

На правах рукописи



Шлапаков Павел Александрович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В
УГОЛЬНОМ МАССИВЕ, ВЫРАБОТАННОМ ПРОСТРАНСТВЕ
И АТМОСФЕРЕ ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКОВ С ОЧАГАМИ
САМОНАГРЕВАНИЯ**

Специальность 25.00.20 — «Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово — 2018

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» (АО «НЦ ВостНИИ»), г. Кемерово

Научный руководитель **Черданцев Сергей Васильевич**
доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник
лаборатории эндогенных пожаров
АО «НЦ ВостНИИ»

**Официальные
оппоненты** **Ордин Александр Александрович**
доктор технических наук, заведующий
лабораторией подземной разработки
угольных месторождений
ФГБУН «Институт горного дела
им. Н.А. Чинакала» СО РАН,
г. Новосибирск

Стрижак Павел Александрович
доктор физ.-мат. наук, профессор,
профессор ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский политехнический
университет», г. Томск

Ведущая организация ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»,
г. Москва

Защита состоится 01 ноября 2018 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.02 в Федеральном государственном образовательном бюджетном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева», и на сайте <http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2018/shl/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан « » сентября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



В. В. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие угольной отрасли в последние годы отмечено стабильным повышением технико-экономических показателей, что обусловлено использованием современного горно-шахтного оборудования и совершенствованием технологии очистных и подготовительных работ.

Однако существует ряд факторов, сдерживающих увеличение добычи угля подземным способом. Основным из них является процесс самонагревания угля, представляющий собой сложный процесс, обусловленный химической кинетикой протекания реакций окисления углеродосодержащих веществ и физическими процессами тепломассопереноса. Другим фактором является угольная пыль, образующаяся при работе горно-шахтного оборудования, которая, взаимодействуя с атмосферой горных выработок, образует пылегазовоздушные смеси (ПГВС), способные к химическому реагированию.

Для обнаружения очагов самонагревания на шахтах, как правило, используются газоаналитические методы, которые, однако, не позволяют произвести точную локацию очагов самонагревания, в связи с чем их ликвидацию приходится производить на значительных площадях, что является существенным недостатком газоаналитических методов.

Кроме газоаналитических, в настоящее время применяются методы шахтной электроразведки, основанные на исследовании естественного электрического поля. Среди методов электроразведки нам представляется наиболее эффективным метод экваториально-дипольного электропросвечивания, который нами уже эффективно применялся для локации очагов самонагревания на ряде шахт Кузбасса.

Очаги самонагревания, характеризующиеся повышенной температурой, приводят к изменению температурного поля в угольных целиках и породугольных скоплениях, в том числе и пород, окружающих очистную выработку, что, в свою очередь, способствует повышению температуры пылегазовоздушных смесей в очистной выработке и существенно увеличивает их предрасположенность к зажиганию и горению.

Процессы зажигания и горения достаточно хорошо изучены, а библиография по этой тематике весьма обширна, но посвящена она, главным образом, сжиганию углеродосодержащих веществ в специальных энергетических установках и в котельных агрегатах на тепловых электрических станциях. Процессы же зажигания и горения ПГВС в условиях горных выработок на угольных шахтах менее изучены, что обусловлено спецификой зажигания и горения ПГВС. Главное отличие заключается в том, что в процессе движения фронта горения ПГВС в горных выработках создаются критические условия горения, переходящие при определенных условиях в волны детонации и последующему взрыву, который в условиях угольных шахт носит катастрофический характер.

Наиболее крупные катастрофы с человеческими жертвами произошли на шахтах Ульяновской (г. Новокузнецк) и Распадской (г. Междуреченск) и унесли жизни более двухсот человек.

В связи со сказанным нам представляется, что выявление закономерностей процесса тепломассопереноса в угольных целиках и породоугольных скоплениях, содержащих очаги самонагревания, анализ процессов зажигания и горения ПГВС смесей, движущихся в воздушных потоках горных выработок, является актуальной задачей, имеющей важное научное, экономическое и социальное значение.

Исследования проводились в соответствии с Государственным контрактом № 146-ГК/2011 от 11 ноября 2011 г. «Разработка проекта Инструкции по прогнозу и локации очагов самонагревания угля в шахтах» в рамках реализации федеральной целевой программы «Пожарная безопасность в Российской Федерации на период до 2012 года».

Цель работы состоит в определении параметров процессов тепломассопереноса, обеспечивающих локацию очагов самонагревания и безопасность на выемочных участках угольных шахт.

Объект исследования — угольные целики, примыкающие к воздухоподающим выработкам, породоугольные скопления в выработанных пространствах и пылегазовоздушные смеси в атмосфере выемочных участков.

Предметом исследования являются закономерности процессов тепломассопереноса в угольных целиках, породоугольных скоплениях и микрогетерогенных пылегазовоздушных смесях, находящихся в атмосфере выемочных участков с очагами самонагревания.

Идея работы заключается в использовании метода экваториально-дипольного электропросвечивания для локации очагов самонагревания и установлении закономерностей их влияния на процессы тепломассопереноса в угольных целиках, породоугольных скоплениях и атмосфере выемочных участков.

Задачи исследования:

- на основе геофизических измерений определить температуру в очагах самонагревания;
- выявить закономерности температурных полей в выработанных пространствах выемочных участков при наличии очагов самонагревания;
- определить параметры и установить закономерности процессов зажигания и горения микрогетерогенных пылегазовоздушных смесей в атмосфере горных выработок.

Методы исследования:

- метод экваториально-дипольного электропросвечивания для локации очагов самонагревания и определения температуры очагов самонагревания;
- лабораторные методы для определения параметров пылегазовоздушных

смесей на основе проб воздуха, взятых в горных выработках;

- графический метод определения областей зажигания и горения микрогетерогенных пылегазовоздушных смесей;

- метод разделения переменных (метод Фурье) в уравнениях с частными производными и метод замены переменной в автономных дифференциальных уравнениях, описывающих процессы тепломассопереноса в угольных целиках, породугольных скоплениях и горения пылегазовоздушных смесей в горных выработках;

- метод Гира для построения приближенного решения задачи о собственных значениях и собственных функциях, описывающих процесс горения пылегазовоздушных смесей.

Научные положения, защищаемые в диссертации:

- температура очага самонагревания породугольного скопления с фиксированной пористостью при изменении относительной величины электрического напряжения в интервале от 5 до 100 является функцией, близкой логарифмической, а с изменением пористости скопления в пределах от 0,05 до 0,5 при постоянном относительном электрическом напряжении температура представляет собой монотонно возрастающую функцию, график которой является вогнутой кривой;

- при увеличении коэффициента теплообмена породугольного скопления с $1,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ до $4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ в направлении от очага самонагревания к очистной выработке относительная температура скопления уменьшается на 12 %, а в перпендикулярном направлении — только на 1 %; с ростом коэффициента теплопроводности внутри интервала $[0,25; 0,75] \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ относительная температура увеличивается на 11 %, а с изменением удельной теплоемкости в интервале $[250; 1200] \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ — всего на 0,4 %.

- критическая температура зажигания микрогетерогенной пылегазовоздушной смеси представляет собой функцию, аргументами которой, находящимися под знаком натурального логарифма, являются: начальная температура смеси, коэффициент теплообмена с окружающей средой, количество теплоты, выделяющейся при горении и концентрация реагирующего газа. При этом увеличение начальной температуры смеси от 300 К до 500 К и коэффициента теплообмена от $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ до $25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ приводит к нелинейному росту критической температуры, а увеличение количества теплоты и концентрации реагирующего газа соответственно в интервалах $[15; 50] \text{ МДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ и $[0,12; 0,5] \text{ кг}/\text{м}^3$ сопровождается нелинейным снижением критической температуры.

- стационарный процесс горения микрогетерогенной пылегазовоздушной смеси происходит только в том случае, если отношение скорости движения смеси к ее коэффициенту температуропроводности больше критического значения, определяемого параметрами смеси.

Научная новизна работы заключается:

- в разработке методики применения экваториально-дипольного электропросвечивания для локации и определения температуры очагов самонагрева в угольных целиках и породугольных скоплениях;
- установлении ряда закономерностей процесса теплопереноса в породугольных скоплениях выемочных участков угольных шахт;
- определении критической температуры зажигания микрогетерогенной пылегазовоздушной смеси и анализе влияния на ее величину некоторых параметров смеси;
- обнаружении критических значений процесса горения микрогетерогенной пылегазовоздушной смеси в атмосфере горных выработок.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

- использованием фундаментальных законов и положений химической кинетики, теплофизики и теории горения при постановке задач о тепломассопереносе в угольных целиках и породугольных скоплениях и задач о зажигании и горении пылегазовоздушных смесей в атмосфере горных выработок;
- применением методов математического анализа, дифференциальных уравнений, математической физики и вычислительной математики при построении решений задач о тепломассопереносе, зажигании и горении в угольных целиках, породугольных скоплениях и пылегазовоздушных смесях;
- соответствием обнаруженных в работе результатов, полученных аналитически, с результатами шахтных измерений и испытаний.

Личный вклад автора заключается:

- в выполнении и обработке шахтных геофизических измерений методом экваториально-дипольного электропросвечивания по заранее выбранным маршрутам;
- построении графиков изменения электрических сигналов и выявлении их скачкообразных изменений, появляющихся в зонах нагревания угольных целиков и породугольных скоплений;
- составлении рекомендаций по ликвидации обнаруженных очагов самонагрева на ряде шахт Кузбасса;
- установлении закономерностей процессов тепломассопереноса в угольных целиках и породугольных скоплениях, зажигания и горения пылегазовоздушных смесей.

Отличие от ранее выполненных работ заключается в том, что

- на основе метода экваториально-дипольного электропросвечивания осуществляется не только локация очагов самонагрева, но и определяется их температура;
- при постановке задачи о горении микрогетерогенных пылегазовоздушных смесей граничное условие, в отличие от классических задач, заранее не

известно, а определяется в результате вычислительных процедур.

Научное значение работы заключается в установлении ряда закономерностей протекания физических, теплофизических и физико-химических процессов на угольных шахтах, позволяющих обнаруживать очаги самонагрева в угольных целиках и выработанных пространствах, определять температуру в очаге самонагрева, выявлять зависимости параметров теплопереноса от очага нагрева в атмосферу горных выработок, находить критическую температуру зажигания и параметры стационарного горения микрогетерогенных пылегазовоздушных смесей в горных выработках.

Практическая ценность заключается в разработке методики обнаружения очагов самонагрева и рекомендации по определению параметров зажигания и горения пылегазовоздушных смесей на очистных участках угольных шахт.

Реализация работы. Основные положения диссертационной работы вошли составной частью в два нормативных документа:

1. «Инструкция по предупреждению эндогенных пожаров и безопасному ведению горных работ на склонных к самовозгоранию пластах угля». Утверждена Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору, приказ № 517 от 16 декабря 2015 года.

2. Стандарт организации СТО 00173769-001-2018 «Определение параметров горения пылегазовоздушных смесей в горных выработках». Утвержден АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» и введен в действие 01 июня 2018 г.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на V международной научно-практической конференции «Инновации в технологиях и образовании» (г. Белово, 2012 г.); на XV международной научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности» (г. Кемерово, 2013 г.); научно-практической конференции с международным участием «Россия Молодая» (г. Кемерово, 2017 г.); на VI международной научно-практической конференции «Современные тенденции и инновации в науке и производстве» (г. Междуреченск, 2017 г.); на X международной научно-практической конференции «Инновации в технологиях и образовании» (г. Белово, 2017 г.); на Международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов», проводимой в рамках специализированной выставки технологий горных разработок «Уголь России и Майнинг» (г. Новокузнецк, 2017 г.), Международном Российско – Казахстанском симпозиуме «Углекислота и экология Кузбасса» (г. Кемерово, 2017 г.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, включая 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 150 наименования и приложения, изложена на 121 странице машинописного текста и содержит 40 рисунков и 3 таблицы.

Работа выполнена в лаборатории профилактики эндогенных пожаров акционерного общества «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» (АО «НЦ ВостНИИ»), коллективу которой автор глубоко признателен.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен анализ изученности процессов тепломассопереноса и методов прогнозирования очагов самонагревания в угольных целиках и породугольных скоплениях на выемочных участках угольных шахт. Указано, что несмотря на более чем столетний период систематического изучения, природа самонагревания углей, к сожалению, остается пока нераскрытой. Отмечены основные этапы развития теорий самонагревания углей, начиная с химического процесса окисления углерода и кончая, современными теориями, базирующимися на процессах тепло и массопереноса.

Отмечено, что огромный вклад в разработку и развитие современных теорий процессов тепломассопереноса при добыче, хранении и перевозке угля внесли отечественные ученые: Л.П. Белавенцев, В.С. Веселовский, Е.И. Захаров, Н.О. Каледина, А.Я. Каминский, Н.М. Качурин, Н.И. Линденау, В.М. Маевская, В.Н. Опарин, А.А. Ордин, В.А. Портола, Л.А. Пучков, В.И. Саранчук, А.А. Скочинский, В.А. Скрицкий, А.М. Тимошенко, А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, А.И. Чанышев, О.И. Чернов, Л.А. Шевченко и др.

Далее в диссертации обсуждаются методы прогноза очагов нагревания угольных пластов и породугольных скоплений. Отмечено, что, наряду с традиционными методами, успешно развиваются электрометрические методы, основанные на исследовании естественного электрического поля, существующего в Земле. Огромный вклад в развитие электрометрических методов и разработку аппаратуры для электрических измерений внесли отечественные ученые Д.В. Алексеев, Е.Ю. Антонов, А.А. Воробьев, В.В. Дырдин, П.В. Егоров, В.В. Иванов, Н.О. Кожевников, Ли Хи Ун, Г.Я. Новик, В.Н. Опарин, С.М. Простов, В.В. Ржевский, Б.Г. Тарасов, Г.Е. Яковицкая и др.

Указано, что при использовании электрических методов есть возможность применять современные высокоточные приборы и компьютерные программы для обработки сигналов и построения графиков, наглядно показывающих положение очагов самонагревания или, наоборот, их отсутствие.

В заключительном параграфе главы, отмечено, что очаги самонагревания существенно повышают склонность угольной пыли образовывать взрывчатую смесь в атмосфере горных выработок. А экспериментальные исследо-

вания С.П. Амельчугова, В.И. Быкова и С.Б. Цыбеновой показали, что при определенных соотношениях уголь — окислитель наблюдается двухстадийный характер взрыва. В ходе дальнейших исследований авторы выявили, что если в определенный момент времени сложились условия воспламенения, то одновременно при наличии горючей среды и окислителя возникает источник зажигания, а возгорание смеси происходит в режиме дефлаграционного горения и последующего возникновения критических условий горения, приводящих к взрывам, которые в условиях шахт носят характер катастроф, наиболее крупные из которых произошли на шахтах Кузнецкого угольного бассейна. Так, в катастрофе, произошедшей 19 марта 2007 года на шахте Ульяновской (г. Новокузнецк) погибли 110 человек, а на шахте Распадской (г. Междуреченск) 8 — 9 мая 2010 года катастрофа унесла жизни 91 человека.

Исходя из сказанного, нам представляется, что наряду с исследованием проблемы самонагрева угольных целиков и породугольных скоплений, необходимо исследовать проблему зажигания и горения пылегазовоздушных смесей в горных выработках, поскольку ее решение позволит более детально установить причины возникновения пожароопасной обстановки в шахтах и разработать дополнительные (к уже известным) мероприятия, снижающие условия возникновения пожаров на угольных шахтах.

В рамках обсуждения этой проблемы выполнены обзор и анализ классических и современных работ, посвященных зажиганию и горению. Отмечен огромный вклад выдающихся отечественных и зарубежных ученых: Н.Н. Бахмана, И.М. Васенина, А.А. Васильева, Д.О. Глушкова, А.А. Дектерева, Я.Б. Зельдовича, Б.В. Канторовича, А.Ю. Крайнова, В.А. Кузнецова, Г.В. Кузнецова, В.А. Левина, Б. Льюиса, А.С. Предводителя, Н.Н. Семенова, Д.Б. Сполдинга, П.А. Стрижака, А.В. Федорова, А.В. Формана, Д.А. Франк-Каменецкого, Л.Н. Хитрина, О.А. Цухановой, М.Ю. Чернецкого, З.Ф. Чуханова и др.

Вторая глава посвящена определению положения и температуры очагов самонагрева в угольных целиках и в породугольных скоплениях с помощью методов электроразведки.

Измерения кажущегося удельного электросопротивления производятся методами экваториально-дипольного электропросвечивания (ЭДЭП) и параллельного экваториально-дипольного электропросвечивания (ЭДЭП-П) с помощью аппаратуры электромагнитной эмиссии, состоящей из СЭР-1, изготовленного опытно-экспериментальным заводом ВНИМИ во взрывобезопасном исполнении и ШЭРС-5М Быковского опытно экспериментального завода во взрывобезопасном исполнении. В этих методах электрическое поле создается в одной выработке выемочного столба, а изучается — в другой этого же столба. Исследуется угольный целик или выработанное пространство, расположенное между выработками (рисунок 1).

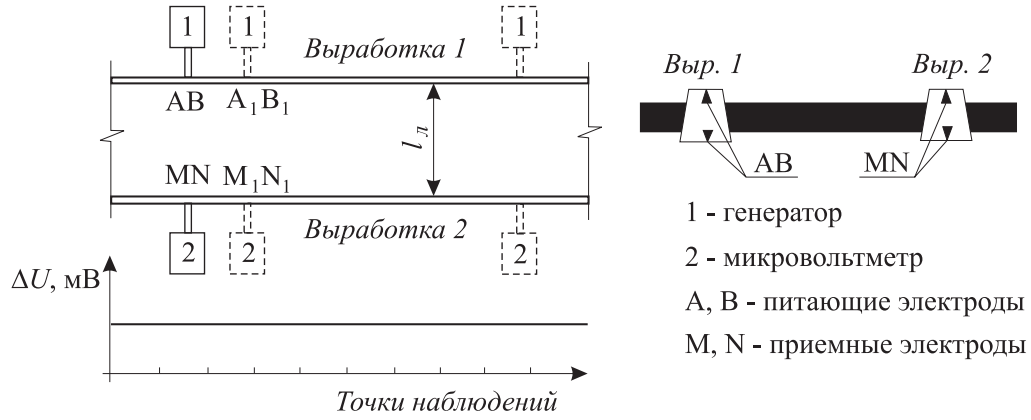


Рисунок 1 – Схема размещения приборов и оборудования в выработке при использовании метода экваториально-дипольного электропросвечивания

Заземление электродов осуществляется в кровлю и почву выработки. Приемный и питающий диполи перемещаются одновременно по временному графику. Результаты наблюдений заносятся в журнал. Обработка результатов шахтных исследований производится с помощью программ PRN, SGR.

В работе получена формула, устанавливающая связь между физико-механическими характеристиками угольных целиков и породугольных скоплений и их температурой T

$$T = T_0 + \frac{N_1 Q \ln \Delta \bar{U}}{k (N_2 C - N_3 \ln \Delta \bar{U})}, \quad (1)$$

где $\Delta \bar{U}$ – относительная величина электрического напряжения, определяемая как $\Delta \bar{U} = \Delta U / \Delta U_0$, где ΔU – напряжение, соответствующее искомой температуре T вмещающих пород, а ΔU_0 – соответствует температуре $T_0 = 287$ К пород в естественном состоянии. Коэффициенты $N_1 = 0,120 \div 0,140$, $N_3 = 4,5 \div 4,55$ зависят от электрического сопротивления, а коэффициент N_2 зависит от пористости $P = 0,1 \div 0,5$ следующим образом: $N_2 = 2(1-P)/(2+P)$. Остальные величины в формуле (1) являются постоянными величинами: $C = 505$ – эмпирический коэффициент, зависящий от диэлектрических свойств угля; $Q = 13 \cdot 10^{-19}$ Дж – ширина запрещенной зоны, представляющая собой энергетическое воздействие на электрон, чтобы он перешел из валентной зоны в зону проводимости; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Поскольку N_1 и N_3 изменяются в очень узких интервалах, а N_2 зависит от пористости, то температуру T можно считать функцией только от двух величин: электрического сигнала $\Delta \bar{U}$ и пористости скопления P . Полагая одну из величин постоянной, можно построить две функции $T = T(\Delta \bar{U})$ и $T = T(P)$, каждая из которых зависит только от одного параметра. Графики функций $T = T(\Delta \bar{U})$ и $T = T(P)$ в градусах по Цельсию (рисунок 2) построены при $P = 0,35$ (рисунок 2, а) и $\Delta \bar{U} = 42$ (рисунок 2, б).

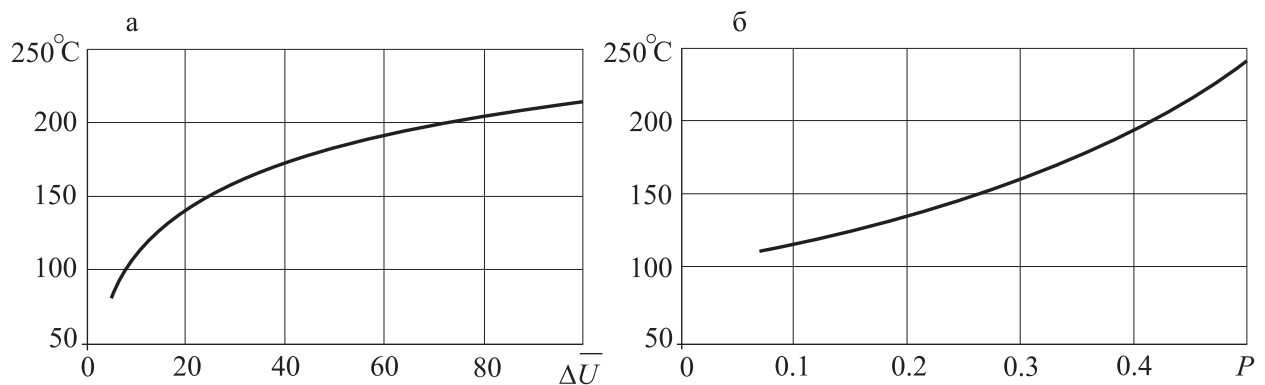


Рисунок 2 – Графики изменения температуры породугольного скопления от величины ΔU (рисунок 2, а) и от пористости скопления (рисунок 2, б)

Из формулы (1) и анализа графиков (рисунок 2) вытекает **первое научное положение**: температура очага самонагрева породугольного скопления с фиксированной пористостью при изменении относительной величины электрического напряжения в интервале от 5 до 100 является функцией, близкой логарифмической, а с изменением пористости скопления в пределах от 0,05 до 0,5 при постоянном относительном электрическом напряжении температура представляет собой монотонно возрастающую функцию, график которой является вогнутой кривой.

Таким образом, формула (1) позволяет определить температуру T угольных массивов и породугольных скоплений по результатам измерений экваториально-дипольного электропросвечивания и, тем самым, выявить положение очагов самонагрева.

С помощью методов экваториально-дипольного электропросвечивания и формулы (1) выполнен анализ самонагрева угольных целиков на ОАО «Разрез Инской» и исследована склонность к самовозгоранию целиков угля на «Шахте им. С.Д. Тихова» и на «Шахте им. А.Д. Рубана».

В третьей главе исследовано температурное поле в породугольном скоплении в окрестности очага самонагрева.

В начале главы детально обсуждается поиск положения очага самонагрева в выработанном пространстве лавы 21-1-9 шахты «Ольжерасская-Новая», отработка которой проводилась по почве пласта, с выпуском подкровельной пачки (рисунок 3).

Протяженность выемочного столба 1660 м, длина лавы 200 м, глубина отработки 180 м ÷ 310 м. Уголь полублестящий, полосчатый, неяснополосчатый, слабой механической прочности, крепостью $f = 1 \div 2$, средней нарушенности. Угол по простиранию $1^\circ \div 6^\circ$, по падению $5^\circ \div 10^\circ$. Мощность пласта в теле лавы составляет 5,94 м ÷ 9,30 м, а в среднем — 7,73 м.

Шахтные исследования методом ЭДЭП проводили в два этапа. На первом этапе угольный целик между Центральным путевым уклоном (ЦПУ) и лавой 21-1-9 «просвечивали» в горизонтальном направлении, для этого гене-

ратор устанавливали на ЦПУ и фиксировали сигнал приемной аппаратурой непосредственно по очистному забою через 10 м по линии 4 – 4' (рисунок 3).

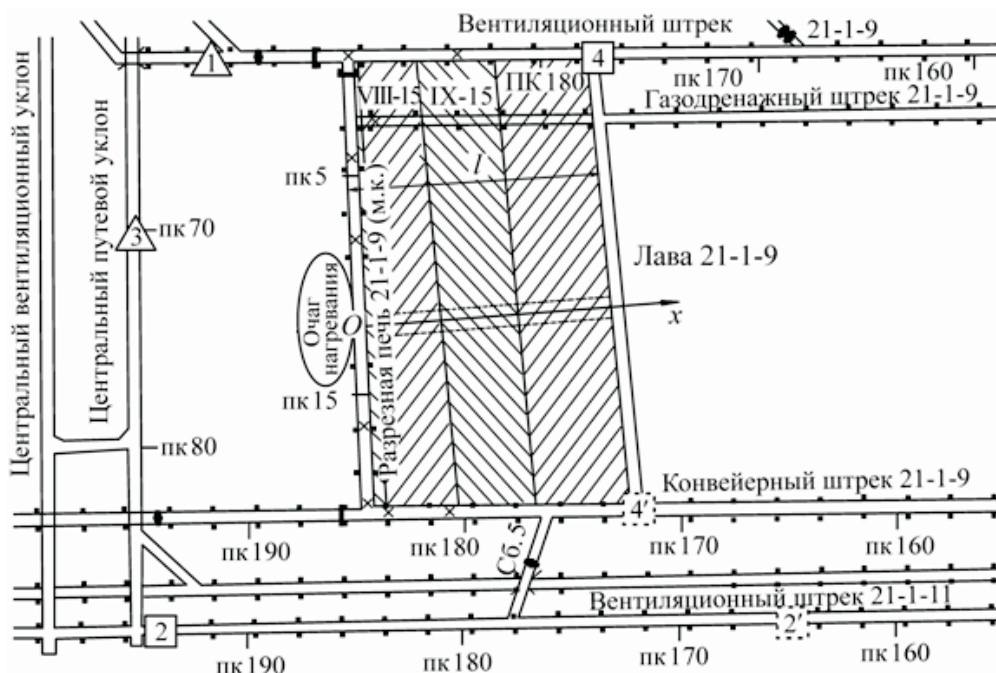


Рисунок 3 – План горных работ со схемой проведения геофизических исследований

На втором этапе указанный целик обследовали в вертикальном направлении, при этом генератор располагали на вентиляционном штреке 21-1-9, а приемник, как и в первом случае, перемещали с регистрацией сигнала через каждые 10 м по вентиляционному штреку 21-1-11 вдоль линии 2 – 2' (рисунок 3). По результатам обработки данных были построены кривые изменения ΔU по очистному забою лавы 21-1-9 (рисунок 4 а) и вентиляционному штреку 21-1-11 (рисунок 4 б). На рисунке 4 в районе пикетов 12 и 183 отчетливо выделяются области, характерные для нагретого породноугольного массива.

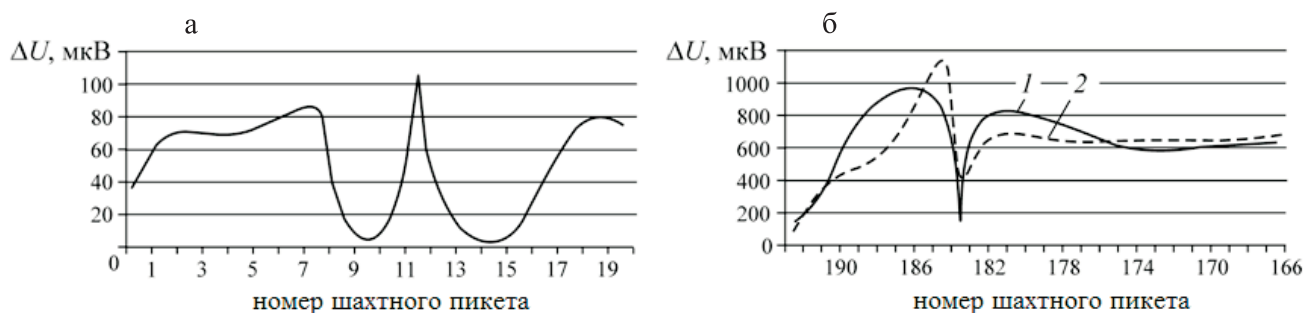


Рисунок 4 – График изменения ΔU вдоль лавы 21-1-9 (замеры выполнены по линии 4 – 4') (рисунок 4, а) и графики изменения ΔU вдоль вентиляционного штрека 21-1-11 в процессе обнаружения очага нагревания: 1 - измерения по линии 2 – 2'; 2 - по линии 2' – 2 (рисунок 4, б)

Так, из рисунка 4, а следует, что в интервалах пк 8 - 9 и 12 - 15 отмечается резкое падение ΔU , в то время как в интервале пк 10 - 11 – резкое увеличение

напряжения. Аналогично в интервалах пк 190 - 184 и 182 - 178 наблюдаются участки повышенного ΔU , а в интервале пк 184 - 182 — резкого падения ΔU (рисунок 4, б).

Подставляя в формулу (1) значения $\Delta \bar{U} = 42$; $P = 0,35$; $N_1 = 0,12$; $N_2 = 2(1 - 0,35)/(2 + 0,35) = 0,55$; $N_3 = 4,53$, соответствующие условиям исследуемой лавы, получим температуру угольного скопления в выработанном пространстве, равную 449 К или 176 °С.

Таким образом, породугольные скопления являются одной из причин возникновения очагов самонагрева угля, характеризующихся резким повышением температуры породугольных скоплений внутри очага и повышенным теплообменом с окружающими породами.

Изменение теплового поля представляет собой сложный нестационарный физический процесс. Сложность его описания определяется несколькими причинами. Во-первых, область, занятая породугольным скоплением, является трехмерной. Во-вторых, породугольное скопление и угольный целик представляют собой неоднородную и анизотропную среду, в связи с чем теплофизические коэффициенты являются функциями координат.

В диссертации рассмотрена упрощенная задача о температурном поле в породугольном скоплении. Главное упрощение состоит в том, что породугольное скопление рассматривается как совокупность «балок-полосок» квадратного поперечного сечения размером b , равной мощности пласта и длиной $l = 130$ м, равной расстоянию между очистным забоем и очагом самонагрева (см. рисунок 3). Температурное поле распространяется вдоль их длины, а соседние «балки-полоски» обмениваются теплом по боковым поверхностям по закону Ньютона.

Температура среды, окружающая боковую поверхность «балки-полоски», принимается постоянной и равной начальной температуре T_0 , а на левом и правом торцах «балки-полоски» происходит теплообмен с окружающей средой. Причем левый торец балки соприкасается с очагом самонагрева, температура в котором $T_{\text{п}}$, а правый — с очистной выработкой, температура стенок которой $T_{\text{ст}}$. В качестве второго допущения принято, что теплофизические параметры «балки-полоски»: плотность ρ , теплоемкость c_p , коэффициент теплопроводности λ , а также коэффициенты теплообмена с ее боковой поверхностью α_1 и торцевыми сечениями α_2 — являются постоянными величинами.

Данная задача относится к задаче смешанного типа для одномерного параболического уравнения, решение которого найдено в следующем виде:

$$T(x, t) = T_0 \left[1 + 4e^{-\nu t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{p}{p(p+2) + \mu_n^2} \left(\cos \frac{\mu_n x}{l} + \frac{p}{\mu_n} \sin \frac{\mu_n x}{l} \right) e^{-\frac{\mu_n^2 a}{l^2} t} \right], \quad (2)$$

где $\nu = \alpha_1/(c_p \rho h)$, $h = 1/4b$, $p = \alpha_2/\lambda l$, а собственные числа μ_n определяются из трансцендентного уравнения $2 \operatorname{ctg}(\mu_n) = \mu_n/p - p/\mu_n$.

На базе формулы (2) выполнены вычислительные процедуры при следующих значениях: $T_0 = 287 \text{ K}$; $\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$; $c_p = 0,835 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг·K)}$; $\lambda = 46,5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м·K)}$; $a = 3,98 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $\alpha_1 = 1,5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$; $\alpha_2 = 2 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$ и построены графики (рисунки 5 и 6), на которых $\bar{T}$ представляет собой искомую температуру, отнесенную к температуре T_0 .

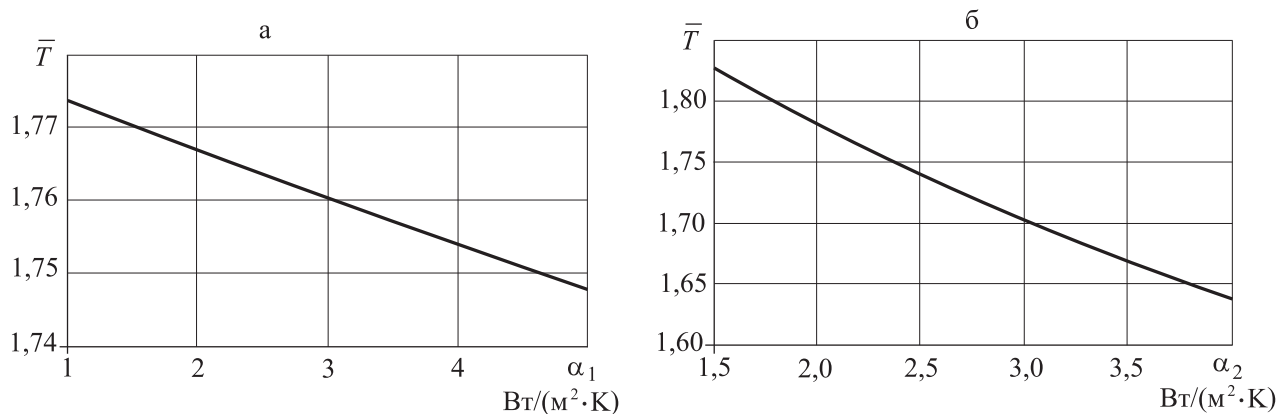


Рисунок 5— Графики зависимостей относительной температуры от коэффициентов теплообмена α_1 (рисунок 5, а) и α_2 (рисунок 5, б)

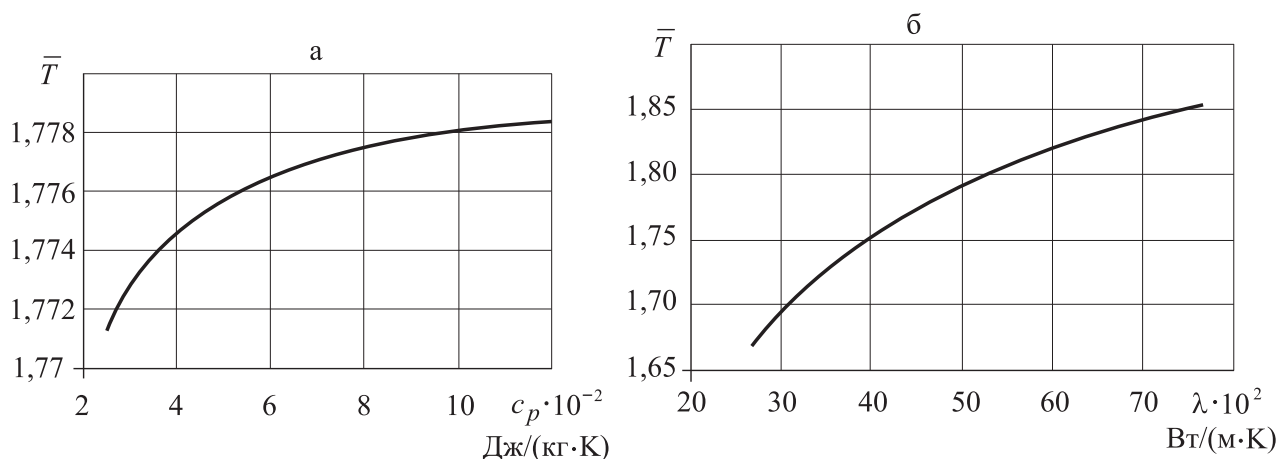


Рисунок 6 — Графики зависимостей относительной температуры от удельной теплоемкости c_p (рисунок 6, а) и коэффициента теплопроводности λ (рисунок 6, б)

Из формулы (2) и графиков на рисунках 5, 6 вытекает **второе научное положение:** при увеличении коэффициента теплообмена породугольного скопления с $1,5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$ до $4 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$ в направлении от очага самонагревания к очистной выработке относительная температура скопления уменьшается на 12%, а в перпендикулярном направлении — только на 1%; с ростом коэффициента теплопроводности внутри интервала $[0,25; 0,75] \text{ Вт/(м·K)}$ относительная температура увеличивается на 11%, а с изменением удельной теплоемкости в интервале $[250; 1200] \text{ Дж/(кг·K)}$ — всего на 0,4%.

Для определения времени остывания разогретого породугольного скопления сформулирована задача Дирихле для одномерного уравнения теплопро-

водности, в процессе решения которой получено трансцендентное уравнение

$$\sum_{n=1}^{n=N} e^{-\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 a t_k} \left\{ \frac{2}{l} \int_0^l \left[T_1(0) + [T_2(0) - T_1(0)] \frac{x}{l} \right] \sin \frac{n\pi x}{l} dx + \frac{2n\pi a}{l^2} \int_0^{t_k} e^{\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 a \tau} \times \times \left[T_1(0) + \frac{T_k - T_1(0)}{t_k} \tau - (-1)^n \left(T_2(0) - \frac{T_2(0) - T_k}{t_k} \tau \right) \right] d\tau \right\} \sin \frac{n\pi}{2} - T_k = 0 \quad (3)$$

относительно искомого времени t_k , в течение которого температура пород угольного скопления станет равной наперед заданной температуре T_k после выполнения мероприятий по ликвидации очага самонагревания.

Вычислительные процедуры выполнены при исходных данных, используемых ранее, к которым добавлены $T_1(0) = 287 \text{ К}$, $T_2(0) = 449 \text{ К}$ – температура пород, соответственно окружающих монтажную камеру, и температура пород в очаге самонагревания в начальный момент времени.

При указанных исходных данных и при $N = 9$, решением трансцендентного уравнения (3) является величина $t_k = 2,678 \cdot 10^6 \text{ с} = 31 \text{ сутки}$.

На основании полученного результата инженерно-технической службой шахты «Ольжерасская-Новая» принято решение о затоплении выявленного очага самонагревания в течение 31 суток. По истечении этого времени затопления и откачки воды из аварийного контура были проведены повторные исследования, показавшие, что участков с повышенными и пониженными значениями ΔU не обнаружено (рисунок 7).

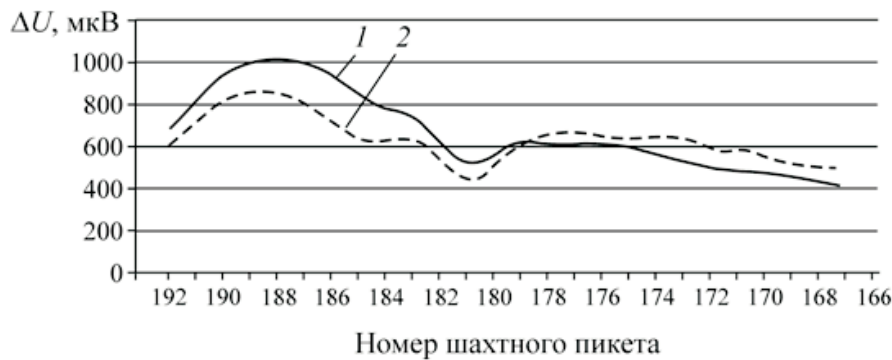


Рисунок 7 – Графики изменения ΔU построенные на основании полевых работ по вентиляционному штреку 21-1-11 после проведения противопожарных мероприятий: 1 – измерения по линии 2 – 2'; 2 – по линии 2' – 2

Поэтому решением технического совета очаг самонагревания в лаве 21-1-9 списан в категорию ликвидированных. После восстановительных мероприятий лава продолжила работу в штатном режиме.

В четвертой главе выполняется моделирование процессов зажигания и горения микрогетерогенной пылегазовоздушной смеси (ПГВС) в протяжен-

ных горных выработках в рамках следующих допущений: 1) размеры области, занятой микрогетерогенной ПГВС, гораздо больше расстояний между угольными частицами, поэтому ПГВС рассматривается как однородная среда; 2) диффузионным сопротивлением переносу окислителя вглубь ПГВС при определении критических температур воспламенения пренебрегаем; 3) теплообмен внутри области горения осуществляется только за счет теплопроводности и конвекции, без учета лучистого теплообмена.

В силу принятых допущений уравнение диффузии реагирующего газа и уравнение теплопроводности представляются в виде

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} + q, \quad c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - c_p \rho v \frac{\partial T}{\partial x} + q, \quad (4)$$

где c — концентрация реагирующего газа; t — время; T — температура смеси; c_p , ρ , λ — соответственно удельная теплоемкость смеси в изобарном процессе, плотность и коэффициент теплопроводности; v — скорость движения смеси, равная скорости воздушного потока; q — тепловой «источник», величина которого определяется по формуле

$$q = Q \frac{k\beta}{k + \beta} c, \quad (5)$$

где Q — тепловой эффект реакции, k — константа скорости реакции, выражаемая законом Аррениуса $k = k_0 e^{-E/RT}$, в котором $R = 8,314$ Дж/(моль·К) — газовая постоянная; E — энергия активации; k_0 — предэкспоненциальный множитель; β — коэффициент массообмена.

Будем полагать, что реакция протекает в стационарном режиме, поэтому количество тепла, поступающего в зону реагирования в результате химической реакции, равно количеству отводимого тепла q , определяемого из закона Ньютона $q = \alpha(T - T_0)$, где α — коэффициент теплообмена. Кроме этого учтем, что процесс зажигания, как правило, происходит в кинетической области, когда $\beta \gg k$. Из сказанного вытекает уравнение

$$Qkc = \alpha(T - T_0), \quad (6)$$

описывающее стационарное химическое реагирование пылегазовоздушной смеси в кинетической области.

Разложив в формуле Аррениуса показатель в ряд Тейлора, получим соотношение $e^{-E/RT} = e^{E/RT_0} \cdot e^\theta$, подставив которое в уравнение (6), приведем последнее к виду

$$\frac{Q}{\alpha} k_0 e^{-E/RT_0} \frac{Ec}{RT_0^2} e^\theta = \theta, \quad \text{где} \quad \theta = \frac{E}{RT_0^2} (T - T_0). \quad (7)$$

В диссертации показано, что условие зажигания имеет место при $\theta = 1$. В этом случае температура ПГВС становится критической $T = T_{кр}$. Для ее

определения учтем, что в уравнении (7) $e^{-E/RT_{kp}} = e^{E/RT_0} \cdot e$, затем прологарифмируем его, и, выполнив преобразования, найдем $T = T_{kp}$ в явном виде

$$T_{kp} = \frac{E}{R \ln \left(\frac{Ek_0 Qc}{RT_0^2 \alpha} \right)}. \quad (8)$$

По формуле (8) вычислена критическая температура зажигания ПГВС и построены графики ее зависимости от различных параметров (рисунки 8, 9) при следующих исходных данных: $k_0 = 3,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$; $c = 0,23 \text{ кг/м}^3$; $Q = 27 \cdot 10^6 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; $E = 133 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль}$; $T_0 = 300 \text{ К}$; $\alpha = 15 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

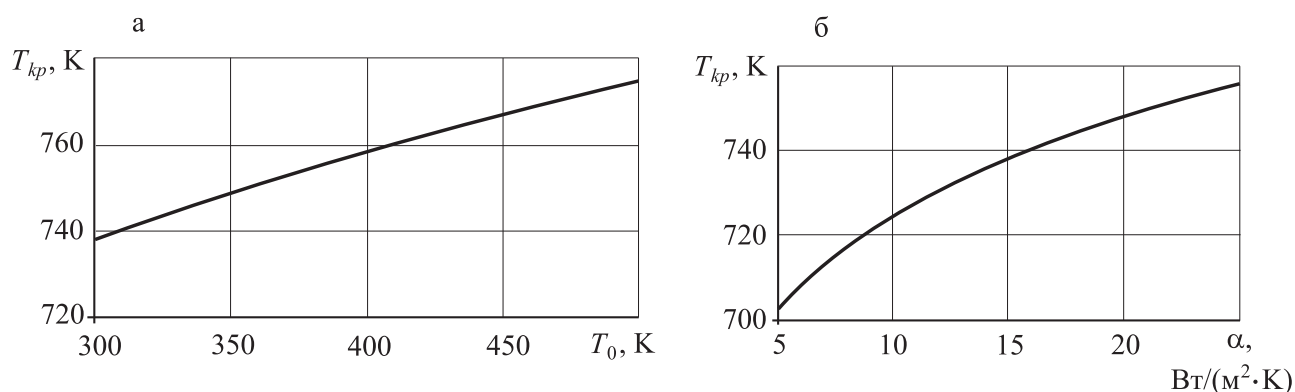


Рисунок 8 – Графики зависимостей критической температуры от температуры смеси T_0 (рисунок 8, а) и от коэффициента теплообмена (рисунок 8, б)

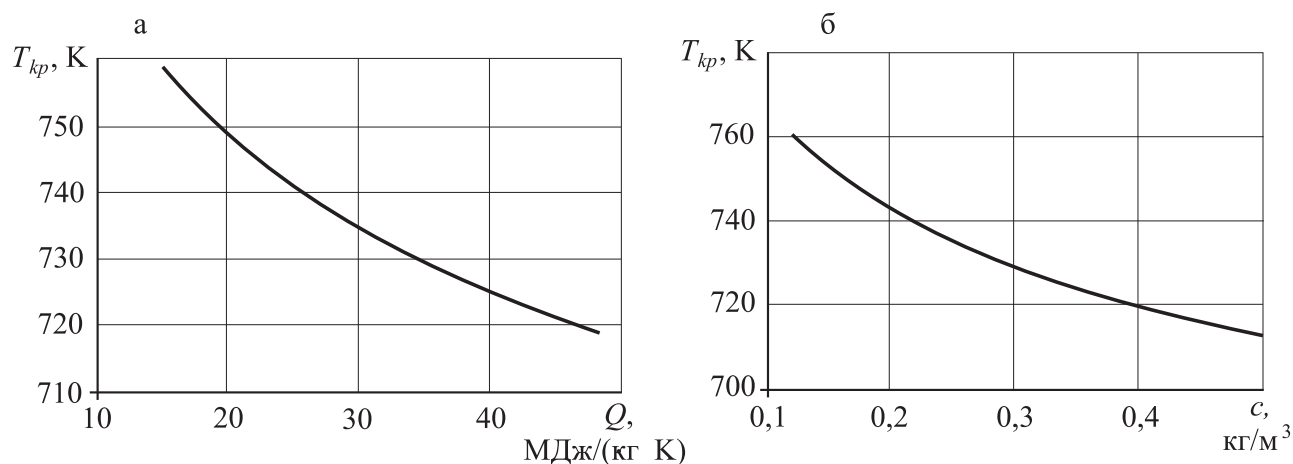


Рисунок 9 – Графики зависимостей критической температуры от величины Q (рисунок 9, а) и от концентрации реагирующего газа (рисунок 9, б)

Формула (8) и графики (рисунки 8, 9) позволили сформулировать **третье научное положение**: критическая температура зажигания микрогетерогенной пылегазовоздушной смеси представляет собой функцию, аргументами которой, находящимися под знаком натурального логарифма, являются: начальная температура смеси, коэффициент теплообмена с окружающей средой, количество теплоты, выделяющейся при горении и концентрация реагирующего газа. При этом увеличение начальной температуры

смеси от 300 К до 500 К и коэффициента теплообмена от 5 Вт/(м²·К) до 25 Вт/(м²·К) приводит к нелинейному росту критической температуры, а увеличение количества теплоты и концентрации реагирующего газа соответственно в интервалах [15; 50] МДж/(кг·К) и [0,12; 0,5] кг/м³ сопровождается нелинейным снижением критической температуры.

Далее в диссертации отмечено, что после зажигания ПГВС процесс ее выгорания достаточно быстро стабилизируется и поэтому поля концентраций и температур перемещаются с некоторой практически постоянной скоростью, в силу чего, процесс горения можно считать квазистационарным, не зависящим от времени, протекающим в кинетической области.

В силу сказанного, преобразуем второе уравнение (4) к виду

$$\frac{d^2\bar{T}}{dx^2} - \omega \frac{d\bar{T}}{dx} + \frac{e^{-\theta_{\max}}(1 - \bar{T})}{a t_{\max}} = 0, \quad (9)$$

где

$$\bar{T} = \frac{T - T_0}{T_{\max} - T_0}, \quad \omega = \frac{v}{a}, \quad a = \frac{\lambda}{c_p \rho}, \quad t_{\max} = \frac{e^{E/RT_{\max}}}{k_0}, \quad \theta_{\max} = \frac{E(T_{\max} - T_0)}{RT_{\max}^2}. \quad (10)$$

Уравнение (9) принадлежит классу автономных уравнений, поскольку явно не содержит независимую переменную x . Это позволяет с помощью подстановки $d\bar{T}/dx = \zeta(\bar{T})$ привести уравнение (9) к виду

$$\zeta(\bar{T}) \frac{d\zeta(\bar{T})}{d\bar{T}} - \omega \zeta(\bar{T}) + F(\bar{T}) = 0, \quad \text{где} \quad F(\bar{T}) = \frac{e^{-\theta_{\max}(1-\bar{T})}}{t_{\max} a}, \quad (11)$$

удовлетворяющему начальному условию $\zeta(0) = \sqrt{2e^{-\theta_{\max}}/(t_{\max}\theta_{\max}a)}$.

Поскольку уравнение (11) в совокупности с начальным условием $\zeta(0)$ образует нелинейную задачу Коши, то найти ее решение мы можем только численно, для чего использовали метод Гира. Вычисления выполнены при следующих исходных данных: $\lambda = 2,62 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·град); $c_p = 1,005 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К); $\rho = 1,225$ кг/м³; $T_{\max} = 2000$ К. На рисунке 10, а показан график искомой функции $\zeta(\bar{T})$, построенный при начальном условии $\zeta(0) = 7,77 \text{ м}^{-1}$ и при $\omega = 296 \text{ м}^{-1}$.

Особо отметим, что при $\zeta(0) = 7,77 \text{ м}^{-1}$ и $\omega < 296 \text{ м}^{-1}$ задача Коши не имеет решения, т.е. процесс горения невозможен. Однако при значениях $\omega \geq 296 \text{ м}^{-1}$ решения задачи Коши существуют, но при этом их граничные значения $\zeta_i(1)$ будут различными, а значит, различными будут и сами функции $\zeta_i(\bar{T})$, причем каждой из них соответствует только одно значение ω .

Следовательно, любое значение ω , при котором задача Коши имеет решение, мы можем рассматривать как собственное значение, а соответствующую ему функцию $\zeta(\bar{T})$ — как собственную функцию. Очевидно, что минимальное

собственное значение $\omega_{\min}$ является критическим значением ω_{kr} , поскольку при $\omega < \omega_{\min}$ задача Коши не имеет решения.

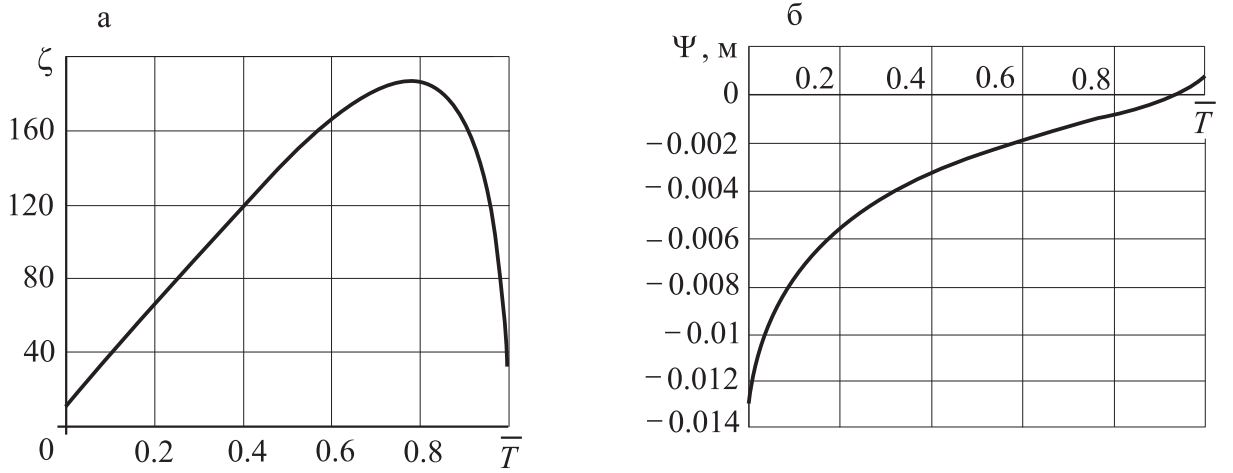


Рисунок 10 – График функции $\zeta(\bar{T})$, построенный по результатам численного решения задачи Коши (рисунок 10, а) и график функции $\Psi(\bar{T})$ (рисунок 10, б)

Таким образом, единственность решения данной задачи означает, что существует такое собственное значение $\omega \geq \omega_{kr}$ и соответствующая ему собственная функция $\zeta(\bar{T})$, которые описывают процесс горения ПГВС единственным образом. В силу второй и третьей формул (10), найдено критическое значение скорости воздушного потока $v_{kr} = 6,299 \cdot 10^{-3}$ м/с. Следовательно, если $v \geq v_{kr}$, решения задачи Коши существуют и процесс горения ПГВС возможен, а при $v < v_{kr}$ – нет.

Из сказанного следует **четвертое научное положение:** *стационарный процесс горения микрогетерогенной пылегазовоздушной смеси происходит только в том случае, если отношение скорости движения смеси к ее коэффициенту температуропроводности больше критического значения, определяемого параметрами смеси.*

Аппроксимируя полученные значения функции $\zeta(\bar{T})$ полиномом шестой степени и преобразовав подстановку $d\bar{T}/dx = \zeta(\bar{T})$ к уравнению $d\bar{T}/\zeta(\bar{T}) = dx$, а затем проинтегрировав его, мы получим уравнение в безразмерном виде

$$\Psi(\bar{T}) - \Psi(0) = \bar{x}, \quad (12)$$

где $\bar{x}$ – безразмерная координата зоны горения, в которой температура ПГВС составляет $\bar{T}$, а функция $\Psi(\bar{T})$ представляет собой интеграл $\Psi(\bar{T}) = \int d\bar{T}/\zeta(\bar{T})$, который найден в замкнутом виде, но, ввиду его громоздкости, приведен только график $\Psi(\bar{T})$ (рисунок 10, б). Умножим уравнение (12) на величину $m = T_{\max} - T_0$ и учтем соотношения $\tilde{T} = \bar{T}m$, $\Psi(\bar{T})m = \Psi(\tilde{T})$, $\bar{x}m = x$, в силу которых уравнение (12) приводится к виду

$$\Psi(\tilde{T}) - \Psi(0) = x. \quad (13)$$

Располагая графиком на рисунке 10, б и уравнениями (12), (13) мы можем определить температуру ПГВС в любом сечении x выработки или найти координату x сечения выработки, в котором температура T достигла заданного значения. И, наконец, мы можем определить длину зоны горения.

Пусть требуется найти координату x сечения выработки, температура в котором достигла величины $T = 500$ К. Для решения поставленной задачи поступаем следующим образом. По первой из формул (10) находим $\bar{T} = 0,1176$, с графика на рисунке 10, б снимаем значение $\Psi(\bar{T}) = -0,0072$ м, а затем вычисляем $\Psi(\tilde{T}) = \Psi(\bar{T})m = -0,0072 \cdot 1700 = -12,24$ м, $\Psi(0)m = -0,0127 \cdot 1700 = -21,63$ м. Подставляя найденные значения в уравнение (13), определяем искомую координату сечения выработки $x = -12,24 - (-21,63) = 9,39$ м.

Заключение

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная задача по определению параметров тепломассопереноса в угольных целиках, выработанных пространствах и атмосфере выемочных участков, позволяющая осуществлять локацию очагов самонагревания, выполнять практические расчеты температурных полей и параметров пылегазовоздушных смесей, что вносит существенный вклад в развитие наук о Земле.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации сводятся к следующему.

1. Найденная температура очага самонагревания породугольного скопления с фиксированной пористостью при изменении относительной величины электрического напряжения в интервале от 5 до 100 является функцией, близкой логарифмической, а с изменением пористости скопления в пределах от 0,05 до 0,5 при постоянном относительном электрическом напряжении температура представляет собой монотонно возрастающую функцию, график которой является вогнутой кривой.

2. Исследовано температурное поле в породугольном скоплении и установлено, что при увеличении коэффициента теплообмена породугольного скопления с $1,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ до $4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ в направлении от очага самонагревания к очистной выработке относительная температура скопления уменьшается на 12 %, а в перпендикулярном направлении — только на 1 %; с ростом коэффициента теплопроводности внутри интервала $[25; 75] \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ относительная температура увеличивается на 11 %, а с изменением удельной теплоемкости в интервале $[250; 1200] \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ — всего на 0,4 %.

3. Получено трансцендентное уравнение, позволяющее найти время, в течение которого породугольное скопление после проведения специальных мероприятий остывает до температуры окружающих пород.

4. Вычислена критическая температура зажигания микрогетерогенной пылегазовоздушной смеси, представляющая собой функцию, аргументами ко-

торой, находящимися под знаком натурального логарифма, являются: начальная температура смеси, коэффициент теплообмена с окружающей средой, количество теплоты, выделяющейся при горении и концентрация реагирующего газа. При этом увеличение начальной температуры смеси от 300 К до 500 К и коэффициента теплообмена от 5 Вт/(м²·К) до 25 Вт/(м²·К) приводит к нелинейному росту критической температуры, а увеличение количества теплоты и концентрации реагирующего газа соответственно в интервалах [15; 50] МДж/(кг·К) и [0,12; 0,5] кг/м³ сопровождается нелинейным снижением критической температуры.

5. Установлено, что стационарный процесс горения микрогетерогенной пылегазовоздушной смеси происходит только в том случае, если отношение скорости движения смеси к ее коэффициенту температуропроводности больше критического значения, определяемого параметрами смеси.

6. Разработана методика обнаружения пожаров в угольных целиках и выработанных пространствах, позволяющая установить местоположение очага самонагрева и определить его температуру.

7. Составлены рекомендации, следуя которым лава 21-1-9 пласта 21 шахты «Ольжерасская-Новая» полностью восстановлена и работает в штатном режиме.

8. Разработан стандарт организации СТО 00173769-001-2018, в котором представлены формулы и графики, позволяющие определить параметры горения пылегазовоздушных смесей в горных выработках.

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в следующих работах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Игишев, В. Г. Выделение индикаторных пожарных газов при окислении угля на стадиях самонагрева и беспламенного горения [Текст] / В. Г. Игишев, П. А. Шлапаков, С. А. Хаймин, С. А. Син // Вестн. Научн. центра по безопасности работ в угольной пром-ти. — 2015. — № 4. — С. 55–59.

2. Каминский, А. Я. Мониторинг эндогенной пожароопасности воздухоподающих выработок [Текст] / А. Я. Каминский, П. В. Поталов, В. В. Славолюбов, В. В. Колыхалов, П. А. Шлапаков // Вестн. Научн. центра по безопасности работ в угольной пром-ти. — 2010. — № 2. — С. 104–106.

3. Каминский, А. Я. Мониторинг эндогенной пожароопасности выработанного пространства отработанных и действующих выемочных участков на пологих и наклонных пластах угля [Текст] / А. Я. Каминский, П. В. Поталов, Н. В. Макаров, П. А. Шлапаков, В. В. Колыхалов, А. Ю. Ерастов, С. А. Хаймин // Вестн. Научн. центра по безопасности работ в угольной пром-ти. — 2011. — № 1. — С. 53–60.

4. Ли Хи Ун. Применение геофизических методов электроразведки при

обнаружении пожаров в угольных шахтах [Текст] / Хи Ун Ли, А. Ю. Ерастов, П. А. Шлапаков, С. А. Прокопенко // Вестн. Научн. центра по безопасности работ в угольной пром-ти. — 2014. — № 2. — С. 100–103.

5. Ли Хи Ун. О результатах применения геофизических методов электроразведки при обнаружении пожаров в угольных шахтах [Текст] / Хи Ун Ли, П. А. Шлапаков, С. А. Прокопенко, А. Ю. Ерастов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2015. — № 7. — С. 329–335.

6. Ли Хи Ун. Опыт применения шахтной электроразведки для обнаружения очага самонагревания угля на шахте «Ольжерасская-Новая» [Текст] / Хи Ун Ли, С. В. Черданцев, В. Б. Попов, П. А. Шлапаков, А. Ю. Ерастов [Текст] // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых.. — 2017. — № 1. — С. 182–188.

7. Патент на изобретение № 2514017 Российская Федерация, МПК E21F 5/00. Способ оценки эндогенной пожароопасности при подземной разработке угольных пластов / П. А. Шлапаков, А. Ю. Ерастов, С. В. Сороковых, А. М. Рыков, заявл.17.01.2013; опубл. 27.04.2014, Бюл. № 12.

8. Трубицын, А. А. Применение геофизических методов для борьбы с эндогенными пожарами [Текст] / А. А. Трубицын, П. А. Шлапаков, В. В. Аксенов, С. А. Прокопенко // Вестн. Научн. центра по безопасности работ в угольной пром-ти. — 2012. — № 1. — С. 84–88.

9. Черданцев, С. В. Анализ процесса горения микрогетерогенных пылегазовоздушных смесей в горных выработках [Текст] / С. В. Черданцев, Х. У. Ли, Ю. М. Филатов, П. А. Шлапаков // Безопасность труда в промышленности. — 2017. — № 11. — С. 10–15.

10. Черданцев, С. В. Определение критической температуры зажигания микрогетерогенных пылегазовоздушных смесей в горных выработках [Текст] / С. В. Черданцев, Хи Ун Ли, Ю. М. Филатов, П. А. Шлапаков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2018. — № 1. — С. 117–125.

11. Черданцев, С. В. Горение мелкодисперсных пылегазовоздушных смесей в атмосфере горных выработок / С. В. Черданцев, Хи Ун Ли, Ю. М. Филатов, Д. В. Ботвенко, П. А. Шлапаков, В. В. Колыхалов // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. — 2018. — № 2. — С. 172–180.

12. Шлапаков, П. А. О проблемах тушения эндогенных пожаров при отработке мощных пологих и наклонных пластов на шахтах Кузбасса [Текст] / П. А. Шлапаков, П. В. Потапов // Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 7. — С. 64–68.

Подписано в печать 25.06.2018 г. Формат 60x84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Печ. л. 1,1. Тираж 100 экз. Заказ №

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Кузбасский государственный технический
университет имени Т. Ф. Горбачева»
650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Типография Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Кузбасский государственный
технический университет имени Т. Ф. Горбачева».
650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.