

На правах рукописи

ЗАХАРЕНКО
Дмитрий Михайлович

**ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ САМОВОЗГОРАНИЯ И ВЗРЫВА ПЫЛИ
БУРЫХ УГЛЕЙ**

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2001

Работа выполнена в Сибирском филиале Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны Министерства внутренних дел Российской Федерации

Научный руководитель – кандидат технических наук, **Амельчугов С.П.**
начальник СФ ВНИИПО МВД РФ

Официальные оппоненты – доктор технических наук,
профессор **Журавлев Ю.А.**
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник **Сухинин А.И.**

Ведущая организация: **АО «Сибирский теплотехнический научно-исследовательский институт (СибВТИ)»**

Защита состоится 14 июня 2001 г. в ____ часов в аудитории _____ на заседании диссертационного совета Д 212.098.01 в Красноярском государственном техническом университете по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26. Тел.: (3912) 49-79-90, 49-76-19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Красноярского государственного технического университета.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «____» _____ 2001 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор

Сильченко П.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время основным источником тепловой и электрической энергии является каменный уголь, потребление которого в последнее десятилетие увеличивается. В России эта тенденция проявляется в росте добычи и переработки углей восточных месторождений, в частности, бурого угля Канско-Ачинского бассейна, главным достоинством которого является низкая себестоимость, главным недостатком – высокая пожаро- и взрывоопасность.

Практически весь технологический процесс добычи и переработки угля взрывопожароопасен. Наиболее актуальна эта проблема для ТЭЦ, пожары и взрывы на которых вызывают не только значительный материальный ущерб, но и приводят к социальным бедствиям. Самовозгорание является основной причиной пожаров на складах топлива и топливоподачах (50...60 %) и на котельных и тепловых электростанциях (15...20 %). Только за последние годы пожары и взрывы с серьёзными последствиями произошли на Гусиноозерской ГРЭС, Читинской ТЭЦ-1, Минусинской ТЭЦ, котельной Красноярского ЭВРЗ. Проблема самовозгорания угля является общемировой. Так, ежегодные потери угольных ресурсов в результате самовозгорания в Китае достигают более 200 млн. тонн, что составляет 1/7 часть годовой добычи.

Одна из основных причин создавшегося положения – недостаточная изученность динамики теплофизических характеристик процессов самовозгорания и взрыва пыли бурых углей, что затрудняет разработку эффективных методов повышения уровня пожаровзрывобезопасности теплоэнергетических объектов, в частности, способов оперативного обнаружения пожара и взрыва. Большинство существующих извещателей по чувствительности, инерционности, помехоустойчивости, пыле- и влагозащищенности не удовлетворяют необходимым требованиям. В тоже время современные научно-технические достижения позволяют создать удовлетворяющие всем необходимым требованиям пожарные извещатели и разработать систему активной противопожарной защиты производств, использующих бурые угли.

Таким образом, исследование процессов самовозгорания и взрыва угольной пыли и разработка на этой основе эффективных средств раннего обнаружения и тушения является важной научно-технической задачей в проблеме обеспечения уровня пожарной безопасности теплоэнергетических предприятий.

Цель настоящей работы – исследование теплофизических характеристик процессов возникновения и развития самовозгорания и взрыва пыли бурых углей для разработки метода раннего обнаружения этих процессов и системы противопожарной защиты объектов теплоэнергетики.

Задачи:

1. Исследование кинетических параметров, динамики температуры и характеристик инфракрасного излучения в зависимости от стадии про-

цесса самовозгорания с целью определения характеристик датчиков, пригодных для регистрации очагов тления угольной пыли.

2. Исследование факторов взрыва пыли бурого угля, развивающегося в замкнутом объеме, и условий распространения фронта дефлаграционного горения в протяженном канале для определения допустимой инерционности средств раннего их обнаружения.
3. Разработка математической модели процесса самовозгорания пыли бурых углей.
4. Расчетно-экспериментальное исследование эффективности применения различных типов датчиков раннего обнаружения очагов самовозгорания и взрыва угольной пыли.
5. Разработка метода регистрации самовозгорания и горения угольной пыли на ранних стадиях по характерному инфракрасному излучению.
6. Разработка требований и технических решений по созданию системы раннего обнаружения очагов самовозгорания и тления угольной пыли трактов углеподачи тепловых электростанций.

Научная новизна. Впервые исследована динамика инфракрасного излучения при самовозгорании пыли бурого угля, на основании которой разработаны технические требования к оптическим датчикам раннего обнаружения очагов самовозгорания.

Определена зависимость кинетических характеристик самовозгорания бурого угля от различных факторов, для прогноза степени пожаровзрывоопасности отдельных этапов технологического процесса его переработки.

Разработана математическая модель процесса самовозгорания бурого угля, учитывающая влияние десорбции летучих компонентов.

Исследованы низкочастотные акустические шумы, динамика оптического излучения взрыва пыли бурого угля и определены требования по допустимой инерционности средств обнаружения.

Разработан малоинерционный метод регистрации процессов самовозгорания и взрыва угольной пыли по характерному инфракрасному излучению.

Практическая ценность. Разработан экспресс-метод определения кинетических параметров процесса самовозгорания, позволяющий оценивать пожароопасные свойства бурого угля в производственных условиях.

Обоснованы конструктивные и технологические требования к автоматическим системам раннего обнаружения пожара и взрыва.

Результаты работы явились основой для разработки специального инфракрасного пожарного извещателя, предназначенного для использования в системах раннего обнаружения очагов самовозгорания и тления угольной пыли, с использованием которого разработана и внедрена система автоматического взрывоподавления и противопожарной защиты трактов топливоподачи Абаканской ТЭЦ и Красноярской ТЭЦ-1.

На защиту выносятся:

1. Комплексный метод определения параметров самовозгорания и взрыва пыли бурого угля в замкнутом объеме и протяженном канале.

2. Данные о динамике процесса самовозгорания и взрыва в замкнутом объеме, инфракрасного излучения, времени формирования и распространения фронта дефлаграционного горения пыли бурого угля.

3. Математическая модель процесса самовозгорания угольной пыли, учитывающая влияние параллельных эндотермических процессов.

4. Данные сравнительных исследований эффективности применения различных типов датчиков обнаружения очагов пожара и взрыва угольной пыли.

5. Метод раннего обнаружения самовозгорания и горения угольной пыли по характерному инфракрасному излучению.

6. Технические решения по системе раннего обнаружения очагов самовозгорания и тления угольной пыли для трактов углеподачи.

Достоверность полученных результатов обеспечивается методами исследований, основанными на современных достижениях теплофизики, техники эксперимента, автоматизации измерений. Полученные автором результаты не противоречат физическим и химическим закономерностям в смежных областях знаний и согласуются с данными других авторов.

Апробация. Основные положения работы доложены на международной конференции «Математическое и физическое моделирование лесных пожаров и их экологических последствий» (Томск-Иркутск, 1997); Международной конференции «Сопряженные задачи механики и экологии» (Томск, 1998); Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях» (Красноярск, 2000); семинарах кафедры теплофизики КГТУ (апрель, ноябрь 2000) и секции НТС СФ ВНИИПО МВД РФ (май 2000).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 12 работ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, содержит 137 страниц, включая 80 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 128 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит краткую характеристику и обоснование актуальности работы, формулировку цели и задач исследований.

1. Состояние вопроса

Обзор результатов работ, посвященных исследованию процессов самовозгорания, горения (тления) и взрыва угольной пыли

Процессам самовозгорания и взрыва угольной пыли уже давно уделяется большое внимание, как в России, так и за рубежом.

Н.Н. Семенов разработал первую количественную теорию теплового воспламенения. В ней источники тепла описываются уравнением Аррениуса, а теплоотвод – законом Ньютона. Несмотря на универсальность этой теории,

анализ условий самовозгорания природных органических топлив и, в частности, бурого угля с помощью модифицированной диаграммы Н.Н. Семенова затруднен. В связи с этим позднее появились работы, направленные на более точное описание процесса самовозгорания угля. В адиабатических условиях температурная зависимость скорости самонагрева, как правило, описывается выражением, аналогичным уравнению Аррениуса.

Многие органические материалы вследствие химической и энергетической неоднородности характеризуются различными значениями кинетических параметров: В.Г. Игишев приводит значения энергии активации для ряда от бурых углей до антрацитов от 83,74 до 138,2 кДж/моль, Я.С. Киселев, С.П. Амелчугов для бурых углей – 45...70 кДж/моль. Аналогичные значения энергии активации для углей получены другими исследователями. По мнению некоторых авторов, определение условий возникновения пожаров и взрывов бурых углей по кинетическим параметрам процесса самонагрева позволяет прогнозировать условия возникновения пожаров при добыче, транспортировке, хранении и переработке бурого угля.

Процессы самовозгорания, пожара или взрыва могут регистрироваться по ряду факторов, которыми эти явления сопровождаются. Общим принципом работы средств обнаружения очага пожара является измерение физических величин, связанных или несвязанных с процессом тепломассопереноса. По принципу работы датчики подразделяются на активные и пассивные; по виду определяемого фактора – на тепловые, дымовые, оптические; по типу чувствительного элемента – на инфракрасные, ультрафиолетовые, акустические, ионизационные, сейсмические, комбинированные и др. Несмотря на существующее многообразие методов обнаружения загораний, проблема выбора оптимального датчика самовозгорания или тления угольной пыли до сих пор является актуальной.

Обоснование направления работы

Процессы самовозгорания, тления и взрыва угольной пыли сопровождаются рядом факторов:

- увеличение температуры;
- изменение химического состава газовой среды;
- изменение оптических свойств газовой среды;
- увеличение мощности оптического излучения в инфракрасном диапазоне;

Процесс взрыва угольной пыли, кроме того, сопровождается ростом давления, что, в свою очередь, приводит к появлению характерных акустических шумов.

В настоящей работе основное внимание уделено изучению тех теплофизических параметров, инерционность регистрации которых сравнительно мала. В работе не исследовались процессы, связанные с изменением оптических и химических свойств среды, так как время их регистрации зависит от процессов тепломассопереноса и, поэтому, не может соответствовать требованиям раннего обнаружения.

В интересующем нас случае основным источником зажигания является очаг самовозгорания угольной пыли, который при «взвихривании» может стать причиной, как пожара, так и взрыва. До этого момента процесс самовозгорания проходит через ряд стадий, каждая из которых развивается по собственным кинетическим закономерностям. Поэтому для оценки возможности раннего обнаружения очага пожара и взрыва угольной пыли представляется наиболее целесообразным изучение различных факторов этого процесса по стадиям его развития.

Для адекватного описания самовозгорания пыли бурого угля необходимо было разработать математическую модель процесса, учитывающую различные конкурирующие теплофизические процессы.

2. Методика проведения экспериментов

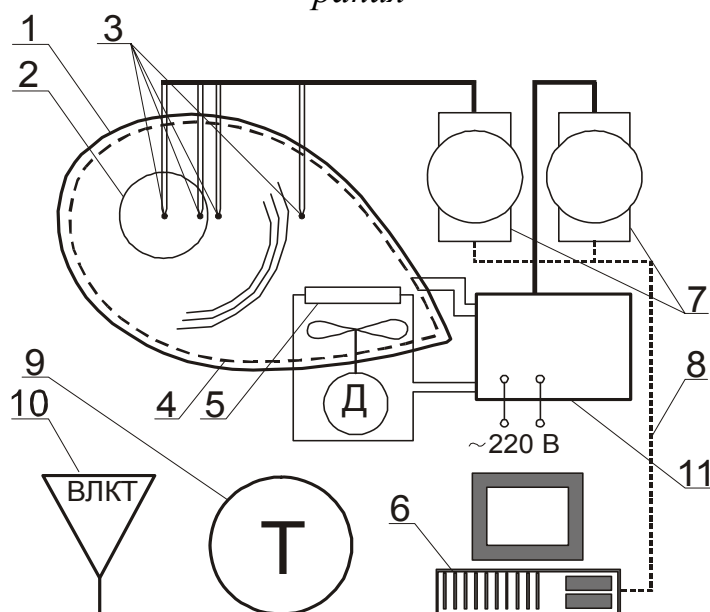
Для проведения исследований было разработано и изготовлено оборудование, входящее в состав контрольно-измерительного комплекса испытательной лаборатории СФ ФГУ ВНИИПО МВД РФ. Автором было разработано специальное математическое обеспечение, позволяющее автоматизировать и значительно повысить оперативность и точность измерений.

Исследование химического и гранулометрического состава угольной пыли проводилось непосредственно перед опытами в химической лаборатории ТЭЦ-3 АО «Красноярскэнерго».

Методика исследования процессов самовозгорания

Для исследования процессов самовозгорания угольной пыли использовалась специальная экспериментальная установка (рис. 1), предназначенная

Установка определения параметров самовозгорания



1 - корпус термостата; 2 - реакционный сосуд; 3 - термопары; 4 - основной нагреватель; 5 - вспомогательный нагреватель; 6 - ПЭВМ; 7 - модули сбора данных и управления; 8 - линия связи RS-485; 9 - сушильный шкаф; 10 - весы; 11 - модуль электропитания и управления.

для определения кинетических параметров процессов самовозгорания. Она позволяла регистрировать разогревы материала. Основу установки составлял сухо-воздушный термостат.

Реакционный сосуд выполнен из тонкой латунной сетки в виде цилиндра. В ходе опытов с помощью хромель-алюмелевых термопар регистрировалась температура не менее чем в четырех точках - в термостате, вблизи стенки, в центре и на границе реакционного сосуда. Вес пробы измерялся до и после опыта.

В течение всего опыта показания термопар фикси-

Рис. 1

ровались с интервалом в одну секунду, результаты отображались на мониторе в виде графиков в координатах «время – температура» и фиксировались на магнитном носителе для последующей обработки.

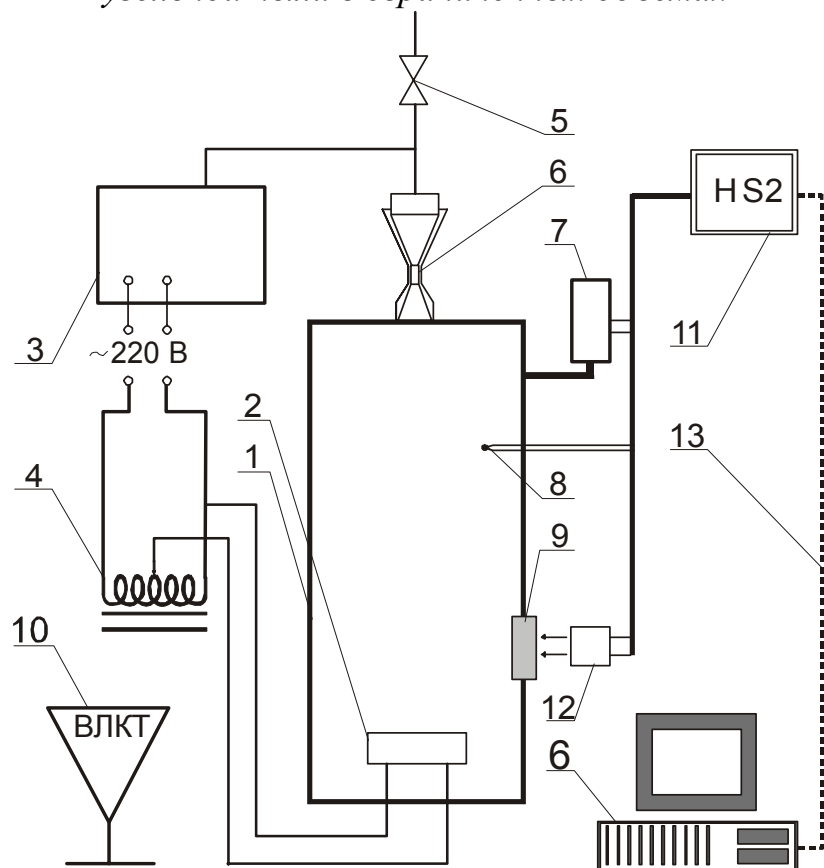
Специальная оптическая приставка к установке позволяла регистрировать относительную оптическую мощность излучения исследуемого образца в определенном диапазоне инфракрасного излучения.

Методика исследования взрывных процессов в замкнутом объеме

Экспериментальная установка (рис. 2) предназначалась для определения параметров возникновения и развития взрыва угольной пыли в ограниченных объемах.

Установка позволяла регистрировать динамику температуры, уровня акустического шума и интенсивность оптического излучения ближнего инфракрасного диапазона в процессе взрыва пыли. Основу установки составляла взрывная камера, выполненная в виде цилиндра из нержавеющей стали, с рубашкой водяного охлаждения. На боковой стенке камеры размещалось смотровое окно для измерения уровня оптического излучения, видеосъемки и наблюдения.

Установка определения условий развития взрывов угольной пыли в ограниченных объемах



- 1 - взрывной цилиндр; 2 - источник зажигания; 3 - компрессор; 4 - ЛАТР; 5 - клапан; 6 - эжектор; 7 - акустический датчик; 8 - термopара; 9 - смотровое окно; 10 - весы; 11 - регистратор; 12 - инфракрасный фотодиод; 13 - линия связи; 14 - ПЭВМ.

Рис. 2

Для создания равномерного пылевого облака внутри взрывной камеры использовался конусный распылитель с эжекционной форсункой. Давление, температура и концентрация кислорода во взрывной камере после ввода пылевого потока соответствовали атмосферным условиям.

При проведении опытов использовались два типа источников зажигания: пировоспламенитель и нагреватель.

Взрыв пылевзвеси сопровождается характерными факторами: тепло-

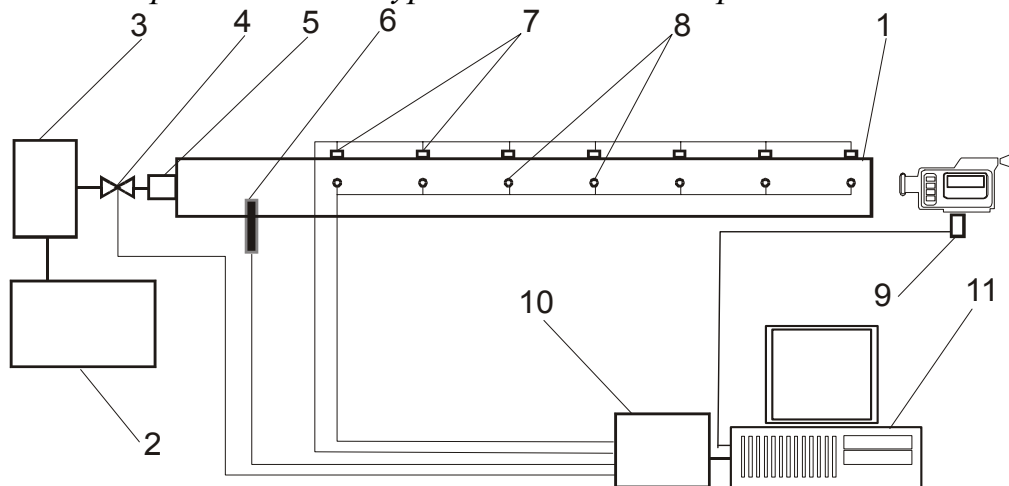
вым, акустическим, оптическим. Для регистрации температуры использова-

лись хромель-алюмелевые термопары, параметры шумового сигнала исследовались с помощью низкочастотного акустического датчика электромагнитного типа, динамика интенсивности оптического излучения определялась с помощью кремниевого инфракрасного фотодиода. Все измерения фиксировались с помощью скоростного регистратора (интервал измерений от 0,1 до 1 мс), отображались на экране цифрового осциллографа и записывались на магнитном носителе. Концентрация пылевзвеси определялась по весу пробы угольной пыли.

Методика исследования взрыва угольной пыли в протяженном канале

Экспериментальная установка (рис.3) предназначалась для исследования факторов взрыва пыли в протяженных каналах и посредством регистрации температуры и проведения видеосъемки позволяла исследовать скорость распространения фронта горения пылевзвеси. Основу установки составляет взрывной канал, который представлял собой стальную трубу диаметром 100 мм и длиной 2000 мм.

Экспериментальная установка по определению условий развития взрыва пыли натуральных топлив в протяженных каналах



- 1 - взрывной канал; 2 - компрессор; 3 - сосуд сжатого воздуха; 4 - клапан;
5 - эжектор; 6 - источник зажигания; 7 - термодатчики; 8 - фотодиоды;
9 - видеокамера; 10 - скоростной регистратор; 11 - ПЭВМ.

Рис. 3

Для создания равномерного пылевого облака внутри взрывной камеры использовался конусный распылитель с форсункой. С помощью компрессорной установки в сосуде сжатого воздуха создавалось избыточное давление до 0,4 Мпа. После открытия клапана поступающий в распылитель воздух эжектировал исследуемую пыль. Воспламенение пыли осуществлялось за счет прохождения пылевзвеси через трубчатый нагреватель.

В ходе опыта происходило формирование и распространение фронта горения пылевзвеси по каналу, сопровождающееся изменением температуры, регистрация которой производилась с помощью распределенных по оси канала хромель-алюмелевых термопар.

Показания термопар фиксировались с помощью скоростного регистратора (интервал измерений от 1 до 10 мс), отображались на экране цифрового

осциллографа и записывались на магнитном носителе. Концентрация пылевзвеси определялась по весу пробы угольной пыли.

Дополнительно производилась скоростная видеосъемка, позволявшая визуально оценить изменение интенсивности излучения в видимом диапазоне с открытого торца взрывного канала.

3. Расчетно-экспериментальные исследования

Исследование процесса самовозгорания пыли бурого угля. Определение кинетических характеристик. Модель процесса самовозгорания

На установке (п.2.1.) был проведен ряд экспериментов с пылью бурого угля Ирша-Бородинского разреза. Варьировались: температура термостатирования, степень окисленности (время контакта с кислородом воздуха) и гранулометрический состав.

Были получены термограммы самовозгорания бурого угля, наиболее характерные из них представлены на рис.4

Характерные термограммы самовозгорания пыли бурого угля полученные при разной температуре термостатирования

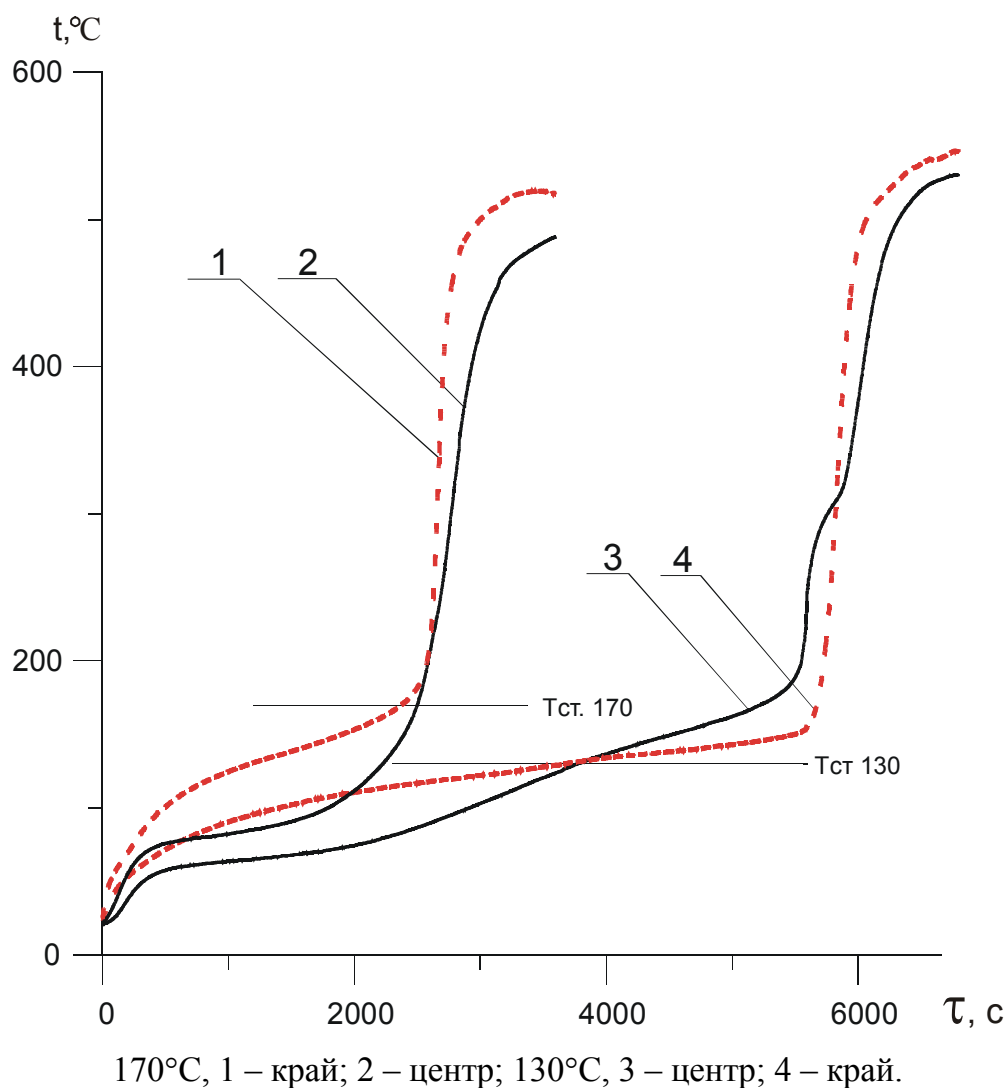


Рис. 4

Основным отличительным признаком бурых углей Канско-Ачинского бассейна является большое содержание летучих. Именно этим фактом объясняется их повышенная взрывоопасность. Известно, что при нагревании бурых углей происходит множество различных процессов, в том числе и десорбция летучих, в ходе которой происходит накопление летучих в объеме с образованием взрывоопасной концентрации газообразных углеводородов и других продуктов в смеси с кислородом воздуха. Самонагревание и последующее возгорание бурого угля происходит при температуре от 75 до 200 °С. При таких температурах тепловым эффектом окисления выделяющихся летучих можно пренебречь.

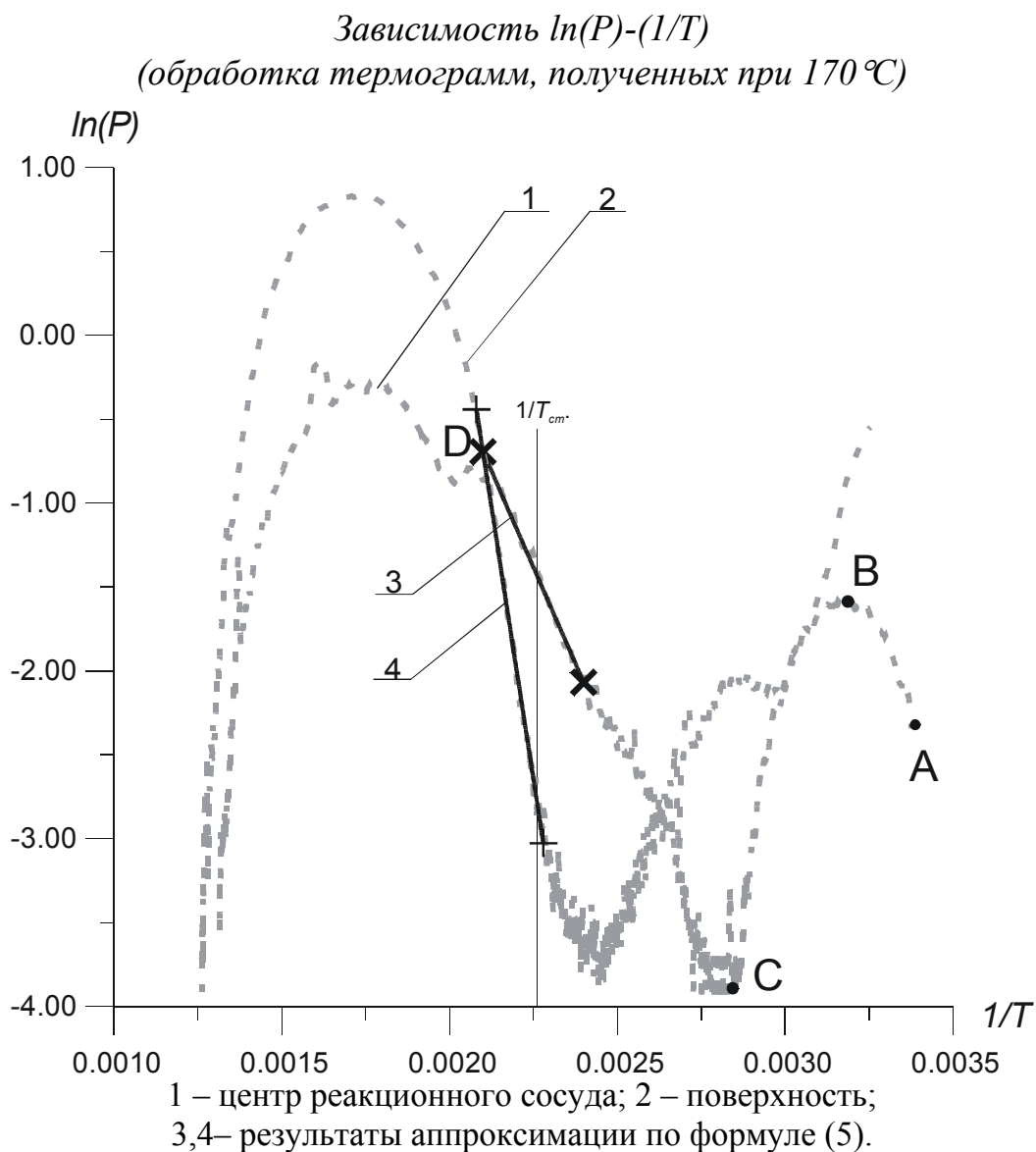


Рис. 5

Для расчета эффективной энергии активации E и предэкспоненциального множителя C полученные в ходе опыта термограммы обрабатывались и пересчитывались в аррениусовских координатах. Наиболее характерные зависимости приведены на рис. 5. Для определения адиабатической скорости нагревания использовался участок вблизи температуры термостатирования.

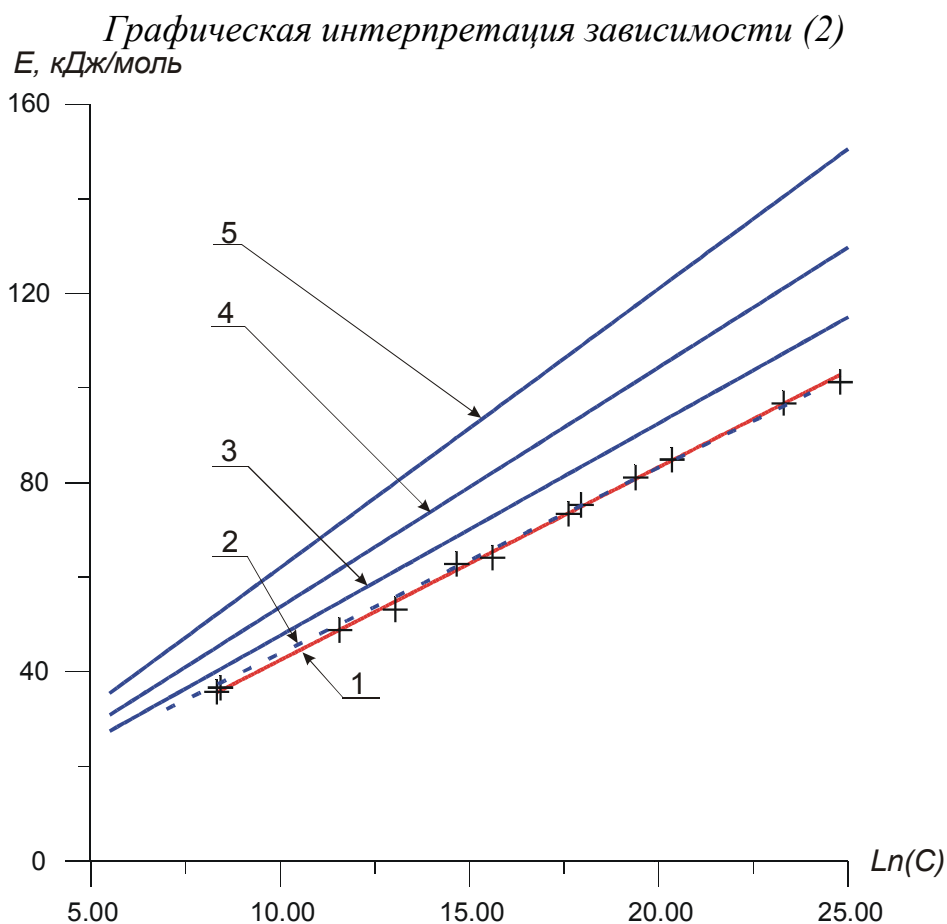
Данный участок удовлетворительно аппроксимируется прямой в аррениусовских координатах с коэффициентом парной корреляции $r=0.97$, что свидетельствует о приемлемости выбранной методики. Коэффициенты уравнения полученной прямой соответствовали формуле:

$$\ln(P) = \ln(C) - E/R (1/T), \quad (1)$$

откуда определялись кинетические параметры процесса: эмпирическая (эффективная) энергия активации E и предэкспоненциальный множитель C . Полученные значения E и C соответствуют значениям, приводимым многими авторами для бурых углей. Для разных проб угля в зависимости от гранулометрического состава и условий проведения опыта были получены различные значения E и C . Установлено, что E и C изменялись не хаотично (рис.6), а в строго определенной зависимости:

$$E = a \ln(C) + b, \quad (2)$$

где a и b некоторые константы (коэффициент парной корреляции $r > 0,99$).



«+» - экспериментальные точки; 1 – результат аппроксимации (2);
Литературные данные: 2 (штриховая) – бурый уголь; 3 – торф;
4 - целлюлозные материалы; 5 – технический углерод.

Рис. 6

Полученные автором данные о зависимости (2) для самовозгорания согласуются с данными других исследователей.

Характер полученных термограмм не может быть полностью объяснен с позиций тепловой теории. В частности, это обусловлено отсутствием учета тепловых потерь при нагревании бурого угля, в том числе, на десорбцию летучих. Содержание летучих в бурых углях является достаточно большим, например, в углях Ирша-Бородинского месторождения оно достигает 42 %. Известно, что теплота десорбции летучих веществ составляет от 8-25 кДж/моль при физической адсорбции и 80-100 кДж/моль при хемосорбции. Следовательно, тепловым вкладом десорбции в процесс самовозгорания нельзя пренебрегать. Кроме десорбции при самовозгорании параллельно могут идти и другие эндотермические процессы, но в настоящей работе они не учитывались.

Как следует из графиков (рис. 5) существует несколько характерных участков, соответствующих различным стадиям процесса. Если поведение угольной пыли на участке А-В может быть удовлетворительно описано уравнением теплообмена, то на участке В-С происходит резкое снижение скорости нагрева (в 5-10 раз), что свидетельствует о появлении дополнительных тепловых потерь, в том числе за счет десорбции летучих.

В общем случае процесс разогрева образца пыли бурого угля в термостате можно записать в виде:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{1}{mC_m} (\dot{Q}_m + \dot{Q}_d + \dot{Q}_o), \quad (3)$$

где m - масса навески угольной пыли, кг;

$\dot{Q}_m$ - тепловая мощность, обусловленная теплопроводностью, Вт;

$\dot{Q}_d$ - мощность тепловых потерь на десорбцию летучих (со знаком «-»), Вт;

$\dot{Q}_o$ - мощность тепловыделения при окислении угля, Вт;

C_m - теплоемкость угольной пыли, Дж/(кг·К).

$\dot{Q}_m$ находится по формуле:

$$\dot{Q}_m = \alpha S (T - T_0), \quad (4)$$

где α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К); S - площадь поверхности теплоотдачи, м²;

$\dot{Q}_d$ можно найти по формуле:

$$\dot{Q}_d = J q_{дес}, \quad (5)$$

где J - скорость десорбции (адсорбции), моль/с;

$q_{дес}$ - теплота десорбции, Дж/моль.

Скорость адсорбции (десорбции) обычно определяется по формуле:

$$J = K(a_\tau - a_T), \quad (6)$$

где K - коэффициент скорости адсорбции, кг/с;

a_τ - текущая концентрация летучих, моль/кг;

a_T - равновесная концентрация летучих при заданной температуре T , моль/кг.

Значение равновесной адсорбции может быть определено с помощью теории объемного заполнения микропор Дубинина:

$$a_T = \frac{W_o}{V^*} \exp \left[- \left(\frac{RT \ln(P_s / P)}{\beta E_o} \right)^n \right] \quad (7)$$

где a_T – величина равновесной адсорбции, моль/кг;

W_o – предельный объем адсорбционного пространства, м³/кг;

V^* - объем одного моля адсорбата, м³/моль;

P_s, P – давление насыщенного пара и равновесное соответственно, Па;

β – коэффициент подобия;

E_o – характеристическая энергия адсорбции, Дж/моль;

n – параметр уравнения равный для большинства углей 2.

Текущая концентрация a_τ при условии отсутствия потерь в окружающую среду может определяться по формуле:

$$a_\tau = a_0 + \int_0^\tau J(\tau) d\tau, \quad (8)$$

где a_0 – начальная концентрация летучих, моль/кг.

Тепловыделение $\dot{Q}_o$ от окисления угля находится по формуле:

$$\dot{Q}_o = U q_o, \quad (9)$$

где U – скорость химической реакции окисления, моль/с;

q_o – тепловой эффект этой реакции, Дж/моль.

В свою очередь, с учетом теории Аррениуса

$$U = k_0 A_C^{n_C} A_{O_2}^{n_{O_2}} e^{-\frac{E_{ox}}{RT}}, \quad (10)$$

где $k_0 \exp(-E_{ox}/RT)$ – константа скорости химической реакции;

A_C, A_{O_2} – концентрации реакционноспособных составляющих угля и кислорода соответственно, моль/кг;

E_{ox} – энергия активации реакции окисления, Дж/моль;

n – порядок реакции, принимаемый для угля равным 0, для кислорода 1.

При повышении температуры следует учитывать переход процесса окисления из кинетической в диффузионную область, когда скорость будет определяться диффузией кислорода к реагирующей поверхности.

Учитывая порядок реакции окисления и процесс диффузии, получим следующее выражение для текущей концентрации кислорода:

$$A_{O_2} = A_0 [1 - \exp(-k_0 \exp(-E_o / RT) \tau)] + \int_0^\tau M(\tau) d\tau, \quad (11)$$

где $M(\tau)$ – скорость диффузии кислорода,

A_0 – начальная концентрация кислорода, моль/кг.

На основании уравнений 3-11 были построены расчетные термограммы и зависимости $\ln(P) - (1/T)$, характер которых без учета диффузии кислорода при $T > 700$ К совпадает с характером экспериментальных кривых (рис. 7). При проведении расчетов по предложенной модели в качестве параметров использовались данные о характеристиках бурого угля, полученные из литературных источников. Обработка расчетных термограмм в аррениусовских координатах позволяет получить кривые, аналогичные экспериментальным (рис.5) с характерными прямолинейными участками, по которым можно рассчитать E и C . Различные значения E и C , полученные при варьировании параметров модели, согласуются с прямой (2).

Расчетные термограммы
для разных температур термостатирования

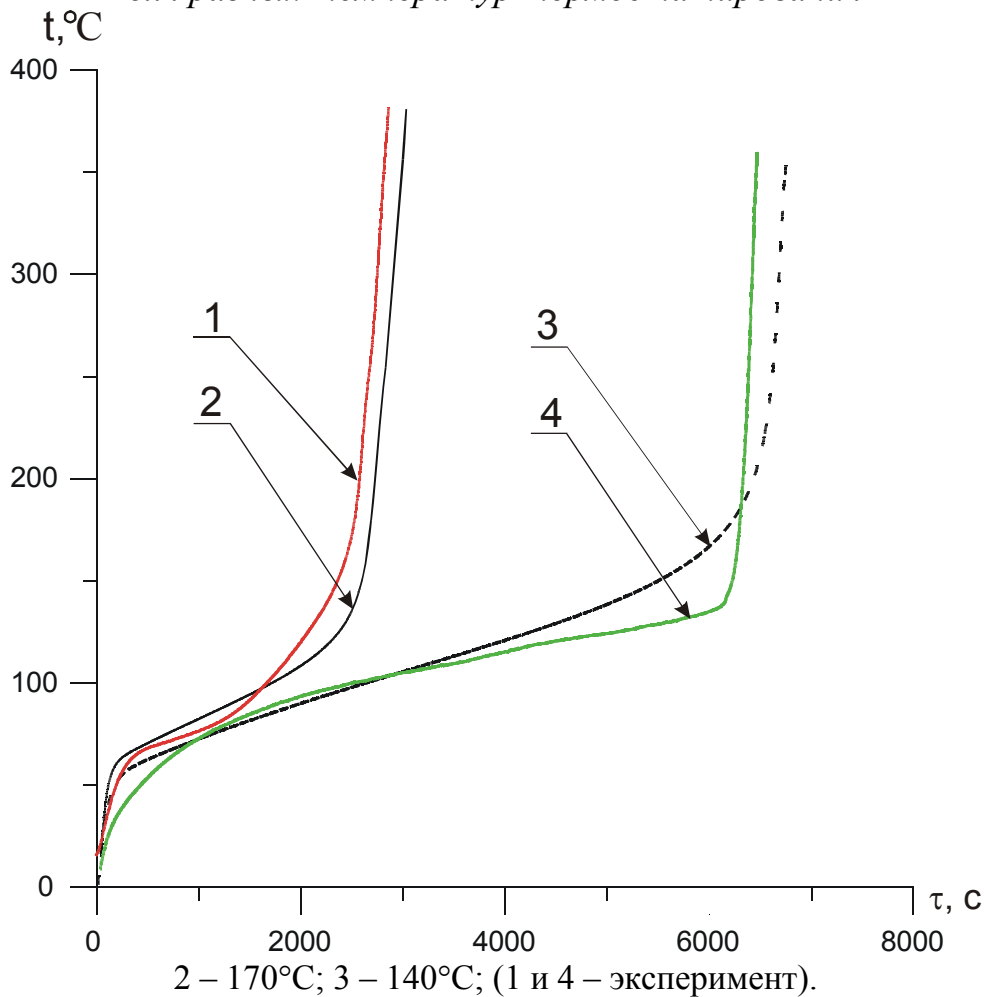


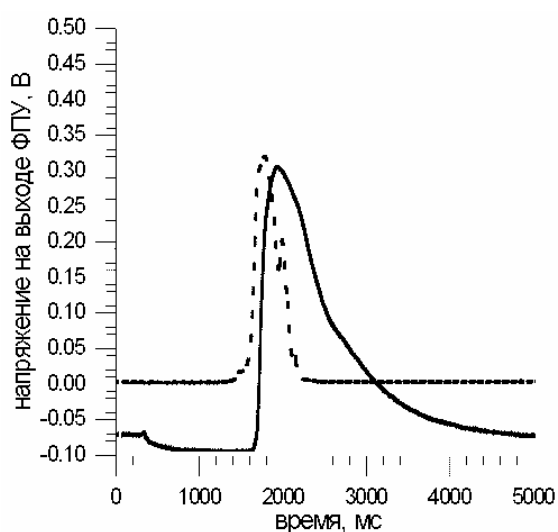
Рис.7.

Полученная математическая модель позволяет рассчитывать скорость разогрева (тепловыделения) пыли бурого угля в процессе самовозгорания в зависимости от ее свойств и внешних факторов и оценить развитие факторов, пригодных для регистрации инфракрасными датчиками.

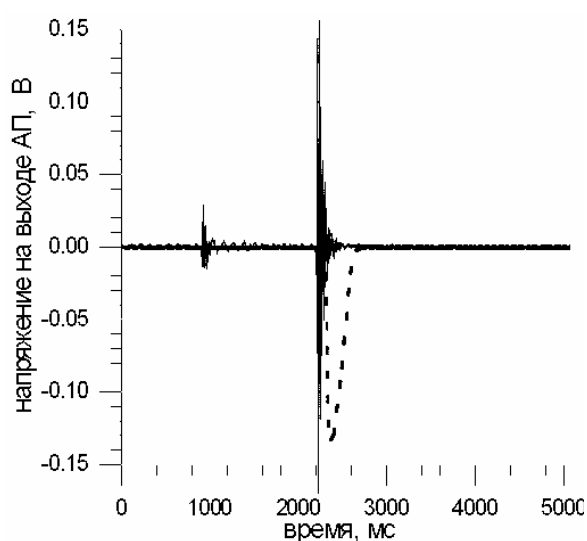
3.2. Исследование взрыва пыли бурого угля в замкнутом объеме

На установке (п.2.2.) проводились эксперименты с пылью бурого угля Ирша-Бородинского разреза фракций менее 80 мкм, 80-160 мкм, 160-180 мкм. Варьировались: начальная концентрация пылевзвеси (вес распыляемой пробы) и степень окисленности. Одновременно регистрировались температура и уровень оптического излучения или уровень акустических шумов и оптического излучения.

Осциллограммы взрыва пыли бурого угля (фракция 160-180 мкм)



Сплошная линия – уровень акустического шума; штриховая – уровень оптического излучения. Источник зажигания – пировоспламенитель.



Сплошная линия – температура; штриховая – уровень оптического излучения. Источник зажигания – нагревательный элемент

Рис.8

Были получены характерные осциллограммы (рис.8), по которым были определены временные характеристики возникновения некоторых факторов взрыва угольной пыли.

На рис.9 показана динамика взрыва угольной пыли по оптическим измерениям для проб угольной пыли различной степени окисленности.

Как видно из рис. 8 и данных таблицы с наименьшим временем задержки регистрируются акустические шумы и оптическое излучение, с наибольшим – показания термопар.

Максимум оптического излучения регистрируется несколько позже начала взрывного процесса. При формировании взрыва в замкнутом объеме, акустический датчик обладает наименьшим временем задержки.

*Динамика оптического излучения взрыва угольной пыли
(фракция менее 80 мкм) при разной степени окисленности*

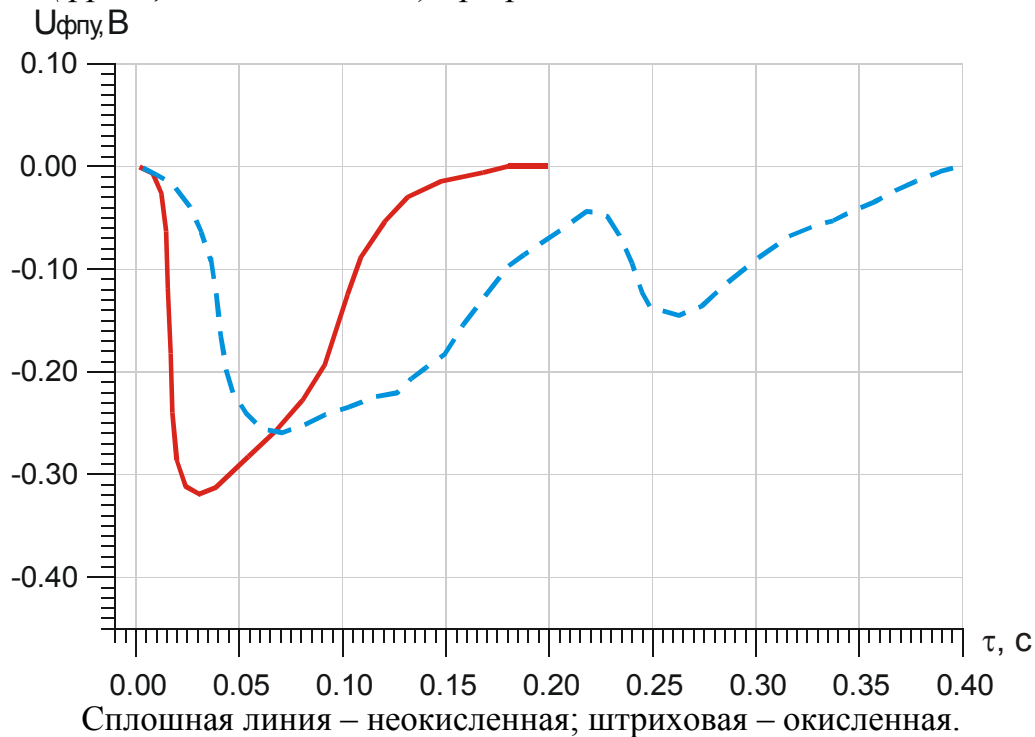


Рис.9

Таблица

Данные о развитии факторов взрыва пыли бурого угля

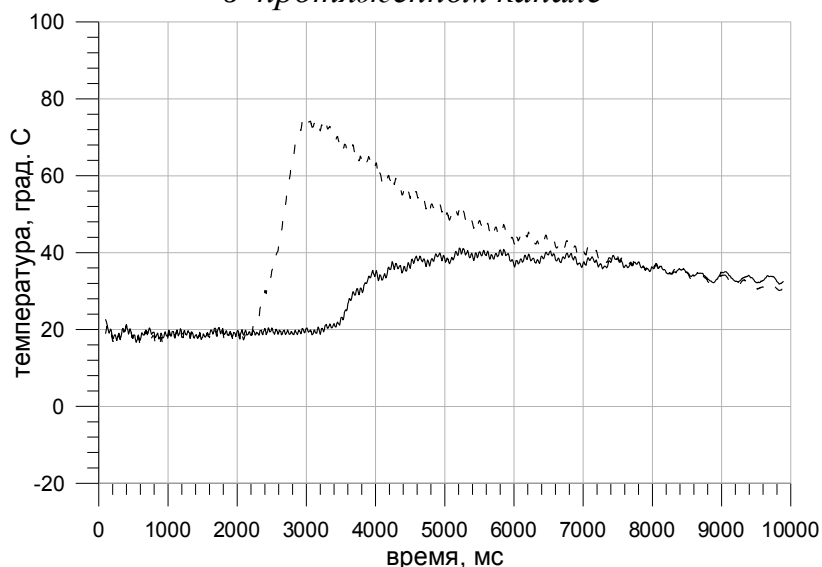
Тип датчика	Характеристики угольной пыли		Время нарастания, мс	Время спада, мс
	Фракция, мкм	Окисленность*		
Фотоэлектрический	< 80	НО	25-30	110-140
	< 80	О	50-70	200-380
	80-160	НО	40-50	150-180
Термоэлектрический	< 80	НО	370-410	>2000
	80-160	НО	420-460	>2000
	80-160	О	420-480	>2000
	160-180	НО	340-390	>2000
Акустический	< 80	НО	10-15	150-180
	80-160	НО	15-25	180-220
	160-180	НО	<5	15-20
	160-180	О	10-20	100-140

* НО – неокисленная, О- окисленная (контакт с воздухом - 36 часов)

3.3. Исследование характеристик распространения фронта взрыва пыли бурого угля в протяженном канале

На установке (п.2.3.) проводились эксперименты с пылью бурого угля Ирша-Бородинского разреза фракций менее 80 мкм, 80-160 мкм. Варьировался вес распыляемой пробы и степень окисленности. Одновременно регистрировались температура и проводилась скоростная видеосъемка.

*Термограмма распространения взрыва угольной пыли
в протяженном канале*



Штриховая линия – термопара на расстоянии 0,5 м ; сплошная – 1 м от источника зажигания (нагревательный элемент).

Рис.10

Были получены характерные осциллограммы факторов взрыва (рис.10).

По полученным данным производился расчет скорости распространения теплового фронта пламени вблизи источника зажигания и характерного времени (инерционности средств обнаружения).

3.4. Раннее обнаружение процессов самовозгорания и взрыва пыли бурого угля

Возникновение пожара и взрыва угольной пыли – процесс многостадийный. Наиболее эффективная борьба с этими явлениями возможна на самых ранних стадиях – при самонагревании и самовозгорании. Время развития этих стадий может достигать нескольких часов, но интенсивность проявления соответствующих факторов при этом очень мала. Взрывы угольной пыли сопровождаются рядом факторов высокой интенсивности, но развиваются в течение очень короткого времени – от 0,2 до 1 секунды. Из вышеизложенного формулируется основное требование к средствам раннего обнаружения пожаров и взрывов угольной пыли – высокая чувствительность и малая инерционность.

По требованиям инерционности не могут использоваться тепловые и дымовые датчики, по требованиям чувствительности и помехозащищенности – акустические. Удовлетворительно отвечает обоим требованиям оптический

инфракрасный датчик, для создания которого необходимо выбрать оптический ИК-детектор, имеющий оптимальные спектральные характеристики.

Исследования показывают, что температура тления угольной пыли в зависимости от недостатка или избытка кислорода воздуха в очаге находится в пределах от 350 до 550 °С, что согласуется с данными других авторов. При таких температурах угольная пыль излучает как серое тело, а спектры излучения отдельных продуктов сгорания не имеют выраженного характера.

ИК-излучение очага самовозгорания имеет, по закону Голицына-Вина, максимум спектральной плотности в диапазоне 3,52..4,65 мкм. Тепловое излучение конструкционных материалов, источника оптических помех, имеет максимум спектральной мощности излучения в коротковолновой области.

Диапазон от 2,5 до 5 мкм является наиболее приемлемым для регистрации с точки зрения уменьшения помех. Для использования в средствах обнаружения пожаров и взрывов угольной пыли удовлетворительно подходят фоторезисторы на основе PbSe.

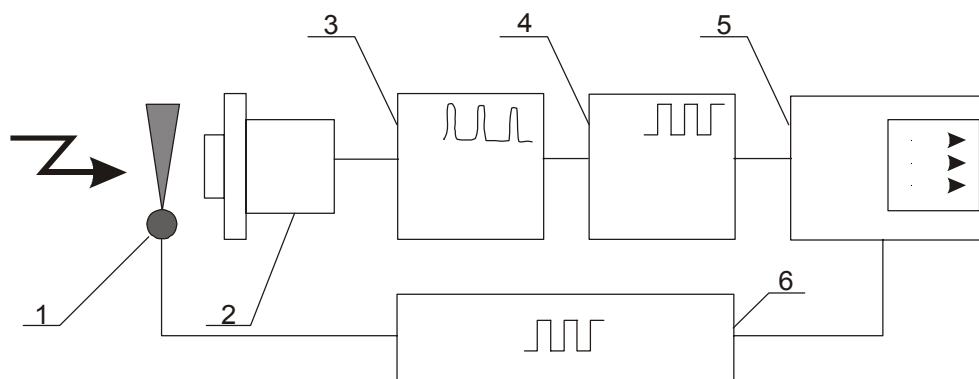
3.5. Метод раннего обнаружения очагов самовозгорания и взрыва на базе модуляционного принципа регистрации ИК-излучения.

Автором был разработан метод раннего обнаружения очагов самовозгорания и тления угольной пыли на основе специального инфракрасного фотоприемного устройства с заданной полосой пропускания и электромеханического прерывателя оптического потока (модулятора).

Модуляционные датчики используют принцип принудительной модуляции оптического потока и позволяют получить переменный электрический сигнал, амплитудное значение которого соответствует максимальной разности температур между температурой фона и температурой очага пожара. Модуляционные датчики не требуют наличия сформировавшегося пламени, и могут применяться для обнаружения очагов тления угольной пыли.

В состав модуляционного датчика входит электромеханический прерыватель оптического потока (модулятор), ФПУ - фоторезистор, усилитель, компаратор, блок обработки и формирования сигналов. Функциональная схема такого датчика приведена на рис.11.

Функциональная схема инфракрасного модуляционного датчика



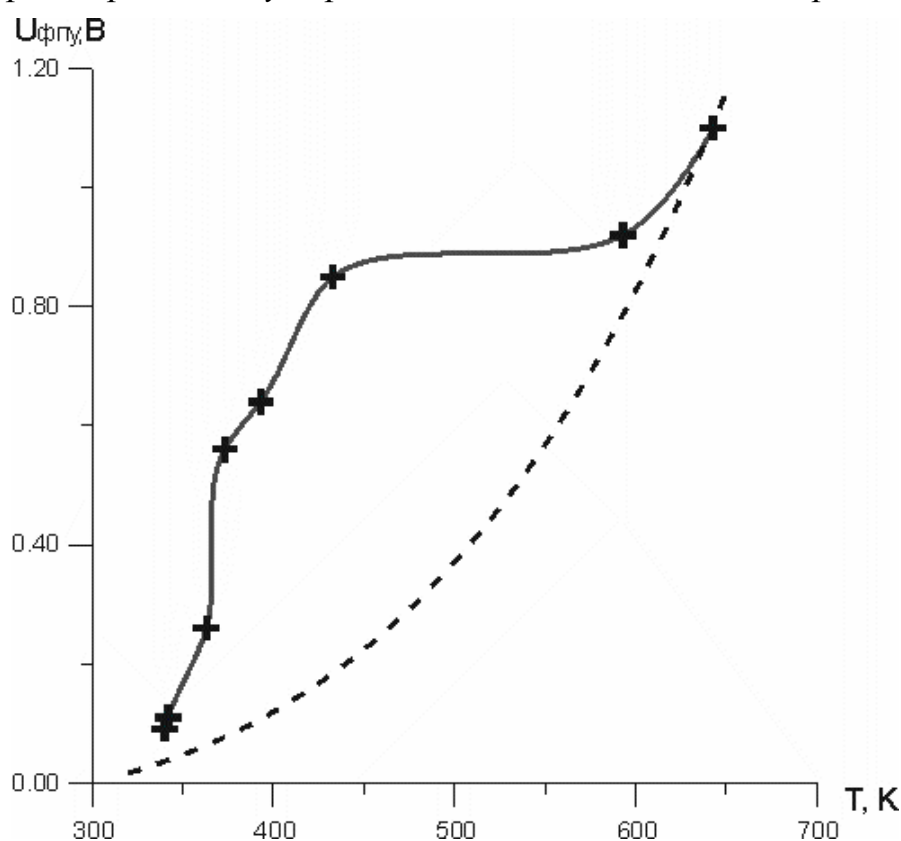
1 - модулятор; 2 - фоторезистор; 3 - входной усилитель; 4 - компаратор;
5 - блок обработки и формирования сигналов; 6 - генератор.

Рис.11

Инерционность модуляционного датчика определяется частотой модуляции и алгоритмом пересчета, при котором сигнал тревоги выдается не сразу, а только после прохождения заданного количества импульсов. При частоте модуляции 20 Гц и 4-кратном пересчете импульсов инерционность не превышает 0,2 секунды.

В работе приведена зависимость уровня напряжения на выходе усилителя от средней температуры поверхности (стадии) развития очага самовозгорания угольной пыли (рис.12).

*Зависимость напряжения на выходе усилителя
фотоприемного устройства от стадии самовозгорания*



Сплошная линия – эксперимент;
штриховая – расчет по закону Стефана-Больцмана

Рис.12

Данные сравнительных испытаний различных типов инфракрасных извещателей пожара (модуляционного датчика с узкополосным и широкополосным спектральными фильтрами, включая две модификации) позволили определить наиболее эффективное средство раннего обнаружения и подтвердить сделанные в работе выводы и предположения.

На основе рекомендаций автора был разработан извещатель МДП-2АСТ, который в настоящее время производится серийно, предназначенный для использования в системах раннего обнаружения очагов пожара трактов топливopодачи.

4. Разработка технических решений по проектированию системы раннего обнаружения очагов самовозгорания трактов топливоподачи

На основе результатов настоящих исследований была разработана система раннего обнаружения очагов пожара и взрыва угольной пыли, которая является основным элементом автоматизированной системы взрывоподавления и противопожарной защиты (АСВПЗ) трактов топливоподачи Абаканской ТЭЦ.

АСВПЗ состоит из средств раннего обнаружения очагов пожара (взрыва); средств технологической сигнализации; исполнительных устройств пожаротушения; средств оповещения; средств управления исполнительными устройствами и технологическим оборудованием; энергонезависимых источников питания; средств обработки, передачи и отображения информации; средств и линий связи; специального программного обеспечения. Все элементы объединены в автоматизированную систему управления. Типовая структурная схема АСВПЗ трактов топливоподачи приведена на рис.13.

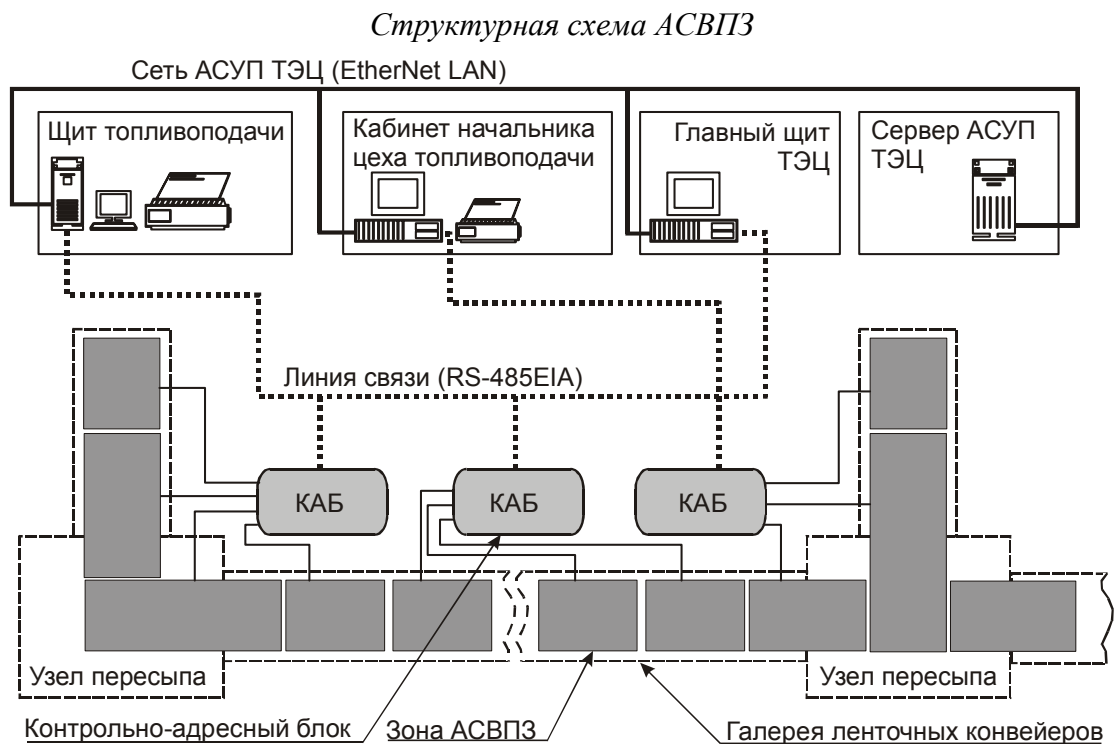


Рис.13

В работе приведены результаты внедрения и опытной эксплуатации АСВПЗ на Абаканской ТЭЦ АО «Хакасэнерго», Красноярской ТЭЦ-1.

Основные результаты и выводы:

1. Исследована динамика факторов процесса самовозгорания: тепловыделения, относительной оптической мощности ИК-излучения. Разработан метод определения кинетических параметров и склонности топлива к самовозгоранию и установлены приемлемые для ранней регистрации очагов самовозгорания и тления угольной пыли факторы, уточнены требования к средствам раннего обнаружения по чувствительности.

2. Определены временные параметры взрыва пыли бурого угля в замкнутом объеме и протяженном канале и их зависимость от различных условий, установлены факторы, по которым возможно их раннее обнаружение, сформулированы требования к средствам раннего обнаружения по инерционности.
3. Разработана математическая модель процесса самовозгорания, позволяющая прогнозировать процесс самовозгорания в зависимости от различных факторов (физико-химических свойств угольной пыли, условий теплообмена с окружающей средой).
4. Обоснованы требования к инфракрасным фотоприемным устройствам, используемым в средствах раннего обнаружения очагов самовозгорания (взрыва) угольной пыли по удельной обнаружительной способности и спектральной чувствительности, на основании которых произведен выбор оптимальных датчиков.
5. Разработан метод раннего обнаружения очагов самовозгорания, тления и дефлаграционного горения угольной пыли по характерному ИК-излучению. На основе метода создан инфракрасный пожарный извещатель, предназначенный для защиты трактов топливоподачи тепловых электростанций.
6. Разработаны технические решения по созданию автоматизированной системы взрывоподавления и противопожарной защиты трактов топливоподачи Абаканской ТЭЦ, Красноярской ТЭЦ-1

Работы, опубликованные по теме диссертации:

1. **Захаренко Д.М.** Использование термостимулированного разряда для определения параметров термического разложения нитроцеллюлозы //Химическая физика. – 1990. - №5. - С.644-647.
2. **Захаренко Д.М., Иващенко Ю.С., Садырин А.Я., Яковлев А.В.** Активация горения конденсированных систем плазмохимическим методом//Физика горения и взрыва. – 1994. - №3. - С.124-126.
3. **Захаренко Д.М., Андреев Ю.А., Амельчугов С.П., Башков С.А.** Закономерности пространственно-временного распределения огнетушащего аэрозоля //Мат. межд. конф. «Математическое и физическое моделирование лесных пожаров и их экологических последствий», 10-15 июня 1997, Иркутск. - Томск-Иркутск:1997. – С.8-10.
4. **Zakharenko D.M., Andreev U.A., Amelchugov S.P., Bashkov S.A.** Regularities of space-time distribution of fire-extinguishing aerosol //Mathematical and Physical Modeling of Forest Fires and Their Ecological Impacts. The proceedings of the International Conference, June 10-15, 1997, Irkutsk. - Tomsk-Irkutsk: 1997. - P.6-8.
5. **Захаренко Д.М., Амельчугов С.П., Ведерников В.И.** Особенности противопожарной защиты объектов топливно-энергетического комплекса Восточной Сибири //Мат. межд. конф. «Сопряженные задачи механики и экологии», Томск. - Томск, 1998. – С.12-13.

6. **Захаренко Д.М., Амельчугов С.П.** Автоматизированная система взрывоподавления и противопожарной защиты трактов топливоподачи Абаканской ТЭЦ //Сиб. вест. пожарной безопасности. – 1999. - №2. - С.42-47.
7. **Захаренко Д.М.** Автоматизация измерений при проведении сертификационных испытаний в области пожарной безопасности //Сиб. вест. пожарной безопасности. – 2000. - №1. - С.44-48.
8. **Захаренко Д.М.** Проблемы раннего обнаружения очагов пожаров и взрывов угольной пыли /Мат. Всерос. науч.-практ. конф. «Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях», 21-23 ноября 2000, Красноярск. – Красноярск: 2000. - С.141-149.
9. **Захаренко Д.М., Амельчугов С.П., Кириллов О.В., Горностаев Р.В., Якунин В.А.** Интегрированная модульная система противопожарной защиты территориально-распределенных объектов /Мат. Всерос. науч.-практ. конф. «Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях», 21-23 ноября 2000, Красноярск. – Красноярск: 2000. - С.135-140.
10. **Захаренко Д.М., Амельчугов С.П., Басараб С.П.** Внедрение системы противопожарной защиты трактов топливоподачи Абаканской ТЭЦ /Мат. Всерос. науч.-практ. конф. «Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях», 21-23 ноября 2000, Красноярск. – Красноярск: 2000. – С.131-135.
11. Интегрированная модульная система противопожарной защиты территориально-распределенных объектов /**Д.М. Захаренко, С.П. Амельчугов, О.В. Кириллов и др.** //Сиб. вест. пожарной безопасности. – 2000. - №4. - С.22-27.
12. **Захаренко Д.М.** Проблемы раннего обнаружения очагов пожаров, тления, взрывов угольной пыли //Сиб. вест. пожарной безопасности. – 2000. - №4. - С.36-47.

Соискатель:

Отпечатано: АО «Компьютерные технологии»
г. Красноярск, ул. К.Маркса,62; офис 120; тел.(3912) 26-34-92
Лицензия ПЛД №48-49 от 16.04.1997 г. Заказ №1804. Тираж
100 экз