$

$$\partial a_2 / \partial t = \beta_2 (\gamma_2 \partial c^* - a_2) - k_2 a_2 a_{20}^*. \quad (17)$$

Уравнение переноса примеси в пористом слое с учетом поглощения

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} + \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (18)$$

Граничные и начальные условия

$$\frac{\partial c^*}{\partial r} \Big|_{r=R} = -H(c^* - c), \quad (19)$$

$$c(0, t) = f(t), \quad (20)$$

$$c(x, 0) = c^*(r, 0) = a_1(r, 0) = a_2(r, 0) = 0. \quad (21)$$

В выражениях (14) - (21) x, r, t – пространственные и временная координаты; a_1 и a_2 – концентрации поглощенного вещества; u – скорость потока; $H = \beta/D_1$; β – коэффициент массоотдачи; D_1 – коэффициент диффузии в твердом теле.

Произведя преобразование Лапласа и перейдя к безразмерным функциям и координатам из уравнений (14)-(21) получим

$$p\tilde{c}_1 + p\tilde{c} + u^* d\tilde{c}/dz = d^2\tilde{c}/dz^2, \quad (22)$$

$$p\tilde{c}_1 = \frac{\Pi}{\text{Bi}} \frac{\partial}{\partial \rho} \tilde{c}^* \Big|_{\rho=1}, \quad (23)$$

$$p\tilde{c}_1 = K a_i (\tilde{c}^* - \tilde{a}_i) - \Gamma_i \tilde{a}_i, \quad (24)$$

при условиях

$$\frac{\partial \tilde{c}^*}{\partial \rho} \Big|_{\rho=t} = -\text{Bi}(\tilde{c}^* - c) \Big|_{\rho=1}, \quad (25)$$

$$\tilde{c}(0) = \tilde{f}(\rho). \quad (26)$$

Решая уравнение (22) относительно неизвестных и предполагая возможность разложения показателя экспоненты в ряд, а также ограничиваясь только первым членом (что справедливо при больших u^*), получим решение уравнения для $A_\gamma(z)$

$$A_\lambda(z) = \frac{\text{Bi}}{s_\lambda} \tilde{f} \exp\left(-\frac{z}{u^*} p\right) \exp\left(-\frac{\Pi}{u^*} \cdot \frac{\lambda \cos \lambda - \sin \lambda}{s_\lambda} z\right). \quad (27)$$

Полученное нами решение задачи изотермической сорбции слоем сорбента при наличии химической реакции первого порядка позволяет найти области безразмерных параметров, в которых наиболее существен процесс либо адсорбции, либо химической реакции, либо массообмена на границе фаз, что может быть использовано при решении конкретных задач динамики поглощения примеси различными сорбентами.

Зависимость расчета поглощенного сорбентом (газонасыщенным углем) вещества (в частности вступившего в реакцию с кислородом воздуха в шахтной атмосфере):

$$\bar{c} = \frac{c}{c_0} = \bar{a} = \frac{a}{a_0} = 0,5 \left[1 - \text{erf} \left(\frac{x - \omega \cdot \tau}{2\sqrt{H\tau}} \right) \right], \quad (28)$$

где $H = D\gamma/(\gamma + 1)$; $a_0/c_0 = \gamma$ – коэффициент Генри; ω – скорость движения фронта адсорбции, м/с; $\text{erf}(y) = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^y \exp(-y^2) dy$ – интеграл Крампа, функция $\text{erf}(y)$ табулирована.

Эксперименты по динамике адсорбции (хемосорбции) кислорода газонасыщенными углями шахт Донбасса выполнялись согласно

предложенной математической модели и специально разработанной для этого лабораторной установке.

В экспериментах использовались угли шахт Донбасса с содержанием горючих веществ V^{daf} от 8% до 43%.

Таблица 2. Параметры хемосорбции кислорода газонасыщенным углем пласта h_{10}^B шахты им. С.М. Кирова

ГУП ДНР «Макеевуголь» «Шахта им. С.М. Кирова», марка Т; $V^{\text{daf}} = 8,2 - 10,6 \%$; $D_p = 8,29$; $T_{\text{кр}} = 323,9 \text{ К}$; $C(\text{O}_2) = 27,009 \text{ моль/м}^3$; $S_{\text{уд}}/S_{\text{max}} = 0,765$; $k_{\text{кр}} = 1,006 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{моль})$; $Q_0 = 25,0 \text{ м}^3/\text{Т}$; $a_c = 114 \text{ 166,7 моль/м}^3$; $E = 12 \text{ 831,4 Дж/моль}$; $K_a = 12,907$; $\gamma = 1,776$; $R_1 = 0,00075 \text{ м}$; $\nu = 2,024 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$						
$\tau, \text{ ч/с}$	12/43200	24/86400	48/172800	72/259200	120/432000	240/864000
$\beta_1, \text{ с}^{-1}$	$3,50 \cdot 10^{-5}$	$2,60 \cdot 10^{-5}$	$2,20 \cdot 10^{-5}$	$1,80 \cdot 10^{-5}$	$1,10 \cdot 10^{-5}$	$7,00 \cdot 10^{-6}$
$D, \text{ м}^2/\text{с}$	$1,395 \cdot 10^{-12}$	$9,588 \cdot 10^{-13}$	$7,845 \cdot 10^{-13}$	$6,973 \cdot 10^{-13}$	$4,794 \cdot 10^{-13}$	$3,051 \cdot 10^{-13}$
Fo	0,107	0,147	0,241	0,321	0,368	0,469
$\mu, \text{ ч}^{-1}$	0,1092	0,0943	0,0702	0,0523	0,0291	0,0067
ξ	$1,074 \cdot 10^{-3}$	$2,928 \cdot 10^{-3}$	$6,905 \cdot 10^{-3}$	$1,073 \cdot 10^{-2}$	$1,736 \cdot 10^{-2}$	$2,394 \cdot 10^{-2}$
$\bar{a}_{\text{эксп}}$	0,742	0,860	0,953	0,981	0,989	1,000
$a_{\text{эксп}}, \text{ моль/м}^3$	35,59	41,25	45,70	47,07	47,46	47,98
$\bar{a}_{\text{погл}}$	0,733	0,865	0,944	0,963	0,979	0,992
$a_{\text{погл}}, \text{ моль/м}^3$	35,18	41,51	45,30	46,18	46,96	47,60
Γ	0,038	0,151	0,435	0,76	1,789	3,876
$\bar{a}_{\text{хим}}$	0,637	0,632	0,591	0,512	0,345	0,231
$a_{\text{хим}}, \text{ моль/м}^3$	30,53	30,32	28,36	24,54	16,56	11,08

В эксперименте с углем шахты им. С.М. Кирова величина скорости отработки сорбента была равна $\omega = \beta_1 \cdot l = 2,6 \cdot 10^{-5} \cdot 0,05 = 1,3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}}{\text{с}}$, где l – средний диаметр колонки экспериментальной установки, м, в ее первой части

Найденная величина ω примерно соответствует пожароопасной скорости фильтрации воздуха через угольное скопление в шахтах.

Так как для остальных углей, используемых в экспериментальных исследованиях динамики их адсорбции, найденные экспериментально величины значений β_1 оказались на один порядок менее, чем на шахте им. Кирова, для получения данных о скорости отработки сорбента использовалась длина реакционной колонки, равная 0,5 м. Расчетные значения ω для этих шахт приведены в таблице 3

Таблица 3. Параметры хемосорбции кислорода углями различной степени метаморфизма

Шахта, пласт	Марка угля	V^{daf} , %	Параметры низкотемпературного окисления												
			$k_{\text{кр}}$, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{моль})$	$T_{\text{кр}}$, К	E , Дж/моль	γ	K_a	$S_{\text{уд}}/S_{\text{max}}$	Γ	$a_{\text{эксп}}$, моль/м^3 , $\bar{a}_{\text{эксп}}$	$a_{\text{хим}}$, моль/м^3 , $\bar{a}_{\text{хим}}$	$a_{\text{эксп}} _{\tau=0}$, моль/м^3 , $\bar{a}_{\text{эксп}} _{\tau=0}$	$a_{\text{хим}} _{\tau=0}$, моль/м^3 , $\bar{a}_{\text{хим}} _{\tau=0}$	ω , м/с	β_1 , 1/с
Им. С.М. Кирова, h_{10}^B	Т	8,2-10,6	$1,006 \cdot 10^{-9}$	323,9	12 831,4	1,776	12,907	0,765	3,876 (240)	47,98	11,08 (240)	$\frac{46,25}{0,86}$	$\frac{30,32}{0,63}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$
Холодная балка, h_{10}^B	Т	13,2	$1,430 \cdot 10^{-9}$	344,5	11 729,1	2,921	0,663	0,899	3,779 (240)	42,66	4,58	$\frac{31,61}{0,88}$	$\frac{28,46}{0,51}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$
Горняк - 95, h_8^B	К	22	$1,612 \cdot 10^{-9}$	343,0	11 025,5	1,699	4,868	0,996	5,81 (480)	42,07	5,81 (480)	$\frac{33,97}{0,43}$	$\frac{3,16}{0,07}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$
Щегловская Глубокая, l_3	К	25,4-27,8	$8,875 \cdot 10^{-10}$	333,0	14 114,6	1,699	4,868	0,927	2,27 (480)	42,07	2,27 (480)	$\frac{33,97}{0,74}$	$\frac{7,55}{0,16}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$
Россия, m_3	ДГ	42	$2,888 \cdot 10^{-10}$	377,0	31 992,5	1,323	9,219	0,102	23,79 (480)	35,75	23,79 (480)	$\frac{31,26}{0,88}$	$\frac{21,55}{0,6}$	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$
Им. Челюскинцев, l_1	ДГ	42,6	$1,102 \cdot 10^{-9}$	329,7	29 447,0	1,323	9,219	0,052	25,46 (480)	35,75	25,46 (480)	$\frac{31,59}{0,88}$	$\frac{22,94}{0,64}$	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$

Результаты исследований поглощенного кислорода в реакционной колонке в относительны величинах $\bar{a} = \frac{a}{a_0}$ для различных углей шахт Донбасса представлены в таблице 4

Таблица 4 Динамика адсорбции кислорода вдоль реакционной колонки газонасыщенными углями Донбасса разной степени углефикации в момент времени отработки сорбента для $x=0,05$ м

Шахта, пласт	V^{daf} , %	Расстояние x , м							
		0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	
		Величина адсорбции кислорода $\bar{a}$							
Им. С.М. Кирова, h_{10}^B	8,2 - 10,6	0,87	0,58	0,25	0,055	0,005			
Холодная балка, h_{10}^B	13,2	0,87	0,84	0,73	0,72	0,58	0,41	0,26	
Горняк - 95, h_8^B	22	0,79	0,74	0,64	0,61	0,52	0,35	0,23	
Щегловская Глубокая, l_3	25,4-27,8	0,74	0,64	0,62	0,59	0,34	0,3	0,28	
Россия, m_3	42	0,87	0,85	0,84	0,8	0,78	0,77		
Им. Челюскинцев, l_1	42,6	0,87	0,85	0,84	0,83	0,78	0,77		

Комплексный показатель склонности угля к самовозгоранию во многом определяется скоростью тепловыделения, равной произведению теплоты реакции окисления q_0 , Дж/моль, на константу скорости окисления угля k , 1/с.

Анализируя данные таблицы 5, показывающие довольно тесную связь q_0 с k предположим, что их произведение (скорость тепловыделения v_{q_0}) – новая характеристика угля, определяющая его склонность к самовозгоранию. комплексный показатель склонности угля к самовозгоранию t обратно пропорционален произведению $q_0 k$, т.е. скорости тепловыделения v_{q_0} . Таким образом, при изучении эндогенной пожароопасности необходимо обращать внимание не на отдельно взятые и определенные в лабораторных условиях q_0 и k , а на их произведение, т.е. на v_{q_0} .

Дальнейшие исследования низкотемпературного окисления угля показали, что существенное влияние в этом процессе имеет также величина концентрации поглощенного углями кислорода C , моль/м³.

Таблица 5 – Теплоты окисления углей шахт Донбасса

Шахта	Индекс пласта	Доля горючих веществ, $V^f, \%$	Выделившаяся теплота, Дж	Теплота реакции окисления $q_0, 10^{-5}$, Дж/моль	Константа скорости окисления $k, 10^2 \cdot c^{-1}$	Концентрация кислорода C_x , моль/м ³	Скорость тепловыделения	
							$v_{q_0} \cdot 10^{-3}$, Дж/моль	$\omega_{q_0} \cdot 10^{-3}$, Дж/(м ³ · с)
«Комсомолец Донбасса»	l_3	30	0,41	6,6	0,31	6,94	2,1	14,57
Им. А. И. Гаевого	l_3	22	0,43	6,1	0,40	1,07	2,5	2,68
Им. М.И. Калинина	l_3	20	0,26	16,1	0,15	0,59	2,4	1,41
«Северная»	l_3	20	0,42	11,2	0,28	0,59	3,1	1,83
	l_1	25	0,33	8,9	0,43	2,59	3,0	7,78
«Южная»	l_1	25	0,43	5,8	0,51	2,59	3,0	7,78
«Торецкая»	l_3	28	0,27	7,6	0,25	4,94	1,9	9,38
Им. А.Ф. Засядько	m_3	36	0,23	25,9	0,23	15,41	5,9	90,92
	l_1	34	0,33	8,4	0,28	12,11	2,4	29,06
Им. Челюскинцев	m_3	33	0,47	4,6	0,65	10,65	3,0	31,96
«Куйбышевская»	l_4	36	0,37	4,5	0,9	15,41	4,1	63,20
Им. А.А. Скочинского	h_6	31	0,25	3,9	0,82	8,07	3,2	25,84
Им.Г.Г. Капустина	m_3	34	2,46	5,8	0,6	12,11	3,5	42,38
Им. В.И. Ленина	l_1	23	1,02	24,1	0,14	1,48	3,4	5,03
Им. К.И. Поченкова	m_3	34	0,41	10,5	0,33	12,11	3,5	42,39
	l_1	25	0,19	4,8	0,6	2,59	2,9	7,51
«Калинская-Восточная»	l_1	26	0,23	2,7	1,1	3,29	2,9	9,54
Им. В.М. Бажанова	m_3	27	0,29	8,2	0,36	4,07	3,0	12,21
«Чайкино»	m_3	30	0,30	6,8	0,47	6,94	3,2	22,20
«Ольховатская»	l_3	8	0,46	8,9	0,18	13,34	1,6	21,35
«Юнком»	l_1	15	0,65	7,8	0,3	1,89	2,3	4,36
«Красный Октябрь»	l_1	15	0,46	7,9	0,3	1,89	2,4	4,55
«Полтавская»	l_1	7	0,41	6,1	0,23	16,32	1,4	22,85
	l_3	8	0,42	6,2	0,24	13,34	1,5	20,01
«Углегорская»	m_3	9	0,49	8,5	0,21	10,76	1,8	19,37
«Красный Профинтерн»	l_3	14	0,43	7,5	0,27	2,71	2,0	5,43
«Донецкая»	h_6	17	0,46	4,0	0,8	0,87	3,2	2,78

Предложен метод разделения кинетики поглощенного и прореагировавшего кислорода и получены численные значения параметров хемосорбции кислорода. Некоторые из результатов исследований, иллюстрирующих долю кислорода $\delta = \frac{a_{\text{хим}}}{a_{\text{эксп}}}$, вступившего в реакции окисления с углем разной степени метаморфизма представлены в таблице 6.

Таблица 6 Доля δ кислорода, вступившего в химическое реагирование с газонасыщенными углями Донбасса разной степени углефикации по мере кинетики процесса

Шахта пласт	$V^{daf},$ %	$k,$ $\text{м}^3/\text{с} \cdot \text{моль}$	Параметры низкотемпературного окисления углей					
			Время, час/сек					
			12/ 43200	24/ 86400	48/ 172800	72/ 259200	120/ 432000	240/ 864000
			доля кисло- рода δ	доля кисло- рода δ	доля кисло- рода δ	доля кисло- рода δ	доля кисло- рода δ	доля кисло- рода δ
Им. С.М. Кирова h_{10}^B	8,2– 10,6	$1 \cdot 10^{-9}$	0,86	0,74	0,62	0,52	0,34	0,23
«Холодная Балка» h_{10}^B	13,2	$1,43 \cdot 10^{-9}$	0,82	0,80	0,77	0,59	0,11	0,095
«Горняк–95» h_8^B	22	$1,61 \cdot 10^{-9}$	0,36	0,22	0,12	0,092	0,02	0,015
«Щегловская Глубокая» l_3	25,4– 27,8	$8,9 \cdot 10^{-9}$	0,49	0,4	0,28	0,22	0,077	0,054
«Россия» m_3	42	$2,9 \cdot 10^{-9}$	0,83	0,81	0,81	0,80	0,68	0,66
Им. Челюскинцев l_1	42,6	$1,1 \cdot 10^{-9}$	0,84	0,82	0,83	0,82	0,71	0,72

Как следует из представленных в ней результатов, у углей всех изученных степеней метаморфизма при значениях V^{daf} от 8 до 43% доля вступившего в реакцию окисления угля по мере процесса его адсорбции неуклонно снижается, хотя общая адсорбтивная его величина увеличивается до наступления сорбционного равновесия. Примерно 90% кислорода всеми изученными углями поглощается в течении 3 суток и 95% в течении 10 суток.

В четвертом разделе работы проведено исследование пожароопасности краевой части угольного массива и разработан номограммный метод оценки пожароопасности, основанный на результатах математического моделирования напряженно-деформированного состояния и теплофизических процессов в краевых частях угольного массива в подготовительных выработках.

Для определения степени разрушаемости краевой части угольного массива в подготовительных горных выработках используем формулу

$$P = \frac{m(q + Kctg\alpha)}{N_1 N_2} \cdot \left(\exp \frac{N_1 x_0}{m} - 1 \right) \quad (29)$$

В таблице 7 представлены результаты расчета коэффициентов уравнения (29).

Таблица 7

α , град	0	5	10	15	20	25	30
N_1	0	0,091	0,181	0,269	0,356	0,441	0,524
N_2	1	0,826	0,658	0,504	0,370	0,259	0,171

Формула для расчета ширины разрушаемой краевой части пласта

$$h = \frac{m}{N} \cdot \ln \left(\frac{N_2 \lambda \gamma H}{q + Kctg\alpha} \right) \quad (29)$$

Анализ формулы показывает, что чем больше вес пород и глубина разработки, тем шире будет разрушаемая часть пласта, особенно в зонах геологических нарушений, где сцепление между частицами угля отсутствует ($K = 0$). Большое значение при этом имеет реакция крепи. С ее уменьшением ширина разрушаемой части массива увеличивается.

На основании исследований в предыдущих разделах работы разработан номограммный метод оценки пожароопасности геологических нарушений в подготовительных выработках. Данный метод позволяет определить максимально возможную температуру в краевой части пласта, место ее нахождения и время инкубационного периода самовозгорания угля.

При проведении расчетов используются следующие исходные данные:

h – ширина разрушаемой краевой части пласта, м;

W_p – рабочая влажность угля, %;

V_r – выход летучих, %;

T_0 – начальная температура угля и окружающих пород, °С;

$T_{кр}$ – критическая температура самовозгорания угля, °С.

Для нахождения максимально возможной температуры в разрушенной краевой части пласта предварительно определяются коэффициенты скорости окисления угля и скорости теплообмена при испарении влаги. Далее находятся критерий Био:

$$B_i = \psi h^2 / a \quad (30)$$

и обобщенный критерий

$$K_p = \frac{kh^2}{(1 + k/\beta) \cdot D} \quad (31)$$

При этом входящие в формулы (30) и (31) исходные параметры могут быть приняты равными: $k_m = 10^{-4}$ 1/с; $\psi_m = 10^{-7}$ 1/с; $a = 2 \cdot 10^{-7}$ м²/с; $D = 2 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $\beta = k$.

По номограмме (рисунок 9) и найденным критериям K_p и Bi ходом ключа снизу вверх и налево определяется относительная максимальная температура $\bar{T}_m$, после чего ожидаемая максимальная температура (°C) находится по формуле

$$T_m = T_0 + qC_0 L_u \bar{T}_m \quad (32)$$

где, как установлено ранее, произведение $qC_0 = 4,46 \cdot K$ и $L_u = 100$.

Если эта температура меньше критической, то расчет прекращается. В противном случае по графику (рисунок 10) определяется координата $\bar{y}$ и определяется положение максимума температур в краевой части пласта $y_m = \bar{y} \cdot h$

Для прогноза времени инкубационного периода развития эндогенного пожара предварительно находится относительная критическая температура по формуле

$$\bar{T} = \frac{T_{kp} - T_0}{T_m - T_0} \quad (33)$$

и определяется критерий Предводителя

$$P_d = kh^2 / a \quad (34)$$

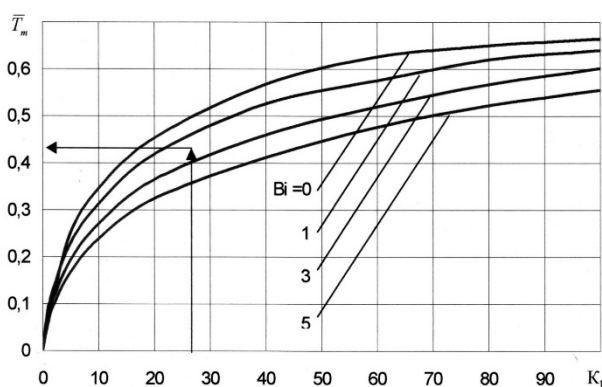


Рисунок 9. Номограмма для расчета ожидаемой относительной максимальной температуры в краевой части пласта

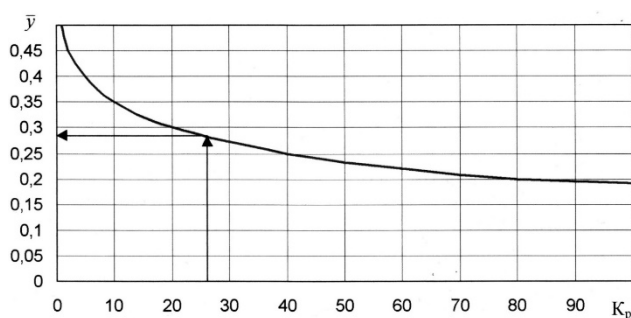


Рисунок 10 Положение относительного максимума температуры в краевой части массива

Используя номограмму (рисунок 11), по найденным параметрам $\bar{T}$ и P_d ходом ключа слева направо и вниз отыскиваем показатель критерия Фурье F_0 и определяем время инкубационного периода самовозгорания угля (сут) по формуле

$$\tau = h^2 / a = 57,9 F_0 \cdot h^2 \quad (35)$$

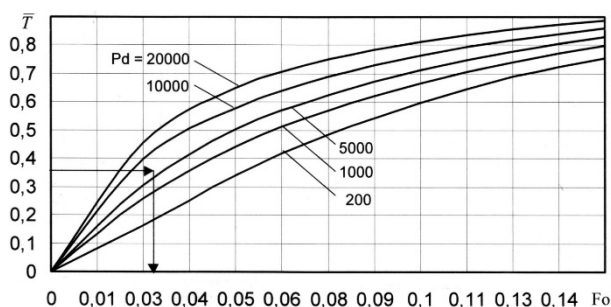


Рисунок 11. Номограмма для прогноза инкубационного периода самовозгорания угля

Экономический эффект от внедрения метода на 12 выемочных участках угольных шахт Донбасса составляет 2245,2 тыс. рос. рублей в год. В среднем по одному выемочному участку экономический эффект составляет 187,1 тыс. рос. рублей в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе, являющейся законченной научно-квалификационной работой, дано практическое решение актуальной научно-технической задачи, состоящей в раскрытии зависимостей формирования зон повышенных температур и обоснование на этой основе метода оценки пожароопасности краевой части угольного массива глубоких шахт который включает в себя аналитический расчет ширины разрушаемой краевой части угольного пласта, определение по номограммам в критериальном виде ожидаемой максимальной температуры, места ее нахождения и времени инкубационного периода самовозгорания, что характеризует степень пожароопасности краевой части угольного массива и позволяет посредством принятия конкретных технических решений предотвратить самовозгорание угля.

Основные научные и практические результаты выполненной работы заключаются в следующем:

- сформулирована задача теплонакопления в краевой части пласта в подготовительной выработке и разработан численный метод решения системы нелинейных уравнений тепломассобмена в краевой части пласта с критериями подобия;

- получена система алгебраических уравнений, которая позволяет численным методом, с заданными начальными и граничными условиями, шаг за шагом по времени определять распределение температуры и концентрации кислорода вглубь краевой части пласта;

- разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния краевой части угольного пласта на больших глубинах.

- впервые на экспериментальной лабораторной установке исследована скорость перемещения адсорбционной и хемосорбционной волны отработки слоя газонасыщенного угля разной степени метаморфизма вдоль пути проникновения в него воздуха, что позволяет рассчитать в нем скорость тепловыделения, приводящую к самонагреванию и в определенных условиях к самовозгоранию угля.

- впервые предложено, опробованно на многочисленных экспериментах и введено понятие – скорость тепловыделения сорбента в результате химических реакций его окисления газонасыщенного угольного скопления на основе ранее проведенных исследований теплоты реакции окисления углей разной степени метаморфизма и теоретического изучения на большинстве разрабатываемых угольных пластов Донбасса степени разделения адсорбированного и вступившего в реакцию окисления с углем кислорода воздуха, что является основой для расчета температур самовозгорания угля.

- впервые на результатах экспериментов по адсорбции и расчетов хемосорбции углями кислорода воздуха большинства разрабатываемых пластов Донбасса доказана тесная корреляционная связь между скоростью тепловыделения (отличающейся от ранее известной количеством вступившего в реакцию в результате окисления кислорода) и числом произошедших эндогенных пожаров, что позволяет при учете теплоотдачи скопления угля рассчитать температуру угля и вероятность возникновения эндогенного пожара в конкретных условиях шахт.

- разработан номограммный метод оценки пожароопасности краевой части угольного массива, разработанный метод включает в себя аналитический расчет ширины разрушаемой краевой части угольного пласта, определение по номограммам в критериальном виде ожидаемой максимальной температуры, места ее нахождения и времени инкубационного периода самовозгорания, что характеризует степень пожароопасности краевой части угольного массива в подготовительных выработках на больших глубинах. Разработанный метод позволяет повысить пожарную безопасность на предприятиях угольной отрасли;

– установленное местонахождение пожароопасных зон в краевой части угольного массива позволяет целенаправленно сосредотачивать материальные средства на выполнение профилактических мероприятий только в опасных зонах, за счет чего значительно снижаются материальные затраты на предупреждение эндогенных пожаров и повышение уровня безопасности горных работ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Кошовский, Б.И. Определение склонности угля к самовозгоранию / Б.И. Кошовский, Я. Цыганкевич, Д.В. Докукин, **Е.А. Головченко** // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2005. Вып. 42. – С. 50-55.
2. Греков, С.П. Кинетика гетерогенного окисления слоя угля и его самонагревание / С.П. Греков, И.Н. Зинченко, Г.Б. Тында, **Е.А. Головченко** // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2005. Вып. 42. – С. 15-21.
3. Греков, С.П. Зависимость химической активности углей от остаточной их газоносности и продолжительности окисления / С.П. Греков, И.А. Шайтан, И.Н. Зинченко, Г.Б. Тында, **Е.А. Головченко** // Уголь Украины. – 2006. – №2. – С. 26-28.
4. Греков, С.П. Определение критической температуры самовозгорания углей в зонах геологических нарушений / С.П. Греков, И.Н. Зинченко, Г.Б. Тында, **Е.А. Головченко** // Уголь Украины. – 2006. – №8. – С. 37-39.
5. Греков, С.П. Метод прогноза пожароопасности потерь угля в шахтах и инкубационный период их самовозгорания / С.П. Греков, И.А. Шайтан, И.Н. Зинченко, Г.Б. Тында, **Е.А. Головченко** // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. / МакНИИ. – Макеевка, 2007. – №19. – С. 39-50.
6. Греков, С.П. Комплексный показатель пожароопасности угольных пластов / С.П. Греков, И.Н. Зинченко, И.А. Шайтан, Г.Б. Тында, **Е.А. Головченко** // Уголь Украины. – 2007. – №1. – С. 32-34.
7. Пашковский, П.С. Определение группы пожарной опасности шахтопластов / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко, **Е.А. Головченко** // Уголь Украины. – 2008. – №8. – С. 25-27.
8. Греков, С.П. Лабораторно-аналитический способ определения инкубационного периода самовозгорания углей низкой влажности / С.П. Греков, И.Н. Зинченко, Б.И. Кошовский, **Е.А. Головченко** // Уголь Украины. – 2008. – №8. – С. 28-34.
9. Греков, С.П. Связь энергии активации углей и эндогенной пожароопасности / С.П. Греков, **Е.А. Головченко** // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – 2015. – Вып. 52. – С. 68-77.

10. Головченко, Е.А. Разработка математической модели тепломассообменных процессов в краевых частях угольного пласта / **Е.А. Головченко** С.П. Греков, // Вестник Института гражданской защиты Донбасса: науч. журн. – 2015. – Вып. №4(4). – С. 21-25.

11. Головченко, Е.А. Теплонакопление в краевой части угольного массива / **Е.А. Головченко** // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – 2017. – Вып. №4(54). – С. 32-41.

12. Головченко, Е.А. Химическая активность угля и его инкубационный период самовозгорания при образовании скоплений угольной пыли / **Е.А. Головченко** // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – 2020. – Вып. №4(57). – С. 66-72.

13. Греков, С.П. Математическая модель динамики адсорбции кислорода слоём газонасыщенного угля при необратимой реакции первого порядка / С.П. Греков, **Е.А. Головченко** // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – 2022. – Вып. №3(59). – С. 48-57.

14. Греков, С.П. Экспериментальные исследования динамики адсорбции кислорода слоём газонасыщенного угля / С.П. Греков, **Е.А. Головченко**, М.А. Белокобыльский, // Вестник Академии гражданской защиты Донбасса: науч. журн. – 2022. – Вып. №3(31). – В печати.

15. Греков, С.П. Исследование кинетики теплового эффекта окисления газонасыщенных углей Донбасса / С.П. Греков, **Е.А. Головченко** // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – 2022. – Вып. №4(59). – В печати.

16. Греков, С.П. Адсорбция и хемосорбция кислорода газонасыщенными углями Донбасса и эндогенная пожароопасность / **Е.А. Головченко**, М.А. Белокобыльский, // Вестник Академии гражданской защиты Донбасса: науч. журн. – 2022. – Вып. №4(31). – В печати.

Публикации в научных изданиях, входящих в наукометрическую базу РИНЦ:

17. **Головченко, Е.А.** Разработка алгоритма предупреждения самовозгорания угольного скопления на выемочном участке / **Е.А. Головченко**, Д.И. Момот, М.А. Белокобыльский // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. Журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общ. Ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2022. – №8. – С. 329-332.

Публикации в сборниках материалов международных научно-практических конференций:

18. **Головченко, Е.А.** Построение математической модели разрушаемости краевых частей угольных пластов в подготовительных горных выработках / **Е.А. Головченко** // Математическое моделирование в образовании, науке и производстве: мат. X Междунар. конф. – Тирасполь, 2017. – С. 121-125.

19. Головченко, Е.А. Оценка разрушаемости краевой части угольного массива горных выработок / **Е.А. Головченко** // Комплексные проблемы техносферной безопасности: V Междунар. науч.-практ. конф. – Воронеж, 2018.

АННОТАЦИЯ

Головченко Евгений Александрович. Обоснование параметров процесса самонагрева угля в краевой части угольного массива подготовительных выработок. – На правах рукописи

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность (по отраслям) (технические науки). – ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР». – Донецк, 2022.

В работе исследованы процессы теплонакопления в краевых частях угольного массива в подготовительных горных выработках, приводящие к повышению температуры угля и возможному возникновению процесса самовозгорания угля.

Разработана математическая модель тепломассообменных процессов в краевых частях угольного массива. Система уравнений с заданными начальными и граничными условиями позволяет определять распределение температуры и концентрации кислорода вглубь краевой части пласта.

Экспериментальными исследованиями кинетических параметров самовозгорания угля изучена кинетика адсорбции и окисления газонасыщенных углей разной степени метаморфизма. В результате экспериментов получено новое понятие – скорость тепловыделения сорбента, которое является основой для последующих расчетов температуры самовозгорания угля.

Исследована пожароопасность краевой части угольного массива с учетом напряженно-деформированного состояния краевой части, получена зависимость, позволяющая определить ширину разрушаемой краевой части. Разработан номограммный метод оценки пожароопасности краевой части угольного массива.

Предложенный метод оценки пожароопасности позволяет установить местонахождение пожароопасных зон в краевой части угольного массива, что в свою очередь позволит целенаправленно сосредотачивать материальные средства на выполнение профилактических мероприятий только в опасных зонах и повысить пожарную безопасность на предприятиях угольной отрасли.

Ключевые слова: самовозгорание угля, пожароопасность, процессы теплонакопления, адсорбция кислорода, краевая часть угольного массива.

ABSTRACT

Golovchenko Yevgeny Aleksandrovich. **Substantiation of Parameters of Coal Spontaneous Heating Process in Selvage of Coal Massif of Development Workings.** – Manuscript copyright.

The dissertation for a degree of Candidate of Technical Sciences for the specialty 05.26.03 –GBU NII “Respirator” EMERCOM DPR. – Donetsk, 2022.

The processes of heat accumulation in the coal massif selvage of the development workings that lead to elevation of coal temperature and possible occurrence of coal spontaneous combustion process have been investigated in the paper.

The mathematical model of the heat and mass exchange processes in the coal massif selvage has been elaborated. The system of equations with the preset initial and boundary conditions permits to determine the temperature distribution and oxygen concentration into the depth of the seam selvage.

The kinetics of adsorption and oxidation of gas-saturated coal with different grades of metamorphism has been studied with the help of the experimental investigations of kinetic parameters of coal spontaneous combustion. The new concept has been derived as a result of the experiments, i.e. the rate of sorbent heat liberation (release).

The fire hazard of the coal massif selvage has been investigated factoring in the deflected mode of the selvage; the relation facilitating the determination of the width of the crushable selvage has been obtained. The nomogram method of the fire hazard assessment for the coal massif selvage has been developed.

The proposed method of the fire hazard assessment permits to determine a location of fire hazardous areas in the coal massif selvage which, in turn, will permit to focus the materiel resources on conducting the preventive measures only in the hazardous locations and to improve the fire safety at the coal industry enterprises.

Keywords: coal spontaneous combustion, fire hazard, heat accumulation processes, oxygen adsorption, selvage of coal massif.