

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»

На правах рукописи

УДК 614.8.086:614.895.5

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)

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
Греков Святослав Павлович

Идентичность всех экземпляров

ПОДТВЕРЖДАЮ

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 01.027.01 канд. техн. наук

И.Г. Старикова

Донецк – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ.....	4
1	СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	11
	1.1 Анализ условий возникновения и тушения эндогенных пожаров в краевых частях угольного массива.....	11
	1.2 Процессы формирования и развития очагов эндогенных пожаров.....	18
	1.3 Средства и способы предотвращения эндогенных пожаров.....	24
	1.4 Цель и задачи исследований.....	32
2	ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОАКОПЛЕНИЯ В КРАЕВЫХ ЧАСТЯХ УГОЛЬНОГО МАССИВА В ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ...	34
	2.1 Разработка математической модели тепломассообменных процессов в краевых частях угольного массива.....	34
	2.2 Математическое моделирование теплоаккумуляции в краевой части угольного массива.....	41
	2.3 Разработка алгоритма решения задачи развития и подавления очагов самовозгорания угля в подготовительных выработках.....	50
	2.4 Выводы.....	55
3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ В КРАЕВЫХ ЧАСТЯХ УГОЛЬНОГО МАССИВА.....	56
	3.1. Параметры самонагрева (самовозгорания) угля.....	56
	3.2 Исследование динамики адсорбции кислорода углями шахт Донбасса.....	68
	3.3 Исследование кинетики теплового эффекта окисления газонасыщенных углей шахт Донбасса.....	90
	3.4 Результаты математического моделирования процесса самонагрева угля в краевой части угольного массива.....	96

3.5 Выводы.....	100
4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЖАРООПАСНОСТИ КРАЕВОЙ ЧАСТИ УГОЛЬНОГО МАССИВА.....	102
4.1. Построение математической модели разрушаемости краевых частей угольных пластов в подготовительных выработках.....	102
4.2 Определение степени разрушаемости краевой части угольного массива в подготовительных горных выработках.....	111
4.3 Разработка метода оценки пожароопасности краевой части угольного массива в подготовительных выработках.....	115
4.4 Выводы.....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	125
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	128

ВВЕДЕНИЕ

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», «Самсоновской-Западной» 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.

Актуальность работы заключается в определении мест наиболее вероятного возникновения очагов самонагрева в краевой части угольного массива и принятии конкретных технических решений о предотвращении процессов теплонакопления в нём при поступлении кислорода с обнаженной поверхности угля вглубь массива.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Степень разработанности темы исследования. Личный вклад соискателя

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.

Работа проводилась в соответствии с планами работ НИИГД «Респиратор» 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.

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

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.

Предмет исследований – условия возникновения и развития очагов самонагревания в краевых частях угольного массива.

Методы исследований. 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 самонагревания 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

Научная новизна полученных результатов

1. Впервые предложено понятие - скорость тепловыделение 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 взаимосвязь 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.

Основные научные 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 углями кислородом и вступившим в реакции окисления, зависящая от степени метаморфизма угля, что позволяет рассчитать скорость тепловыделения и вероятность возникновения эндогенного пожара.

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

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическое значение работы заключается 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.

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».

Достоверность научных положений и результатов 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 расчных 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 ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР» (2019,2020,2021).

Публикации. Основные результаты диссертационных исследований изложены в 19 печатных работах, в том числе 17 работ опубликованы в рецензируемых научных изданиях; одна работа в изданиях, индексируемых в базах данных РИНЦ (Россия) и двух докладов в материалах международных научных конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 122 наименований, содержит 138 страниц машинописного текста, 31 рисунок , 18 таблиц, 1 приложение.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Анализ условий возникновения и тушения эндогенных пожаров в краевых частях угольного массива

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).

В последние годы увеличилась доля пожаров, возникающих на пластах пологого падения. Это связано с одной стороны с сокращением добычи угля на наклонных и крутопадающих пластах, с другой стороны с ухудшением горно-геологических условий, происходящем вследствие увеличения глубины разработки пологих пластов.

Особо ощутимый урон эндогенные пожары наносят высоконагруженным механизированным очистным забоям (3-я восточная лава пласта k_2 , шахты «Самсоновская-Западная» ОАО «Краснодонуголь» 2003г., 4-я западная лава пласта k_2 шахты имени 50-летия СССР ОАО «Краснодонуголь» 2004г., 53 лава пласта c_{11} шахты «Южно-Донбасская №1» УК «Донецкуголь» 2004г., 33-я Орловская лава пласта k_2 шахты «Молодогвардейская» ПАО «Краснодонуголь» 2010 г., 6-я западная лава Западной панели пласта h_6^1 шахты им. А.А. Скочинского ГУП ДНР ДУЭК 2020 г.). Значительная часть пожаров (около 30%) возникает в зонах геологических нарушений, в том числе на пластах угля, не склонного к самовозгоранию.

На фоне постоянного усложнения горно-геологических условий выявляется целый ряд нерешенных вопросов, связанных с предупреждением самовозгораний угля. Это, прежде всего, несовершенство существующих методов оценки уровня эндогенной пожароопасности, общим недостатком которых является упрощенность, вследствие которой, невозможно получить

точную оценку в конкретных условиях. Отсутствие стройной системы правовых и технических требований к технологии добычи угля, которая бы обеспечивала при минимальных затратах необходимый уровень пожаробезопасности на всех этапах горных работ. К этому следует добавить, что существующие в настоящий момент технологии предупреждения эндогенных пожаров морально устарели, трудоемки и малоэффективны. Зачастую вещества, применяемые в качестве антипирогенов, не соответствуют тем требованиям, которые предъявляются к этому профилактическому средству. Отсутствует входной контроль качества антипирогенов и ряд других нормативных документов в этой области.

Подавляющее большинство случаев самовозгорания угля обнаруживается на стадии горения, что свидетельствует о том, система контроля ранних стадий эндогенных пожаров не получила должного распространения на угольных предприятиях. Одной из причин является недостаточная точность и достоверность, которую может обеспечить эта система. Очевидно, необходимы принципиально новые технические решения для разработки более надежных систем контроля.

Более 75 % возникших эндогенных пожаров ликвидируются способом изоляции. Известно, что для тушения горящего угля необходимо создать в изолированном объеме газовую среду с содержанием кислорода, не превышающим 2-3 %. В условиях современных шахт это очень сложная техническая задача, связанная с необходимостью возведения большого количества изолирующих сооружений. В связи с этим остро встает проблема недостаточного уровня механизации изоляционных работ.

Не менее актуальной является проблема определения состояния очага изолированного пожара. Используемые в настоящее время методы контроля пожара далеки до совершенства, в тоже время цена неверно принятого решения очень высока. Поэтому и здесь необходим поиск принципиально новых научно-технических решений, которые бы обеспечили требуемый уровень достоверности методов контроля.

При увеличении глубины ведения работ растет длительность локализации и тушения эндогенных пожаров, что ведет к значительному росту материальных затрат. Поэтому во всех угледобывающих странах особое внимание уделяют созданию способ и средств активного подавления очагов самонагревания и самовозгорания угля. Выбор этих способов и средств зависит от места расположения и размеров очага самонагревания (самовозгорания). В этой связи представляет интерес изучение условий возникновения эндогенных пожаров в угольных шахтах.

Подземные пожары относятся к числу наиболее опасных аварий, приводящих к значительным материальным потерям. Наибольшую сложность, как с точки зрения ликвидации, так и угрозы жизни и здоровью рабочих представляют эндогенные пожары. Анализ аварийности на угольных шахтах Донбасса за 2010-2021 годы показывает, что эндогенные пожары составляют в среднем 10,1 % от всех подземных пожаров, официально принятых к учету в отрасли. Несмотря на огромный ущерб, причиняемый такими пожарами, приводящими порой к полной остановке горных работ на длительные сроки (1-3 года), состояние дел в вопросах их профилактики из года в год практически не улучшается.

Сведения о динамике подземных пожаров на угольных шахтах Донбасса в 2010-2021 годах приведены в таблице 1.

В Донецком угольном бассейне из 120 разрабатываемых пластов более 80 склонны к самовозгоранию, за период с 2010 по 2021 год на шахтах Донбасса зарегистрировано 11 случаев самовозгорания угля (эндогенных пожаров) причем 4 эндогенных пожара произошли в период 2020-2021 годов: 1 пожар на угольных шахтах Донецкой Народной Республики и 3 пожара на шахтах Луганской Народной Республики.

Таблица 1 – Сведения о динамике подземных пожаров на угольных шахтах Донбасса в 2010-2021 годах

* (совместные данные ГВГСС МЧС ДНР и ЦУ ВГСО МЧС ЛНР)

Годы	Общее количество произошедших аварий	Количество подземных пожаров			Удельный вес, %	
		Всего	Эндогенных	Экзогенных	Подземных пожаров в общей аварийности	Эндогенных пожаров в подземных пожарах
2010	42	12	1	11	28,6	8,3
2011	53	14	2	12	26,4	14,3
2012	23	12	2	10	52,2	16,7
2013	24	6	1	5	25,0	16,7
2014	23	9	1	8	39,1	11,1
2015*	21	4	0	4	19,0	0,0
2016*	11	2	0	2	18,2	0,0
2017*	21	2	0	2	9,5	0,0
2018*	24	2	0	2	8,3	0,0
2019*	32	0	0	0	0,0	0,0
2020*	27	14	2	12	51,9	14,3
2021*	27	5	2	3	18,5	40,0

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.

Например, для условий ГУП ДНР «Шахта имени А.Ф. Засядько» количество эндогенных пожаров, отнесенных к числу лав на этих горизонтах и времени их работы, дает возможность найти эмпирическую зависимость вероятности возникновения эндогенных пожаров $P, 1$, от глубины ведения работ $H, м$.

Зависимость частоты возникновения эндогенных пожаров n , от глубины ведения горных работ на ГУП ДНР «Шахта имени А.Ф. Засядько» приведена в таблице 2.

Таблица 2. Зависимость частоты возникновения эндогенных пожаров от глубины ведения горных работ на ГУП ДНР «Шахта имени А.Ф. Засядько»

Глубина ведения горных работ, м	Число отработанных лаво-месяцев	Количество происшедших эндогенных пожаров	Частота возникновения эндогенных пожаров n
530	238	6	0,02521
647	236	6	0,02542
854	229	5	0,02184
1120	169	7	0,04142
1291	160	10	0,06250

Вероятность возникновения эндогенных пожаров $P, 1$, имеет вид:

$$P = 0,02 \cdot 10^{-3} + 0,022 \cdot H \quad (1.1)$$

где H – глубина ведения горных работ, м.

На рисунке 1.1 приведена зависимость вероятности возникновения эндогенных пожаров $P, 1$, от глубины ведения горных работ $H, м$. Глубина ведения горных работ принята по данным таблицы 2.

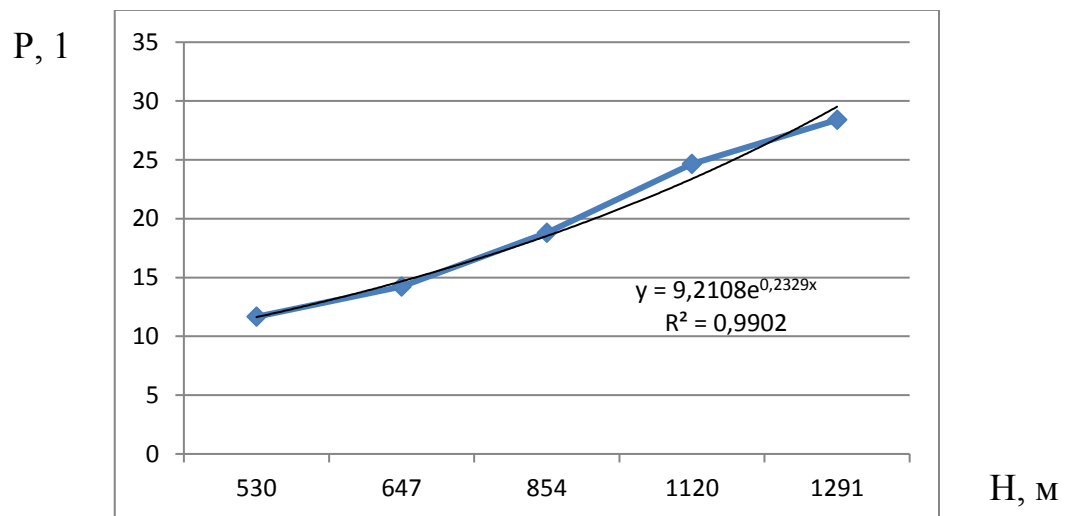


Рисунок 1.1 Зависимость вероятности возникновения эндогенных пожаров $P, 1$, от глубины ведения горных работ $H, м$.

На рисунке 1.2 приведены статистические величины частоты возникновения эндогенных пожаров от глубины ведения горных работ на угольных шахтах Донбасса, как видно, с переходом горных работ на большие глубины, особенно более 1000 м частота возникновения эндогенных пожаров возрастает.

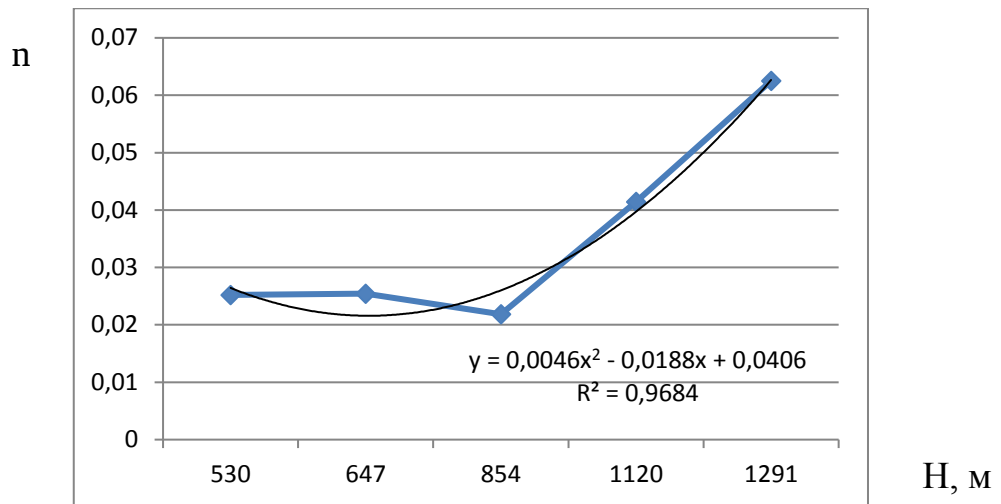


Рисунок 1.2 Величина частоты возникновения эндогенных пожаров от глубины ведения горных работ

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 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.

1.2. Процессы формирования и развития очагов эндогенных пожаров

Исследованиями процессов, приводящих к самовозгоранию угля в шахтах, установлено, что возникновение эндогенного пожара возможно при осуществлении некоторых условий:

- уголь должен иметь достаточно большую химическую активность и соответствующие физико-механические, структурные и другие свойства, проще говоря иметь определенную склонность к самовозгоранию,
- к скоплению угля должен поступать воздух,
- условия, в которых находится окисляющийся уголь, должны быть благоприятными для накопления теплоты, выделяющейся при его окислении.

Основные физические условия самовозгорания угля подробно сформулированы и обоснованы В.С. Веселовским и его последователями [1-6]. В данных работах изучена химическая природа углей, дисперсная структура, дана классификация, исследованы процессы окисления, зависимость скорости окисления от температуры, рассмотрены процессы

сорбции кислорода углем при низких и средних (менее 400°C) температурах.. Изучена зависимость скорости окисления от содержания кислорода и от крупности зерен угля, дана теоретическая интерпретация механизма окисления углей.

В работах Е.И. Глузберга, Е.И. Захарова и других [7-10] представлена математическая модель процесса самовозгорания угля – уравнение теплового баланса, включающее в себя в более или менее явном виде самые различные факторы, влияющие на процесс самонагрева, которое указывает на общеметодологический и теоретический подход при изучении рассматриваемой проблемы. Однако это уравнение не может быть проинтегрировано аналитически [7, 9], так как некоторые входящие в него параметры являются неизвестными функциями температуры, относительно которой уравнение составлено. Чтобы воспользоваться данным уравнением на практике необходимо знать критериальные соотношения между величинами характеризующими генерацию теплоты и величинами, характеризующими теплопроводные свойства данного скопления угля и вмещающих пород, которые определяют течение процесса самонагрева. Эти соотношения могут быть изучены лишь с помощью математических моделей, описывающих распределение во времени и в пространстве температурного поля в угольном скоплении.

Многие исследователи [7, 11-14] при начальном определении параметров пожароопасности методами математической физики использовали различные варианты упрощенного уравнения теплового баланса в скоплении угля без учета массопереноса и некоторых условий теплоотдачи. Решение данных уравнений позволило получить некоторые аналитические выражения для определения нескольких критических параметров или показателей пожароопасности, имеющих определенный физический смысл

В работах [7, 9, 10,] предлагается несколько математических моделей процесса самонагрева угля, позволяющих устанавливать важные

критерии течения этого процесса при некоторых типичных условиях, возникающих в шахте. К недостаткам этих моделей следует отнести в первую очередь, принимаемую линейную зависимость от температуры генерируемой в единицу времени теплоты, причем угловой коэффициент этой линейной функции зависит не от текущей концентрации кислорода, а от некоторой средней. Это позволяет расщепить систему дифференциальных уравнений, линеаризовать их и получить аналитические решения, однако правомочность такого рода преобразований ничем не обоснована. Следует ожидать что в силу нелинейности рассматриваемой задачи теплонакопления полученные аналитические решения являются весьма грубыми приближениями, искажающими в некоторых случаях физическую сущность самого процесса, необходима возможность сопоставления полученных решений с численными расчетами нелинейных систем и оценка сходимости результатов.

В работах [15-17] аналитически найдены так называемые критическая масса угля и критическая мощность угольного скопления. При этом под критической понимается такое значение мощности разрыхленного скопления угля, ниже которой возникновение эндогенного пожара маловероятно. К недостаткам определения критических значений для скопления угля следует отнести ту же самую линеаризацию исходного уравнения теплового баланса. Оценка может получиться весьма грубой, что приведет к нерациональным экономическим затратам и усложнению мер и технологии профилактических работ.

Во всех вышеперечисленных работах не решается сопряженная задача теплообмена скопления угля с вмещающими породами, который самым существенным образом влияет на формирование теплового поля и тем самым на процесс самонагрева угля. Для решения задачи локализации эндогенных пожаров необходимо детальное исследование влияния содержания кислорода в шахтном воздухе на процесс самонагрева угля, а также кинетики процесса окисления и генерирования теплоты при малых

концентрациях кислорода. Существуют определенные пределы содержания кислорода в шахтном воздухе, при которых процесс самонагрева не переходит в самовозгорание. Так по данным работ П.С. Пашковского [18-21], это происходит при доле кислорода менее 12-15%. Вместе с тем обработка угля азотом, например, может привести к увеличению химической активности угля. Таким образом, необходимо установить минимальную концентрацию кислорода, при которой стабилизируется или затухает процесс самонагрева угля. Ее можно определить лишь на основе соответствующей математической модели, позволяющей найти соотношения между теплогенерацией и теплоотводом при запуске инертных газов.

Поскольку в реальных условиях скорость окисления зависит также от дробимости угля, то представляют интерес исследования, проведенные в работах [13, 16, 21], позволяющие увязать значение константы скорости сорбции с размерами зерен угля, что необходимо учесть в математической модели.

Представляет интерес также физический критерий эндогенной пожароопасности, полученный в работе П.С. Пашковского [22] имеющий физический смысл отношения приращения мощности тепловыделения при повышении температуры на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ к тепловой проводимости слоя (или очага самонагрева) и позволяющей определить необходимую концентрацию кислорода для невозможности развития локальных очагов разогрева и перехода самонагрева в самовозгорание. Необходимо сопоставить этот критерий с расчетами при решении сопряженной задачи теплообмена. Для решения сопряженной задачи необходимо знание коэффициента объемной теплоотдачи при фильтрации воздуха сквозь уголь, некоторые данные о котором приводятся в работах [9, 11, 18].

В работах [4, 8, 9, 11] даны уравнения теплового баланса в горных выработках при самонагревании угля и вычисляется инкубационный период самовозгорания угля. Эти уравнения позволяют оценить инкубационный период самовозгорания угля, однако не позволяют получить распределение

теплоты в скоплении угля и в горном массиве, чтобы сравнить, как изменяются условия теплоотвода во времени по сравнению с теплогенерацией.

В работе В.Я. Альперовича [18] приведены результаты научных исследований процессов сорбции углем кислорода, окисления и самонагревания углей Донбасса на основе теоретического описания их системой дифференциальных уравнений. Предложен новый метод определения окислительной активности углей и пожароопасности его скоплений, а также классификация пожароопасности шахтопластов по критической мощности скопления угля.

Однако в этих работах не решается задача сопряженного теплообмена. Кроме того, содержание кислорода в поступающей газовой воздушной струе принимается неизменным.

Заслуживает внимания, разработанные В.Н. и Вл.Н. Вылегжаниными, В.А. Бонецким и другими исследователями [23-26] математические модели развития процессов самонагревания и самовозгорания угля. Они представляют значительный теоретический интерес, однако достаточно сложны, громоздки и требуют знания параметров, определения которых в настоящее время затруднено или не представляется практически возможным: скорости распространения теплового поля, коэффициентов, учитывающих сорбционно-фильтрационные процессы, и другие, поэтому для решения практических задач вряд ли пригодны.

Большинство существующих математических моделей самонагревания углей, как правило, слабо учитывают особенности низкотемпературного окисления. Кроме этого, они содержат уравнения химической кинетики применительно к шахтным условиям. Взаимодействие угля с кислородом чаще всего учитывается введением в систему уравнений показателя константы скорости сорбции кислорода, определенной в лабораторных условиях в статическом режиме [18, 24, 26].

Наиболее полной, хотя и не свободной от указанных выше недостатков, является модель, разработанная В.И. Саранчуком и Х.А. Баевым [10], включающая шесть уравнений, описывающих кинетику химического взаимодействия и адсорбции, конвективной диффузии, газового и теплового баланса. Полученные авторами частные решения предложенной системы уравнений представляют значительный теоретический и практический интерес. Однако в своей общей постановке модель не может быть использована для прогноза ввиду сложности и невозможности численного решения, так как в ней используются такие величины, как константа скорости образования и разрушения уголькислородных комплексов, скорость конденсации и испарения молекул кислорода, удельная поверхность и доля поверхности, занятая физически и химически адсорбированным кислородом, определение которых в настоящее время связано с большими трудностями.

Неадекватность существующих математических моделей реальному процессу самовозгорания углей в шахтах обусловлена, 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.

Определенный прогресс в вопросах математического описания процессов самовозгорания угля представляют работы, выполненные в НИИГД «Респиратор». В работе П.С. Пашковского и др. [27] изложен метод текущего прогноза эндогенной пожароопасности выемочного участка в процессе ведения горных работ. Метод основан на использовании, с одной стороны совокупности физико-химических свойств угля, а с другой, комплекса горно-геологических и горнотехнических факторов.

Указанные свойства и факторы определяют возможность возникновения эндогенных пожаров в горных выработках. Согласно разработанному алгоритму первоначально, на основании методики, изложенной в работе [12, 28, 29], устанавливают степень склонности к самовозгоранию угля в пределах выемочного участка. Если уголь оказывается склонным к самовозгоранию, то, пользуясь специально разработанной схемой, выявляются места возможных потерь угля при отработке конкретного выемочного участка. После чего мощность фактических потерь угля сравнивают с критической, рассчитываемой для каждого пласта угля. Если в результате сравнения оказывается, что мощность фактических потерь превышает критическую, то переходят к математическому моделированию процесса самонагревания угольного скопления в выработанном пространстве выемочного участка. При этом учитывается влияние различных физико-химических и теплофизических параметров, схемы проветривания, способа управления горным давлением на формирование теплового поля и развитие окислительных процессов в выработанном пространстве конкретного выемочного участка. В результате выполненных расчетов устанавливают возможность самовозгорания угля и, если таковая имеется, то время в течение которого она реализуется. Однако и данное математическое описание процессов развития самовозгорания угля, несмотря на имеющийся рациональный методический подход, является громоздким и трудоемким, в силу чего не нашло применения для практических расчетов мест расположения очагов самовозгорания угля.

1.3. Средства и способы предотвращения эндогенных пожаров

До конца 60-х годов 20-го столетия в практике профилактики и тушения эндогенных пожаров в выработанных пространствах угольных шахт наиболее распространенным способом была изоляция, а также изоляция с проиливанием глинистой пульпой (особенно была распространена в

восточных районах бывшего СССР) и изоляция с последующей инертизацией изолированного пространства [7, 13, 19, 29, 30-34].

Наравне с изоляцией для борьбы с эндогенными пожарами применяется воздушно-механическая пена. Впервые в бывшем СССР она была применена в Донбассе для тушения эндогенного пожара на шахте имени Феликса Кона в 1960 г [35-38]. Также воздушно-механическая пена была успешно применена для подавления эндогенного пожара в 1978 г в Центральном районе Донбасса на шахте «Красный Профинтерн» [39]. Случай применения воздушно-механической пены для охлаждения локальных пожаров, возникающих в пустотах обрушения описан Е.И. Глузбергом [39], при слоевой выемке пластов угля на шахтах «Вашах» и «Зобак» в Венгрии. Пенные способы борьбы с эндогенными пожарами описаны в работе [40] при подавлении пожара на шахте №5 Западная Компании «Olga Coal» США.

Оценивая воздушно-механическую пену как средство предупреждения и тушения эндогенных пожаров, нужно отметить следующее. При обработке выработанного пространства воздушно-механическая пена, обладая малой плотностью и большой вязкостью накапливается в пустотах обрушенных пород и поглощает теплоту своей жидкой и газообразной формой, тем самым дезактивируя процесс окисления угля.

Кроме того, пена способствует частичной инертизации атмосферы за счет накопления природных и пожарных газов, но в данном случае необходимо постоянное поддержание пенной зоны вокруг очага самонагревания. Исследователи пришли к выводу, что воздушно-механическая пена снижает химическую активность угля, охлаждает породы на пути движения, предотвращает приток свежего воздуха к очагу самовозгорания, тем самым способствует накоплению инертных газов в районе очага.

Для предупреждения и тушения эндогенных пожаров в выработанном пространстве при неизвестном местонахождении очага в бывшем СССР был

разработан способ использования низкократной вспененной глинистой пульпы (ВГП) в 1977 году этот способ был применен на шахтах Кузбасса. [41].

Низкая вязкость (не более 10), высокая стойкость (в 20-25 раз выше стойкости воздушно-механической пены) выгодно отличают вспененную глинистую пульпу от воздушно-механической пены. Присутствие глины в пенообразующей жидкости не только способствует повышению стойкости пены, но и уменьшает расход пенообразователей в 1,5 – 2 раза [35, 41].

Наряду с отмеченными положительными сторонами вспененная глинистая пульпа обладает и существенными недостатками, не позволяющими широко использовать ее при выемке угля например, щитовыми агрегатами и струговыми комплексами. Самым явным недостатком является тот, что тяжелая вспененная глинистая пульпа быстро накапливаясь в вентиляционных и углеспускных печах на пластах крутого падения может нарушить режим проветривания выемочного участка, а также проникаю под щитовой агрегат или в район действия струга в рабочее пространство участка осложняет ведение работ в очистных забоях [35]. Вспененная глинистая пульпа обладает еще одним недостатком, а именно наличием кислорода в газообразной фазе воздуха.

Наряду с пеной для предупреждения и локализации эндогенных пожаров используют инертные газы. В качестве инертных газов применяют азот, углекислый газ и газообразные продукты сгорания топлива.

Так, например применение углекислого газа зафиксировано еще в начале 20 столетия, в 1913-1914 годах на шахтах Англии были потушено несколько пожаров, а в 1922-1924 на шахтах Германии. Топочным газом например, был потушен пожар на шахте «Фолькенроде» в Германии в 1930.

Для инертизации выработанного пространства широко используется азот [42-49]. Наибольшее распространение инертизация выработанного пространства получила на угольных шахтах Германии, так с 1974 по 1983 гг. метод инертизации для локализации эндогенных пожаров был применен в 63

случаях при общем расходе азота более 200 млн. м³ [42, 46-47]. В результате этого удалось сохранить более 50 механизированных комплексов и предотвратить сокращение добычи угля примерно на 600 тыс. т. В зависимости от обстоятельств применялась объёмная и объектная инертизация. По данным [42, 46], пожары в недоступных местах никогда не удавалось окончательно потушить, используя только инертизацию азотом без возведения изолирующих перемычек. Как правило, при тушении пожаров одновременно с инертизацией азотом необходимо осуществлять активные меры тушения и охлаждения. Интенсивность подачи азота в зависимости от конкретных условий колебалась от 6 до 270 м³/мин. Продолжительность инертизации различных пожаров составила от 2 до 585 суток, а расход азота на один пожар от 0,15 до 18,6 млн. м³.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что успешное и широкое применение азота для профилактики и локализации эндогенных пожаров возможно лишь при обеспеченности шахт достаточным количеством азота и создании автономных систем подачи газообразного азота с поверхности к очагу самовозгорания.

К недостаткам способа борьбы с эндогенными пожарами с помощью инертизации газообразным азотом следует отнести то, что азот, имея низкую теплоемкость, вызывает необходимость дополнительного применения средств охлаждения при тушении пожара, а также непрерывной инертизации до изоляции или активного тушения очага самовозгорания. Отмеченные недостатки воздушно-механической пены, вспененной глинистой пульпы и азота исключены в инертной пене.

Впервые использованная инертная пена для тушения содержала в качестве дисперсной фазы углекислый газ [50-55]. Полученная этим способом пена имела низкую кратность, поэтому содержащийся в ней углекислый газ не оказывал существенного влияния на процесс тушения. Поэтой же причине не нашел распространения и разработанный в 1927 году в Германии способ получения пены из водного раствора пенообразователя и

выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания [55]. В 1967 году в Англии разработан метод получения высоkokратной механической пены с использованием выхлопных газов реактивного двигателя [56]. Однако проведенные исследования данной пены в подземных горных выработках не подтвердили ее огнегасительную эффективность.

Первые попытки получения механической пены с использованием выхлопных газов турбореактивного двигателя в бывшем СССР были сделаны Новосибирской пожарно-испытательной станцией в 1962 году. Положительные результаты не были достигнуты, так как при высокой температуре продуктов горения топлива в реактивной трубе происходило интенсивное разрушение пены.

В Центральной научно-исследовательской лаборатории ВГСЧ также были проведены исследования возможности получения инертной пены с использованием в качестве газовой фазы парогазовой смеси реактивного двигателя. Было установлено, что устойчивое пенообразование наблюдается при температуре до 600°C при определенной скорости газов у сетки, пары керосина даже при объемной доле 0,124% в горячем воздухе уменьшают устойчивость пены в 3-4 раза.

В НИИГД «Респиратор» были проведены исследования углекислого газа и азота на процесс пеногенерации [29, 38, 57]. Установлено, что при использовании углекислого газа резко ухудшается процесс пеногенерации и снижается устойчивость пены. Это происходит в связи с относительно большой плотностью углекислого газа и хорошей его растворимостью в воде. Причем в пене данный процесс происходит более интенсивно за счет увеличения поверхности контакта углекислого газа с водой.

В зарубежных странах также применялась инертная пена при тушении подземных пожаров, так например, попытка тушения пожара на шахте «Combria №32» (США) активным способом не принесла результатов [35, 53, 58], тогда пожарный участок изолировали и инертизировали жидким азотом

и также безуспешно, ликвидация пожара удалась лишь с помощью инертной пены.

В угольной промышленности Франции [53, 58] одним из направлений профилактики эндогенных пожаров является применение инертной пены для предотвращения доступа воздуха к очагу самовозгорания.

В Венгрии вопрос повышения пожаротушащей эффективности пены решался путем полной или частичной замены воздуха углекислым газом или азотом [39, 53, 58]. При этом исследователи пришли к выводам, что необходимое количество инертного газа при тушении так называемой, пенной пробкой довольно значительно, поэтому инертную пену целесообразно применять при тушении мелких пожаров, возникающих в куполах и закрепном пространстве выработок.

В Кузнецком угольном бассейне для предупреждения и локализации эндогенных пожаров также используют инертную пену. Так на шахтах Кузбасса за период с 1981 по 1991 под защитой воздушно-механической, инертной пены и инертной вспененной глинистой пульпы отработано более 70-ти выемочных полей с общей добычей более 10 млн т угля [50-54, 57].

Анализ отечественных и зарубежных исследований по повышению пожаротушащей эффективности пен показал, что разработкой способов получения и применения пен, дисперсной фазой которых являются инертные газы, подавляющие горение стали заниматься сравнительно недавно [50-54]. Применение инертных пен на основе азота для предупреждения и локализации эндогенных пожаров в выработанных пространствах является весьма перспективным направлением. Инертная пена обладает преимуществами воздушно-механической пены, а также изолирующим фактором. Кроме того, инертная пена за счет испарения жидкой фазы при охлаждении очага пожара и вмещающих пород в процессе синерезиса выделяет азот, который вытесняет кислород, локализуя очаг и предупреждает возможность взрыва горючих газов.

Применение инертной пены позволяет локализовать и тушить эндогенные пожары, возникающие в выработанном пространстве действующих очистных забоев, без остановки работ по выемке угля.

Исследования причин возникновения эндогенных пожаров показали, что более 30% пожаров происходят из-за несвоевременной и некачественной изоляции выработанных пространств. Следовательно, своевременность, быстрота и качество изоляции и соответствие ее конкретным горно-геологическим и горнотехническим факторам будут существенно влиять на снижение прососов воздуха и в конечном итоге на вероятность возникновения самовозгорания угля.

Существующие в настоящее время способы и средства для возведения изолирующих сооружений в ряде случаев не обеспечивают достаточной оперативности, например, на пластах угля крутого падения изолировать участки обычными стройматериалами малоэффективно, так как изолирующие полосы из обычных стройматериалов быстро разрушаются, теряя свою изолирующую способность, кроме того стоимость и трудоемкость таких изолирующих сооружений очень высока.

В последние годы в отечественной и зарубежной горной промышленности ведутся поиски и разработки новых, более приемлемых для условий шахт материалов для возведения изолирующих сооружений. Так например, в горной промышленности Англии, США, Канады широкое распространение для целей изоляции получили полиуретановые и карбамидные пенопласты [45, 59-63]. Они используются для покрытия воздухоизолирующих сооружений, закрепления и удержания легкообрушающихся пород, покрытия поверхности целиков угля склонного к самовозгоранию.

В Германии например, для герметизации бутовых полос, заполнения пустот за крепью, для возведения изоляционных перемычек используют карбамидные пенопласты [59, 62, 64], для заполнения закрепного пространства успешно применяют изопену [60-63].

Из всех синтетических материалов, применяющихся в отечественной и зарубежной практике, наибольшего внимания заслуживают вспененные пластические массы (пенопласты). Изолирующие устройства из твердеющих пен обладают эластичностью и податливостью, что очень важно при их эксплуатации в условиях активного проявления горного давления [65-66]. Также пенопластовые изолирующие сооружения быстровозводимы, обладают малой трудоемкостью и сравнительно недороги [66-69].

Однако, несмотря на отмеченные положительные свойства, экспериментальные исследования по применению пенопластов в угольной промышленности до сих пор продолжаются. Обусловлено это прежде всего, требованиями предъявляемыми к синтетическим материалам, которые предназначены для угольной промышленности.

В Донбассе наибольшее распространение в шахтах получили полиуретановые, фенольные и карбамидные пенопласты для воздухоизоляции горных выработок при подземных пожарах, герметизации бутовых полос, заполнения закрепного пространства [60, 61, 67].

Например, в результате проведенных в НИИГД «Респиратор» экспериментов на шахтах «Углегорская», им. Артема и им. Гагарина [60, 67] была обоснована технико-экономическая целесообразность применения карбамидных пенопластов для изоляции горных выработок.

На шахтах Кузбасса применялись фенольные пенопласты для изоляции вентиляционных перемычек, заполнения куполов и других пустот за крепью горных выработок [66]. Они относятся к группе трудносгораемых материалов, при длительном воздействии открытого пламени медленно обугливаются и не поддерживают горение [31, 61, 66].

Также в НИИГД Респиратор разработан способ возведения изолирующих сооружений и заполнения пустот за крепью горных выработок твердеющей пеной на основе карбамидно-формальдегидной смолы [62].

1.4. Цель и задачи исследований

Ведение горных работ на больших глубинах выдвинуло проблему борьбы с эндогенными пожарами на одно из ведущих мест. Стало очевидным, что применяемый комплекс методов и средств оценки склонности угля к самовозгоранию, прогноза эндогенной пожароопасности выемочных полей, обнаружения ранних признаков и контроля за ходом развития процесса самовозгорания угля, а также способы и средства предупреждения и тушения эндогенных пожаров требуют дальнейшего совершенствования [17, 27, 31, 50, 58].

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. В этой связи необходимо вести поиски метода прогноза эндогенной пожароопасности, который бы обеспечил выделение в пределах выемочных участков опасных по самовозгоранию мест в ходе ведения подготовительных и очистных работ.

Исходя из вышесказанного, целью настоящей работы является раскрытие зависимостей формирования зон повышенных температур и разработка на этой основе метода оценки пожароопасности краевой части угольного массива глубоких шахт.

Поставленная цель и основная идея работы, вытекающие из состояния решения проблемы, а также обзор литературных источников определили необходимость решения следующих задач для достижения поставленной цели:

- 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.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОНАКОПЛЕНИЯ В КРАЕВЫХ ЧАСТЯХ УГОЛЬНОГО МАССИВА В ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

2.1. Разработка математической модели тепломассообменных процессов в краевых частях угольного массива

Уголь, образующийся при разрушении краевой части целика вдоль подготовительной выработки, будем считать трещиновато-пористым телом, состоящим из частиц угля различной фракции. Поток воздуха за счёт фильтрации и поперечной диффузии омывает обнажённые поверхности пласта и проникает в поры и трещины краевой части массива, особенно в зоне геологических нарушений, тем самым заполняя их кислородом. В результате сорбции кислорода углем на поверхности его частиц возникнут окислительные процессы с выделением тепла. Это тепло будет как накапливаться в пористом теле, так и расходоваться на испарение влаги с поверхности частиц угля, а также уходить в окружающие породы и в атмосферу подготовительной выработки. В зависимости от соотношения между теплопритоком и потерями тепла уголь либо разогреется до критической температуры, либо нет. При разогревании угля до критической температуры произойдёт его самовозгорание.

Даже простое перечисление всех видов переноса (теплоты, кислорода, метана, влаги и пр.), сорбции и десорбции кислорода и метана в пористом теле, то очевиден тот факт, что процессы, происходящие в нём, являются сложнейшими и описываются системой дифференциальных уравнений.

Примем за основу при исследовании процесса теплонакопления в пористом теле уравнение теплопроводности в двух направлениях при отсутствии конвективного переноса [14, 70-71]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial y} \right) + F, \quad (2.1)$$

где ρ – плотность пористого тела, кг/м³;

c – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К);

T – температура пористого тела, К;

τ – время, с;

x – продольная координата вглубь угольного пласта, м;

y – вертикальная координата вкrest пласта, м;

λ_1 – коэффициент теплопроводности пористого тела вглубь пласта, Вт/(м·К);

λ_2 – коэффициент теплопроводности пористого тела вкrest пласта, Вт/(м·К);

F – плотность источников или стоков теплоты, Вт/м³.

На рисунке 2.1 приведена схема привязки системы координат к краевой части угольного пласта.

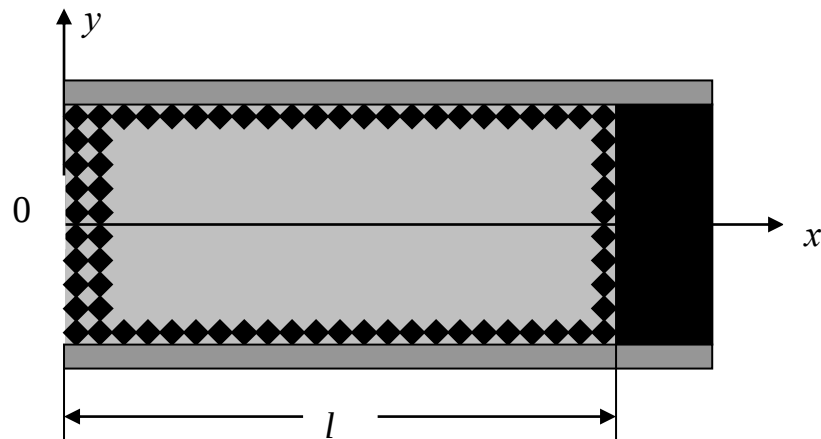


Рисунок 2.1. Схема привязки системы координат к краевой части угольного пласта

К уравнению теплопроводности (2.1) добавим уравнение диффузии кислорода в порах [7, 11, 26, 40]:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_1 \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_2 \frac{\partial C}{\partial y} \right) - G, \quad (2.2)$$

где C – концентрация кислорода в порах, моль/м³;

D_1 – коэффициент диффузии кислорода вглубь угольного пласта, м²/с;

D_2 – коэффициент диффузии кислорода вкrest угольного пласта, м²/с;

G – интенсивность поглощения кислорода частицами угля, моль/(с·м³).

Принимая коэффициенты теплопроводности (λ_1, λ_2) и диффузии (D_1, D_2) за константы и объединяя уравнения (2.1) и (2.2) в систему получим

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + a_2 \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + F / \rho c; \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_2 \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - G, \quad (2.4)$$

где $a_1 = \lambda_1 / (\rho c)$ – коэффициент температуропроводности пористого тела вглубь угольного пласта, м²/с;

$a_2 = \lambda_2 / (\rho c)$ – коэффициент температуропроводности пористого тела вкrest угольного пласта, м²/с.

Данная задача, очевидно, отличается от известных и решённых задач теплонакопления и фильтрации через сравнительно небольшие скопления угля [7, 9, 22, 26] и является весьма актуальной из-за частого возникновения эндогенных пожаров в подготовительных выработках на больших глубинах 1000 м и более. Для упрощения задачи представим вторые производные по y в конечных разностях

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + a_2 \frac{T_n - 2T + T_e}{\Delta y^2} + F / \rho c; \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_2 \frac{C_n - 2C + C_e}{\Delta y^2} - G, \quad (2.6)$$

где T_n – температура на контакте угольного пласта с породным массивом снизу, К;

T_v – температура на контакте угольного пласта с породным массивом сверху, К;

C_n – концентрация кислорода на контакте угольного пласта с породным массивом снизу, моль/м³;

C_v – концентрация кислорода на контакте угольного пласта с породным массивом сверху, моль/м³;

$\Delta y = m/2$ – половина мощности угольного пласта, м;

m – мощность пласта, м.

Граничные условия на контакте угольного пласта с породным массивом можно представить в виде

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_n = \alpha_0 (T_0 - T_n); \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_v = \alpha_0 (T_0 - T_v); \quad \left. \frac{\partial C}{\partial y} \right|_n = 0; \quad \left. \frac{\partial C}{\partial y} \right|_v = 0, \quad (2.7)$$

где α_0 – коэффициент теплообмена с породным массивом, 1/м.

Этим самым принимается, что на контакте угольного пласта с массивом имеется некоторый теплообмен, а обмен в этом месте кислородом отсутствует.

В конечных разностях граничные условия (2.7) примут вид:

$$T_n = T_v = \frac{T + T_0 \beta \Delta y}{1 + \beta \Delta y}; \quad C_n = C_v = C. \quad (2.8)$$

Подставляя формулы (2.8) в уравнения (2.5) и (2.6) получим систему, где функции C и T являются функциями только двух переменных x и τ :

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \alpha(T_0 - T) + F / \rho c; \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - G, \quad (2.10)$$

где $\alpha = \frac{2\beta\Delta y}{(1+\beta\Delta y)\Delta y^2} a_2$ – осреднённый коэффициент теплообмена угля с окружающими выше и ниже лежащими породами, 1/с;

T_0 – температура пород, К.

Система уравнений (2.9) и (2.10) содержит неизвестные функции источников теплоты и поглощения. Учитывая, что окисление углей происходит на поверхности их частиц, где находится сорбированный кислород, функцию источника теплоты представим в виде

$$F / \rho c = k \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) qZ, \quad (2.11)$$

где k – константа скорости окисления угля, 1/с;

q – приведенная плотность тепловыделения, К·м³/моль;

Z – равновесная концентрация сорбированного кислорода, (моль/м³);

E – энергия активации, Дж/моль;

R – газовая постоянная, Дж/(К·моль).

С учётом (2.11) уравнение теплопроводности в пористой среде примет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \alpha(T_0 - T) + k \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) qZ. \quad (2.12)$$

Входящая в уравнение теплопроводности (2.12) функция Z равновесной концентрации кислорода на поверхности частиц угля является неизвестной и может быть определена с использованием уравнения сорбции [18, 72, 73], в котором кроме газообмена между поверхностью частиц и порами необходимо учесть ещё расход кислорода на окисление угля. В результате уравнение кинетики сорбции кислорода можно представить в виде

$$\frac{\partial Z}{\partial \tau} = \beta(C - Z) - k \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)Z, \quad (2.13)$$

где β – коэффициент скорости газообмена между поверхностью частиц угля и порами, 1/с.

Как видно из уравнения (2.13), при $C > Z$ концентрация кислорода на поверхности частиц угля будет увеличиваться и при $k \neq 0$ расходоваться на его окисление. Поскольку в порах сорбента будут происходить газообменные процессы необходимо их учесть в уравнении (2.10), используя ту же функцию, что и в уравнении кинетики сорбции (2.13). Тогда функцию интенсивности поглощения кислорода можно представить в виде

$$G = \beta(C - Z), \quad (2.14)$$

Подставляя эту функцию в уравнение (2.10), получим

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \beta(Z - C). \quad (2.15)$$

С ростом температуры показатель степени у экспоненты стремится нулю, а сама экспонента стремится к единице. Поэтому в уравнениях (2.11) и (2.12) не будем учитывать экспоненту. Объединим уравнения (2.12), (2.15) и (2.13) в систему

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \alpha(T_0 - T) + kqZ; \\ \frac{\partial C}{\partial \tau} = D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \beta(Z - C); \\ \frac{\partial Z}{\partial \tau} = \beta(C - Z) - kZ. \end{array} \right. \quad (2.16)$$

Представленная система уравнений (2.16) является замкнутой, так как содержит три уравнения с тремя неизвестными, подлежащими определению, функциями T , C и Z . Для получения решения уравнений системы (2.16)

необходимо добавить начальные и граничные условия. 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:

$$1) T(x,0) = T_0; \quad 2) C(x,0) = 0; \quad 3) Z(x,0) = 0. \quad (2.17)$$

Как уже отмечалось, направим ось x от поверхности пласта по его простиранию вглубь с началом отсчёта на контакте с выработкой (рисунок 2.1). На поверхности пласта, на контакте его с вентиляционным потоком, примем при $x = 0$ температуру и концентрацию кислорода равной температуре и концентрации в потоке воздуха соответственно $T_0(K)$ и C_0 (моль/м³):

$$4) T(0,\tau) = T_0; \quad 5) C(0,\tau) = 0. \quad (2.18)$$

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:

$$6) T(l,\tau) = T_0; \quad 7) \frac{\partial C(l,\tau)}{\partial x} = 0. \quad (2.19)$$

Подобная задача поставлена, но не решена в работах [24, 26]. В других работах [74-76] задача решена в упрощённой постановке. Так, граничные условия (2.18) и (2.19) хотя почти не отличаются от условий, принятых в работах [24, 75, 76], однако начальные условия (2.17) отличаются, поскольку отсчёт времени взят с момента разрушения краевой части пласта, когда кислород в нём отсутствовал.

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.

2.2 Математическое моделирование теплонакопления в краевой части угольного массива

Представим систему уравнений (2.16) в безразмерном виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} + \alpha(1 - \bar{T}) + kqC_0 \bar{Z}; \\ \frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} = D_1 \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + \beta(\bar{Z} - \bar{C}); \\ \frac{\partial \bar{Z}}{\partial \tau} = \beta(\bar{C} - \bar{Z}) - k\bar{Z}, \end{array} \right. \quad (2.20)$$

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.

В работах [75-76], отмечается, что аналитическое решение задачи более предпочтительно, чем численный метод её решения. Однако известно, что, наоборот, численный метод решения нестационарных задач

тепломассообмена предоставляет большие возможности их решения даже при наличии нелинейностей.

Для получения численного решения системы уравнений (2.20) представим их в конечных разностях:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{T}_m^{n+1} = \bar{T}_m^n + \frac{a_1 \Delta \tau}{\Delta x} (\bar{T}_{m-1}^n - 2\bar{T}_m^n + \bar{T}_{m+1}^n) + \alpha \Delta \tau (1 - T_m^{n+1}) + \frac{1}{T_0} k q C_0 \Delta \tau \bar{Z}_m^n; \\ \bar{C}_m^{n+1} = \bar{C}_m^n + \frac{D_1 \Delta \tau}{\Delta x^2} (\bar{C}_{m-1}^n - 2\bar{C}_m^n + \bar{C}_{m+1}^n) + \beta \Delta \tau (\bar{Z}_m^n - \bar{C}_m^{n+1}); \\ \bar{Z}_m^{n+1} = \bar{Z}_m^n + \beta \Delta \tau (C_m^n - \bar{Z}_m^{n+1}) - k \Delta \tau \bar{Z}_m^{n+1}, \end{array} \right. \quad (2.21)$$

где $\Delta \tau$ – шаг по времени, с;

m – номер узла на оси координат x (рисунок 2.2);

n – номер временного слоя (рисунок 2.2).

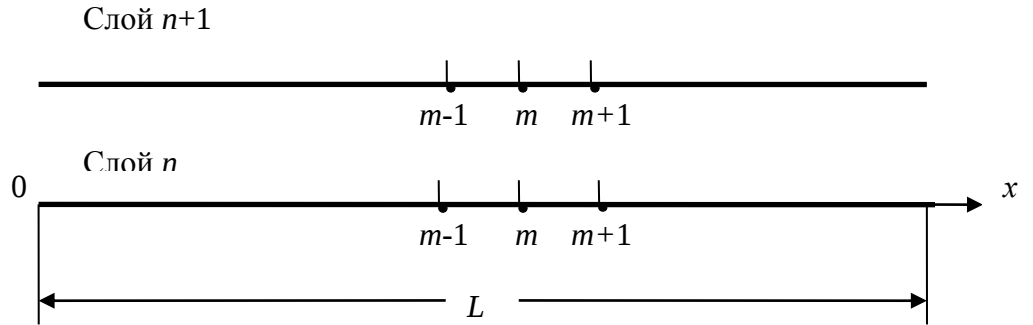


Рисунок 2.2. Условное разбиение краевой части пласта на участки длиной Δx с указанием временных слоёв

В соответствии с начальными условиями (2.17) примем

$$1) \bar{T}_m^0 = 1; \quad 2) \bar{C}_m^0 = 0; \quad 3) \bar{Z}_m^0 = 0. \quad (2.22)$$

Граничные условия (2.18) и (2.19) можно представить виде:

$$4) \bar{T}_0^n = 1; \quad 5) \bar{C}_0^n = 1; \quad 6) \bar{T}_M^n = 1; \quad 7) \bar{C}_M^{n+1} = \bar{C}_{M-1}^{n+1}. \quad (2.23)$$

Учтём энергию активации и разрешим искомые функции на новом временном слое, представляя систему уравнений (2.21) в виде:

$$\left| \begin{aligned}
 \bar{T}_m^{n+1} &= \frac{\bar{T}_m^n + Fo_1(\bar{T}_{m-1}^n - 2\bar{T}_m^n + \bar{T}_{m+1}^n) + \bar{\alpha} + \bar{k}\bar{q}\bar{Z}_m^n}{1 + \bar{\alpha}}; \\
 \bar{C}_m^{n+1} &= \frac{\bar{C}_m^n + Fo_1 \frac{D_1}{a_1} (\bar{C}_{m-1}^n - 2\bar{C}_m^n + \bar{C}_{m+1}^n) + \bar{\beta}\bar{Z}_m^n}{1 + \bar{\beta}}; \\
 \bar{Z}_m^{n+1} &= \frac{\bar{Z}_m^n + \bar{\beta}\bar{C}_m^n}{1 + \bar{\beta} + \bar{k}},
 \end{aligned} \right. \quad (2.24)$$

где $Fo_1 = a\Delta\tau/\Delta x^2$ – схемное число Фурье;

$\bar{\alpha} = \alpha \cdot \Delta\tau$ – 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 [76].

Используем применяемый при изучении нестационарной теплопередачи критерий Фурье, который является безразмерным комплексом и имеет смысл обобщённого времени [2, 5, 10, 13]: $Fo = a\tau/l^2$.

Введем критерий Предводителя – безразмерный комплекс, характеризующий интенсивность тепловыделения при процессах окисления по сравнению с температуропроводностью [2, 10, 70]: $Pd = kl^2/a$, 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: $Bi = \alpha l^2/a$.

Число Фурье $Fo = a\tau/l^2$ связано со схемным числом Фурье:

$$Fo = a\tau/l^2 = (a\Delta\tau/\Delta x^2)n/M^2 = Fo_1n/M^2, \quad (2.25)$$

где M – число отрезков или узлов на сетке (рисунок 2.2.)

Безразмерный коэффициент теплообмена с окружающим массивом связан с числом Био:

$$\bar{\alpha} = \alpha\Delta\tau = \alpha\tau/n = Fo/(nBi). \quad (2.26)$$

Безразмерный коэффициент скорости газообмена между порами и частицами угля связан с критерием Предводителя:

$$\bar{k} = k\Delta\tau = k\tau/n = Fo/(nPd). \quad (2.27)$$

Полученная система алгебраических уравнений (2.24) позволяет, с заданными начальными и граничными условиями (2.22) и (2.23), шаг за шагом по времени определять распределение температуры и концентрации кислорода вглубь краевой части пласта.

На рисунке 2.3 представлены результаты моделирования распределения безразмерной температуры вглубь краевой части пласта в различное время с момента его разгрузки без учёта энергии активации угля.

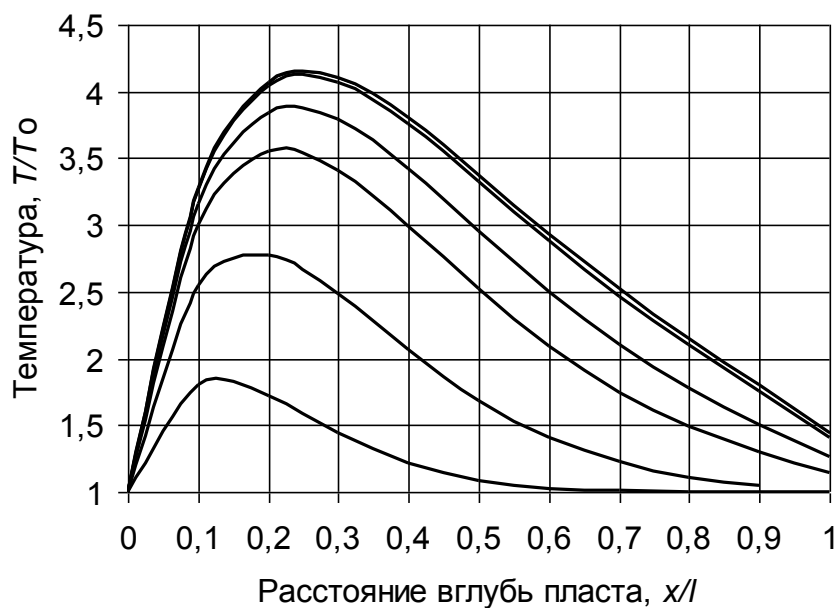


Рисунок 2.3. Распределение безразмерной температуры вглубь краевой части пласта в разное время с момента его разгрузки при $Fo = 0,04; 0,08; 0,14; 0,2; 0,8; 1,0$ снизу вверх

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 2.4 представлены результаты моделирования динамики температуры во времени на различных расстояниях от обнажённой поверхности пласта.

На рисунке 2.5 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 2.3). После этого температура медленно снижается вглубь пласта, особенно при возникновении горения.

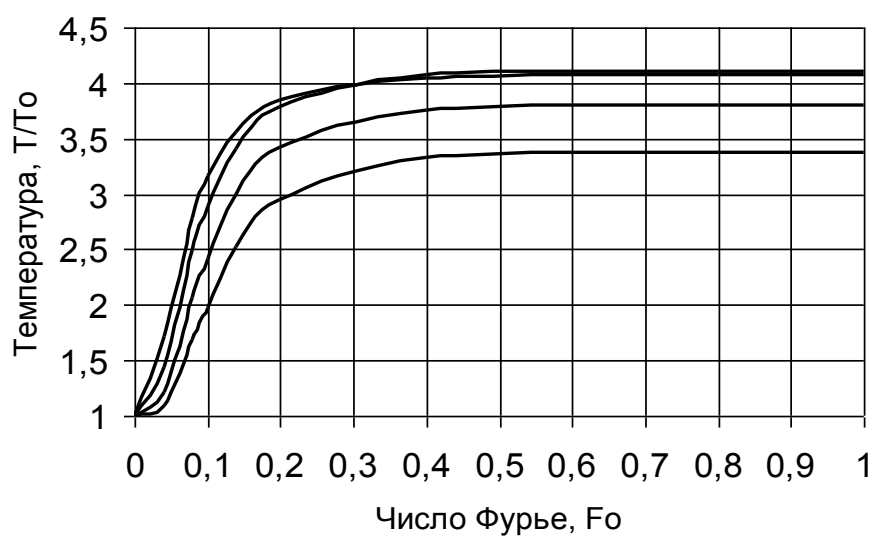


Рисунок 2.4. Динамика относительной температуры на различных расстояниях от обнажённой поверхности пласта ($x/l = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ слева направо)

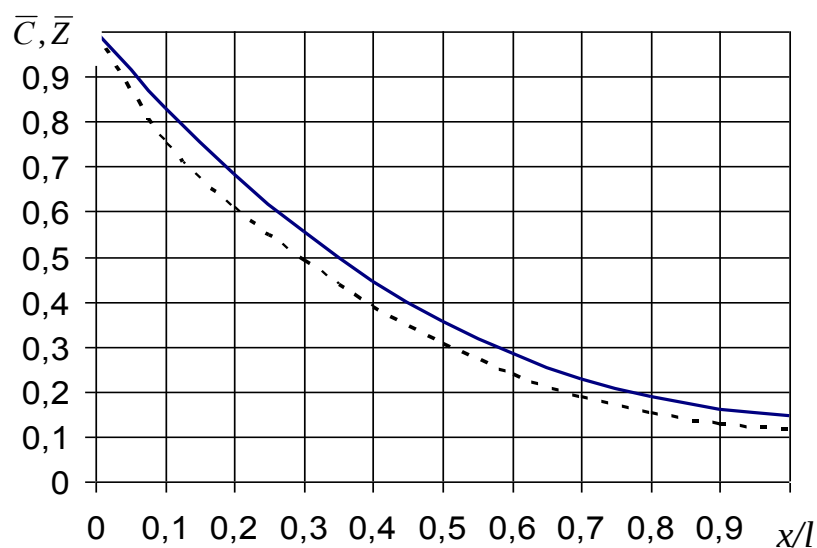


Рисунок 2.5. Распределение установившихся относительных концентраций кислорода в порах (сплошная линия) и на поверхности частиц угля (прерывистая линия)

Концентрации кислорода 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.

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 результаты моделирования на рисунках 2.3-2.5 проведены при максимальной скорости окисления угля без учёта энергии активации. Это позволяет вследствие нелинейности задачи получить решение задачи только численным методом.

На рисунке 2.6 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 $D_1 / a = 1$.

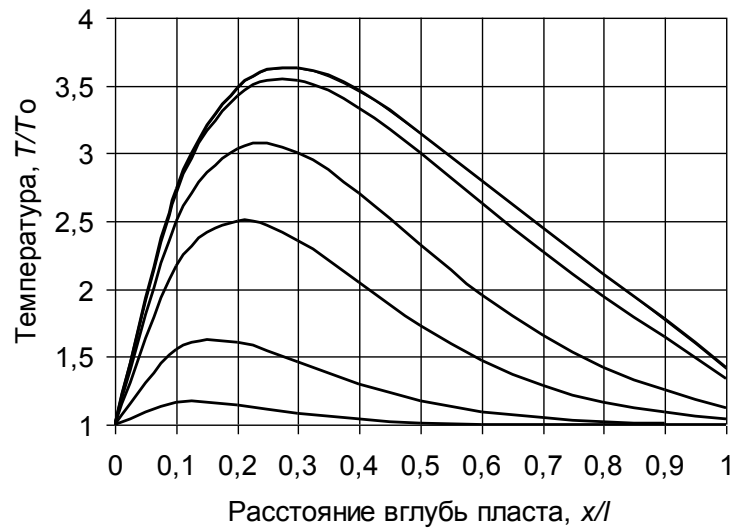


Рисунок 2.6. Распределение безразмерной температуры с учётом энергии активации вглубь краевой части пласта в различное время с момента его разгрузки при $Fo = 0,04; 0,08; 0,14; 0,2; 0,8; 1,0$ снизу вверх

На рисунке 2.7 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.

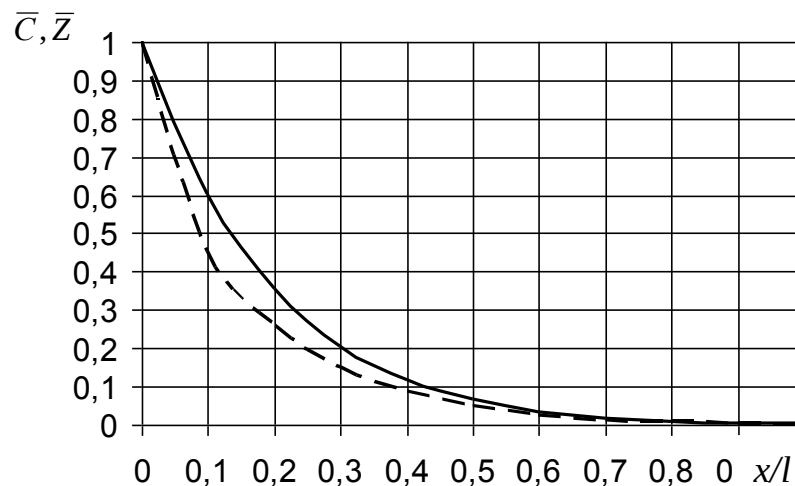


Рисунок 2.7. Распределение установившихся относительных концентраций кислорода при его диффузии в порах (сплошная линия) и на поверхности частиц угля (прерывистая линия)

Сравнивая данные моделирования распределения концентраций кислорода при разных коэффициентах диффузии (рисунок 2.5 и рисунок 2.7), 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 2.8.

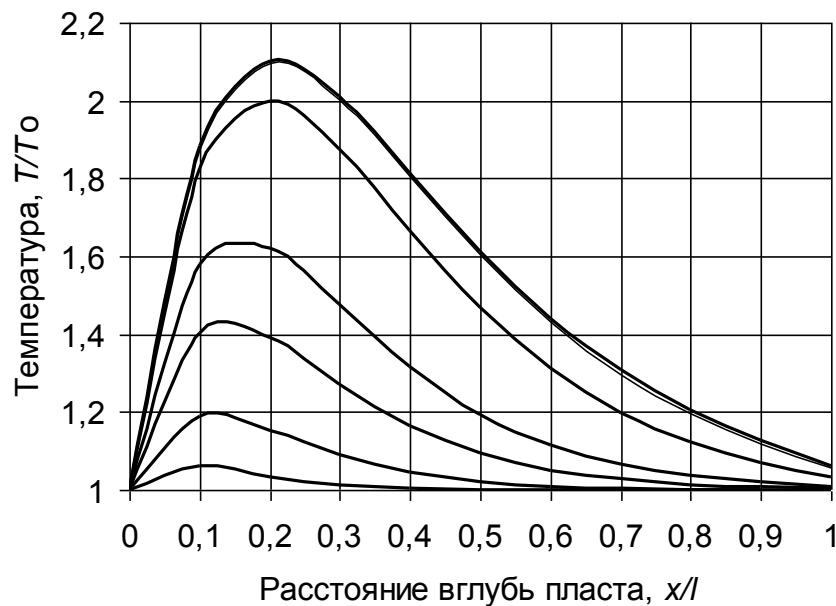


Рисунок 2.8. Распределение безразмерной температуры при ухудшении диффузии кислорода с учётом энергии активации вглубь краевой части пласта в различное время с момента его разгрузки при $Fo = 0,04; 0,08; 0,14; 0,2; 0,8; 1,0$ снизу вверх

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 °С). Это говорит о том, что если температура начала горения составляет 400 °С, 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).

2.3 Разработка алгоритма решения задачи развития очагов самовозгорания угля в подготовительных выработках

Прежде чем приступать к разработке алгоритма, программы и к практическим расчётам развития и подавления очагов самовозгорания угля в краевой части пласта, определим значения эффективных теплофизических параметров дисперсной системы, состоящей из твёрдых сферических частиц угля и газа (воздуха). Так, для углей Донбасса, их удельная теплоёмкость и плотность равны соответственно: $c_0 = 1,18 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$; $\rho_0 = 1225 \text{ кг/м}^3$. В то же время для воздуха эти же параметры равны: $c_1 = 1.04 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$; $\rho_1 = 1,2 \text{ кг/м}^3$ [8, 21, 76]. Сравнивая эти параметры, приходим к выводу, что удельные теплоёмкости угля и воздуха почти одинаковые, поэтому можно принять для всего пористого тела, как и для угля, $c = c_0$. Плотность пористого тела определим по формуле

$$\rho = (1 - \delta)\rho_0 + \delta\rho_1, \quad (2.28)$$

где δ – коэффициент пористости.

Из формулы (2.28) следует, что если коэффициент пористости равен нулю, то имеем цельный уголь, а если коэффициент пористости равен единице, то уголь отсутствует и среда представляет собой воздух.

Для расчёта коэффициента эффективной теплопроводности дисперсных сред на основании теоретических и экспериментальных исследований предложено множество зависимостей [75, 78, 79], из которых более предпочтительным представляется соотношение, аналогичное формуле (2.28), и для определения коэффициента теплопроводности при направлении теплового потока между частицами имеющее вид:

$$\lambda = (1 - \delta) \lambda_0 + \delta \lambda_1. \quad (2.29)$$

Тогда для пористой среды (уголь и воздух) соответственно при $\lambda_0 = 0,29$ Вт/(м·К) и $\lambda_1 = 0,026$ Вт/(м·К) получим для расчёта коэффициента эффективной теплопроводности угля в краевой части пласта при пористости $\delta = 0,5$ [80] значение $\lambda = \lambda_0/2$. Поскольку плотность угля намного больше плотности воздуха, при пористости $\delta = 0,5$ согласно (2.90) найдём $\rho = \rho_0/2$. Коэффициент эффективной температуропроводности в этом случае будет равен $a = \lambda/c\rho = \lambda_0/c_0\rho_0 = a_0$, где a_0 – коэффициент температуропроводности угля, м²/с.

Воспользуемся данными работ [1, 3, 11, 12, 81] и произведём оценку коэффициента температуропроводности в краевой части пласта. Так, для углей Донбасса $a_0 = 2 \cdot 10^{-7}$ м²/с. По одним данным [1, 3] теплота реакции окисления углей $q = 376$ кДж/моль, по другим данным [81] теплота сгорания углерода $q = 394$ кДж/моль, что находится в полном соответствии друг с другом. Причём, в работе [12] предлагается для широкого круга горючих веществ теплоту сгорания определять по количеству потреблённого воздуха. Так как в одном моле кислорода содержится 32 г, то при сгорании одного грамма кислорода выделится тепла $394/32 = 12,3$ кДж/г. Тогда при плотности кислорода $\rho_k = 1,3$ кг/м³ и его объёмном содержании в воздухе равном 0,21, получим $qC_0 = 12300 \cdot 1,3 \cdot 0,21 = 3360$ кДж/м³. Тогда численное значение $qC_0 = qC_0/(c\rho) = 2qC_0/(c_0\rho_0) = 4,64$ К. Согласно [11, 12, 81] коэффициент обычной молекулярной диффузии кислорода $D = 2,2 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

Таким образом, максимальная температура в краевой части пласта в большой степени зависит от диффузии кислорода в порах сорбента. При кнудсеновской диффузии, размеры пор соизмеримы и даже меньше длины свободного пробега молекул воздуха и коэффициент диффузии кислорода согласно [82] настолько мал ($D = 10^{-8}$ м²/с), что прирост температуры будет менее одного градуса. Это указывает на то, что в ненарушенном целике угля

процессы самонагрева угля происходить не могут. В то же время в раздробленной краевой части пласта, особенно в зонах геологических нарушений, когда размеры пор значительно больше длины свободного пробега молекул и частицы угля не препятствуют их взаимному столкновению, тогда даже при обычной молекулярной диффузии кислорода, как показано, температура может достигать сотни градусов Цельсия.

В результате экспериментальных исследований установлено [70-72, 82], что при скоростях фильтрации меньше $1 \cdot 10^{-4}$ м/с преобладающее влияние имеет обычная молекулярная диффузия, численное значение которой использовано при расчётах.

В лабораторных условиях хроматографическим способом изучено влияние летучих на константу скорости окисления углей различных шахт Донбасса, в том числе шахты им. А.Ф. Засядько. Расчёты константы окисления углей можно производить по формуле

$$k = k_m / (1 + 2,4/V_r), \quad (2.30)$$

где V_r – выход летучих, %;

k_m – максимальная константа сорбции, 1/с.

Расчёты по формуле (2.30) удовлетворительно согласуются с данными экспериментов (относительная ошибка составляет не более 10%). Выход летучих V_r в опытах находился в пределах 5 – 40%, а максимальная константа сорбции k_m – в диапазоне 10^{-4} – 10^{-6} 1/с, причём для шахты им. А.Ф. Засядько наиболее приемлемо среднее значение $k_m = 10^{-4}$ 1/с.

Аналогичная зависимость установлена для константы скорости теплообмена при испарении от начальной влажности угля

$$\alpha = \alpha_m / (1 + 2,4/W_p), \quad (2.31)$$

где α_m – максимальное значение константы скорости теплообмена при стопроцентной влажности, 1/с;

W_p – рабочая влажность угля, %.

Для углей шахты им. А.Ф. Засядько рабочая влажность угля составляет 1-2 %, а среднее значение константы α_m может быть принято равным 10^{-7} 1/с.

С целью установления закономерностей теплонагрева и прогноза эндогенной пожароопасности в подготовительной выработке на больших глубинах разработана блок-схема расчёта на ЭВМ нестационарных полей концентраций кислорода в порах и на поверхности частиц угля, а также температур в краевой части пласта. При составлении блок-схемы использованы исходные данные и система алгебраических уравнений (2.24) с предварительным выбором шагов по времени и по ширине краевой части пласта. На рисунке 2.9 представлена блок-схема расчёта температуры и концентраций кислорода в разгруженной зоне угольного пласта.

Результаты расчёта температуры и концентраций кислорода в зоне разгрузки угольного пласта представляются в наглядном графическом виде.

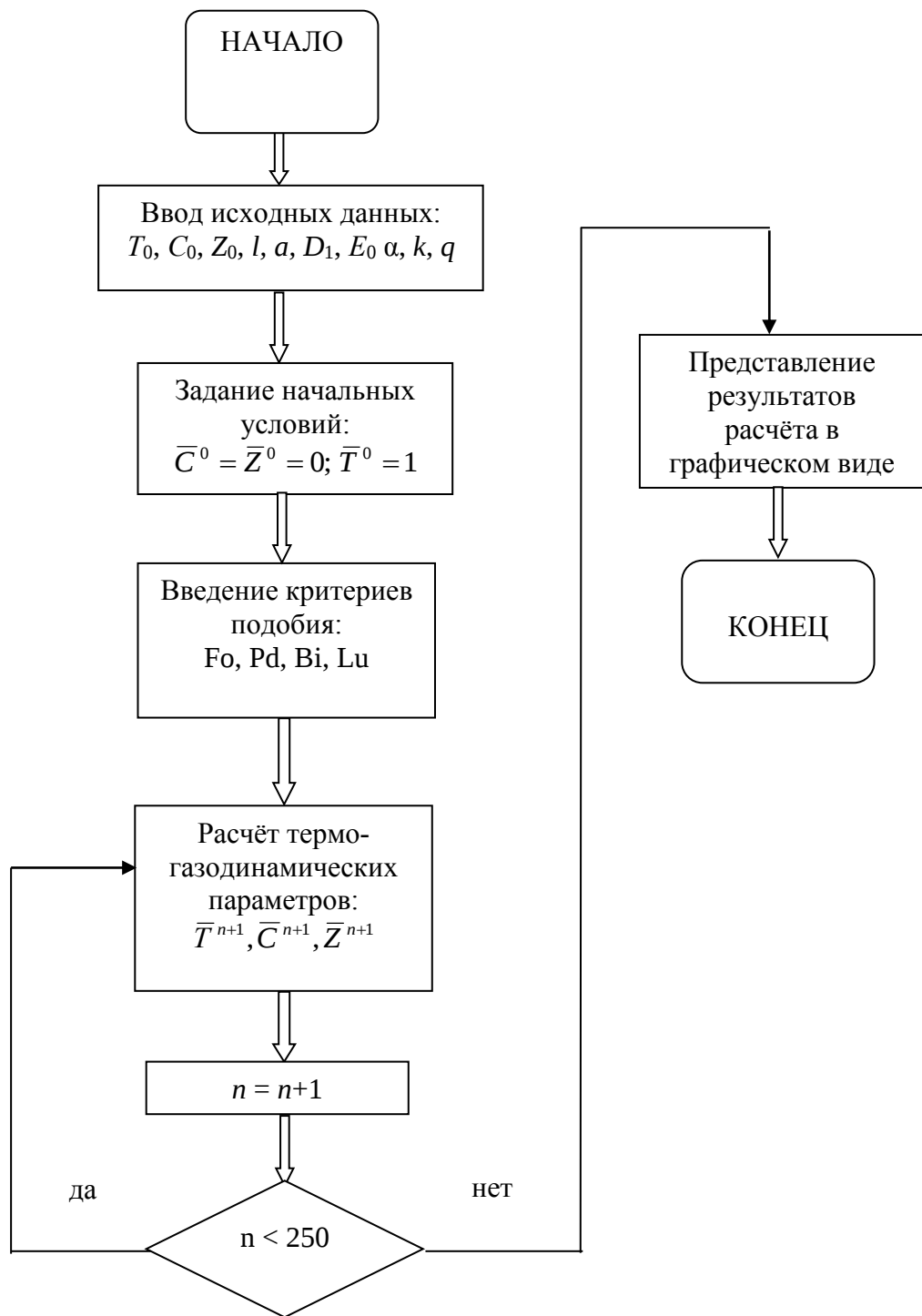


Рисунок 2.9. Блок-схема расчёта температуры и концентраций кислорода в разгруженной зоне угольного пласта

Как видно из блок-схемы, расчёт газодинамических параметров заканчивается при достижении количества итерации $n = 250$. Это примерно соответствует, как показали результаты математического моделирования,

выходу процесса тепломассообмена на стационарный режим. Некоторые результаты расчёта приведены на рисунках 2.3 – 2.8.

2.4. Выводы

1. 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.

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

3. 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.

4. 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.

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

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ

3.1. Параметры самонагрева (самовозгорания) угля.

3.1.1. Константа скорости окисления угля

Константа скорости окисления является одним из основных параметров, характеризующих склонность углей к самовозгоранию. Известно, что скорость хемосорбции молекулярного кислорода углями в значительной степени определяет их активность при окислении. Однако ее определение традиционным объемным методом – процесс длительный и трудоемкий [74, 75, 80]. Поскольку определение константы скорости окисления в данном методе проводится в статических условиях, то на кинетику окисления оказывают большое влияние процессы диффузии кислорода из ядра потока через пограничный слой к внутренней поверхности угольной частицы и десорбция образовавшихся продуктов окисления.

В связи с этим для определения констант скоростей сорбции кислорода углями, нами был использован хроматографический метод, предложенный в НИИГД [83], но с некоторыми усовершенствованиями. 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.

В предложенном хроматографическом методе импульсный ввод кислорода на слой угля обуславливает своеобразие протекания гетерогенных реакций в хроматографических условиях, значительно усложняя кинетический анализ. Вместе с тем появляется ряд новых экспериментальных возможностей для изучения механизма процесса окисления.

В общем случае, в нестационарных импульсных условиях кинетика реакции может существенно отличаться от кинетики реакции в статических, проточных или проточно-циркуляционных установках, что связано с различием в состоянии реакционной поверхности при проведении реакций в импульсных условиях. В этом случае уголь непрерывно обдувается при температуре реакции потоком непрерывного газа-носителя, действие которого в известной мере аналогично действию поддерживаемого вакуума в системе. В результате этого происходит постоянная регенерация поверхности угольной частицы. Этим, по-видимому, и объясняется тот факт, что в ряде случаев значения констант скоростей хемосорбции кислорода, полученных в импульсных условиях, выше чем в статических. Благодаря тому, что на хроматографическую колонку вводится очень небольшое количество кислорода, можно считать, что результаты, полученные импульсным методом, характеризуют поверхность угольной частицы, которая не испытала воздействие окислителя.

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. В угольных шахтах же фракционный состав угля колеблется в значительно большем диапазоне, симбатно которому изменяется соответственно, и реакционная поверхность.

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.

Для перехода от лабораторных кинетических данных к тем, которые имеют место в реальных условиях шахт, были проведены исследования по

определению дробимости различных углей и изучено влияние фракционного состава на константу скорости его окисления.

3.1.2 Дробимость угля и средний радиус угольных частиц

Знание геометрических характеристик поверхности угольных частиц необходимо для понимания поведения угля при его окислении. Наиболее важной геометрической характеристикой является величина поверхности угольной частицы, так как она может дать количественное описание процесса низкотемпературного окисления угля.

Известно, что скорость окисления угля зависит от содержания кислорода в скоплении угля и от реагирующей поверхности. Чем больше реагирующая поверхность, тем выше скорость окисления угля [83-85].

Поверхность угольной частицы изрезана огромным количеством пор и микротрещин разнообразных форм и размеров, это позволяет предположить, что реагирующая поверхность угля зависит от его дробимости. В реальных условиях гранулометрический состав угля, образующийся в результате ведения горных работ, а также при выбросах и обрушениях, зависит от его дробимости.

В этой связи нами были поставлены эксперименты по исследованию дробимости углей различных марок метаморфизма, пробы угля при этом отбирались на действующих угольных шахтах Донецкой и Луганской Народных Республик. Для исследования были выбраны пласты угля склонного и не склонного к самовозгоранию, с различными горно-геологическими условиями.

Величина поверхности частиц, образовавшихся после измельчения угля, отнесенная к поверхности частиц угля в исходном состоянии и является мерой дробимости.

Лабораторными опытами установлено, что при массе исходного угля равной 0,3 кг и среднем диаметре частиц исходного угля 0,015 м, формула для расчета дробимости D_p , 1, имеет вид:

$$D_p = 5 \cdot 10^{-2} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{d_i} \quad (3.1)$$

где m_i – масса данного класса угля при ситовом анализе, кг,

d_i – средний диаметр частиц данного класса, м,

n – количество фракций угля.

На основании многократных измерений установлено, что относительная погрешность определения дробимости D_p , 1, не превышает 15%.

Дробимость углей склонных к самовозгоранию выше, чем дробимость углей не склонных к самовозгоранию, это дает возможность в пределах одной стадии метаморфизма угля провести границу по способности к измельчению между углями склонными и не склонными к самовозгоранию.

На рисунке 3.1 представлены зависимости дробимости угля от содержания в нем углерода C_g , %. Содержание углерода принималось средним по стадии метаморфизма угля (маркам угля). Данные по дробимости приняты согласно проведенным исследованиям в НИИГД «Респиратор».

Анализ результатов рисунка 3.1 позволяет отметить, что дробимость углей различной степени склонности к самовозгоранию изменяется от 1-3 у углей крайних стадий метаморфизма (марки А) до 70 у углей средней стадии метаморфизма (марки Ж, К).

Сопоставление значений дробимости исследованных углей с группой эндогенной пожароопасности шахтопластов также показывает, что между ними есть определенная связь.

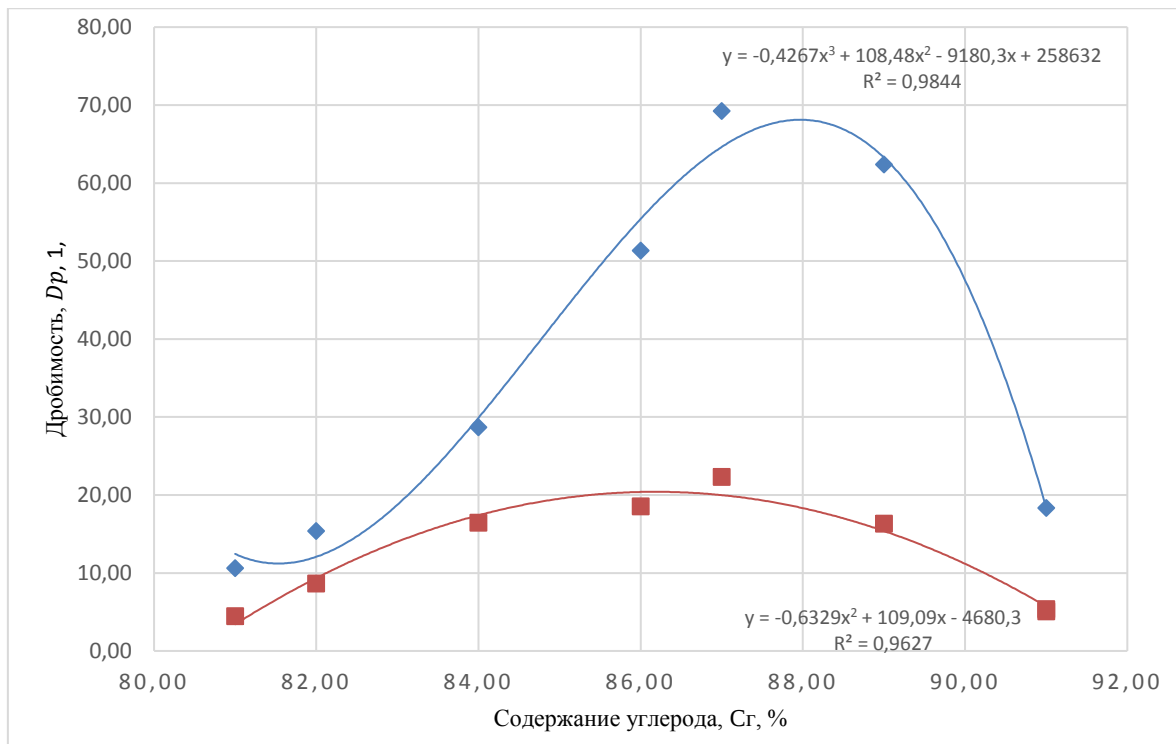


Рисунок 3.1. Зависимости дробимости угля D_p от содержания в нем углерода C_g

- ◆ – угли, склонные к самовозгоранию,
- – угли не склонные к самовозгоранию.

В таблице 3.1 приведены значения дробимости $D_p, 1$, углей различных стадий метаморфизма на шахтах Донбасса по результатам определения склонности к самовозгоранию за период 2014-2020 годов.

Таким образом, зная способность угля к измельчению (дробимость), можно определить реагирующую поверхность и с достаточной степенью адекватности судить о возможности развития процесса самонагревания угля.

Таблица 3.1 – Значения дробимости углей различных стадий метаморфизма на шахтах Донбасса по результатам определения склонности к самовозгоранию за период 2014-2020 годов.

Шахта	Индекс пласта	Марка угля	Дробимость, D_p , 1,
имени А.Ф. Засядько	m_3	К	20,5
имени Челюскинцев	l_1	ДГ	5,0
имени А.А. Скочинского	h_6^1	К	36,7
имени М.И. Калинина	h_{10}^B	ОС	12,4
имени Г.Г. Капустина	m_3	Д	4,2
имени В.И. Ленина	l_1	К	29,5
«Калиновская-Восточная»	l_1	ОС	35,2
«Холодная Балка»	h_{10}^B	Т	12,5
«Чайкино»	m_3	Ж	40,5
«Комсомолец Донбасса»	l_4	Т	6,5
«Молодогвардейская»	k_2^H	Ж	27,2
«Самсоновская-Западная»	k_2	Ж	16,4
имени Н.П. Баракова	k_5^H	Ж	38,6
«Суходольская-Восточная»	i_3^1	К	22,3
«Прогресс»	h_{10}^B	А	3,5

3.1.3 Влияние на кинетику окисления угля его фракционного состава и концентрации кислорода

Необходимость проведения данных исследований предопределяет то, что в условиях угольных шахт скопления угля, в том числе в краевой части угольного пласта имеют разный фракционный состав, также различной может быть и концентрация кислорода.

Известно, что структура угля однородно тонкопористая и содержит молекулярные поры, которые могут быть недоступны для молекул кислорода [86-89], поэтому необходимо изучить окислительную способность угля при его различном фракционном составе и концентрации кислорода.

Для проведения исследований были отобраны пробы угля, склонного к самовозгоранию с шахт Донбасса. Исследования проводились в хроматографических условиях [83], испытывались угли следующего фракционного состава, мм: 0-0,2; 0,2-0,35; 0,35-05; 0,5-1,0; 1,0-2,0; 2,0-3,0.

Из данных представленных на рисунке 3.2, 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.

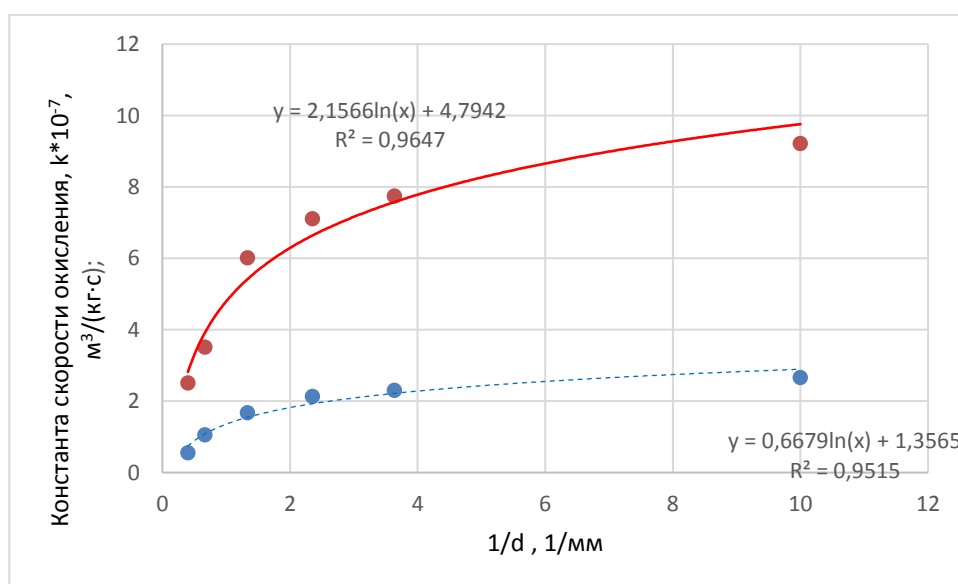


Рисунок 3.2. Зависимость константы скорости окисления от фракционного состава угля пласта k_5 шахты имени Н.П. Баракова при различных температурах: — 100°C , --- 70°C .

Если длина пор меньше диаметра частицы угля, то наблюдается линейная зависимость между константой скорости окисления и обратным

значением диаметра частицы угля, когда длина пор становится соизмеримой с диаметром угольной частицы, происходит отклонение от линейной зависимости.

Предельное значение диаметра угольной частицы, при котором константа скорости окисления становится максимальной и постоянной рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{k_m \cdot c}{d_{cp} + c}, \quad (3.2)$$

где k – константа скорости окисления, $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с})$;

k_m – максимальное значение константы скорости окисления, которое может быть достигнуто при измельчении угля, $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с})$;

c – постоянная;

d_{cp} – средний диаметр угольных частиц

В таблице 3.2. приведены предельные значения диаметра и константы скорости окисления угля пласта k_5 шахты имени Н.П. Баракова.

Из приведенных данных видно, что диаметр угольной частицы, начиная с которого константа скорости окисления становится максимальной и постоянной с ростом температуры увеличивается.

Таблица 3.2. Предельные значения диаметра d , мм и максимальной константы скорости окисления угля пласта k_5 шахты имени Н.П. Баракова.

Параметр	Температура, °С							
	50	60	70	80	90	100	110	120
d , мм	0,04	0,045	0,046	0,053	0,053	0,06	0,09	0,10
$k_m \cdot 10^7$, $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с})$;	2,97	3,0	3,14	3,67	5,28	6,96	9,18	12,77

При низких температурах максимальная скорость окисления достигается для частиц с диаметром 0,04 мм, по видимости уголь такого фракционного состава наиболее опасен в отношении возникновения эндогенных пожаров.

Такое влияние фракционного состава на константу скорости окисления можно объяснить ограниченным проникновением окислителя (кислорода) в глубь частицы угля и недоступностью для него пор, находящихся в глубине частицы.

Взаимодействие угля с кислородом представляет собой сложный химический процесс, на кинетику процесса окисления оказывает влияние структура угля и химические свойства его поверхности .

3.1.4. Критическая температура самовозгорания углей

В литературных источниках по подземным пожарам под критической температурой подразумевают температуру угля, выше которой происходит процесс его самовозгорания. Ранее считалось, что для большинства углей критическая температура находится в пределах 60-85 °С [70, 75, 90, 91].

Учеными НИИГД «Респиратор» П.С. Пашковским, С.П. Грековым и др. на основании исследований значительного количества образцов угля была предложена методика определения критической температуры для конкретного угля. При этом в качестве критической температуры принята точка перегиба кривой графика зависимости логарифма константы скорости окисления угля от обратной температуры, значения критической температуры для углей Донбасса находятся в пределах 50-140°С.

Выражение для определения скорости окисления угля имеет вид:

$$k_{T_1} = \frac{D_p \cdot 10^{-3} \cdot 0,04}{t_{rj} \gamma} \cdot \ln \frac{\bar{s}_{O_2}^{rp}}{\bar{s}_{O_2}} \quad (3.3)$$

где k_{T_1} – константа скорости окисления угля при заданной температуре, $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с})$;

D_p – дробимость угля, 1

γ – плотность угля, $\text{кг}/\text{м}^3$

$\bar{S}_{\text{O}_2}^{\text{гр}}$ – среднее значение площади пика кислорода при градуировке, м^2

$\bar{S}_{\text{O}_2}$ – среднее значение пика кислорода не вступившего во взаимодействие с углем, м^2

t_{rj} – продолжительность контакта кислорода с углем, с, определяется по формуле:

$$t_{rj} = t_{\text{уд}} - t_0, \quad (3.4)$$

$t_{\text{уд}}$ – продолжительность удерживания кислорода в условиях, хроматографического опыта, с

t_0 – продолжительность прохождения дозой кислорода «мертвого» объема газовой колонки, 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 $T_{\text{кр}}$ по формулам:

$$E = \frac{R \cdot (\ln k_{\text{кр}} - \ln k_{\text{л}})}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{\text{кр}}}} \quad (3.5)$$

$$k_0 = k_{\text{л}} \cdot e^{\frac{E}{RT_0}} \quad (3.6)$$

где E – энергия активации процесса окисления, Дж/моль

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К)

$k_{кр}$ – константа скорости окисления угля при критической температуре, с⁻¹

$k_{л}$ – константа скорости окисления угля при начальной температуре лабораторного опыта, с⁻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 3.3.

Экспериментальное определение критических температур самовозгорания углей шахтопластов ДНР и ЛНР показало, что они для различных углей колеблются в довольно широком диапазоне – от 60 до 120°С. 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.

Таблица 3.3. – Результаты определения критических температур самовозгорания угля, констант скорости окисления и энергии активации различных углей

№ п/п	Шахта	Пласт	Марка угля	Критическая температура, К	$k_{кр} \cdot 10^7$, $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с})$	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

Из анализа полученных данных следует что критическая температура самовозгорания угля является одним из факторов, который необходимо учитывать при оценке пожароопасности угля. С физической точки зрения, даже у активных, легко окисляющихся углей, имеющих высокую критическую температуру, процесс окисления может и не перейти в самовозгорание и последующее пламенное горение, вследствие затрудненного процесса накопления теплоты при высоких температурах. И наоборот, угли имеющие небольшую химическую активность но низкую критическую температуру могут самовозгораться даже при небольшом повышении температуры при их низкотемпературном окислении.

3.2. Исследования динамики адсорбции кислорода углями шахт Донбасса

Динамика хемосорбции кислорода углями в их скоплениях в шахтах по мере проникновения в скопление воздуха под действием депрессии и протекании процессов поглощения из него кислорода, сопровождающейся необратимыми реакциями окисления с выделением теплоты, приводит в определенных условиях к нагреванию углей. По мере перемещения адсорбтива (со скоростью порядка $1 \cdot 10^{-6}$ м/с, характерной для самовозгорания угля [92-96] по слою скопления угля концентрации окислителя (кислорода) в нем снижаются, скорость адсорбции β_1 , 1/с, и химической реакции K , 1/с, падают, выделяющаяся теплота также снижается. Однако за счет уменьшения теплотерь по мере продвижения процесса хемосорбции вглубь скопления угля температура последнего повышается. В зависимости от соотношения скорости тепловыделения и теплотерь процесс нагревания сорбата (угля) может либо сократиться, либо перейти от самонагревания к самовозгоранию. Согласно литературным данным исследований [18] и практическим сведениям об эндогенных пожарах в шахтах [97] максимум температур в скоплениях углей достигается на расстоянии от 0,1 до 0,8 м от места входа в них воздуха.

Исследованием динамики процесса окисления угля преследуется задача определить скорость перемещения фронта адсорбции для последующего расчета возможности самовозгорания угля на его фронте.

Для этого необходимо разработать математическую модель и лабораторную установку для экспериментального определения динамики адсорбции кислорода в слое адсорбента (угля) и выполнить экспериментальные исследования динамики его адсорбции газонасыщенными углями разной степени углефикации для последующего анализа температуры в слое скопления с возможностью самовозгорания.

Для отыскания искомых функций распределения адсорбата используют два метода: фенолинологический и статистический, причем чаще всего первый. Фенолинологический метод устанавливает функциональные

зависимости между величинами, характеризующими процесс с макроскопической точки зрения.

Обоснование основных уравнений динамики адсорбции и их анализ в достаточно общей форме приведены в [18]. Ниже рассмотрим эти уравнения, приняв в соответствии с возможностями практических расчетов адсорбционных процессов некоторые допущения:

- 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.

В этом случае динамика адсорбции описывается системой уравнений материального баланса и кинетики адсорбции.

Ниже предлагается физическая и математическая модели изотермической адсорбции вещества (воздуха, поступающего в скопления угля в шахтах) слоем сорбента при наличии адсорбции двумя его компонентами (углеродом и водой) и химической реакции I порядка. Прототипом формулируемой задачи являлась работа П.С. Пашковского [98-99], в которой рассматривалась математическая модель процесса адсорбции примеси неподвижным слоем зерен адсорбтива различных размеров в случае линейной изотермии и постоянной на входе в колонку концентрации адсорбтива.

В рассматриваемом нами случае адсорбция слоем угля смеси O_2 и N_2 (воздуха) происходит ещё и химическая реакция, что существенным образом влияет как на скорость поглощения веществ, так и на их количество, а следовательно концентрацию примеси на выходе из колонки.

В случае наличия химической реакции I порядка в зернах сорбента для математического описания процесса сорбции вещества слоем для интенсивности поглощения примеси введем вначале $c_1(x, t)$ — концентрацию поглощенного вещества в единичном объеме слоя. Тогда величина

$\partial c_1 / \partial t$ будет характеризовать интенсивность «потерь» примеси в единичном объеме, зависящую от времени и толщины слоя. Явный вид этой зависимости неизвестен, так как он зависит от параметров, характеризующих физико-химические процессы в пористых единичных образцах сорбента, поверхностного сопротивления на границе раздела фаз, коэффициентов внутренней диффузии, адсорбции, константы скорости химической реакции.

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

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} = 4\pi r^2 N D_1 \frac{\partial c^*}{\partial r} \Big|_{r=R}, \quad (3.7)$$

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

Таким образом, необходимо решить задачу нахождения величины $\partial c^* / \partial r \Big|_{r=R}$. Математическая модель, характеризующая взаимосвязь величины c^* с концентрациями адсорбированной примеси a_1 и a_2 , имеет вид

$$D_1 \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c^*}{\partial r} \right) - \beta_1 (\gamma_1 \partial c^* - a_1) - \beta_2 (\gamma_1 \partial c^* - a_2) = \frac{\partial c^*}{\partial t}, \quad (3.8)$$

$$\partial a_1 / \partial t = \beta_1 (\gamma_1 \partial c^* - a_1) - k_1 a_1 a_{10}^*, \quad (3.9)$$

$$\partial a_2 / \partial t = \beta_2 (\gamma_2 \partial c^* - a_2) - k_2 a_2 a_{20}^*. \quad (3.10)$$

Уравнение переноса примеси в пористом слое с учетом поглощения

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} + \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (3.11)$$

Граничные и начальные условия

$$\frac{\partial c^*}{\partial r} \Big|_{r=R} = -H(c^* - c), \quad (3.12)$$

$$c(0, t) = f(t), \quad (3.13)$$

$$c(x, 0) = c^*(r, 0) = a_1(r, 0) = a_2(r, 0) = 0. \quad (3.14)$$

В выражениях (3.7)-(3.14) 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.

Для решения системы (3.7)-(3.14) перейдем вначале к безразмерным координатам и функции по формулам:

$$\begin{aligned} z &= x/R, F_o = Dt/R^2, \rho = r/R, \\ Ka_i &= R^2 \beta_i/D \quad (i=1, 2), \\ u^* &= uR/D, \quad Bi = HR, \quad \Pi = 4\pi NR^3(D_1/D)Bi, \\ \bar{c}_1 &= (z, F_o) = c(x, t)/c_c, \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \bar{c}_1 &= \frac{1}{c_c} c_1(x, t), \quad \bar{c}^* = \frac{1}{c_c} c^*(x, t), \\ f(F_o) &= \frac{1}{c_c} f(t), \\ \bar{a}_i(z, \rho, F_o) &= a_i(x, r, t)/\gamma_i c_c, \\ \Gamma_i &= k_i a_{i0}^* R^2/D. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Тогда получим систему

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{c}_1}{\partial F_o} + \frac{\partial \bar{c}}{\partial F_o} + u^* \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} &= \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}, \\ \frac{\partial \bar{c}_1}{\partial F_o} &= \frac{\Pi}{Bi} \frac{\partial \bar{c}^*}{\partial \rho} \Big|_{\rho=1}, \\ \frac{\partial \bar{c}^*}{\partial F_o} &= \frac{D_1}{D} \frac{1}{\rho^2} \left(\rho^2 \frac{\partial \bar{c}^*}{\partial \rho} \right) - Ka_1 \gamma_1 (\bar{c}^* - \bar{a}_1) - Ka_2 \gamma_2 (\bar{c}^* - \bar{a}_2), \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial \bar{a}_i}{\partial F_o} = Ka_i (\bar{c}^* - \bar{a}_i) - \Gamma_i \bar{a}_i \quad (i = 1, 2). \quad (3.18)$$

Граничные условия

$$\begin{aligned} \frac{\partial c^*}{\partial \rho} \Big|_{\rho=t} &= -Bi(\bar{c}^* - \bar{c}) \Big|_{\rho=t}, \\ \bar{c}(0, F_o) &= \bar{f}(F_o), \\ \bar{c}(z, 0) &= \bar{c}^*(z, \rho, 0) = \bar{c}_1(z, \rho, 0) = \bar{a}_1(z, \rho, 0) = \bar{a}_2(z, \rho, 0) = 0. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Произведя преобразование Лапласа по формуле

$$\tilde{f}(p) = \int_0^\infty \tilde{f}(Fo) e^{-pFo} dFo, \quad (3.20)$$

Вместо системы (3.17)-(3.19) будем иметь

$$p\tilde{c}_1 + p\tilde{c} + u^* d\tilde{c}/dz = d^2\tilde{c}/dz^2, \quad (3.21)$$

$$p\tilde{c}_1 = \frac{\Pi}{Bi} \frac{\partial}{\partial \rho} \tilde{c}^* \Big|_{\rho=1}, \quad (3.22)$$

$$p\tilde{c}_1 = Ka_i(\tilde{c}^* - \tilde{a}_i) - \Gamma_i \tilde{a}_i, \quad (3.23)$$

при условиях

$$\frac{\partial \tilde{c}^*}{\partial \rho} \Big|_{\rho=t} = -Bi(\tilde{c}^* - c) \Big|_{\rho=1}, \quad (3.24)$$

$$\tilde{c}(0) = \tilde{f}(\rho). \quad (3.25)$$

Из условия (3.23) исключаем $\tilde{a}_i$

$$\tilde{a}_i = [Ka_i/(p + \Gamma_i + Ka_i)]\tilde{e}^*. \quad (3.26)$$

Тогда для $\tilde{e}^*$ получаем из (3.23) уравнение

$$\frac{D_1}{D} \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho^2 \frac{\partial \tilde{e}^*}{\partial \rho} \right) = p\varphi(p)e^*, \quad (3.27)$$

где

$$\varphi(p) = 1 + \frac{1}{p} \sum_{i=1}^2 \frac{Ka_i \gamma_i \Gamma_i}{Ka_i + \Gamma_i} + \sum_{i=1}^2 \frac{Ka_i^2 \gamma_i}{(Ka_i + \Gamma_i)(p + Ka_i + \Gamma_i)}. \quad (3.28)$$

Решение этого уравнения удовлетворяющее условию $\partial \tilde{e}^* / \partial \rho \Big|_{\rho=0} = 0$, будет

$$\tilde{c}^* = A_\lambda(z) \sin \lambda \rho / \rho, \quad (3.29)$$

где

$$\lambda = (D/D_1)^{1/2} [-p\varphi(p)]^{1/2},$$

$A_\lambda(z)$ — пока неизвестная функция z . Из уравнения (3.22) находим

$$\tilde{c}_1 = \frac{\Pi}{\text{Bi} \cdot p} (\lambda \cos \lambda - \sin \lambda) A_\lambda(z). \quad (3.30)$$

а из условия (3.25) получаем

$$\tilde{c} = \{[\lambda \cos \lambda + (\text{Bi} - 1) \sin \lambda] / \text{Bi}\} A_\lambda(z). \quad (3.31)$$

Подставляя этот результат в (3.21), получим уравнение для $A_\lambda(z)$

$$A_\lambda'' - u^* A_\lambda' - (p + \Pi - \Pi \frac{\text{Bi} \sin \lambda}{s_\lambda}) A_\lambda = 0, \quad (3.32)$$

где

$$s_\lambda = \lambda \cos \lambda + (\text{Bi} - 1) \sin \lambda. \quad (3.33)$$

Решением этого уравнения, удовлетворяющее условию конечности при $z \rightarrow \infty$, будет:

$$A_\lambda(z) = A_\lambda \exp \left\{ \left[\frac{u^*}{2} - \left(\frac{u^{*2}}{4} + p + \Pi - \Pi \frac{\text{Bi} \sin \lambda}{s_\lambda} \right)^{1/2} \right] z \right\}, \quad (3.34)$$

где ветвь корня фиксируется условием

$$\text{Re} \left(\frac{u^{*2}}{4} + p + \Pi - \Pi \frac{\text{Bi} \sin \lambda}{s_\lambda} \right)^{1/2} > 0. \quad (3.35)$$

Из условия (3.25) имеем

$$A_\lambda = \text{Bi} \tilde{f} / s_\lambda. \quad (3.36)$$

Следовательно,

$$A_\lambda(z) = \frac{\text{Bi}}{s_\lambda} \tilde{f} \exp \left\{ \left[\frac{u^*}{2} - \left(\frac{u^{*2}}{4} + p + \Pi - \Pi \frac{\text{Bi} \sin \lambda}{s_\lambda} \right)^{1/2} \right] z \right\}. \quad (3.37)$$

Подставляя полученное $A_\lambda(z)$ в выражения (3.29), (3.30) и (3.31), получаем функции $\tilde{c}^*$, $\tilde{c}_1$ и $\tilde{c}$, а из (3.26) получаем $\tilde{a}_i$, что и дает преобразование Лапласа искомого решения.

Предполагая возможность разложения показателя экспоненты в выражении (3.37) в ряд и ограничиваясь только первым членом (что справедливо при больших u^*), получим

$$\frac{u^*}{2} - \left(\frac{u^{*2}}{4} + p + \Pi - \Pi \frac{\text{Bi} \sin \lambda}{s_\lambda} \right)^{1/2} \approx -\frac{1}{u^*} \left(p + \Pi - \Pi \frac{\text{Bi} \sin \lambda}{s_\lambda} \right).$$

Тогда $A_\lambda(z)$ можно записать в виде

$$A_\lambda(z) = \frac{\text{Bi}}{s_\lambda} \tilde{f} \exp\left(-\frac{z}{u^*} p\right) \exp\left(-\frac{\Pi}{u^*} \cdot \frac{\lambda \cos \lambda - \sin \lambda}{s_\lambda} z\right). \quad (3.38)$$

Полагая $\tilde{f} = 1/p$ и подставляя значение $A_\lambda(z)$ в выражения для $\tilde{c}$, $\tilde{c}_1$, и $\tilde{c}^*$, получим

$$\tilde{c} = \frac{1}{p} \exp\left(-\frac{z}{u^*} p\right) \exp\left(-\frac{\Pi}{u^*} \cdot \frac{\lambda \cos \lambda - \sin \lambda}{s_\lambda} z\right), \quad (3.39)$$

$$\tilde{c}_1 = -\frac{\Pi}{p^2} \cdot \frac{\lambda \cos \lambda - \sin \lambda}{s_\lambda} \exp\left(-\frac{z}{u^*} p\right) \exp\left(-\frac{\Pi}{u^*} \cdot \frac{\lambda \cos \lambda - \sin \lambda}{s_\lambda} z\right), \quad (3.40)$$

$$\tilde{c}^* = \frac{\text{Bi}}{s_\lambda p} \cdot \frac{\sin \lambda \rho}{\rho} \exp\left(-\frac{z}{u^*} p\right) \exp\left(-\frac{\Pi}{u^*} \cdot \frac{\lambda \cos \lambda - \sin \lambda}{s_\lambda} z\right). \quad (3.41)$$

Функции $\tilde{c}$ и $\tilde{c}^*$ имеют в точке $p = 0$ полюсы первого порядка с вычетами

$$\bar{c}^{(0)} = \exp\left(-\frac{\Pi}{u^*} \cdot \frac{\lambda_0 \cos \lambda_0 - \sin \lambda_0}{s_{\lambda_0}} z\right), \quad (3.42)$$

$$\bar{c}^{*(0)} = \frac{\text{Bi}}{s_{\lambda_0}} \cdot \frac{\sin \lambda_0 \rho}{\rho} \exp\left[-\frac{\Pi}{u^*} \cdot \frac{\lambda_0 \cos \lambda_0 - \sin \lambda_0}{s_{\lambda_0}} z\right], \quad (3.43)$$

где

$$\lambda_0^2 = -\frac{D}{D_1} \sum_{i=1}^2 \frac{Ka_i \gamma_i \Gamma_i}{Ka_i \gamma_i + \Gamma_i}. \quad (3.44)$$

Заметим, что в случае отсутствия реакции, т. е. при $\Gamma_i = 0$, $\lambda_0 = 0$. (Этот случай нами рассмотрен отдельно). Отметим также, что входящие в выражения (3.39)-(3.41) функции: $(\lambda \cos \lambda - \sin \lambda)/s_\lambda$ и $\sin \lambda_\rho/s_\lambda$ являются четными по λ , поэтому фактически будут зависеть только от λ^2 и, следовательно, при $\lambda = \lambda_0$ принимают действительные значения. Что касается вычетов в точках $s_\lambda = 0$, то в таком виде их вычисление затруднительно, поэтому мы ограничимся малыми значениями z и в выражении (3.39) положим

$$\exp\left(-\frac{\Pi}{u^*} \cdot \frac{\lambda \cos \lambda - \sin \lambda}{s_\lambda} z\right) = 1 - \frac{\Pi}{u^*} \cdot \frac{\lambda \cos \lambda - \sin \lambda}{s_\lambda} z,$$

а в выражении (3.41) оставим только 1. Тогда после обращения по Лапласу будем иметь

$$\bar{c} = \exp\left(-\frac{\Pi}{u^*} \cdot \frac{\lambda_0 \cos \lambda_0 - \sin \lambda_0}{s_{\lambda_0}} z\right) - 1 - \frac{\Pi}{u^*} z \sum_k \frac{\text{Bi} \lambda_k}{\text{Bi}(\text{Bi}-1) + \lambda_k^2} \sum_{n=1}^3 \frac{\exp[p_{kn}(F_0 - z/u^*)]}{p_{kn} \lambda_{kn}'}, \quad (3.45)$$

$$\bar{c}^* = -\frac{3\text{Bi} \lambda_0 \cos \lambda_0 - \sin \lambda_0}{\lambda_0^2 s_{\lambda_0}} \times \exp\left(-\frac{\Pi}{u^*} \frac{\lambda_0 \cos \lambda_0 - \sin \lambda_0}{s_{\lambda_0}} z\right) - \frac{1}{2} \sum_k B_k \lambda_k \sum_{n=1}^3 \frac{\exp[p_{kn}(F_0 - z/u^*)]}{p_{kn} \lambda_{kn}'}. \quad (3.46)$$

Здесь проведено предварительно в выражении для $\bar{c}^*$ усреднение по ρ , и введены обозначения λ_k – корень уравнения $s_\lambda = 0$, p_{kn} – корень уравнения

$$\lambda_k^2 = -(D/D_1)p\varphi(p), \quad (3.47)$$

$$\lambda_{kn}' = \frac{d}{dp} \lambda_k|_{p=p_{kn}},$$

значения B_k приведены в работе [97, 99].

Вычисления вычетов в точках p_{kn} приведены в [100-102]. Выражения (3.45) и (3.46) имеют место только для $F_0 > z/u^*$. Для $F_0 < \frac{z}{u^*}$, $\bar{c} = \bar{c}^* = 0$.

Что касается функции $\bar{a}_i$, то они определяются из (3.26) по формуле

$$\bar{a}_i = \begin{cases} Ka_i \int_{z/u^*}^{F_0} \exp[-(Ka_i + \Gamma_i)(F_0 - \tau)] \bar{c}^*(\tau) d\tau & (F_0 > z/u^*) \\ 0 & (F_0 < z/u^*), \end{cases} \quad (3.48)$$

а функция $\bar{c}_1$ при необходимости может быть легко найдена из уравнения (3.7).

Отметим, что в случае пренебрежения диффузионным членом $D\partial^2 c/\partial x^2$ в уравнении (3.11) приближение, которое мы использовали в выражении (3.38), приводит к точному значению, если положить всюду в дальнейшем $D = uR$, и, следовательно, $u^* = 1$.

Полученные решения позволяют вычислить концентрации примеси при их фильтрации через слой сорбента с адсорбцией двумя компонентами и химической реакцией первого порядка. На основании полученных решений нами были просчитаны значения концентраций примеси при ее фильтрации через слой сорбента с адсорбцией двумя компонентами и химической реакцией первого порядка. На рисунке 3.3 представлены кривые динамики концентраций примеси $\bar{a}$ в потоке газа через слой зернистого сорбента, показывающие влияние химической реакции на фоне молекулярной адсорбции в газоздушном потоке при различных его скоростях.

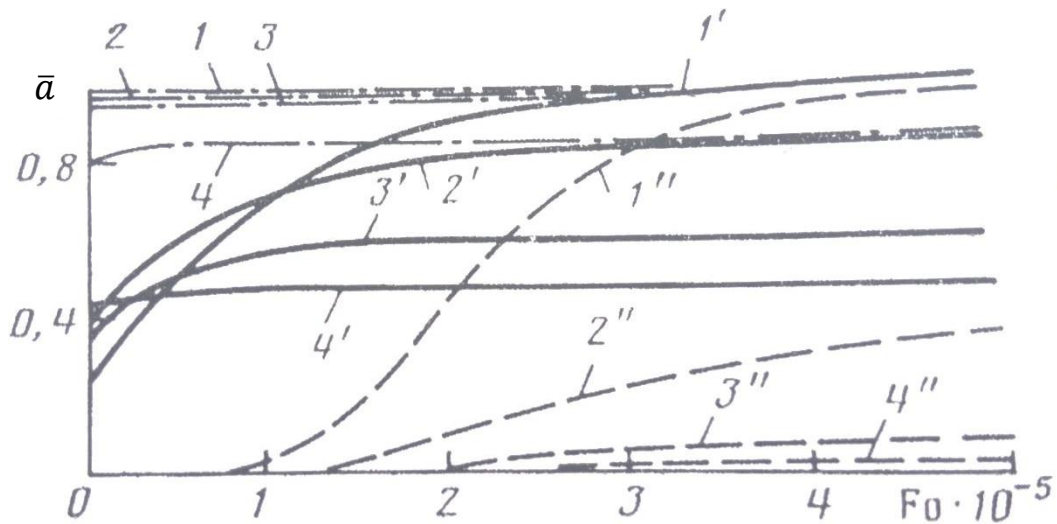


Рисунок 3.3 – Кривые динамики (1-4) концентраций примеси $\bar{a}$ в потоке газа через слой зернистого сорбента при критериях адсорбции:

$Ka_1 = 0,25 \cdot 10^{-4}$, $Ka_2 = 0$, $x = 1\text{м}$, $\beta = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$
и критериях реакции $\Gamma_2 = 0$, Γ_1 соответственно 1) $0,25 \cdot 10^{-9}$;
2) $0,25 \cdot 10^{-5}$; 3) $0,25 \cdot 10^{-4}$; 4) $0,25 \cdot 10^{-2}$;

скорость потока:

$u = 0,35 \text{ м/с}$ (1 – 4), $0,035 \text{ м/с}$ (1' – 4'), $0,0035 \text{ м/с}$ (1''–4'')

Как следует из представленных результатов, интенсивность химической реакции существенно влияет на динамику сорбции, причем этот эффект значителен при малых скоростях потока и несуществен при большой скорости. При одном и том же значении скорости потока и фиксированном значении кинетического коэффициента степень влияния скорости химической реакции на динамику изменения примеси уменьшается с увеличением скорости реакции и при определенном ее значении процесс выходит на «автомодельный» режим, т.е. дальнейшее увеличение скорости химической реакции практически не влияет на динамику концентраций примеси в потоке, поскольку процесс при этом лимитируется адсорбцией

Представляет интерес исследование влияния химических реакций на распределение концентраций примеси в потоке вдоль слоя сорбента, для этого на рисунке 3.4 представлены зависимости изменения концентраций сорбата вдоль слоя сорбента. В результате действия необратимой химической реакции, как это следует из представленных на рисунке 3.4 данных, концентрация примеси падает вдоль слоя, причем этот эффект

весьма мал при больших скоростях потока и существенен при малых. Однако с увеличением скорости химической реакции профиль концентраций стабилизируется, что также свидетельствует о наступлении «автомодельного» режима, лимитируемого адсорбцией.

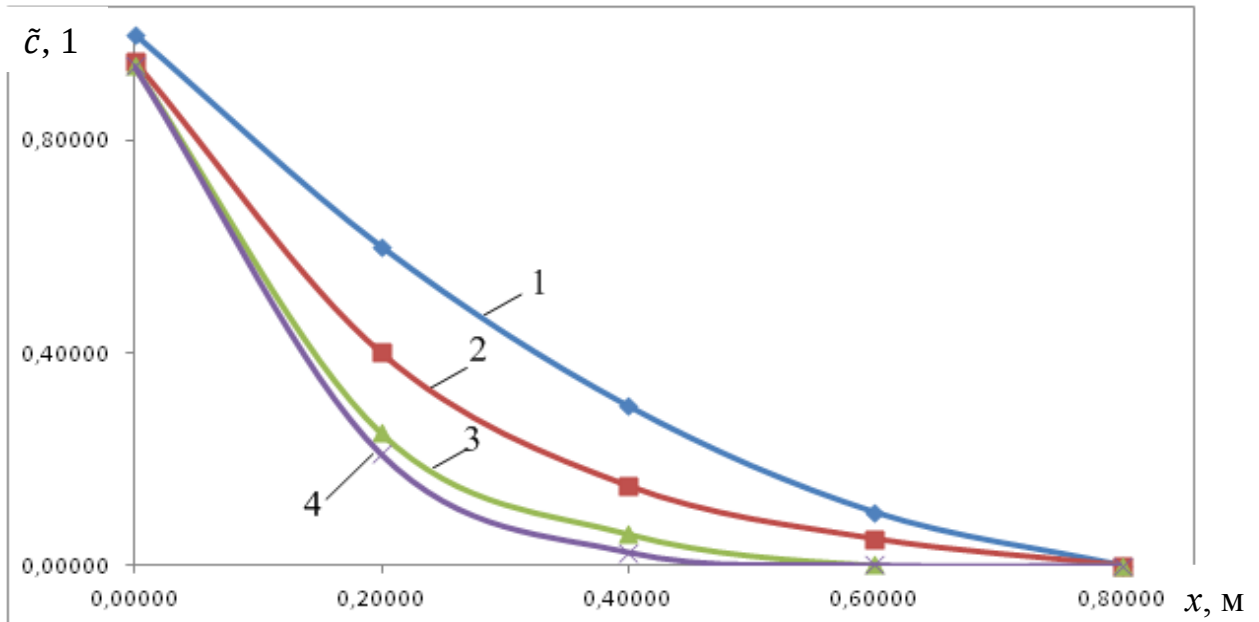


Рисунок 3.4 – Зависимости изменения концентраций сорбата вдоль слоя сорбента при скорости потока $u = 0,0035$ м/с, коэффициентом массоотдачи $\beta = 0,3 \cdot 10^{-4}$ м/с, времени $t = 3600$ с и критериях реакции Γ_1 соответственно:
 $1 - 0,25 \cdot 10^{-9}$, $2 - 0,25 \cdot 10^{-4}$, $3 - 0,25 \cdot 10^{-2}$,
 $4 - 0,25 \cdot 10^{-1}$

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.

Как следует из рисунка 3.3, из-за наличия коэффициента диффузии D в уравнении (3.11) существует размытие фронта адсорбции, увеличивающееся со временем. Поэтому можно говорить только о скорости ω перемещения

сорбционного слоя для времени $\tau_{0,5}$, т.е. о величине адсорбированного вещества на половине безразмерной кривой кинетики адсорбции $\bar{a} = 0,5$. Такую возможность можно реализовать практически в лабораторных экспериментах. Для практических целей целесообразно попытаться использовать известную в литературе [103-104] более простую, чем предложено выше, зависимость расчета поглощенного сорбентом (газонасыщенным углем) вещества (в частности вступившего в реакцию с кислородом воздуха в шахтной атмосфере):

$$\bar{c} = \frac{c}{c_0} = \bar{a} = \frac{a}{a_0} = 0,5 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \omega \cdot \tau}{2\sqrt{H\tau}} \right) \right], \quad (3.49)$$

где $H = D\gamma/(\gamma + 1)$; $a_0/c_0 = \gamma$ – коэффициент Генри;

ω – скорость движения фронта адсорбции, м/с;

$\operatorname{erf}(y) = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^y \exp(-y^2) dy$ – интеграл Крампа.

Функция $\operatorname{erf}(y)$ табулирована.

Исходя из анализа теоретических предпосылок хемосорбции кислорода газонасыщенных слоев скопления углей в горных выработках, лабораторная установка должна удовлетворить следующим требованиям:

- иметь длину реакционной колонки не менее 0,8 м исходя из того, что эндогенные пожары, пожары в горных выработках в слое скопления угля происходят на расстояниях 0,1-0,7 м от входа в них окислителя (кислорода в шахтной атмосфере);

- давать возможность получать первичную информацию о скорости адсорбции β_1 , 1/с кислорода в нескольких точках колонки от места поступления в нее адсорбтива;

- обеспечить непрерывное поступление в реакционную колонку воздуха со скоростью просасывания его между частицами адсорбента $1 \cdot 10^{-5}$ - $1 \cdot 10^{-6}$ м/с ;

- иметь диаметр реакционной колонки не менее 0,1 м для возможности загрузки в нее частиц сорбента до 0,1 м.

- иметь водяной U-образный манометр для наблюдения и регистрации величин поглощенного адсорбента в различных местах реакционной емкости;

- иметь возможность производить отбор проб адсорбтива в нескольких точках реакционной колонки от места поступления в нее воздуха;

- иметь расходомеры на входе и выходе из реакционной колонки.

Схема установки, для изучения механики адсорбции газов, отвечающей поставленным требованиям представлена на рисунке 3.5

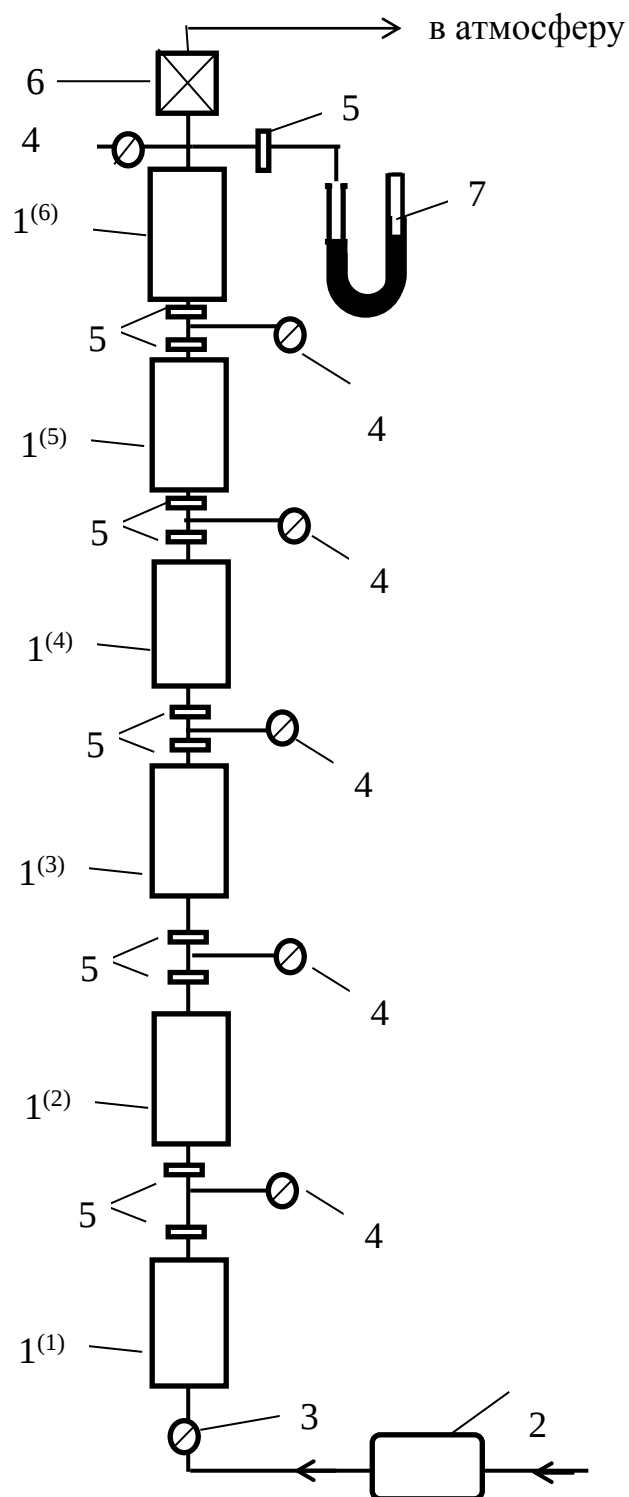


Рисунок 3.5 – Схема установки для изучения механики адсорбции газов:
 $1^{(n)}$ - компоненты реакционной колонки; 2 - насос для подачи адсорбтива; 3 - кран регулировочный для подачи требуемого расхода адсорбтива; 4 - краны для отбора проб адсорбтива; 5 - зажимы для регулировки мест отбора проб адсорбтива; 6 - водяной манометр; 7 – пленочный расходомер.

Имея опыт работы с установкой для изучения кинетики адсорбции (хемосорбции) компонентов сорбтива из смеси кислорода и азота (в присутствии метана), предлагается установка для исследования динамики адсорбции компонентов адсорбтива с использованием последовательно соединенных небольших реакционных колонок того же типа, что и в предыдущей установке.

Подготовка к эксперименту и выполнение наблюдений за динамикой сорбции кислорода производятся в следующей последовательности:

выполняется отбор проб угля в количестве (массой) ≈ 10 кг непосредственно после его отделения от массива фракцией не менее 50мм и в кратчайшие сроки доставляется в лабораторию НИИГД «Респиратор»;

- на дробильной установке производится дробление угля и отбор фракций 1-3мм в количестве, необходимом для заполнения всех 6 (шести) частей реакционной колонки (рисунок 3.5);

- для исследования адсорбции (хемосорбции) кислорода углем в реакционной колонке используется газ-носитель аргон, либо метан с получением концентрации кислорода 20%;

- краном 3 регулируется подача адсорбтива с расходом, необходимым для получения линейной скорости в сорбционной колонке $1 \cdot 10^{-5}$ - $1 \cdot 10^{-6}$ м/с и начинается его подача;

- одновременно с началом подачи в колонку адсорбтива начинается измерение его расхода на выходе из колонки пленочным расходомером;

- через различные промежутки времени, начиная с первого часа и по мере снижения процесса адсорбции кислорода увеличивая его сначала до 12-24 часов, а затем до нескольких суток, отбираются и анализируются пробы на содержание кислорода, из всех частей реакционной колонки через краны 4, отсекая зажимами 5 каждую часть;

- количество поглощенного адсорбтива каждой части колонки $\Delta a^{(n)}$ за время $\Delta \tau = \tau_m - \tau_{m-1}$ определяют по разности его концентраций для моментов времени $\Delta \tau [c]$ по формуле:

$$\Delta a^{(n)} = a_m^{(n)} - a_{m-1}^{(n)}, \frac{\text{моль}}{\text{м}^3}, \quad (3.50)$$

где $a_m^{(n)}$ и $a_{m-1}^{(n)}$ – концентрации адсорбтива в момент времени τ_m и τ_{m-1} , с;

– константу скорости поглощения адсорбтива определяют по разности его концентраций в потоке между двумя замерами по формулам:

для первой точки и первой части колонки 1⁽¹⁾

$$K^{(1)} = \frac{C_0 - C_1^{(1)}}{\tau_2 - \tau_1}, \frac{\text{моль}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}}; \quad (3.51)$$

для второй и последующих колонок (n) и точек (m)

$$K^{(n)} = \frac{C_m^{(n)} - C_{m-1}^{(n-1)}}{\tau_m - \tau_{m-1}}, \frac{\text{моль}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}}; \quad (3.52)$$

где n – номер колонки;

τ_m – время последующего замера, с;

τ_{m-1} – время предыдущего замера, с;

– по данным о количестве поглощенного адсорбтива за отрезок времени $\tau_m - \tau_{m-1}$ строятся кинетические кривые его адсорбции для каждой части реакционной колонки 1⁽ⁿ⁾ $\left(\frac{\text{моль}}{\text{м}^3}\right) a = f(\tau), \left(\frac{\text{моль}}{\text{м}^3}\right)$;

– по данным кинетических кривых каждой колонки строятся их безразмерные кинетические кривые

$$\bar{a}^{(n)} = \frac{a}{a_m}, \quad (3.53)$$

где a_m – максимальное поглощение адсорбтива.

– для каждой части колонки 1⁽ⁿ⁾ фиксируется время отработки сорбента $\tau_{0,5}$, т.е. время достижения безразмерной величины $\bar{a}_{0,5}^n = 0,5$.

– зная величины $\bar{a}_{0,5}^n$ для каждой колонки во время его наступления, определяется скорость движения w , м/с отработки адсорбтива.

– по найденным величинам константы скорости поглощения с использованием теории адсорбции, приведённой в работе [98] строится кинетическая кривая кислорода вступившего в реакцию с углем в виде безразмерной величины $\bar{a}_{0_2}^n = f(\tau)$ и по ней находится время полуотработки сорбента $\tau_{0,5}$, т.е. $\bar{a}_{0,50_2}^n$.

– имея величины $\bar{a}_{0,50_2}^n$ определяется скорость движения адсорбционного слоя ω , м/с.

– по двум смежным величинам $K^{(n)}$ для каждой части реакционной колонки находится коэффициент адсорбции $\beta_1, \frac{1}{c}$, по формуле

$$\beta_{1i}^{(n)} = \frac{\bar{a}_i^n - \bar{a}_{i-1}^n}{\tau_{i+1} - \tau_{in}} \quad (3.54)$$

и строятся графики $\beta_i^{(n)} = f(\tau)$, а так же для них подбирается формула в виде

$$\beta_i^{(n)} = a + b\tau + c\tau^2 \quad (3.55)$$

– по полученным точкам адсорбции адсорбтива $\bar{a}_n$ (кислорода, либо его смеси с азотом) производится моделирование процесса кинетики адсорбции смеси газов и кислорода каждой части колонки 1^n и находится безразмерная величина прореагировавшего кислорода $Ka_{O_2} = \frac{\beta_1 R^2}{D}$, а по ним и экспериментальным данным $\beta, 1/c$, вычисляются величины коэффициентов диффузии $D = f(x)$, где x – координата перемещения адсорбтива вдоль колонки.

Эксперименты по динамике адсорбции (хемосорбции) кислорода газонасыщенными углями шахт Донбасса выполнялись согласно предложенной математической модели и специально разработанной для этого лабораторной установке (рисунок 3.5)

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

Отобранные с 1-ой части реакционной колонки (рисунок 3.5) пробы на содержание поглощенного углями кислорода в течение длительного периода времени (до 480 часов) позволили отыскать все необходимые параметры массопереноса и газообмена.

В таблице 3.3 представлены параметры хемосорбции кислорода углем шахты им. С.М. Кирова пл. h_{10}^B марки Т, $V^{\text{daf}} = 8,2 - 10,6 \%$, найденные по кинетической кривой адсорбции кислорода из 1-ой части колонки (рисунок 3.5)

Экспериментальные параметры низкотемпературного окисления углями 5-ти шахт Донбасса представлены в таблице 3.4 по данным анализов на выходе из первого компонента реакционной колонки (рисунок 3.5).

В последних колонках таблицы 3.4 даны результаты, отражающие $\approx 90\%$ отработки сорбента. Дальнейшее поглощение кислорода и его химическое реагирование происходило настолько медленно, что может длиться месяцами. Поэтому возможно положить, что процесс адсорбции кислорода к этому времени практически подошел к завершению и им заполнены крупные поры и почти окончились химические реакции с углеродом на активных центрах. Тогда, учитывая, что приведенный размер реакционной колонки (сосуда с углем №1, рисунок 3.5) составляет $l = 0,05$ м, скорость отработки сорбента ω , м/с, составит

$$\omega = \beta_1 \cdot l. \quad (3.56)$$

Величины β_1 и ω для каждого из исследованных углей представлены в последних колонках таблице 3.4.

Таблица 3.3. 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

Таблица 3.4. Параметры низкотемпературного окисления кислорода углями различной степени метаморфизма

Шахта, пласт	Мар- ка угля	V^{daf} , %	$k_{\text{кр}}$, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{моль})$	$T_{\text{кр}}$, К	E , Дж/моль	Параметры низкотемпературного окисления									
						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 , $\bar{a}_{\text{хим}}$	$a_{\text{эксп}} _{\tau=0,9}$, моль/м^3 , $\bar{a}_{\text{эксп}} _{\tau=0,9}$	$a_{\text{хим}} _{\tau=0,9}$, моль/м^3 , $\bar{a}_{\text{хим}} _{\tau=0,9}$	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)	$\frac{46,25}{0,86}$	$\frac{30,32}{0,63}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$
Холод- ная 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)	$\frac{33,97}{0,43}$	$\frac{3,16}{0,07}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$
Щег- ловская Глубо- кая, 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. Челюс- кинцев, 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)	$\frac{31,59}{0,88}$	$\frac{22,94}{0,64}$	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$

Динамика адсорбции кислорода углями вдоль реакционной колонки изучалась с использованием теоретических зависимостей, изложенных в разделе 3. Скорость отработки сорбента вычислялась по формуле (3.56).

В эксперименте с углем шахты им. С.М. Кирова величина скорости отработки сорбента ω , м/с, была равна (согласно формуле 3.56)

$$\omega = \beta_1 \cdot l = 2,6 \cdot 10^{-5} \cdot 0,05 = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м/с},$$

где l – средний диаметр колонки, м, в ее первой части (рисунок 3.5).

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 3.4

Результаты исследований поглощенного кислорода в реакционной колонке в относительны величинах $\bar{a} = \frac{a}{a_0}$ для различных углей шахт Донбасса представлены в таблице 3.5

Таблица 3.5 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^B_{10}	8,2 - 10,6	0,87	0,58	0,25	0,055	0,005		
Холодная Балка, h^B_{10}	13,2	0,87	0,84	0,73	0,72	0,58	0,41	0,26
Горняк - 95, h^B_8	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	

3.3. Исследование кинетики теплового эффекта окисления газонасыщенных углей Донбасса

Известно, что тепловой эффект реакции окисления вещества независимо от пути реакции определяется только начальным и конечным состоянием и составляет для случая окисления углерода $3,93 \cdot 10^5$ Дж/моль (94 ккал/моль) при условии, что процесс протекает, если объем и давление постоянны.

В экспериментальных условиях с углями различных пластов Донбасса тепловой эффект реакции взаимодействия кислорода с углем, по данным [18, 98], изменялся от $2,7 \cdot 10^5$ до $27 \cdot 10^5$ Дж/моль. Это позволило автору сделать вывод, что принимать фиксированное значение теплоты реакции окисления при оценке процессов самонагревания угля неправомерно. Анализируя

сведения о тепловых эффектах окисления угля, автор пришел к выводу, что между склонностью угля к самовозгоранию и теплотой реакции окисления прямой функциональной связи не существует. Угли, при выемке которых происходило большое количество эндогенных пожаров, отличаются повышенным количеством выделившейся теплоты при окислении. Например, самую высокую теплоту реакции окисления имеет уголь пожароопасного пласта m_3 шахты им. Г.Г. Капустина. Высокая теплота реакции окисления также у пожароопасных углей пластов l_3 шахты им. Ю.А. Гагарина, l_1 шахты им. В.И. Ленина (Макеевка) и l_1 шахты «Юнком», а теплота реакции окисления несамовозгорающегося антрацита шахты «Донецкая» выше, чем теплота реакции самовозгорающихся углей шахт им. В.И. Бажанова и «Чайкино» [105].

Подводя итог исследованию теплоты реакции окисления угля, можно сделать вывод, что по абсолютному значению теплоты окисления нельзя характеризовать степень склонности угля к самовозгоранию. Однако, поскольку его значение для различных углей колеблется в широких пределах, теплоту реакции необходимо учитывать при оценке тепловых процессов самовозгорания угля.

Существующая методика определения тепловых эффектов окисления угля требует довольно сложных экспериментальных исследований, поэтому на практике значение теплоты реакции окисления угля принимают среднее равное $3,76 \cdot 10^5$ Дж/моль [106-107], что нельзя считать правомерным.

Ископаемые угли в отличие от чистого углерода, для которого тепловой эффект постоянен, отличаются наличием минеральных примесей в тонко рассеянном состоянии либо в виде отдельных кристаллов разной формы и размера.

Среди минеральных примесей встречаются терригенные включения и минеральные новообразования. Терригенные примеси содержат зерна кварца, обломки кальцита, включения апатита, сфена, циркона, пластины слюды, которые равномерно распределены в веществе угля. К минеральным

новообразованиям относятся сидерит, пирит, каолинит, возникшие в торфообразующем слое в результате химического взаимодействия соединений, растворенных в воде. Кроме того, в углях встречаются гипс, целестин, образующиеся в трещинах сформировавшегося угольного пласта. Между минеральными примесями и веществом угля существует тесная генетическая связь, а также их определенная отнесенность к отдельным угольным пластам. Таким образом, из-за разнообразного состава примесей в ископаемых углях и различной степени их углефикации теплота реакции окисления отличается.

Чтобы определить инкубационный период и склонность углей к самовозгоранию, провели экспериментальные исследования углей, содержащих от 7 до 35 % летучих горючих: измеряли суммарные тепловые эффекты окисления и тепловые, отнесенные к единице поглощенного кислорода [98-99]. Последние не зависят от диффузионных или кинетических особенностей сорбции кислорода, размеров поверхности, массы угля и его фракционного состава, в то время как на суммарный тепловой эффект эти факторы влияют.

Для измерения тепловых эффектов окисления углей молекулярным кислородом использовали усовершенствованный вариант проточной системы с импульсным дозированием кислорода. Установку смонтировали на базе серийного хроматографа ЛХМ–8МД и дифференциального микрокалориметра ДАК–1–1. Строго дозированное количество кислорода через дозатор хроматографа вводили в реакционный сосуд с исследуемым углем, который находился в измерительной ячейке микрокалориметра. Кислород, прошедший через слой угля, частично поглощался, а непрореагировавший элюировался газом–носителем и фиксировался детектором хроматографа. Количество теплоты, выделившейся в результате окисления, измеряли микрокалориметром. Результаты исследования теплоты окисления различных углей Донбасса представлены в таблице 3.6.

Анализируя данные таблицы 3.6, показывающие довольно тесную связь q_0 с k предположим, что их произведение это – скорость тепловыделения ν_{q_0} , Дж/моль, являющаяся новой характеристикой угля, определяющей его склонность к самовозгоранию. Для подтверждения обратились к методике определения склонности угля к самовозгоранию [108-110], в которой комплексный показатель склонности угля к самовозгоранию t , с, определяется зависимостью

$$t = \frac{\rho c_V T_0}{(q_0 C k) \ln\left(\frac{T_{кр}}{T_0}\right)}, \quad (3.57)$$

где ρ – плотность угля, кг/м³;

c_V – удельная теплоемкость угля при постоянном объеме, Дж/(кг·К);

T_0 и $T_{кр}$ – начальная и критическая температура угля, К;

q_0 – теплота реакции окисления, Дж/моль;

C – концентрация кислорода, поглощенного углем, моль/м³;

k – константа скорости окисления угля, с⁻¹.

Из формулы (3.57) следует, что комплексный показатель склонности угля к самовозгоранию t обратно пропорционален произведению $q_0 k$, т.е. скорости тепловыделения ν_{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 скорость тепловыделения ν_{q_0} .

Описанные выше исследования теплового эффекта окисления углей основывались на определении величин поглощенного углями кислорода в хроматографической колонке в течении нескольких секунд, когда реакции окисления угольных частиц могли произойти только на их поверхностях. В действительности скопления угля в горных выработках шахт подвергается

окислению длительный период времени – многие сутки. А инкубационный период самовозгорания составляет 20 – 40 суток.

В связи со сказанным изучение процесса окисления углей и выделяющееся в результате этого тепло надо проводить на протяжении всего периода их низкотемпературного окисления.

Ещё один недостаток выполненных исследований – принятие величин поглощенного определенной массой угольных частиц кислорода за его количество, вступающее в реакции окисления. Как показано в работе [98], только небольшая часть поглощенного углем кислорода вступает с ним в реакции. Поэтому изучение этого вопроса представляет не только теоретический, но и практический интерес, т.к. от этого зависит решение задачи о возможности самовозгорания конкретного скопления угля в шахте.

Поэтому необходимо изучить кинетику теплового эффекта окисления газонасыщенных углей разной степени метаморфизма на основе исследований разделения кинетики адсорбции и хемосорбции ими кислорода.

Таблица 3.6 – Теплоты окисления углей шахт Донбасса

Шахта	Индекс пласта	Доля горючих веществ, $V^r, \%$	Выделившаяся теплота, Дж	Теплота реакции окисления $q_0 \cdot 10^{-5}$, 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. Ю.А. Гагарина	l_3	25	0,71	26,7	0,14	2,59	3,7	9,60
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
«Калиновская-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
«Булавинская»	l_3	10	0,53	7,6	0,25	8,54	1,9	16,23
	l_1	9	0,27	12,2	0,19	10,76	2,3	24,75
«Ольховатская»	l_3	8	0,46	8,9	0,18	13,34	1,6	21,35
«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
«Донецкая»	h_6	17	0,46	4,0	0,8	0,87	3,2	2,78

3.4 Результаты математического моделирования процесса самонагрева угля в краевой части угольного массива

Как сказано выше (формула 3.57) 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. Дальнейшие исследования низкотемпературного окисления угля показали, что существенное влияние в этом процессе имеет также величина концентрации поглощенного углем кислорода C , моль/м³.

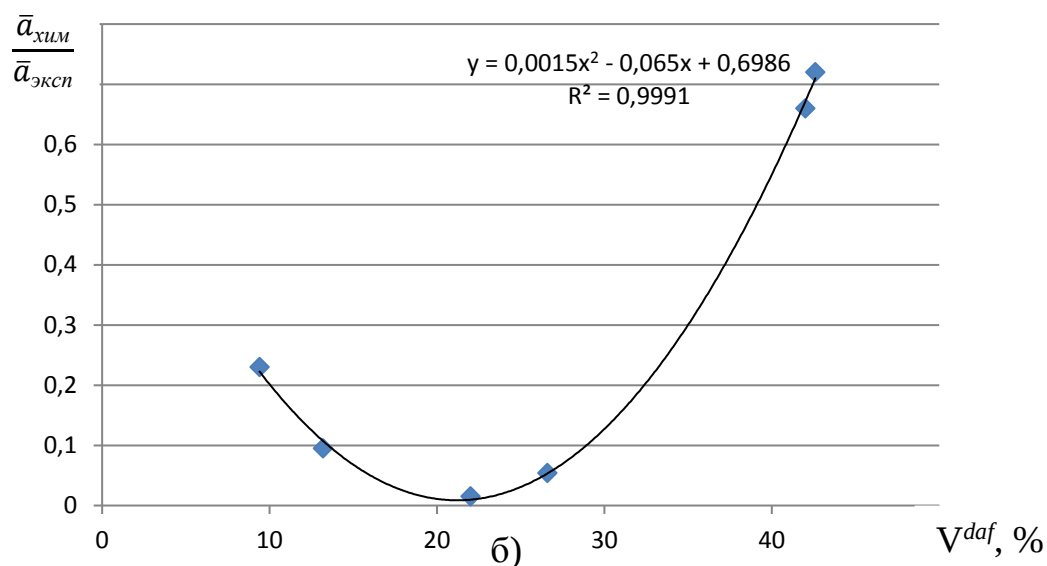
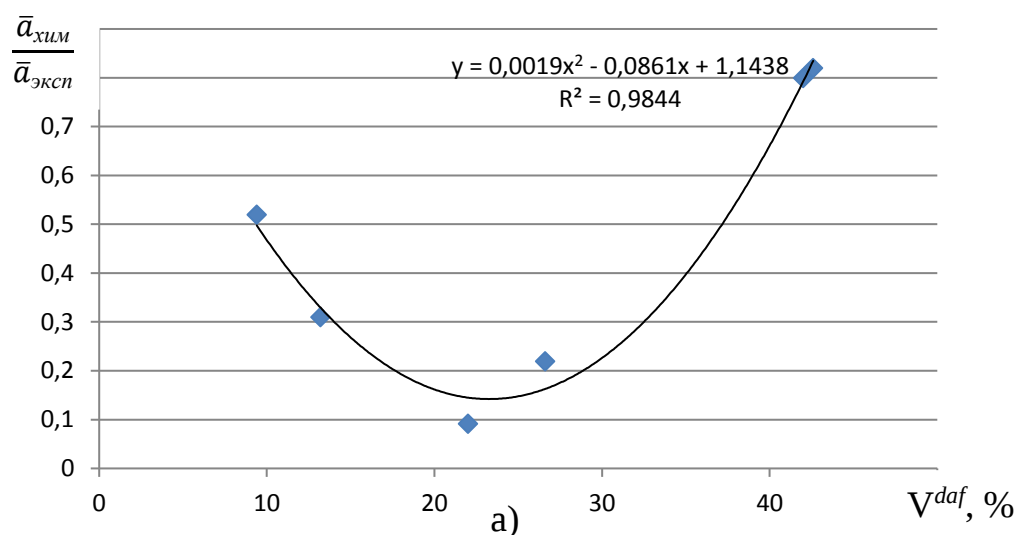
В работе [4] впервые предложен метод разделения кинетики поглощенного и прореагировавшего кислорода и получены численные значения параметров хемосорбции кислорода. Некоторые из результатов исследований, иллюстрирующих долю кислорода вступившего в реакции окисления с углем разной степени метаморфизма представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 Доля δ кислорода, вступившего в химическое реагирование с газонасыщенными углями Донбасса разной степени углефикации по мере кинетики процесса

Шахта пласт	V^{daf} , %	К, м ³ /с·моль	Доля δ кислорода, вступившего в химическое реагирование					
			Время, час/сек					
			12/43200	24/86400	48/172800	72/259200	120/432000	240/864000
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. На рисунке 3.5 представлены зависимости относительного количества кислорода вступившего в реакцию окисления с углем $\bar{a}_{хим}$ от общего адсорбированного его количества $\bar{a}_{эксн}$ для углей разной степени метаморфизма.

Как следует из представленных данных, в обоих случаях от начала процесса адсорбции (для $\tau = 3$ сут и $\tau = 10$ сут) связь величин $\bar{a}_{хим}/\bar{a}_{эксн}$ с V^{daf} весьма тесная с коэффициентом корреляции более 0,98, что позволяет в дальнейшем при изучении тепловыделения углей полагаться на эти результаты.



а) 3 сут от начала процесса адсорбции

б) 10 сут от начала процесса адсорбции

Рисунок 3.5 – Зависимость относительного количества кислорода вступившего в реакцию окисления с углем $\bar{a}_{хим}$ от общего адсорбированного его количества $\bar{a}_{эксн}$ для углей разной степени метаморфизма.

Кинетика адсорбции различных газов газонасыщенными углями Донбасс ранее изучена [18, 23-24]. Пользуясь этими данными для случая адсорбции углями кислорода и зависимостью между поглощенным кислородом и вступившим в реакцию окисления [99] рассчитанные величины последнего для углей, представлены в таблице 3.6 (C_x , моль/м³).

Далее, предлагается для определения скорости тепловыделения с учетом количества вступающего в реакции окисления с углем кислорода ω_{q_0} , Дж/(м³·с) использовать следующую формулу

$$\omega_{q_0} = q_0 C_x k, \quad (3.58)$$

Вычисленные значения C_x , моль/м³ и скорости тепловыделения ω_{q_0} представлены в последних графах таблицы 3.6 и на рисунке 3.6.

Выполненные исследования позволили получить более полные данные о механизме самовозгорания углей, чего нельзя было сделать ранее за неимением данных о доле вступившего в реакцию с углем кислорода воздуха.

Полученная зависимость далее будет использована для расчета температур самовозгорания углей.

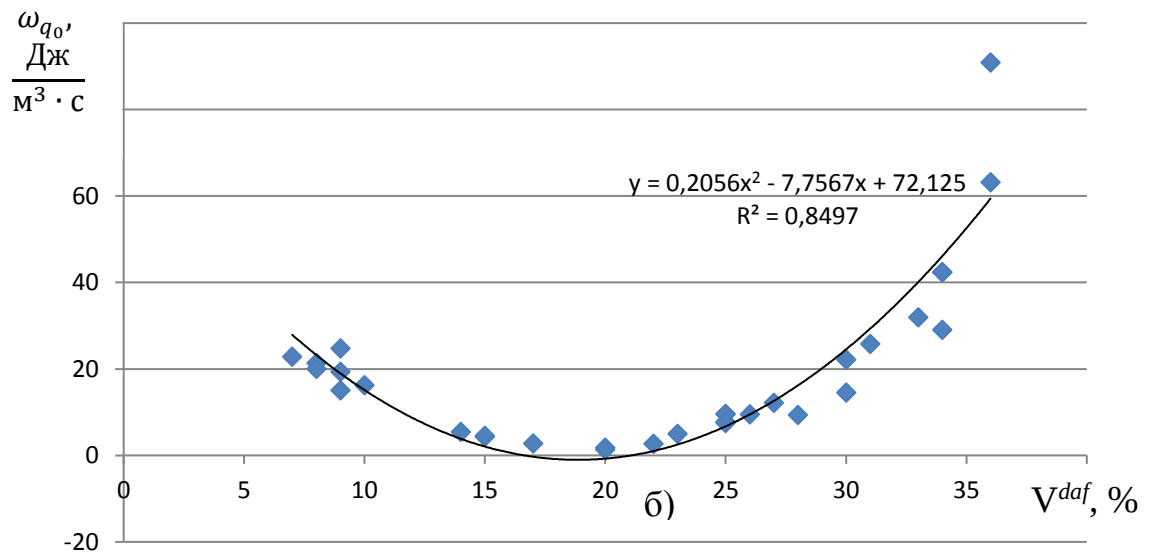
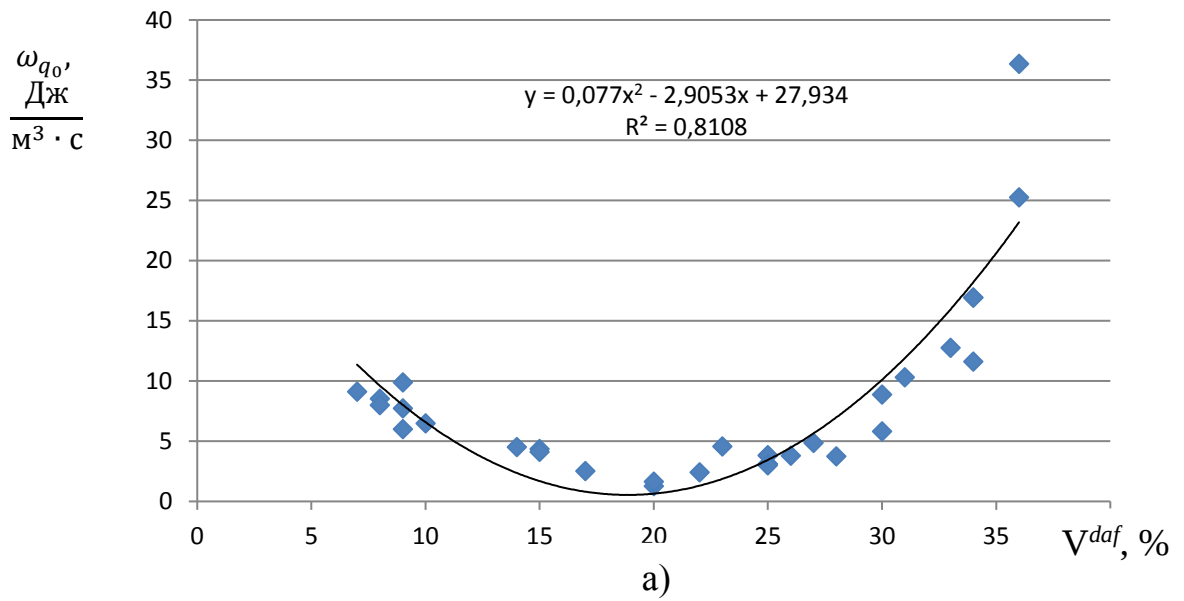


Рисунок 3.6. Зависимость скорости тепловыделения от выхода летучих веществ.

а) 3 сут от начала процесса адсорбции

б) 10 сут от начала процесса адсорбции

3.5 Выводы

1. Разработаны физическая и адекватная математическая модели изотермической адсорбции веществ слоем сорбента при наличии адсорбции

двумя его компонентами и химической реакции первого порядка. Получено точное аналитическое решение задачи. Выполнен анализ решения.

2. Предложена упрощенная зависимость для расчета динамики адсорбции и химической реакции кислорода слоем скопления угля в горных выработках.

3. Разработана конструкция лабораторной установки для изучения динамики адсорбции кислорода слоем угля в приближенных к горным выработкам условиях его нахождения.

4. Выполнены эксперименты по динамике адсорбции кислорода газонасыщенными углями Донбасса с содержанием горючих веществ V^{daf} от 8 до 43%.

5. Получены скорость отработки сорбента каждой степени его метаморфизма и распределение величин поглощенного углями кислорода вдоль пути проникновения кислорода в скопление угля.

6. Изучена кинетика адсорбции и окисления газонасыщенных углей разной степени метаморфизма.

7. Впервые предложено, и будет введено в руководящие документы новое понятие – скорость тепловыделения сорбента (угля) – при его окислении, с учетом степени разделения адсорбированного и вступившего в реакцию окисления кислорода.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЖАРООПАСНОСТИ КРАЕВОЙ ЧАСТИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ В ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТКАХ ГЛУБОКИХ ШАХТ

4.1. Построение математической модели разрушаемости краевых частей угольных пластов в подготовительных выработках

Как установлено в предыдущем разделе, теплонагрев в краевой части угольного массива в большей степени зависит от ширины зоны разрушения. Как показали расчеты, чем шире эта зона или чем больше масса раздробленного угля, тем выше ожидаемые в ней максимальные температуры. Поэтому необходимо установить, как меняется ширина зоны разрушения угольного массива с глубиной залегания пласта. С этой целью воспользуемся результатами исследований по напряженному состоянию целиков [98, 114, 122].

Для изучения напряженно-деформированного состояния целиков используем уравнения равновесия сил, приложенных к элементарному объему в плоскости x, y :

$$\begin{cases} \partial\sigma_x / \partial x + \partial\tau_{xy} / \partial y = 0 \\ \partial\tau_{xy} / \partial x + \partial\sigma_y / \partial y = 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

где σ_x – нормальное к координате x напряжение, кг/м^2 ; σ_y – нормальное к координате y напряжение, кг/м^2 ; τ_{xy} – касательное напряжение, кг/м^2 ; x и y – продольная (вглубь пласта) и поперечная координаты (рисунок 4.1), м.

Три составляющих напряжения выражаются через главные напряжения зависимостями:

$$\begin{cases} \sigma_x = \omega \cdot (1 + \sin \alpha \cos 2\varphi) - K \operatorname{ctg} \alpha \\ \sigma_y = \omega \cdot (1 - \sin \alpha \cos 2\varphi) - K \operatorname{ctg} \alpha \\ \tau_{xy} = \omega \sin \alpha \sin 2\varphi \end{cases} \quad (4.2)$$

где ω – суммарное напряжение, кг/м²; α – угол наклона касательной к огибающей кругов напряжений или угол внутреннего трения; φ – угол наклона главного максимального напряжения к оси x ; K – коэффициент сцепления частиц материала между собой, кг/м².

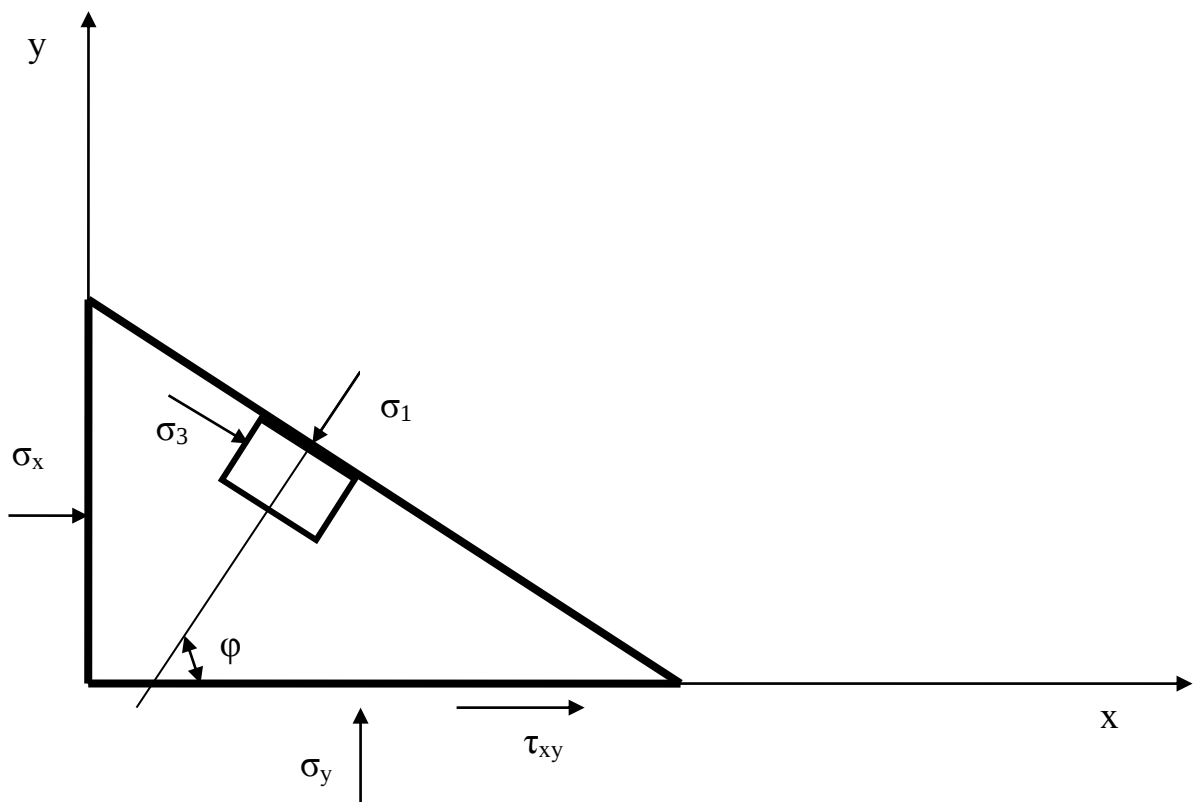


Рисунок 4.1. Схема напряжений, действующих на главных площадках

Суммарное напряжение определяется по формуле:

$$\omega = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 + K \operatorname{ctg} \alpha \quad (4.3)$$

где σ_1 – максимальное главное напряжение, кг/м²; σ_3 – минимальное главное напряжение, кг/м².

После подстановки формул (4.2) в систему уравнений равновесия сил (4.1) получим основную систему уравнений напряженно-деформированного состояния массива

$$\begin{cases} \cos(\varphi + \mu) \partial \omega / \partial x + \sin(\varphi + \mu) \partial \omega / \partial y + \\ \quad + 2\omega \operatorname{tg} \alpha [\cos(\varphi + \mu) \partial \varphi / \partial x + \sin(\varphi + \mu) \partial \varphi / \partial y] = 0 \\ \cos(\varphi - \mu) \partial \omega / \partial x + \sin(\varphi - \mu) \partial \omega / \partial y - \\ \quad - 2\omega \operatorname{tg} \alpha [\cos(\varphi - \mu) \partial \varphi / \partial x + \sin(\varphi - \mu) \partial \varphi / \partial y] = 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

где μ – угол, связанный с углом внутреннего трения соотношением $\mu = \pi/4 - \alpha/2$

Представим систему уравнений (4.4) в более упрощенном виде

$$\begin{cases} \partial \omega / \partial x + \operatorname{tg}(\varphi + \mu) \partial \omega / \partial y + 2\omega \operatorname{tg} \alpha [\partial \varphi / \partial x + \operatorname{tg}(\varphi + \mu) \partial \varphi / \partial y] = 0 \\ \partial \omega / \partial x + \operatorname{tg}(\varphi - \mu) \partial \omega / \partial y - 2\omega \operatorname{tg} \alpha [\partial \varphi / \partial x + \operatorname{tg}(\varphi - \mu) \partial \varphi / \partial y] = 0 \end{cases} \quad (4.5)$$

Поскольку тупиковая выработка проходится в целике, то его напряженное состояние относится к случаю полосы шириной h , во много раз превосходящей ее высоту или мощность пласта m (рисунок 4.2).

В этом случае можно не учитывать области, примыкающие непосредственно к выработке и соответствующие криволинейному участку огибающей напряжений, так как их размеры менее мощности пласта. Поэтому будем рассматривать прямолинейный участок огибающей и примем на границах пласта с породами условие пропорциональности касательных напряжений между собой: $\tau = \sigma \operatorname{tg} \delta$, где δ – экспериментально определяемый угол, меньший угла внутреннего трения или равный ему ($\delta \leq \alpha$).

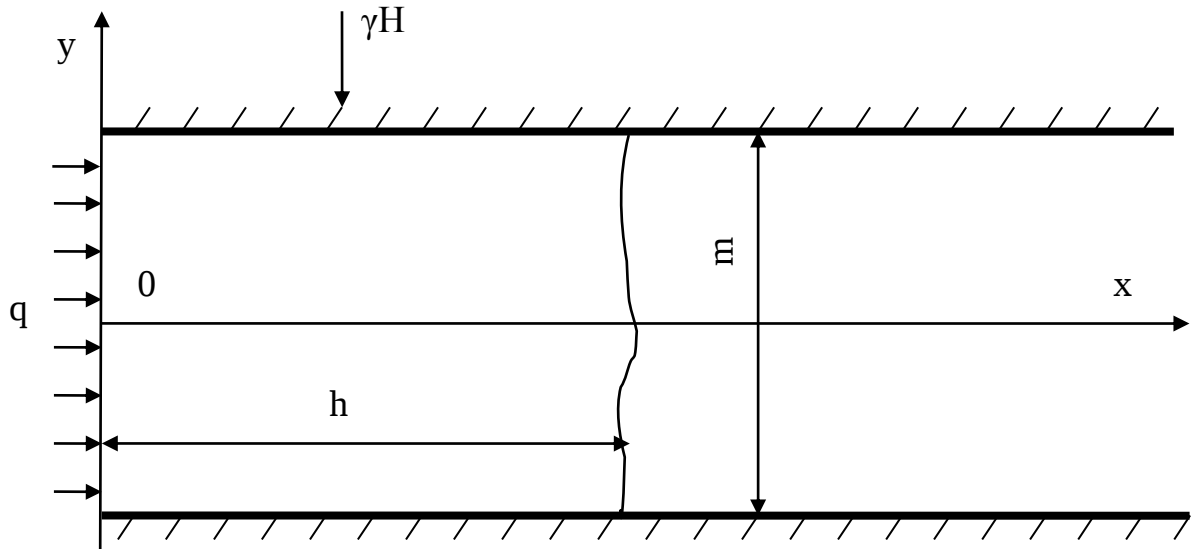


Рисунок 4.2. Схема краевой части пласта

Тогда граничные условия для функции φ при $y = \pm m/2$ можно записать в виде:

$$\varphi(x, \pm m) = \pi/2 \mp \frac{1}{2} \left[\delta + \arcsin \left(\frac{\sin \delta}{\sin \alpha} \right) \right] \quad (4.6)$$

Чтобы удовлетворить этим граничным условиям, достаточно принять функцию φ зависящей только от y : $\varphi = \varphi(y)$. В результате система уравнений (4.5) еще более упростится и примет вид

$$\begin{cases} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \operatorname{tg}(\varphi + \mu) \frac{\partial \omega}{\partial y} + 2\omega \operatorname{tg} \alpha \left[\operatorname{tg}(\varphi + \mu) \varphi' \right] = 0 \\ \frac{\partial \omega}{\partial x} + \operatorname{tg}(\varphi - \mu) \frac{\partial \omega}{\partial y} - 2\omega \operatorname{tg} \alpha \left[\operatorname{tg}(\varphi - \mu) \varphi' \right] = 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

где φ' – производная функции по y . Вычитая из первого уравнения системы (4.7) второе и повторяя эту операцию, предварительно умножив оба уравнения на котангенсы соответствующих углов, получим

$$\begin{cases} [tg(\varphi + \mu) - tg(\varphi - \mu)]\partial\omega/\partial y + 2\omega tg\alpha [tg(\varphi + \mu) + tg(\varphi - \mu)]\varphi' = 0 \\ [ctg(\varphi + \mu) - ctg(\varphi - \mu)]\partial\omega/\partial x + 4\omega tg\alpha \varphi' = 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

После тригонометрических преобразований получим упрощенную систему уравнений напряженно-деформированного состояния краевой части угольного пласта

$$\begin{cases} \sin 2\mu \partial\omega/\partial y + 2\omega tg\alpha \sin 2\varphi \varphi' = 0 \\ \sin 2\mu \partial\omega/\partial x - 2\omega tg\alpha (\cos 2\mu - \cos 2\varphi) \varphi' = 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

Будем искать общее решение для функции суммарного напряжения ω в виде произведения двух функций, одна из которых зависит только от x а другая – только от y :

$$\omega(x, y) = F_1(x)F_2(y) \quad (4.10)$$

Подставляя предполагаемое решение (4.10) в систему уравнений (4.9), будем иметь

$$\begin{cases} \sin 2\mu F_1(x)F_2'(y) + 2F_1(x)F_2(y)tg\alpha \sin 2\varphi \varphi' = 0 \\ \sin 2\mu F_1'(x)F_2(y) - 2F_1(x)F_2(y)tg\alpha (\cos 2\mu - \cos 2\varphi) \varphi' = 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

Разделим первое и второе уравнение системы (4.11) на произведение $(F_1 \cdot F_2)$ и получим

$$\begin{cases} \sin 2\mu F_2'(y)/F_2(y) = -2tg\alpha \sin 2\varphi \varphi' \\ \sin 2\mu F_1'(x)/F_1(x) = 2tg\alpha (\cos 2\mu - \cos 2\varphi) \varphi' \end{cases} \quad (4.12)$$

Из анализа первого уравнения системы (4.12) следует, что левая и правая его части зависят только от y . Поэтому после интегрирования получим

$$\sin 2\mu \ln F_2(y) = \operatorname{tg} \alpha \cos 2\varphi \quad (4.13)$$

Таким образом, искомая функция F_2 равна

$$F_2(y) = \exp\left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin 2\mu} \cdot \cos 2\varphi\right) \quad (4.14)$$

Так как $\sin 2\mu = \sin(\pi/2 - \alpha) = \cos \alpha$, то вместо уравнения (4.14) будем иметь

$$F_2(y) = \exp\left(\frac{\sin \alpha}{\cos^2 \alpha} \cdot \cos 2\varphi\right) \quad (4.15)$$

Анализ второго уравнения системы (4.12) показывает, что левая его часть зависит только от x , а правая – только от y . Следовательно, они не зависят друг от друга и равны некоторой константе B :

$$F_1'(x)/F_1(x) = 2 \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin 2\mu} \cdot (\cos 2\mu - \cos 2\varphi) \varphi' = B \quad (4.16)$$

Это позволяет найти поочередно две функции $F_1(x)$ и $\varphi(y)$. Так после интегрирования получим

$$F_1(x) = B_1 \exp(Bx) \quad (4.17)$$

где B_1 – константа интегрирования. Объединяя вместе полученные решения уравнений (4.15) и (4.17), согласно уравнению (4.10) будем иметь

$$\omega(x, y) = B_1 \exp \left(B_x + \frac{\sin \alpha}{\cos^2 \alpha} \cdot \cos 2\varphi \right) \quad (4.18)$$

Учитывая, что $2\mu = \pi/2 - \alpha$, преобразуем второе равенство уравнения (4.16) к виду

$$\varphi' - \frac{\cos 2\varphi \varphi'}{\sin \alpha} = \frac{B}{2tg^2 \alpha}$$

Интегрируя это уравнение по y , получим

$$\varphi - \frac{\sin 2\varphi}{2 \sin \alpha} = B_2 + \frac{B_y}{2tg^2 \alpha} \quad (4.19)$$

где B_2 – константа интегрирования. Уравнение (4.19) не разрешимо относительно функции φ и является трансцендентным, поэтому с некоторым приближением примем $\sin 2\varphi \cong 2\varphi$ и получим

$$\varphi(y) = -\frac{1 + \sin \alpha}{2 \sin \alpha} \cdot (2tg^2 \alpha B_2 + B_y) \quad (4.20)$$

На границах, в месте контакта угольного целика с породами, при $y = \pm m/2$ функция (4.20) принимает значения

$$\varphi(\pm m/2) = -\frac{1 + \sin \alpha}{2 \sin \alpha} \cdot (2tg^2 \alpha B_2 \pm Bm/2) \quad (4.21)$$

Сравнивая выражения (4.6) и (4.21), находим константы интегрирования

$$\begin{cases} B_2 = \frac{\pi(\sin \alpha - 1)}{2 \sin \alpha} \\ B = \frac{2 \sin \alpha}{m(1 + \sin \alpha)} \cdot \left[\delta + \arcsin\left(\frac{\sin \delta}{\sin \alpha}\right) \right] \end{cases} \quad (4.22)$$

Таким образом, искомая функция φ имеет вид

$$\varphi(y) = \pi/2 - \left[\delta + \arcsin\left(\frac{\sin \delta}{\sin \alpha}\right) \right] \cdot \frac{y}{m} \quad (4.23)$$

Посредине мощности пласта при $y = 0$, функция $\varphi = \pi/2$ и формула (4.18) принимает вид

$$\omega(x, 0) = B_1 \exp\left(B_x - \frac{\sin \alpha}{\cos^2 \alpha}\right) \quad (4.24)$$

Константа интегрирования B_1 определяется из граничного условия вблизи обнаженной боковой поверхности пласта

$$\omega_0 = \frac{q + Kctg\alpha}{1 - \sin \alpha} \cdot \exp(4\chi tg\alpha) \quad (4.25)$$

где q – давление на контуре выработки, равное реакции крепи, кг/м²; K – коэффициент сцепления частиц угля между собой, кг/м²; χ – угол, образуемый линией скольжения с осью x и зависящий от угла δ .

Сравнивая формулы (4.24) и (4.25) при $x = 0$, найдем константу интегрирования B_1 :

$$B_1 = \frac{q + Kctg\alpha}{1 - \sin \alpha} \cdot \exp\left(4\chi tg\alpha + \frac{\sin \alpha}{\cos^2 \alpha}\right) \quad (4.26)$$

Подставим выражения (4.22) и (4.26) в формулу (4.24) и получим

$$\omega(x,0) = \frac{q + Kctg\alpha}{1 - \sin\alpha} \cdot \exp\left(4\chi tg\alpha + \frac{2\sin\alpha}{m(1 + \sin\alpha)} \cdot \left[\delta + \arcsin\left(\frac{\sin\delta}{\sin\alpha}\right)\right]x\right) \quad (4.27)$$

Нормальное напряжение найдем, используя вторую зависимость системы (4.2), при $y = 0$, в результате чего будем иметь

$$\sigma_y = (1 + \sin\alpha) \cdot \omega(x,0) \quad (4.28)$$

Среднюю разрушающую нагрузку на целик определяют как интеграл

$$P_p = \int_0^l \sigma_y dx \quad (4.29)$$

где l – ширина целика, м.

Эту нагрузку затем сравнивают с давлением пород на целик и по запасу прочности судят о надежности охранных целиков. Однако, несмотря на двух-трехкратный запас прочности уголь разрушается у краев, что сопровождается нередко горными ударами. Разрушение угля может иметь место в краевой части массива в подготовительной выработке, несмотря на многократный запас прочности при оценке по указанному методу. Более правильная оценка прочности краевой части пласта в данном случае может быть сделана при сравнении распределения напряжений вглубь массива с пределами прочности угля на сжатие. Это позволит установить область упругих и неупругих деформаций в угольном пласте с использованием разработанной математической модели.

4.2. Определение степени разрушаемости краевой части угольного массива в подготовительных горных выработках

Для практического использования полученных зависимостей можно с достаточной степенью точности можно применить линейную зависимость

$$\chi = 1,1 \cdot \delta \quad (4.30)$$

Эта зависимость тем точнее, чем меньше угол δ . Экспериментальные исследования угольных и породных образцов [98, 114, 122] показывают, что угол внутреннего трения α обычно не превышает 30° , а угол δ и того меньше (при расчетах принимаем $\delta = 0,5 \alpha$). Поскольку угол $\alpha \leq 30^\circ$, можно принять $\sin \alpha \approx \alpha$, $\sin \delta \approx \delta$.

Тогда зависимость (4.27) упрощается и принимает вид

$$\omega(x,0) = \frac{q + Kctg\alpha}{1 - \sin \alpha} \cdot \exp \left(4,4\delta tg\alpha + \frac{2\sin \alpha}{m(1 + \sin \alpha)} [\delta + \arcsin(\delta/\alpha)]x \right) \quad (4.31)$$

принимая, что $\delta = 0,5 \alpha$ получаем

$$\omega(x,0) = \frac{q + Kctg\alpha}{1 - \sin \alpha} \cdot \exp \left(2,2\alpha tg\alpha + \frac{(\alpha + \pi/3)\sin \alpha}{m(1 + \sin \alpha)} x \right) \quad (4.32)$$

Подставляя выражение (4.32) в формулу (4.28), имеем

$$\sigma_y = (q + Kctg\alpha) \cdot \frac{1 + \sin \alpha}{1 - \sin \alpha} \cdot \exp \left[2,2\alpha tg\alpha + \frac{(\alpha + \pi/3)\sin \alpha}{m(1 + \sin \alpha)} x \right] \quad (4.33)$$

Интегрируя выражение (4.33), найдем формулу для расчете разрушающей нагрузки на целик угля шириною x_0 :

$$P = (q + Kctg\alpha) \cdot \frac{m(1 + \sin \alpha)^2 \cdot \exp(2,2\alpha tg\alpha)}{(\alpha + \pi/3) \cdot \sin \alpha \cdot (1 - \sin \alpha)} \cdot \exp\left[\frac{(\alpha + \pi/3)\sin \alpha}{m(1 + \sin \alpha)} \cdot x_0 - 1\right] \quad (4.34)$$

где P – разрушающая нагрузка на целик, кг/м². Из этой формулы следует, чем шире целик, тем больше разрушающая нагрузка и тем больше запас прочности. Поэтому такой параметр как разрушающая нагрузка не может быть показателем прочности краевой части в подготовительных выработках.

Для поиска другого параметра прочности обозначим через N_1 и N_2 выражения, зависящие только от угла внутреннего трения α

$$N_1 = \frac{(\alpha + \pi/3)\sin \alpha}{(1 + \sin \alpha)}, \quad N_2 = \frac{(1 - \sin \alpha)}{(1 + \sin \alpha)} \cdot \exp(-2,2\alpha tg\alpha) \quad (4.35)$$

тогда вместо формулы (4.34), получим

$$P = \frac{m(q + Kctg\alpha)}{N_1 N_2} \cdot \left(\exp \frac{N_1 x_0}{m} - 1 \right) \quad (4.36)$$

В таблице 4.1 представлены результаты расчета по формулам (4.35) коэффициентов уравнения (4.36).

Таблица 4.1

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

Зависимость (4.36) является среднеинтегральным показателем разрушающей нагрузки на часть угольного массива шириною x_0 , содержащей как зону неупругих так и зону упругих деформаций. Для

выделения зоны неупругих деформаций представим формулу (4.33) с использованием выражений (4.35) в виде

$$\sigma_y = \frac{q + Kctg\alpha}{N_2} \cdot \exp(N_1 x / m) \quad (4.37)$$

Решим уравнение (4.37) относительно x и получим

$$x = \frac{m}{N} \cdot \ln \left(\frac{N_2 \sigma_y}{q + Kctg\alpha} \right) \quad (4.38)$$

Полученная формула позволяет определить необходимую ширину целика при заданной разрушающей нагрузке, имеющей запас прочности. Эта ширина может включать в себя как область упругих, так и неупругих деформаций. В область неупругих деформаций попадает краевая часть пласта, где нормальное напряжение σ_y будет меньше веса столба пород на глубине разработки пласта, т.е. $\sigma_y \leq \gamma H$, где γ – вес пород, кг/м³; H – глубина разработки пласта, м.

Поэтому подставляя значения $\sigma_y = \sigma_n = \lambda \gamma H$ и $x_0 = h$ в выражение (4.38), где λ – коэффициент пропорциональности, получим формулу для расчета ширины разрушаемой краевой части пласта

$$h = \frac{m}{N} \cdot \ln \left(\frac{N_2 \lambda \gamma H}{q + Kctg\alpha} \right) \quad (4.39)$$

Анализ зависимости (4.38) 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 стремится к минимальному (можно принять, $K = 0$) [98]. Большое значение

при этом имеет реакция крепи q , т/м². С ее уменьшением ширина разрушаемой краевой части увеличивается.

Рассмотрим пример расчета прочности краевой части угольного массива в подготовительной выработке в условиях ПАО «Шахта имени А.Ф. Засядько» при следующих исходных данных:

- глубина разработки $H = 1260$ м;
- мощность пласта $m = 2,00$ м;
- предел прочности угля на сжатие $\sigma_c = 2500$ т/м²;
- объемный вес пород $\gamma = 2,5$ т/м³;
- реакция крепи $q = 800$ т/м².

При этом экспериментально в лабораторных условиях НИИГД «Респиратор» найдены параметры огибающей главных наибольших кругов напряжений для угля: $\alpha = 30^\circ$; $\delta = 15^\circ$; $K = 500$ т/м².

Определим нагрузку на краевую часть пласта шириной $x_0 = 10$ м. полное среднее давление на 1 пог. м краевой части пласта составит:

$$P_{\phi} = \lambda \gamma H x_0$$

В результате при $\lambda = 3,8$, [9] используя исходные данные, получим

$$P_{\phi} = 3,8 \cdot 2,5 \cdot 1260 \cdot 10 = 119700 \text{ т/м.}$$

По формуле (4.36) с помощью таблицы 4.1 найдем разрушающую нагрузку на краевую часть пласта

$$P = \frac{2 \cdot (800 + 500 \cdot \operatorname{ctg} 30)}{0,524 \cdot 0,171} \cdot \left(\exp \frac{0,524 \cdot 10}{2} - 1 \right) = 255391 \text{ т/м.}$$

Сравнивая полученные величины, установим запас прочности краевой части пласта шириною 10 м

$$n = \frac{P}{P_{\phi}} = \frac{255391}{119700} = 2,13$$

Отсюда следует, что краевая часть пласта шириною 10 м имеет достаточный запас прочности, однако например, в условиях ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько» как правило, разрушается. Найдем ширину разрушаемой краевой части пласта по формуле (4.39), используя исходные данные

$$h = \frac{2}{0,524} \cdot \ln \left(\frac{0,171 \cdot 3,8 \cdot 2,5 \cdot 1260}{800 + 500 \cdot \operatorname{ctg} 30} \right) = 0,79 \text{ м.}$$

В зоне геологического нарушения разрушаемая краевая часть пласта будет еще больше и составит $h = 3,59$ м.

Таким образом, при исследовании степени разрушаемости краевой части угольного массива, более точную оценку дает дифференцированный подход, позволяющий выделить зону неупругих деформаций и тем самым определить ширину разрушаемой краевой части пласта в подготовительной выработке.

4.3 Разработка метода оценки пожароопасности краевой части угольного массива

Анализ условий возникновения эндогенных пожаров, особенно в условиях ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько» а также шахт «Краснодонугля», позволяет прийти к выводу, что они сосредоточены в определенных зонах:

- в выработанном пространстве лав в виде скоплений измельченного угля;
- в местах геологических нарушений при пересечении выработок;
- в лавах, где находятся барьерные и охранные целики угля;
- в полостях внезапных выбросов;

- в пустотах за крепью выработок со скоплениями разрыхленного угля;
- в местах обрушения кровли и сползания почвы в лавах;
- в местах обрушения горных выработок при обнажении вышерасположенных пластов и пропластков угля;
- в выработках со скоплениями угля и ветоши, смоченных минеральным маслом.

Опыт отработки пластов угля, склонного к самовозгоранию показывает, что даже в пожароопасных местах, при наличии скоплений измельченного угля и благоприятных условиях для теплонакопления самовозгорание угля бывает, не происходит. Поэтому прогноз возможности самовозгорания угля в потенциально опасных местах должен включать оценку критической мощности раздробленного угольного скопления. В тупиковых выработках критической мощностью угольного скопления является разрушенная краевая часть угольного массива. Она может быть установлена по исходным данным с использованием зависимости (4.33) и данных таблицы 4.1 по формуле (4.39):

$$h = \frac{m}{N_1} \ln \left(\frac{N_2 \lambda \gamma H}{q + K \operatorname{ctg} \alpha} \right)$$

Если окажется, что ширина разрушаемой краевой части пласта h больше 1 м, особенно в зоне возможных геологических нарушений, то необходимо приступить к прогнозу распределения температурных и концентрационных полей в зависимости от размеров разрушаемой краевой части пласта. Если будет установлено, что максимальная температура в краевой части пласта ниже критической температуры самовозгорания для данного угля, то эндогенный пожар в этих условиях маловероятен. И, наоборот, если расчетная температура превышает критическую, то самовозгорание угля возможно. При этом необходимо определить

инкубационный период самовозгорания – это время достижения температурой ее критического значения.

На основании изложенных предпосылок 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 по формулам (2.30) и (2.31) определяются коэффициенты скорости окисления угля и скорости теплообмена при испарении влаги. Далее находятся критерий Био:

$$B_i = \psi h^2 / a \quad (4.40)$$

и обобщенный критерий

$$K_p = \frac{kh^2}{(1 + k/\beta) \cdot D} \quad (4.41)$$

При этом входящие в формулы (4.40) и (4.41) 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 представленной на рисунке 4.3 и найденным критериям K_p и B_i , ходом ключа снизу вверх и налево определяется относительная

максимальная температура $\bar{T}_m$, после чего ожидаемая максимальная температура T_m , °C находится по формуле

$$T_m = T_0 + qC_0 L_u \bar{T}_m \quad (4.42)$$

где, как установлено ранее, произведение $qC_0 = 4,46 \cdot \text{К}$ и $L_u = 100$.

Если эта температура меньше критической, то расчет прекращается. В противном случае по графику (рис. 4.4) определяется координата $\bar{y}$ и определяется положение максимума температур в краевой части пласта $y_m = \bar{y} \cdot h$, h – ширина разрушаемой краевой части пласта, м.

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

$$\bar{T} = \frac{T_{кр} - T_0}{T_m - T_0} \quad (4.43)$$

и определяется критерий Предводителя

$$P_d = kh^2 / a \quad (4.44)$$

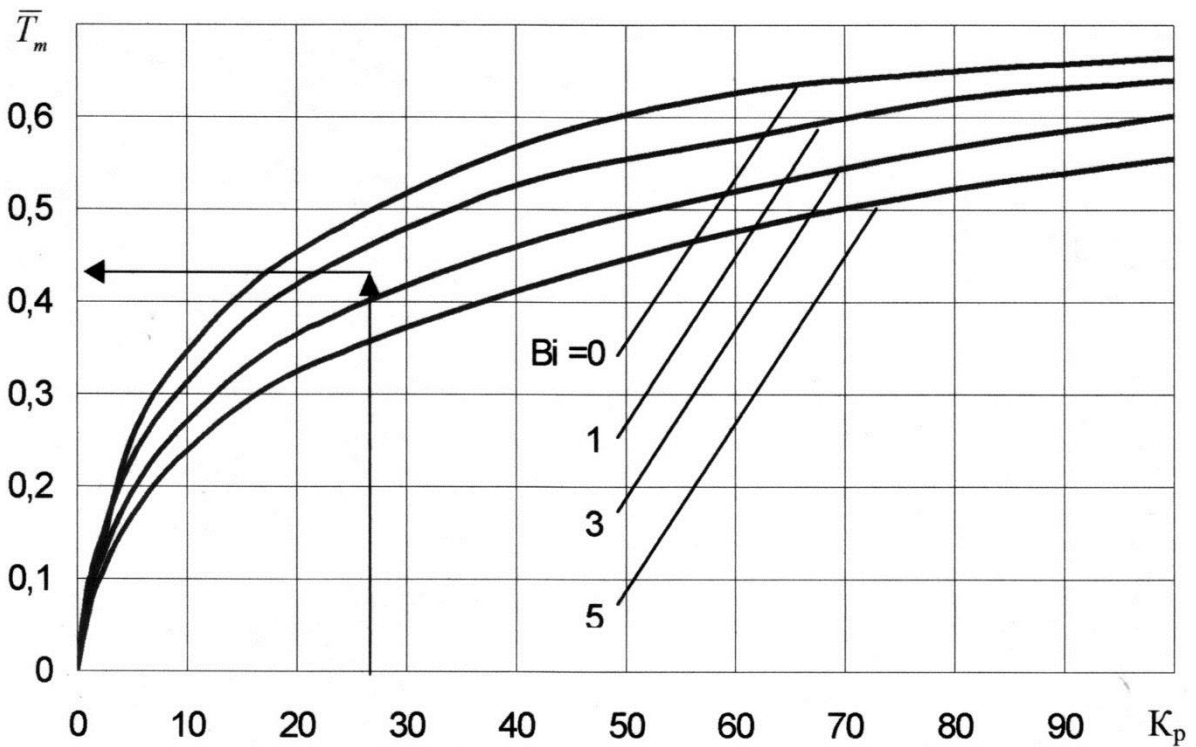


Рис.4.3. Номограмма для расчета ожидаемой относительной максимальной температуры в краевой части пласта

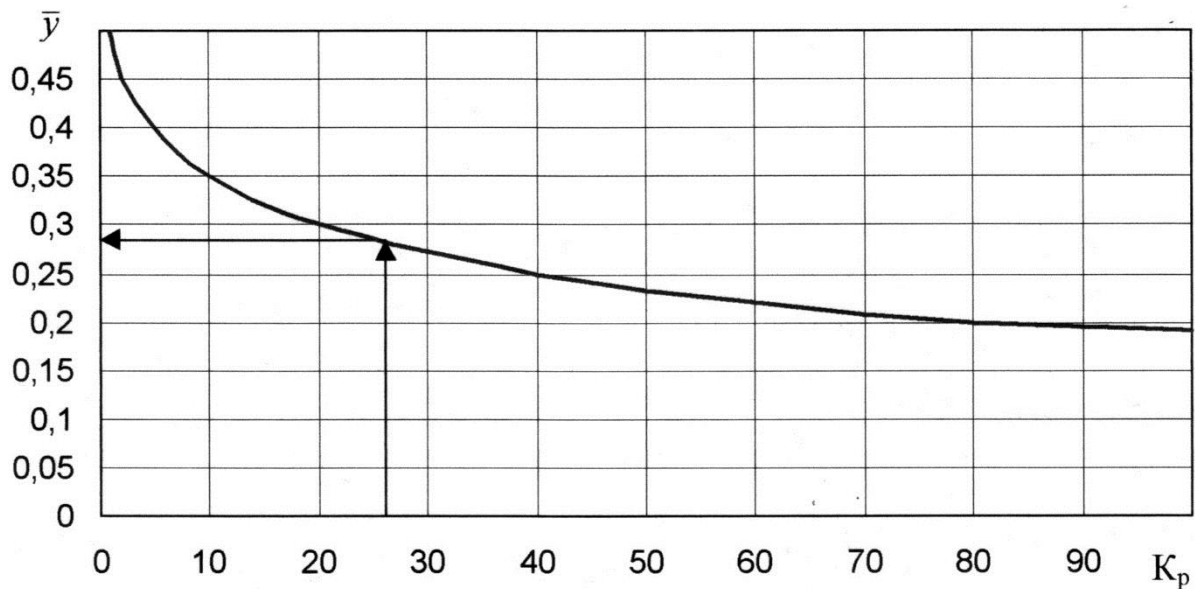


Рис. 4.4. Положение относительного максимума температуры в краевой части массива

Используя номограмму (рисунок 4.5) , по найденным параметрам $\bar{T}$ и критерия Предводителя P_d , ходом ключа слева направо и вниз отыскиваем

показатель критерия Фурье F_0 и определяем время инкубационного периода самовозгорания угля τ , сут, по формуле

$$\tau = h^2 / a = 57,9 F_0 \cdot h^2 \quad (4.45)$$

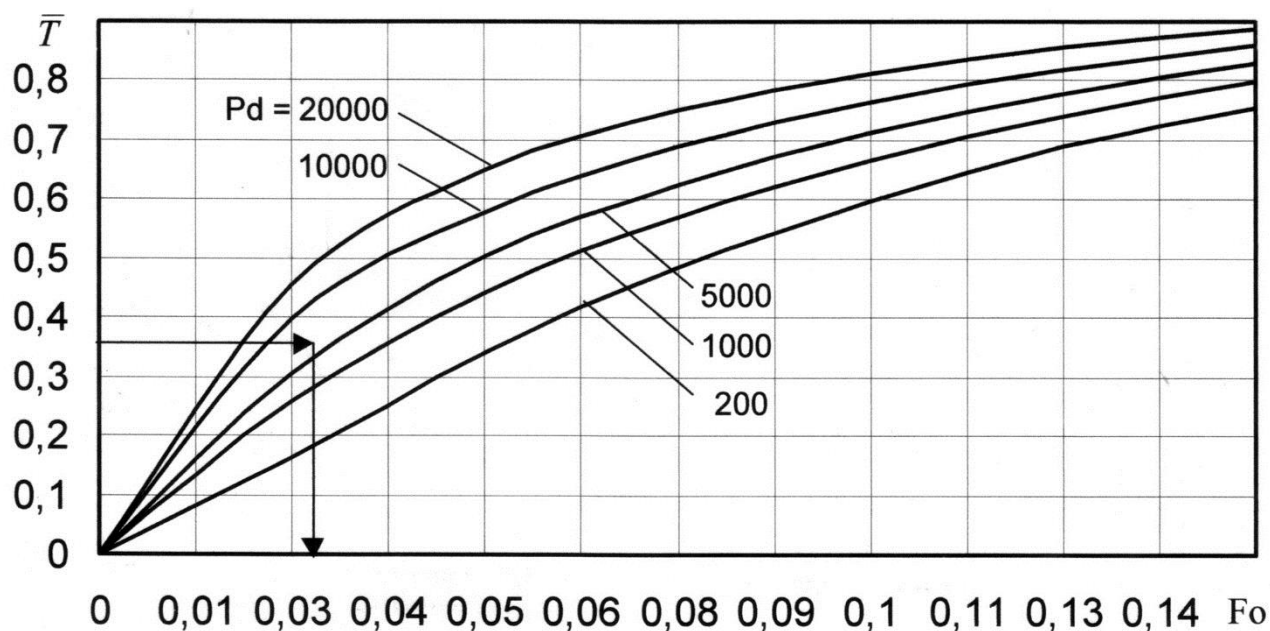


Рис. 4.5. Номограмма для прогноза инкубационного периода самовозгорания угля

С целью экспериментальной проверки разработанного метода оценки эндогенной пожароопасности в подготовительных выработках используем данные наблюдений по выработкам пласта m_3 ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько». Исходные данные для проведения прогноза следующие:

- ширина разрушаемой краевой части пласта $h = 3,59$ м;
- рабочая влажность угля $W_p = 2\%$;
- выход летучих $V_r = 40\%$;
- начальная температура угля и окружающих пород $T_0 = 45^\circ\text{C}$;
- критическая температура самовозгорания угля $T_{кр} = 110^\circ\text{C}$.

Определяем по формулам (2.30) и (2.31) соответственно константы скорости окисления угля и теплообмена при испарении влаги $k = 0,94 \cdot 10^{-4}$ 1/с и α или $\psi = 0,45 \cdot 10^{-7}$ 1/с. По формулам (4.40) и (4.41) находим значения критериев $B_i = 3$ и $K_p = 30$. По номограмме (рисунок 4.3) определяем

параметр $\bar{T}_m = 0,42$ и , используя формулу (4.42), находим ожидаемую максимальную температуру $T_m = 232^\circ\text{C}$. Так как ожидаемая максимальная температура больше критической, то в подготовительной выработке в краевой части угольного пласта возможно самовозгорание угля. Местонахождение максимальной температуры определим по графику (рисунок 4.4), найдя предварительно параметр $\bar{y} = 0,27$, откуда $y_m = 0,97$ м.

Для прогноза времени инкубационного периода самовозгорания предварительно по формуле (4.43) находим относительную температуру $\bar{T} = 0,35$ и по формуле (4.44) критерий Предводителя Pd = 6110. С помощью номограммы (рисунок 4.5) определяем число Фурье $F_0 = 0,033$, и в итоге устанавливаем по формуле (4.45) время достижения температуры критического значения $\tau = 25$ сут.

Сравнивая результаты прогноза с данными наблюдений на ГУП ДНР «Шахта им. А.Ф. Засядько» приходим к выводу, что они хорошо согласуются друг с другом. Так например, при ликвидации очагов самонагревания в 14-м западном штреке пласта m_3 и выемке угля из ниши на глубину до 2,4 м, максимальная температура в глубине пласта превышала 200°C , а инкубационный период составлял 1 месяц.

Экономический эффект определен из сравнения затрат на тушение и профилактику эндогенных пожаров до и после внедрения разработанного метода прогноза. Данные о затратах за два года на тушение и профилактику эндогенных пожаров представлены в табл.4.5. Прямые убытки от эндогенных пожаров (на ликвидацию аварии, от потери оборудования, добычи и горных выработок) подсчитанные шахтами, выбраны из карточек учета аварий. Затраты на профилактику эндогенных пожаров (материалы, заработная плата, электроэнергия, амортизация) определены по формуле

$$Y_{\pi} = (Z_{\text{ш}} + Z_{\text{сy}} + Z_{\text{кнс}}) \cdot K_{\text{э}}, \quad (4.45)$$

где $Z_{ш}$ – затраты участка противопожарной службы шахты на профилактику эндогенных пожаров;

$Z_{су}$ – затраты на профилактику специализированных управлений;

$Z_{кнс}$ – затраты контрольно-наблюдательной службы;

K_3 – коэффициент, учитывающий эффект от кругооборота экономии эксплуатационных издержек.

Экономический эффект от внедрения метода на 12 выемочных участках 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.

Таблица 4.2 – Затраты на тушение и профилактику эндогенных пожаров

Шахта	Пласт	Затраты на года на тушение и профилактику эндогенных пожаров			
		До внедрения профилактических мероприятий		После внедрения профилактических мероприятий	
		прямые убытки, тыс. рос. рублей	затраты на профилактику, тыс. рос. рублей	прямые убытки, тыс. рос. рублей	затраты на профилактику, тыс. рос. рублей
им. А.А. Скочинского	h_6^1	-	646,4	-	191,2
им. А.Ф. Засядько	m_3	-	395,5	-	56,2
им. Н.П. Баракова	k_5^H	-	487,4	-	40,2
“Самсоновская-Западная”	$k_2^B-k_2$	-	371,4	-	44,0
“Суходольская-Восточная”	i_3^1	-	202,2	-	35,1
«Молодогвардейская»	$k_2^B-k_2$		644,2		135,2
Итого		-	2747,1	-	501,9

4.4. Выводы

Разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния краевой части угольного пласта на больших глубинах в подготовительных выработках, в основу которой положены дифференциальные уравнения равновесия сил, приложенных к полосе большой ширины. Получены аналитические зависимости для определения напряженного состояния краевой части пласта и предельно допустимой нагрузки с учетом реакции крепи в подготовительной выработке и сцепления частиц угля между собой, характеризующего степень геологических нарушений пласта. В результате сравнения предельно допустимой нагрузки с давлением пород на целик угля установлено, что несмотря на двух-трехкратный и более запас прочности, уголь все равно будет разрушаться у краев, что подтверждается на практике. Указано, что более правильная оценка прочности краевой части пласта в данном случае может быть сделана при сравнении распределения напряжений вглубь массива с пределами прочности угля на сжатие. При математическом моделировании установлены области упругих и неупругих деформаций в угольном пласте и определена граница их раздела.

Предложены упрощенные формулы и таблицы для определения углов линий скольжения и коэффициентов, связанных с углами внутреннего трения внутри массива и на его границах с породами. Получена аналитическая зависимость для расчета ширины разрушаемой краевой части пласта в функции от углов внутреннего трения, мощности пласта, реакции крепи и степени геологического нарушения. На примере ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько» установлено, что на глубине разработки 1200 м и более, разрушаемая краевая часть пласта в подготовительных выработках достигает до 1 м, а в зонах геологических нарушений – до 4 м и более.

Разработан номограммный метод оценки пожароопасности, основанный на результатах математического моделирования напряженно-

деформированного состояния и теплофизических процессов в краевых частях угольного массива в подготовительных выработках. 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.

Установлено расчетным методом на примере ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько», что в краевой части угольного пласта подготовительных выработок на больших глубинах ожидаемая максимальная температура может достигать 200°C и более, а время инкубационного периода самовозгорания угля составляет около одного месяца.

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 для 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 взаимосвязь 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 ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Физические основы самовозгорания угля и руд / В.С. Веселовский, Л.П. Виноградова, Г.Л. Орлеанская и др. - М.: Наука, 1972. - 197 с.
2. Самовозгорание промышленных материалов / В.С. Веселовский, Н.Д. Алексеева, Л.П. Виноградова и др. - М.: Наука, 1964. - 247 с.
3. Глузберг, Е.И. Теоретические основы прогноза и профилактика шахтных эндогенных пожаров / Е.И. Глузберг - М.: Недра, 1986. - 160 с.
4. Лыков, А.В. Тепломассообмен / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
5. Захаров, Е.И. Научные основы борьбы с самовозгоранием угля в шахтах / Е.И. Захаров // Сб. «Геология, поиски и разведка твердых горючих ископаемых». Тула: Тульский политехнический институт, 1986. - С. 35-42.
6. Печук, И.М. Эндогенные пожары в Донецком бассейне / И.М. Печук, В.М. Маевская, М.: Углетехиздат, 1954. – 276 с.
7. Глузберг, Е.И. Математические модели медленно окисляющихся материалов / Е.И. Глузберг // Сб. «Применение математических методов исследования в вопросах пожарной охраны». - М.: Недра, 1982. - С. 51-53.
8. Захаров, Е.И. Аналитические исследования развития самонагревания угольных скоплений в начальной стадии эндогенного пожара / Е.И. Захаров, И.В. Панферова, С.В. Шкловер // Сб. «Дифференциальные уравнения и прикладные задачи». – Тула: Тульский политехнический институт, 1986. - С. 100-107.
9. Математическая модель аэродинамики выработанных пространств очистных забоев с учетом влияния на нее тепловой депрессии при самонагревании угля / М.З. Двейрин, А.Е. Калюсский, А.И. Лагутин и др. // сб. науч. тр. «Борьба с подземными пожарами». Кемерово: ВО ВНИИГД, 1990. - Вып. 12. - С. 89-101.
10. Саранчук, В.И. Теоретические основы самовозгорания угля / В.И. Саранчук, Х.А. Баев, - М.: Наука, 1976. 151 с.

11. Маевская, В.М. Исследование теплового баланса процесса самовозгорания углей / В.М. Маевская, Л.П. Белавенцев // Изв. вузов. Горный журн. 1967. - № 7. - С. 54-58.
12. Инкубационный период самовозгорания углей / В.Я. Альперович, Г.И. Чунту, П.С. Пашковский и др. // Безопасность труда в промышленности. - 1973.-№ 9. - С. 43-44.
13. Прогноз и профилактика эндогенных пожаров / В.С. Веселовский, Л.П. Виноградова, Е.А. Терпегосова и др. - М.: Недра, 1975. - 160 с.
14. Горшков, В.И. Самовозгорание веществ и материалов / В.И. Горшков. – М.: ВНИИПО, 2003. – 446 с.
15. Лазаров, Л. Структура и реакции углей / Л. Лазаров, Г. Ангелова. – София: Издательство Болгарской академии наук, 1990. – 232 с.
16. Крикунов, Г.Н. О критических размерах скоплений самовозгорающихся материалов / Г.Н. Крикунов, А.М. Зайцев // Изв. вузов. Горный журн., 1977. № 8. - С. 45-48.
17. Линденау, Н.И. Происхождение, профилактика и тушение эндогенных пожаров в угольных шахтах / Н.И. Линденау, В.М. Маевская, В.Ф. Крылова, М.: Недра, 1977. - 319 с.
18. Альперович, В.Я. Определение скорости хемосорбции кислорода углями / В.Я. Алтперович, Г.И. Чунту, П.С. Пашковский// Химия твердого топлива. – 1975. - № 6. – С. 124-127.
19. Каледин, Н.В. Тушение эндогенных пожаров на шахтах / Н.В. Каледин, П.С. Пашковский, М.: ЦНИЭИуголь, 1984. - 48 с. – Серия "Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело": Обзорная информация; Вып.3.
20. Определение критического для самовозгорания угля содержания кислорода / Н.В. Каледин, П.С. Пашковский, А.Е. Калюсский и др. // Совершенствование методов и средств ведения горноспасательных работ: Сб.науч.тр. – Донецк: ВНИИГД, 1985. – С. 64-69.

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

22. Пашковский, П.С. Математическое описание фильтрационных и тепловых процессов в выработанных пространствах шахт при самонагревании угля / П.С. Пашковский, 1992. - 15 с. - Деп. рукопись, ЦНИЭИуголь, № 5377 от 22.04.92.

23. Вылегжанин, В.Н. О влиянии механических процессов на формирование очагов эндогенных пожаров / В.Н. Вылежанин, Вл.Н Вылежанин // Физико-техн. пробл. разраб. полезных ископаемых. – 1982. - № 2. – С. 84-89.

24. Вылегжанин, В.Н. Сорбционно-диффузионно-фильтрационные процессы тепломассообмена при эндогенных пожарах / В.Н. Вылежанин, Вл.Н Вылежанин // Физико-техн. пробл. разраб. полезных ископаемых. – 1978. - №3. – С. 83-87.

25. Бонецкий В.А. Классификация и оценка выемочных полей по фактору эндогенной пожароопасности / В.А. Бонецкий, В.Д. Богатырев, С.П. Казаков // Физико-техн. пробл. разраб. полезных ископаемых. - 1981. - № 5. - С. 72 -76.

26. Бонецкий, В.А. О математической модели низкотемпературного окисления угольного скопления / В.А. Бонецкий, А.С. Богатырева, В.В. Егшин // Физико-техн. пробл. разраб. полезных ископаемых. - 1976. - № 6. - С. 106 -111.

27. Пашковский, П.С. Локальный прогноз эндогенной пожароопасности выемочного участка в процессе ведения горных работ / П.С. Пашковский, И.А. Шайтан, И.Н. Коваль // Уголь Украины. – 1992. - № 11. – С. 17-19.

28. Чунту, Г.И. Склонность углей к самовозгоранию и ее прогноз / Г.И. Чунту, В.Я. Альперович, П.С. Пашковский // Безопасность труда в промышленности. 1972. - № 10. - С. 27-29.

29. Борьба с самовозгоранием угля на шахтах / А.И. Козлюк, Н.В. Каледин, Г.И. Чунту и др. – Донецк: Донбасс, 1982. – 120 с.

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

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

32. Скочинский, А.А. Рудничные пожары / А.А. Скочинский, В.М. Огиевский, М.: Углетехиздат, 1954. – 387 с.

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

34. Линденау, Н.И. Происхождение, профилактика и тушение эндогенных пожаров на угольных шахтах // Н.И. Линденау, В.М. Маевская, В.Ф. Крылов – М.: Недра, 1977. – 320 с.

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

36. Пожары и пожарная безопасность в 2016 году: статистический сборник / Под общей редакцией Д.М. Гордиенко. – М.: ВНИИПО, 2017.– 124 с.

37. Чернов, О.И. Критический объем сухих и увлажненных углей / О.И. Чернов, В.С. Черкасов, Н.П. Миронов // Физико-техн. пробл. разраб. полезных ископаемых. -1968.- №2.- С. 48-55.

38. Чарков, В.П. Тушение очагов пожара в куполах выработок воздушно-механической пеной / В.П. Чарков // Предупреждение локализация

аварий на угольных шахтах: Сб.ст. – Киев: Техника, 1964. – Вып. 1. – С. 59-68.

39. Глузберг, Е.И. Комплексная профилактика газовой и пожарной опасности в угольных шахтах / Е.И. Глузберг, Н.Ф. Гращенков, В.С. Шалаев, М.: Недра, 1988. –181 с.

40. Глузберг, Е.И. Самонагревание слоевого скопления угля на почве / Е.И. Глузберг // Изв. вузов. Горный журнал. - 1980. - № 6. - С. 43-47.

41. Борьба с эндогенными пожарами при отработке мощных крутых пластов / В.Г. Игишев, В.И. Лагутин, Д.И. Мальцев и др. // Безопасность труда в пром-сти. - 1982. - № 3. - С. 10-12.

42. Кок, Ф.И. Горноспасательная служба и борьба с подземными пожарами в горной промышленности ФРГ / Ф.И. Кок // Глюкауф. 1985. - № 1. - С. 20-22.

43. Мюллер, Р. Подавление эндогенного пожара в выработанном пространстве инертизацией атмосферы азотом / Р. Мюллер // Глюкауф. 1976. - № 2. - С. 26-34.

44. Баренблатт, Г.И. Теория нестандартной фильтрации жидкости и газа / Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, В.М. Рыжик - М.: Недра, 1972. - 288 с.

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

46. Кара, В.В. Упрочнение пород в очистных забоях с помощью вспенивающихся пластмасс / В.В. Кара, В.К. Сальников // Уголь Украины, 1976. - С. 17-19.

47. Леман, Г. Инертные газы для борьбы с подземными пожарами / Г. Леман // Глюкауф. - 1979. -№ 8. - С. 57-60.

48. Осипов, С.Н. Применение инертных газов при ликвидации подземных пожаров / С.Н. Осипов. - Киев: Техника, 1973. - 172 с.

49. Briggs, A.A. Use of nitrogen-filled high expansion foam to protect a 100 tonne fuel tank / A.A. Briggs // Fire research note. - 1074. - August, 1977. - P.8.

50. Зборщик, М.П. Предотвращение самонагревания горных пород / М.П. Зборщик, В.В. Осокин, Киев: Техника, 1990. - 176 с.

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

52. Тушение подземных пожаров инертной пеной на основе жидкого азота / А.И. Козлюк, В.П. Чарков, Г.М. Шецер и др. // Безопасность труда в пром-сти. -1961.- № 3. С. 8-10.

53. Gijbels, M.R. Spontaneous ignition time underground / M.R. Gijbels, T. Brüning // Erdöl und Kohle-Erdgas-Petrochem. 1982. - Vol.35, - № 8. - P. 376-379.

54. Куглер, У. Ликвидация пожара на шахте "Остерфельд" с применением азота / У. Куглер, А. Шевер // Глюкауф. 1975. - № 10. - С. 4-11.

55. Канторович, В.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива / В.В Канторович. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 598 с.

56. Improvements in relating to fire fighting. Nam. 1062771 - Int. - C. – b1C. – London. – 1967.

57. Игишев, В.Г. Прогноз эндогенной пожароопасности выемочных полей по многим параметрам / В.Г. Игишев // Уголь, 1974. - № 4. - С.56-59.

58. Устинов, А.М. Прогнозные особенности развития эндогенных пожаров / А.М. Устинов, О.Г. Буркене, В.А. Горбатов // Безопасность труда в промышленности. - 1985. - № 8. - С. 51-55.

59. Анализ аварийности на предприятиях Минуглепрома СССР за 1990 г. - Донецк: ВНИИГД, 1991. - 206 с.

60. Применение карбамидного пенопласта МФП-Б для герметизации кроссинга / Б.А. Негриенко, К.А. Теличко, П.С. Пашковский и др. // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. – 1976. - № 6. – С. 13-15.

61. Сальников, В.К. Испытание нового пенопласта на пожаростойкость / В.К. Сальников, А.И. Исачкин // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. – 1976. - № 7. – С. 5-6.

62. Солоницын, Е.М. Механизированное заполнение куполов и пустот за крепью твердеющей пеной / Е.М. Солоницын, В.К. Кульбачко // Уголь Украины, 1985. - № 4. - С. 22-23.

63. Феклов, А.И. Исследование утечек воздуха через пенопластовые перемычки / А.И. Феклов // Изв. вузов. Горный журнал. 1975. - № 4. - С. 17-18.

64. Харбуш, Г. Экономическое использование пластмасс в каменно-угольной промышленности / Г. Харбуш // Глюкауф. 1974. - № 6. - С. 25-28.

65. Феклов, А.И. Изоляция горных выработок пенопластом на Салаирском руднике / А.И. Феклов, М.К. Пауль // Изв. вузов Горный журнал 1976. - № 3. - С. 17-18.

66. Лукьянов, П.Ф. Возведение изолирующих перемычек из фенольных пенопластов / П.Ф. Лукьянов, В.А. Калмыков, АюИ. Феклов // Безопасность труда в пром-сти, 1975. - № 7. - С. 31-32.

67. Кушнарев, А.М. Применение карбамидного пенопласта для изоляции пожарных участков на шахтах Донбасса / А.М. Кушнарев, О.В. Сенкевич, Б.А. Негриенко // Безопасность труда в пром-ти. – 1969. - № 11. – С. 3-4.

68. Гросман, Р. Применение изопены для затяжки при проведении пластовых штреков / Р. Гросман // Глюкауф. 1976. - № 6. - С. 25-28.

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

70. Еременко, С.А. Задачи нестационарной теплопроводности при самонагревании сырья пластовыми очагами / С.А. Еременко, В.П. Ольшанский. – Харьков: ХНАДУ, 2003. – 164 с.

71. Семенов, Н.Н. Тепловая теория горения и взрывов / Н.Н. Семенов, В кн.: Теория горения и взрывов. – М.: Наука, 1981. 33 – 140 с.

72. Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д.А. Франк-Каменецкий. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Наука, 1967. – 492 с.

73. Брунауер, С. Адсорбция газов и паров / С. Брунауер. Т.1. - М.: Изд-во иностр.лит., 1948. - 782 с.

74. Березовский, А.А. Математическое моделирование процессов самовозгорания промышленных материалов / А.А. Березовский, С.П. Греков, Я. Цыганкевич // Физико-технические и технологические приложения математического моделирования: Сб. статей. – Киев: Институт математики НАН Украины. 1999. – С. 27 – 31.

75. Греков, С.П.. Математическая модель процесса самонагрева угля / С.П. Греков, Я. Цыганкевич, А.А. Березовский, Б.И. Кошовский // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 2001. – С. 33 – 46.

76. Пашковский, П.С. Математическая модель газотеплообменных процессов в слое зернистого материала / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко, Г.Б. Тында // Горноспасательное дело: Сб. науч. Тр. / НИИГД. – Донецк, 2005. – С. 5 – 14.

77. Саранчук, В.И. Теоретические основы самовозгорания угля / В.И. Саранчук, Х.А. Баев, М.: Недра, 1976. –151 с.

78. Березовский, Н.А. Математические модели процессов диффузии, сопровождаемой абсорбцией и химическими реакциями / Н.А. Березовский // Нелинейные краевые задачи математической физики и их приложения. – Киев: Ин-т математики НАН Украины, 1998. – С.29 – 31.

79. Греков, С.П. Кинетика гетерогенного окисления слоя угля и его самонагрева / С.П. Греков, И.Н. Зинченко, Г.Б. Тында, Е.А. Головченко // Горноспасательное дело: Сб. науч. Тр. / НИИГД. – Донецк, 2005. – С. 15 – 21.

80. 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.

81. Пашковский, П.С. Природа критической температуры самовозгорания угля / П.С. Пашковский, Б.И. Кошовский, В.Ф. Липницкий // Рабочее совещание по проблемам техники безопасности и охраны окружающей среды при подземной добыче угля: Доклад. – Польша, 1995. – С. 291-297.

82. Буркина, Р.С. Очаговое тепловое воспламенение в пористой среде в условиях естественной фильтрации газа / Р.С. Буркина, Е.А. Козлов // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37, № 2. – С. 35 – 41.

83. Пашковский, П.С. Определение склонности углей к самовозгоранию / П.С. Пашковский, С.П. Греков, Я. Цыганкевич, И.А. Шайтан // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 2000. – С. 10 – 16.

84. 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.

85. 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.

86. Белолипецкий, В.М. Некоторые вопросы теории фильтрации и гидродинамической устойчивости: учебное пособие по практическим занятиям / В.М. Белолипецкий, В.Б. Бекежанова. – Красноярск: ФГОУВПО «Сибирский федеральный университет», 2007. – 55 с.

87. Маскет, М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. – пер. с англ. М.А. Геймана. – Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. – 628 с.

88. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкостей и газов / Л.Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

89. Греков, С.П. Расчёт пожаробезопасных скоростей фильтрации воздуха через угольное скопление / С.П. Греков, И.Н. Зинченко, Г.Б. Тында // Горноспасательное дело: сб. науч. Тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2006. – Вып. 43. – С. 24 – 29.

90. 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.

91. 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.

92. 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.

93. 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.

94. 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.

95. Греков, С.П. Математическая модель динамики адсорбции кислорода слоем 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.

96. Греков, С.П. Экспериментальные исследования динамики адсорбции кислорода слоем газонасыщенного угля / С.П. Греков,

Е.А. Головченко, М.А. Белокобыльский, // Вестник Академии гражданской защиты Донбасса: науч. журн. – 2022. – Вып. №3(31). – В печати С. 21-25.

97. Греков, С.П. Параметры низкотемпературного окисления угля разной степени метаморфизма / С.П. Греков, В.П. Орликова // Сб. науч. тр. НИИГД «Респиратор», №3(59). - 2022. - С.

98. Пашковский, П.С. Эндогенные пожары на угольных шахтах. Ноулидж, 2013, с.791.

99. Греков, С.П. Тепловой эффект окисления углей и эндогенная пожароопасность / С.П. Греков, П.С. Пашковский, В.П. Орликова // Уголь Украины. – 2014. - №10. - С. 46–50.

100. Пашковский П.С. Актуальные вопросы борьбы с самовозгоранием угля: сб. науч. тр. / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко. – Донецк: ЧП «Арпи», 2012. – 656 с.

101. Глузберг, Е.И. Физический критерий эндогенной пожароопасности / Е.И. Глузберг // Предупреждение, обнаружение и тушение эндогенных пожаров: Сб. науч. Ст. / ВНИИГД. - Донецк, 1978.-С.63-64.

102. Бобин, В.А. Термодинамика сорбции и структура углей / В.А. Бобин // Физико-техн. пробл. разраб. полезных ископаемых. – 1992. - №6. - С.75-81.

103. Вылегжанин, В.Н. Сорбционно-фильтрационные процессы тепломассообмена при эндогенных пожарах / В.Н. Вылегжанин, Вл.Н. Вылегжанин // Физико-техн. пробл. разраб. полезных ископаемых. - 1978. - №3. - С.83-87.

104. Саранчук, В.И. Окисление и самовозгорание угля / В.И. Саранчук. – Киев: Наукова думка, 1982. - 164 с.

105. 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.

106. Экспертная система оценки эндогенной пожароопасности при разработке угольных месторождений / Е.И. Захаров и др. //

Дифференциальные уравнения и приклад.задачи: Сб.ст. – Тула: ТПИ, 1986. – С. 91-97.

107. Матвеев В.В. Экспертно-статистический метод корректировки прогноза эндогенной пожароопасности на угольных шахтах / В.В. Матвеев, Ю.М. Казаков // Изв.вузов.: Горный журнал.-1998.-№1-2.-С.105-108.

108. 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.

109. Головченко, Е.А. Разработка алгоритма предупреждения самовозгорания угольного скопления на выемочном участке / Е.А. Головченко, Д.И. Момот, М.А. Белокобыльский // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. Журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общ. Ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2022. – №8. – С. 398-401.

110. Альперович, В.Я. Прогноз склонности углей к самовозгоранию по данным их испытаний в хроматографическом режиме / В.Я. Альперович, Г.И. Чунту, П.С. Пашковский // Горноспасательное дело: Сб.науч.тр./ ВНИИГД.- Донецк, 1973. - Вып.7 – С. 12-15.

111. . Скочинский, А.А. Исследования о применении антипирогенов при борьбе с рудничными пожарами / А.А. Скочинский, С.З. Макаров. - М.: Л.: Изд-во АН СССР, 1947. - 238 с.

112. Пащенко, Л.В. Рентгеноструктурные исследования углей Донбасса / Л.В. Пащенко, В.И. Саранчук, Е.К. Ковалев, Л.М. Крыхина // Химия твердого топлива. - 1992. - № 2. - С.9-15.

113. Пашковский, П.С. Исследование процесса низкотемпературного окисления углей и разработка методов оценки их пожароопасности в скоплениях: Автореф.дис. ...канд.техн.наук.-М., 1977.- 15 с.

114. Руппенейт, К.В. Некоторые вопросы механики горных пород / К.В. Руппенейт. – Москва: Углетехиздат, 1954. – 384 с.

115. Саранчук, В.И. Предупреждение самовозгорания породных отвалов угольных шахт и обогатительных фабрик / В.И. Саранчук, В.К. Раскидкин // В кн. Борьба с горением породных отвалов и рекультивация земель. М., ЦНИЭИуголь, 1975 .- С. 1-6.

116. Пашковский, П.С. Роль электрохимических процессов в развитии очага самонагревания угля // П.С. Пашковский, В.М. Кравец // Уголь Украины. – 1995. - № 6. - С.38-39.

117. Захаров, А.Б. Склонность угля к самовозгоранию и опасность самовозгорания угольных пластов / А.Б. Захаров, Ф.Ф. Эйнер // Уголь. - 1972. - № 1. - С.53-55.

118. Горбатов, В.А. Прогноз температуры нагревания угля в выработанном пространстве действующего выемочного участка аналитическим методом / В.А. Горбатов, Г.А. Немкин, Н.В. Плохотнюк, А.М. Рыков // Борьба с подземными пожарами: Сб.науч.тр. / ВостНИИ-Кемерово, 1990.-№ 12.-С.85-89.

119. Панферова, В.И. Прогнозная модель самовозгорания угля / В.И. Панферова // Подземные разработки тонкой и средней мощности угольных пластов / Тульский политехнический институт. – Тула, - 1992. - С. 82-88.

120. Кошовский, Б.И. Природа критической температуры самовозгорания угля / Б.И. Кошовский, А.Н. Заборская, В.В. Липницкий // Горноспасательное дело: Сб.науч.тр. / НИИГД.–Донецк, 1994. - С. 104-108.

121. Петров, В.В. Математическое моделирование теплофизических процессов в краевой части угольного пласта / В.В. Петров // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 2002. – С. 65-73.

122. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1974. – 640 с.