

на правах рукописи

БОЙКО

Евгений Анатольевич

**КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И УЧЕТ
РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГЛЕЙ
В ПРАКТИКЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ**

05.14.04 – промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Красноярск 2008

Работа выполнена на кафедре «Тепловые электрические станции» ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» (г. Красноярск)

Научный консультант:

доктор физико-математических наук,
профессор

Журавлев Валентин Михайлович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
доктор технических наук, профессор
доктор технических наук, профессор

Костин Владимир Иванович
Степанов Сергей Григорьевич
Щипко Максим Леонидович

Ведущая организация:

Институт теплофизики
им. С.С. Кутателадзе СО РАН
(г. Новосибирск)

Защита диссертации состоится « 27 » ноября 2008 г. в 14 часов в аудитории Д 1-03 на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.07 при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу:
660074, г. Красноярск, ул. акад. Киренского, 26.
тел. (3912) 91-27-56, факс 43-06-92 (для кафедры ТЭС).
e-mail: boiko@krgtu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Политехнического института Сибирского федерального университета.

Автореферат разослан « 24 » октября 2008 г.

и.о. ученого секретаря,
д.т.н., профессор

С.А. Бронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Согласно «Энергетической стратегии России на период до 2020 года», утвержденной распоряжением Правительства РФ № 1234-р от 28.08.2003 г., твердое органическое топливо рассматривается в качестве основного сырьевого источника для производства энергии на длительную перспективу. Совершенствованию технологии производства и потребления энергии, вырабатываемой на твердом органическом топливе, уделяется значительное внимание в энергетической, углехимической, металлургической и других отраслях промышленности. Создание новых и повышение эффективности существующих технологических приемов термохимической обработки, сжигания и газификации твердых горючих ископаемых основано на всесторонней оценке их состава и свойств. Технологии производств, так или иначе связанных с использованием процессов испарения влаги, термического разложения и взаимодействия топлива с окислителем, предусматривают, в качестве неперемennого условия, оценку его реакционной способности. При этом необходимо учитывать специфические для каждой марки угля сложные кинетические механизмы большого класса недостаточно исследованных явлений термохимического превращения органической и минеральной части пылевидного твердого топлива. Значительный разброс и неполнота экспериментальных значений кинетических параметров, определяющих реакционную способность, а также отсутствие обобщающих методических работ по определению этих параметров применительно к основным этапам термохимического превращения твердого органического топлива в условиях реальных теплотехнологических процессов и установок, предопределили основные положения исследований в рамках самостоятельного научного направления «Реакционная способность углей».

Достаточно эффективным средством исследования механизма и кинетики процессов термохимического превращения твердого органического топлива является использование методов комплексного термического анализа и математического моделирования. Перечисленные методы нашли широкое применение в практике научных исследований, однако, сложность исследуемых процессов требует их дальнейшего совершенствования. Следует отметить, что имеет место не объективность при оценке и интерпретации получаемых результатов, а иногда и явно ошибочные гипотезы. Феноменологическое описание нуждается в дополнительной информации, главным образом структурного характера, что особенно важно при исследовании динамики процессов.

Разработка комплексного метода оценки реакционной способности энергетических углей, математических моделей и методик расчета степени термохимического превращения твердого органического топлива и обоснование на их основе технических и технологических решений по повышению эффективности энергетического использования углей имеет существенное значение для ускорения научно-технического прогресса в топливно-энергетическом комплексе страны и являются важными народно-хозяйственными задачами.

Работа выполнена в соответствии с заданием 07.05 федеральной целевой комплексной научно-технической программы 0.Ц.008 («Энергия»), утвержденной Постановлением ГКНТ, Госпланом СССР и АН СССР (№ 4741250/132) от 12.12.1980 г., научно-технической программой «Технические университеты» (1993-1996 г.), «Гранта по фундаментальным исследованиям в области энергетики и электротехники» (1998-1999 г.), гранта РФФИ (№08-08-90253-Узб_а, 2008-

2009) и тематических планов выполнения хозяйственных договоров (1995-2007 г.) с Красноярской ТЭЦ-1, ТЭЦ Ачинского глиноземного комбината, Красноярской ТЭЦ-2, Назаровской ГРЭС, Минусинской ТЭЦ, Красноярской ТЭЦ-3, Красноярской ГРЭС-2, ЗАО «СибКОТЭС» (г. Новосибирск), ОАО СибЭНТЦ (г. Новосибирск), ОАО «Енисейская генерация (ТГК-13)» (г. Красноярск).

Объектом исследования является комплекс термических и термохимических процессов превращения пылевидного твердого органического топлива в условиях его подготовки и сжигания на тепловых электростанциях.

Предмет исследований: кинетические параметры термохимической обработки энергетических углей Кузнецкого и Канско-Ачинского месторождений.

Цель работы заключается в развитии и внедрении комплексного метода исследования реакционной способности твердых органических топлив в практику физического и математического моделирования теплотехнологических процессов и устройств для повышения эффективности проектных и технических решений энергетического использования углей.

Для достижения цели решались следующие **задачи:**

- анализ методических подходов и экспериментальных приемов по исследованию и определению кинетических параметров процесса горения твердого органического топлива в пылевидном состоянии;

- совершенствование схемы и установки комплексного термического анализа твердого органического топлива для исследования и определения характеристик его реакционной способности;

- исследование влияния различных факторов на характер термоаналитических зависимостей и обоснование выбора экспериментальных условий выполнения комплексного термического анализа угольного вещества для определения его технических и реакционных характеристик;

- обобщение и развитие теоретических основ и математического аппарата неизотермической кинетики процессов термохимического превращения твердого органического топлива;

- разработка методики и определение на ее основе кинетических параметров процессов испарения влаги, выхода летучих веществ с отдельной оценкой смолы и выхода парогазовых компонентов, горения и газификации нелетучего остатка, термических превращений химических компонентов минеральной части твердого органического топлива;

- проведение экспериментальных исследований процесса термохимического превращения твердого органического топлива в условиях лабораторных, полупромышленных и промышленных установок с сопоставлением полученных при различном темпе нагрева видимых констант скоростей основных стадий горения угля;

- разработка математической диффузионно-кинетической модели термохимического превращения твердого органического топлива в газовом потоке и выполнение на ее основе расчетного анализа динамики этого процесса при различных условиях обработки угля и параметрах модели;

- совершенствование методики расчета степени выгорания пылевидного твердого органического топлива в топочных камерах паровых котлов, разработка вычислительного алгоритма и программы по расчету динамических характеристик горения угольной пыли и создание на их основе тренажерных комплексов для отработки оперативных задач управления рабочими процессами топочных устройств котельных агрегатов;

– обоснование рекомендаций по практическому применению результатов комплексного термического анализа для разработки рациональных способов, режимов и устройств энергетического использования углей.

В работе использован комплексный **метод исследований**, включающий научный анализ теории и практики термохимической обработки твердого органического топлива, математическое моделирование и экспериментальные исследования в лабораторных и опытно-промышленных условиях, а также промышленное внедрение результатов исследования. Численное моделирование теплофизических и физико-химических процессов базируется на известных достижениях фундаментальных и прикладных наук, таких как теория горения, физическая химия, теория тепло- и массообмена, вычислительная математика и др. Экспериментальные исследования подкреплены соответствующим метрологическим обеспечением и проводились на базе ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет».

Научная новизна и положения, выносимые на защиту:

1. Разработан критерий для определения условий и режимных параметров выполнения комплексного термического анализа твердого органического топлива, основанный на расчетной оценке и текущем контроле соотношения количества прореагировавшего вещества к диффузионному потоку через слой продуктов реакции, что обеспечивает протекание сложных процессов, ответственных за термохимическое превращение угля при проведении лабораторного эксперимента в строго кинетической области.

2. Разработана экспресс-методика определения теплотехнических характеристик твердого органического топлива по результатам его комплексного термического анализа, основанная на аналитической обработке в соответствующей температурной области термогравиметрических кривых убыли массы навески, полученных в условиях непрерывного нагрева и различной атмосфере печи.

3. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена применимость математического аппарата неизотермической кинетики для оценки реакционной способности энергетических углей, устанавливающего с помощью системы трансцендентных уравнений связь между кинетическими характеристиками процесса, скоростью нагрева и долей прореагировавшего вещества, и разработаны практические рекомендации по его использованию для экстраполяции результатов комплексного термического анализа на условия высокоскоростного нагрева, присущие реальным теплотехнологическим процессам и установкам.

4. Разработан новый экспериментально-расчетный метод исследования кинетики многостадийных процессов термохимического превращения твердых органических топлив, использующий аппроксимацию экспериментальных термогравиметрических кривых полиномом, коэффициенты которого определяются исходя из реализации принципа последовательного захвата, расчета и исключения изолированных стадий из исходных термоаналитических зависимостей с помощью корреляционно-регрессионного анализа, что позволяет устранить ограничения по количеству подлежащих определению искомых стадий, число которых может быть заранее неизвестно, и кинетических параметров. Получены предельные значения погрешностей определения кинетических параметров, а также степень влияния на эти погрешности случайных искажений экспериментальных данных.

5. Разработана методика определения реакционной способности угля, основанная на его комплексном термическом анализе в инертной и окислительных средах; получен банк данных по кинетическим константам процессов испарения

влаги, выхода летучих веществ с отдельной оценкой смоловыделения и выхода индивидуальных парогазовых компонентов, горения и газификации нелетучего (коксового) остатка, термического превращения химических компонентов минеральной части кузнецких и канско-ачинских углей и установлены зависимости их изменения от качества исходного топлива.

6. Впервые научно обоснована и экспериментально доказана стабильность механизмов протекания процессов сушки, термической деструкции и горения нелетучего (коксового) остатка угольного вещества с размером частиц менее 250 мкм при экстремальных значениях темпа нагрева (10^4 – 10^6 град/с), что позволяет рекомендовать комплексный метод термического анализа в неизотермических условиях с непрерывной регистрацией скорости процесса термохимического превращения пылевидного твердого органического топлива в качестве универсального способа определения его реакционной способности.

7. Разработана математическая диффузионно-кинетическая модель процесса термохимической обработки пылеугольных частиц, учитывающая химическую структуру, механизм превращения и реакционную способность твердых органических топлив, а также межфазный тепло- и массоперенос, что позволило выполнить количественную оценку и анализ температурно-временных интервалов протекания различных стадий превращения угля в зависимости от качества исходного топлива и режимных параметров широкого класса топливоиспользующих устройств.

8. Усовершенствована методика расчета степени выгорания пылевидного твердого органического топлива в топочных камерах паровых котлов в части учета реакционной способности для отдельной оценки длительности протекания различных стадий горения угля и на ее основе разработана динамическая позонная модель пылеугольной топки, учитывающая изменение приведенной доли выгорания от эксплуатационных факторов, и позволяющая осуществлять синтез имитационных и управляющих систем рабочих процессов топочных устройств.

9. По результатам численного моделирования и экспериментальных исследований процесса термохимического превращения твердого органического топлива в условиях лабораторных и опытно-промышленных установок обоснованы требования к организации систем подготовки и сжигания твердого органического топлива, а также разработаны способы и устройства по их реализации в условиях тепловой электростанции, обеспечивающие повышение эффективности и надежности работы котельных агрегатов, снижение выбросов вредных веществ в атмосферу, вовлечение в топливно-энергетический баланс страны низкосортных углей.

Практическая значимость работы:

1. Усовершенствованы схема и отдельные узлы установки комплексного термического анализа твердых органических топлив с учетом индивидуальных особенностей различных процессов термохимического превращения угольного вещества, что обеспечивает повышение информативности, надежности и точности результатов экспериментального моделирования. Установка реализована в виде аппаратно-программного комплекса, автоматизирующего процессы сбора, обработки и интерпретации экспериментальных данных в масштабе реального времени.

2. Разработаны практические рекомендации для выбора экспериментальных условий при проведении комплексного термического анализа твердых горючих ископаемых, минимизирующих эффект диффузионных осложнений: масса навески топлива, размер пылеугольных частиц, скорость нагрева, расход газа в реакционное пространство, чувствительность записи регистрирующих прибо-

ров, материал изготовления и форма тигля.

3. Апробирована и внедрена методика выполнения экспресс-анализа технических характеристик топлива в условиях эксплуатации и наладки топочно-горелочных устройств котельных установок тепловых электростанций, сокращающая общую продолжительность анализа в 2,5–4 раза при аналогичной точности в сравнении с методиками ГОСТ.

4. Разработано специализированное алгоритмическое и программное обеспечение, реализующее методику оценки кинетических параметров многостадийных процессов термохимического превращения твердых органических топлив, позволяющее формализовать и автоматизировать обработку результатов комплексного термического анализа.

5. Получена необходимая структура кинетических характеристик для расчета и проектирования процессов и устройств энергетического и энерготехнологического использования угля на основе применения разработанного комплексного метода определения реакционной способности с отдельной оценкой кинетических параметров различных стадий сжигания твердого органического топлива, отличающегося документальной регистрацией экспериментальных величин и их сопоставимостью.

6. На основе данных комплексного термического анализа выявлены особенности возникновения тепловых потерь с химическим и механическим недожогом при энергетическом использовании твердых органических топлив и предложена система обоснованных требований к организации процессов их подготовки и сжигания с учетом исходного качества угля, а также режимов работы котельных установок. Разработаны рекомендации по повышению эксплуатационной надежности и экологической безопасности работы котлоагрегатов при использовании канско-ачинских углей.

7. Разработано и внедрено специализированное программное обеспечение для отработки оперативных задач управления рабочими процессами топочных устройств в составе имитационных компьютерных тренажеров энергетических котельных агрегатов, базирующееся на использовании кинетических параметров, математической модели и методики расчета степени термохимического превращения твердых органических топлив.

8. Разработаны критерии оценки и способы расчетного обоснования требований к организации процессов и режимов подготовки, а также сжигания твердого органического топлива с учетом его реакционной способности. Предложены и апробированы технические решения и практические рекомендации, обеспечивающие высокую эффективность систем подготовки угольной пыли перед сжиганием, применение рациональных конструкций горелочных устройств, а также схем их расположения в топочной камере, совершенствование топочного процесса за счет применения конструктивных и режимных мероприятий.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных средств и методов научных исследований в области термического анализа твердого органического топлива, тепло- и массообмена и подтверждается удовлетворительной сходимостью экспериментальных данных с теоретическими расчетами и данными других авторов, успешными испытаниями лабораторных и опытно-промышленных установок, созданных с использованием результатов исследований, практическим применением разработанных программных продуктов, а также способов и устройств эффективного топливоиспользования.

Реализация результатов работы. Полученные результаты исследований

нашли практическое применение: на Красноярской ТЭЦ-1 для совершенствования схемы подготовки и сжигания бороздинских углей; на Красноярской ТЭЦ-3 при разработке технического проекта по модернизации топочно-горелочных устройств котельных агрегатов КВТК-100; на Красноярской ТЭЦ-2 при тепловых испытаниях и наладке систем пылеприготовления и топочных устройств котельных агрегатов БКЗ-420-140 и БКЗ-500-140; на Березовской ГРЭС-1 при тепловых испытаниях и наладке систем пылеприготовления и топочных устройств котельного агрегата П-67; на Минусинской ТЭЦ при разработке технического проекта экологически чистого котельного агрегата БКЗ-500-140; на ТЭЦ Ачинского глиноземного комбината при создании экспертной системы мониторинга и управления топочного процесса в составе АСУ ТП для котлов БКЗ-320-140 и при создании системы входного контроля за качеством поступающего на ТЭЦ топлива; в ОАО «Енисейская генерация (ТГК-13)» при использовании программных комплексов для отработки оперативных задач управления рабочими процессами топочных устройств в составе имитационных компьютерных тренажеров котлоагрегатов ПК-10Ш, БКЗ-320-140 Красноярской ТЭЦ-1, БКЗ-420-140 и БКЗ-500-140 Красноярской ТЭЦ-2, ПК-38 Назаровской ГРЭС, БКЗ-320-140 ТЭЦ АГК, БКЗ-420-140 Минусинской ТЭЦ.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на Всесоюзной конференции «Комплексное использование углей СССР в народном хозяйстве» (г. Иркутск, 1989 г.); Всесоюзной научно-технической конференции «Разработка и внедрение технологий комбинированного производства тепловой и электрической энергии» (г. Ташкент, 1990 г.); Всесоюзной конференции «Проблемы использования канско-ачинских углей в энергетике» (г. Красноярск, 1991 г.); 1-ой Всесоюзной, 2-ой и 3-ей Всероссийских конференциях «Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов» (г. Челябинск, 1992, 2001, 2007 г.г.); XXV, XXVI, XXVIII, XXXII, XXXVI Kraftwerkstechnisches kolloquium «Effektive und Umweltschonende Kraftwerksanlagen-Planung-Baubetrieb» (Deutschland, Dresden, 1993, 1994, 1996, 2000, 2004 г.г.); Всероссийской научно-технической конференции «Повышение эффективности производства энергии в условиях Сибири» (г. Иркутск, 1994 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Новые методы и средства экономии энергоресурсов и экологические проблемы энергетике» (г. Санкт-Петербург, 1996 г.); 2-й Российской национальной конференции по теплообмену (г. Москва, 1998 г.); 9-х и 12-х Бернардосовских чтениях «Состояние и перспективы развития электротехнологий» (г. Иваново, 1999, 2005 г.г.); The Third Russian-Korean International Symposium on Science and Technology «KORUS-99» (Novosibirsk, 1999 г.); 3-ей Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (г. Кемерово, 1999 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы использования канско-ачинских углей на ТЭС» (г. Красноярск, 2000 г.); 3-м Российском национальном симпозиуме по энергетике (г. Казань, 2001 г.); International congress on FEM-Technology and 19th all-European CAD-FEM user' meeting (Germany, Berlin-Potsdam, 2001 г.); 2-й Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы экологии и развития городов» (г. Красноярск, 2001 г.); XXII Всероссийской школе по проблемам науки и технологий (Екатеринбург, 2002 г.); XXII Российской школе «Наука и технологии» (г. Москва, 2002 г.); 2-ой Всероссийской научно-технической конференции «Тренажерные технологии» (г. Санкт-Петербург, 2003 г.); 4-ой Международной научно-технической конференции «Достижения и перспективы развития энергетики Си-

бири» (г. Красноярск, 2005 г.); VI Всероссийской конференции «Горение твердого топлива» (г. Новосибирск, 2006 г.); Международной научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы развития энергетики» (г. Ташкент, 2006); на Всесоюзной выставке «НТТМ-ХП» (г. Пермь, 1989 г.) экспонат «Система подготовки углей Канско-Ачинского бассейна» награжден дипломом I степени; на Всероссийской выставке-конгрессе «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (г. Санкт-Петербург, 2003 г.) разработка «Научно-методическое и программное обеспечение для отработки оперативных задач управления энергетическим оборудованием» награждена дипломом I степени (с вручением медали).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 69 печатных работ, в том числе 1 монография, 14 статей в отечественных и зарубежных изданиях по перечню ВАК, 19 докладов на конференциях, 15 патентов на изобретения, 9 свидетельств об официальной регистрации программ для ЭВМ, 1 депонированная рукопись и 10 статей в межвузовских сборниках научных трудов.

Личный вклад автора. Автору принадлежит постановка задач данного исследования, обоснование и разработка положений, определяющих научную новизну и практическую значимость работы; проведение, анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований на лабораторных, опытных и промышленных установках; разработка математических моделей и расчетных методик; создание соответствующего программного обеспечения; разработка и внедрение технических систем, способов и устройств по подготовке и сжиганию углей.

Структура и состав диссертации. Диссертация состоит из введения, семи разделов с выводами, заключения, списка использованных источников и 6 приложений. Работа содержит 427 страниц машинописного текста, 265 рисунков и 62 таблиц. Список использованных источников включает 412 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, сформулирована цель работы, выделены научная новизна, практическая значимость полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе выполнен аналитический обзор работ, посвященных исследованию особенностей состава и свойств энергетических углей, изучению различных стадий процесса горения твердого органического топлива и вопросу определения его реакционной способности. На примере бурых углей Канско-Ачинского месторождения рассмотрены теплотехнические свойства и опыт энергетического использования твердых органических топлив как при сжигании в лабораторных условиях, так и в пылеугольных топках котельных агрегатов с жидким и твердым шлакоудалением. Особенности вещественного состава органической и минеральной части канско-ачинских углей значительно влияют на устойчивость горения пылеугольного факела, надежность работы и мощность котельных агрегатов. В связи с этим существенно возрастает роль научно-обоснованного подхода при расчете, проектировании и наладке эксплуатационных режимов систем подготовки топлива к сжиганию и топочных устройств с учетом исходного качества угля и обусловленных им физико-химических закономерностей температурно-временных превращений пылеугольных частиц.

Совершенствованию технологии производства и потребления энергии, вырабатываемой на твердом органическом топливе, уделяется значительное внимание

в энергетической отрасли. Существующие проблемы энергетического использования углей в значительной степени можно решить, если перед сжиганием угольную пыль подвергнуть термохимической обработке. Экспериментальному и расчетному обоснованию данного подхода посвящены работы З.Ф. Чуханова, В.И. Бабия, В.Г. Каширского, М.Х. Ибрагимова, В.Л. Шульмана, В.А. Дубровского, А.Ф. Гаврилова, М.С. Пронина, А.С. Заборина и др. Хорошая воспламеняемость продуктов термообработки, их высокая калорийность и реакционная способность открывают широкие возможности для применения на тепловых электростанциях процесса предварительной термической обработки угля перед сжиганием. Однако, вопросы влияния режимов и способов реализации термической подготовки топлива на показатели энергетической эффективности котельных агрегатов, надежности их эксплуатации и экологической безопасности требуют дальнейших исследований.

Рациональным подходом при создании новых и повышении эффективности существующих технологических приемов термохимической обработки и сжигания углей на тепловых электростанциях является использование математического моделирования. В области математического моделирования процессов тепло- и массопереноса при сушке, термической деструкции, горении и газификации топлива в последние десятилетия достигнуты значительные успехи. Существенный вклад в развитие научных основ моделирования термохимического превращения твердого органического топлива внесли Д.М. Хзмалян, Т.В. Виленский, Б.П. Устименко, Э.П. Волков, В.И. Быков, Л.И. Зайчик, А.М. Бубенчиков, А.В. Старченко, R.H. Essenhigh, M.A. Field, F.C. Lockwood, L.D. Smoot, J. Szekeley и др. Вместе с тем, прямое численное моделирование топочных процессов и устройств приводит к катастрофическому увеличению объема вычислений из-за сложности и многообразия физико-химических процессов, протекающих в топливоиспользующих установках. Рассмотрены основные принципы, допущения и упрощения, позволяющие разработать диффузионно-кинетическую модель термохимического превращения твердых органических топлив, пригодную для построения инженерных расчетов, определения контролируемых и лимитирующих процессов, способов и средств интенсификации тепло- и массообмена и оптимальных режимных параметров. Выполненный обзор и классификация математических моделей показали необходимость совершенствования данного подхода, как по степени детализации, так и по уровню решаемых задач.

Для правильного определения степени термохимического превращения твердых органических топлив в условиях работы систем подготовки и сжигания котельных агрегатов необходимо учитывать, что процесс горения пылеугольной частицы представляет собой сложный комплекс различных параллельно-последовательных многостадийных физико-химических явлений. Большой вклад в развитие фундаментальных основ процессов термохимического превращения твердого органического топлива внесли А.С. Предводителев, Л.Н. Хитрин, Я.Б. Зельдович, Н.Н. Семенов, Н.В. Лавров, Д.А. Франк-Каменецкий, Б.В. Канторович, Л.А. Вулис, Г.Ф. Кнорре, А.Б. Резняков, Б.В. Померанцев, З.Ф. Чуханов, И.А. Яворский, С.В. Бухман, Г.С. Головина, А.С. Федосеев, D.B. Spalding, M.L. Hobbs, L.D. Smoot, J.G. Speight, S.R. Turns, P.R. Solomon, J.C. Lee и др. Однако анализ работ показал, что феноменологическое описание процесса термохимического превращения угля нуждается в дополнительной информации, главным образом структурного характера, что особенно важно при исследовании динамики процессов. При выполнении инженерных расчетов и численном моделировании тепло- и массообмена в энергоустановках ощущается острый дефицит кинетических характеристик, описывающих различные стадии

процесса термохимического превращения угля.

Одним из эффективных методов исследования механизма и кинетики процессов термохимического превращения твердого органического топлива является комплексный термический анализ, сочетающий в рамках единой установки термогравиметрический, дифференциально-термический и газохроматографический анализ. Все перечисленные методы нашли широкое применение в практике научных исследований, однако, простота и легкость получения экспериментальных данных методами термического анализа обратнопропорциональна усилиям, необходимым для выявления надежной и достоверной информации о свойствах изучаемого объекта. Это обусловлено, в первую очередь, несовпадением условий эксперимента вследствие индивидуального конструктивного оформления установок, различий в тепловом и аэродинамическом режимах обработки образцов и ряда других факторов. Развитие техники эксперимента позволяет осуществить объединение различных методов в рамках единой установки, с одним исследуемым объектом. Такое объединение является основным направлением комплексного термического анализа. С точки зрения приближения эксперимента к реальным условиям и определения кинетических параметров по результатам исследования одного образца целесообразней использовать неизотермический подход, возможности которого в настоящее время задействованы не в полной мере. Среди работ посвященных неизотермическим методам исследования, следует отметить работы А.М. Курнакова, В.В. Болдырева, И.М. Глущенко, Г.О. Пилюяна, Г.П. Алаева, Л.Г. Берга, В.А. Ивановой, З.С. Смуткиной, С.П. Родькина, В.И. Саранчук, W.W. Wendland, H. Juntgen, J. Sestak, D. Jang, D. Dollimore, T. Ozawa, L. Reich, V. Satava и др.

Сложность химического строения угля, многообразие и последовательно-параллельный характер протекания индивидуальных стадий, отвечающих за процесс термохимической обработки твердого органического топлива, значительный разброс и противоречивость экспериментальных значений кинетических параметров требует дальнейшего развития математического аппарата неизотермической кинетики, использования достижений современной вычислительной техники в практике работы установок термического анализа. При этом следует, конечно, уточнять и совершенствовать методику и аппаратуру термического анализа, повышать ее точность, быстродействие, расширять функциональные возможности.

В заключение была аргументирована постановка цели и сформулированы основные задачи исследований, проводимых в диссертационной работе.

Во втором разделе обоснована перспективность использования и выполнено совершенствование схемы, а также отдельных узлов установки комплексного термического анализа, реализовано экспериментально-расчетное обоснование условий проведения комплексного термического анализа твердых органических топлив – оптимальных размеров исследуемого образца, и, как следствие, величины навески и фракционного состава, темпа нагрева материала, атмосферы (газовой среды) печи, расхода газа и.т.д. с целью получения объективной информации о реакционной способности угля. Здесь же приводится экспресс-методика и рекомендации по применению комплексного термического анализа для определения теплотехнических характеристик угля.

Усовершенствованная схема установки комплексного термического анализа твердого органического топлива для проведения экспериментальных исследований, показана на рис. 1. Установка выполнена на основе серийно выпускаемых приборов: дериватографа серии Q-1500 (системы Paulik-Paulik-Erdey) и хромато-

графического газоанализатора марки «Союз-3101». Совмещенная установка позволяет наряду с суммарными характеристиками процесса (убыль массы – ТГ, скорость изменения веса – ДТГ, тепловые эффекты – ДТА), используемыми для оценки реакционной способности твердого органического топлива, получать также и динамику выхода газообразных продуктов (CO , CO_2 , H_2 , CH_4 и др.).

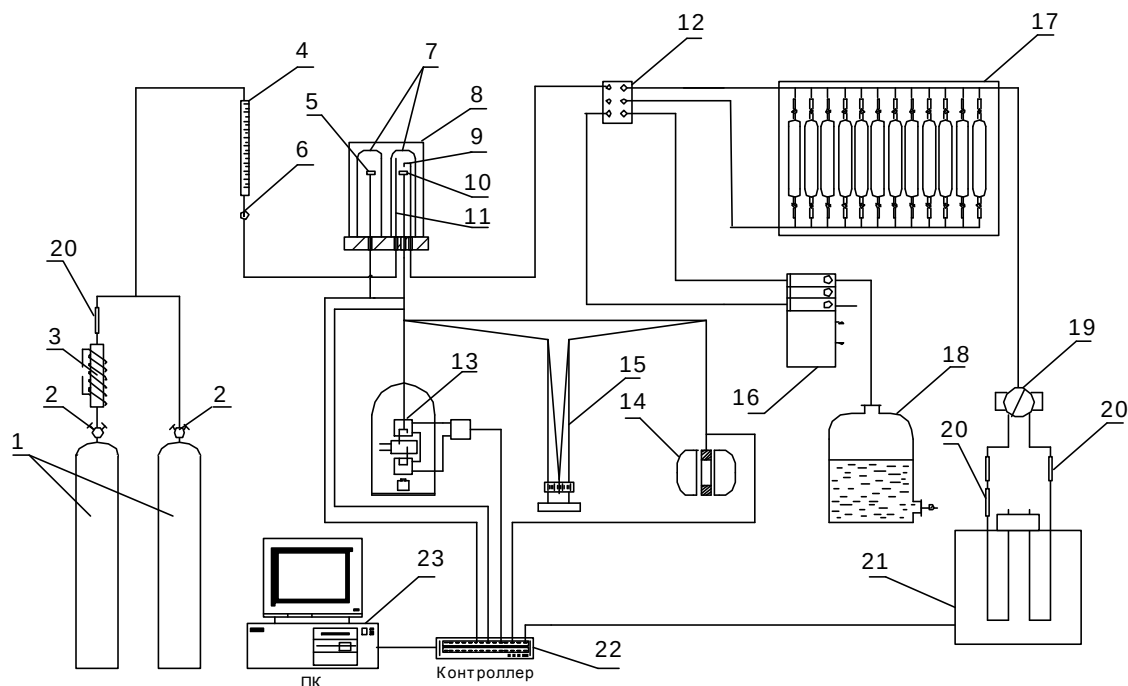


Рис. 1. Принципиальная схема установки комплексного термического анализа твердого органического топлива: 1 – баллоны с газом; 2 – регуляторы расхода; 3 – реактор для удаления кислорода на линии подачи инертного газа; 4 – ротаметр; 5 – тигель с инертным образцом; 6 – тонкий регулятор расхода; 7 – кварцевые стаканы; 8 – печь; 9 – зонд для отвода газообразных продуктов реакции; 10 – тигель с исследуемым образцом; 11 – канал подвода газа в реакционное пространство; 12 – шестиходовой кран; 13 – катушка индуктивности с магнитом; 14 – дифференциальный трансформатор для преобразования сигнала ТГ; 15 – аналитические весы; 16 – перистальтический насос; 17 – штатив газовых пипеток; 18 – газометр с солевым раствором; 19 – кран дозатора; 20 – аскаритовый и ангидронный фильтры; 21 – хроматографический газоанализатор; 22 – цифровой контроллер; 23 – вычислительная машина

Помимо совершенствования схемы в целом, были рассмотрены и решены проблемы, характерные для проведения комплексного термического анализа твердых органических топлив, такие как «проскок» продуктов термической деструкции в блок аналитических весов, вызывающий их загрязнение, что сказывается на надежности и стабильности работы установки в целом, и тепловая неэквивалентность в точках расположения спаев термопар вследствие наличия градиента температур, обусловленного несовершенством геометрии печи, что приводит к неравномерности нагрева навески образца и эталонного вещества (до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$) и искажению результатов ДТА-анализа. Для решения первой задачи была использована система конденсации парообразных продуктов деструкции угля (смол), установленная ниже уровня посадки печи, основным элементом которой является охлаждаемая водой Т-образная спираль, навитая из медной трубки с внутренним диаметром 4 мм и имеющая следующие размеры: диаметр основания 50 мм, внутренний диаметр 8 мм, высота 45 мм. Для уменьшения тепловой неэквивалентности используется антиградиентный экран высотой 60 мм, изготовленный из нихромовой проволоки диаметром 1 мм, навитой вокруг кварцевых стаканов. Экран размещается симмет-

рично по высоте относительно уровня расположения спаев термопар.

Установка реализована в виде аппаратно-программного комплекса, автоматизирующего процессы сбора, обработки и визуализации экспериментальных данных в масштабе реального времени. Сопряжение измерительных датчиков с ЭВМ выполняется по интерфейсу RS-232. Обработка аналоговых сигналов в цифровые осуществляется с помощью контроллера PCL-818L-A5 (Advantech). Драйверы и соответствующее программное обеспечение написаны в среде программирования Borland C++ Builder.

Для определения оптимальных условий проведения комплексного термического анализа угольного вещества, минимизирующих эффект диффузионных осложнений, выполнены расчетные и экспериментальные исследования влияния теплообмена на поверхности образца, скорости нагрева и размера пылеугольных частиц на характер термогравиметрических кривых. Анализ полученных результатов позволил установить минимальную чувствительность терморегистрирующего прибора (0,0625 см/град), линейную скорость движения тренда (0,01 см/с), минимальный угол наклона термической кривой $t = f(\tau)$ к оси абсцисс (1°), оптимальный диапазон темпа нагрева навески ($\beta_{\text{опт}} = 0,018\text{--}20$ град/мин, где нижний предел обусловлен ограничением совокупности технических характеристик, верхний – инерционностью установки). С уменьшением размера пылеугольных частиц при постоянных скорости нагрева, величине навески и прочих равных условиях ширина и высота пика теплового эффекта увеличиваются, а температура, соответствующая максимальной скорости реакции, сдвигается в область более высоких температур. Экспериментально подтверждено предположение о независимости значения температуры начала термохимической реакции от условий проведения термоаналитического эксперимента.

Для контроля и прогноза области протекания исследуемых процессов при выполнении комплексного термического анализа угольного вещества, обеспечивающего получение объективных кинетических характеристик широкого класса термохимических реакций в зависимости от наиболее значимых режимных факторов, обоснован и применен критерий, характеризующий отношение количества прореагировавшего вещества на единице поверхности в единицу времени («потока реакции») к диффузионному потоку через слой продукта

$$\frac{N}{q} = \frac{\mu m_0}{4\pi D_c} \cdot \frac{(r_0 - r_n)}{r_0 r_n (\mu \rho - [C_0])} \cdot \frac{d\alpha}{d\tau}, \quad (1)$$

где μ – стехиометрический коэффициент; m_0 – начальная масса исходного вещества, кг; D_c – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; r_0 и r_n – соответственно начальный и текущий радиус пылеугольных частиц, м; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; $[C_0]$ – концентрация продуктов реакции в окружающей угольную частицу среде, $\text{кг}/\text{м}^3$; τ – время, с; $\alpha = (m_0 - m)/m_0$ – доля прореагировавшего вещества; m – текущая массы навески, кг.

При $N/q \ll 1$, обеспечивается кинетический режим протекания термохимической реакции; при $N/q \approx 1$ реакция протекает в промежуточной области; при $N/q \gg 1$ – в диффузионной области. Согласно уравнению (1), факторы, определяющие режимные условия проведения комплексного термического анализа пылевидного твердого топлива, подбираются таким образом, чтобы гарантировать протекание исследуемого процесса в строго кинетической области. На рис. 2 в качестве примера представлен расчетный график изменения параметра N/q от условий проведения термо-

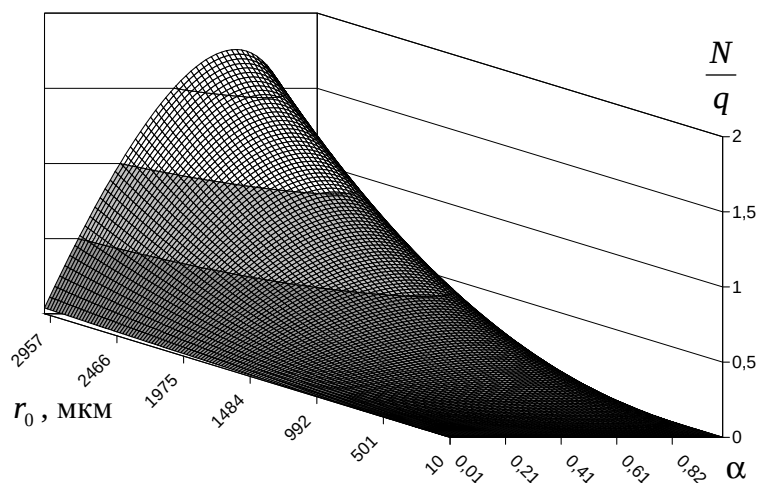


Рис. 2. Зависимость критерия определения области протекания (N/q) процесса термического разложения твердого органического топлива от условий проведения термоаналитического эксперимента: r_0 – исходный размер частиц; α – степень термохимического превращения

аналитического эксперимента, построенный по уравнению (1) для процесса термического разложения с использованием обобщенных кинетических параметров соответствующих процессов термохимического превращения угля. Аналогичные зависимости получены для процессов горения нелетучего (коксового) остатка и термоокислительной деструкции твердого органического топлива.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований по обоснова-

нию условий проведения комплексного термического анализа угольного вещества позволяют рекомендовать следующие режимные параметры работы дериватографа. При термическом разложении топлива рекомендуется выбирать: среда – инертная (He , Ar), расход газа – $200 \text{ см}^3/\text{мин}$; масса угольной навески – 500 мг ; скорость нагрева $5\text{--}20 \text{ град}/\text{мин}$, при сжигании нелетучих продуктов термического разложения и при исследовании термоокислительной деструкции исходного угля: среда – окислительная (воздух); масса угольной навески – 50 мг ; скорость нагрева – $5\text{--}20 \text{ град}/\text{мин}$; при газификации коксового остатка диоксидом углерода (CO_2) и водяным паром (H_2O): скорость нагрева $5\text{--}10 \text{ град}/\text{мин}$; концентрации $\text{CO}_2 = \text{H}_2\text{O} = 100 \%$, (при атмосферном давлении); масса навески – 150 мг ; расход CO_2 в печь дериватографа – $220\text{--}240 \text{ см}^3/\text{мин}$, расход $\text{H}_2\text{O} = 250\text{--}290 \text{ см}^3/\text{мин}$. Для исследуемых процессов имеется также ряд обобщенных настроек: инертный материал – Al_2O_3 ; тарельчатый тигель – платиновый; чувствительность записи (μV) TG – 500 , DTA – 1000 , DTG – 500 ; размер частиц угля – полифракция (с остатками на ситах $R_{90} = 45\text{--}50 \%$, $R_{200} = 28\text{--}32 \%$, $R_{1000} < 1 \%$).

Методика оперативного определения технических характеристик топлива по результатам его комплексного термического анализа основана на обработке ТГ-кривых убыли массы навески в соответствующей температурной области и атмосфере печи. Для текущего экспресс-анализа сжигаемого на ТЭС топлива, которым предусматривается определение влажности и зольности, целесообразно использовать термоокислительную деструкцию. Для декадного анализа, которым предусматривается определение влажности, выхода летучих веществ, зольности, теплоты сгорания – термическое разложение и горение коксового остатка. Длительность выполнения анализа термогравиметрическим методом по сравнению с методиками ГОСТ сокращается в $2,5\text{--}4$ раза при сопоставимости результатов с коэффициентом корреляции $r = 0,991\text{--}0,999$.

В третьем разделе выполнено обобщение и развитие теоретических основ и математического аппарата неизотермической кинетики процессов термохимического превращения твердого органического топлива и определены аналитические зависимости для экстраполяции данных комплексного термического анализа на

условия протекания реальных процессов подготовки и сжигания угля.

Реакционная способность энергетических углей рассматривается с точки зрения скорости процессов испарения влаги, выхода летучих веществ с отдельной оценкой смолы выделения и выхода парогазовых компонентов, горения и газификации нелетучего остатка, термических превращений химических компонентов минеральной части твердого органического топлива, характеризующаяся набором кинетических параметров: E – энергия активации, кДж/моль; k_0 – предэкспоненциальный множитель, 1/с или м/с; n – порядок реакции; C_0 – исходная масса прореагировавшего вещества, кг; T_n , $T_{\max}$, T_k – соответственно температуры начала, максимальной скорости и окончания реакции, °С. При разработке методики экспериментального определения реакционной способности предусматривается использование единого комплекса методов термического анализа для дифференцированной оценки указанных кинетических параметров, а также математического аппарата неизотермической кинетики для экстраполяции получаемых результатов на условия реальных энергетических процессов и устройств, использующих твердое органическое топливо.

В условиях непрерывного нагрева при выполнении комплексного термического анализа изменяется концентрация реагирующего вещества и константа скорости реакции. Обобщенное уравнение неизотермической кинетики имеет вид:

$$\frac{dC}{dT} = \frac{k_0}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (C_0 - C)^n, \quad (2)$$

где $\beta = dT/d\tau$ – скорость нагрева, град/с; C – масса прореагировавшего вещества к моменту времени τ , кг; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·град).

Из уравнения (2) следует, что скорость реакции в пересчете на один градус обратнопропорциональна скорости нагрева. Следствием этого является сдвиг реакции в область повышенных температур, расширение температурной области протекания реакции и уменьшение максимальной скорости процесса с ростом темпа нагрева. Разделив переменные и проинтегрировав уравнение (2), получим обобщенное уравнение неизотермической кинетики в интегральной форме, решение которого позволяет теоретически оценить влияние скорости топочимической реакции любого порядка в зависимости от температуры.

$$\int_0^C \frac{dC}{(C_0 - C)^n} = \frac{k_0}{\beta} \int_0^T \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) dT. \quad (3)$$

Найденное по уравнению (3) значение C при подстановке в исходное уравнение (2) позволяет представить обобщенное уравнение неизотермической кинетики в окончательном виде (при $n \neq 1$):

$$\frac{dC}{dT} = \frac{k_0}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \frac{C_0^n}{\left[1 + (n-1) \frac{k_0 C_0^{n-1}}{\beta} \frac{RT^2}{E} \left(1 - \frac{2RT}{E}\right) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)\right]^{\frac{n}{n-1}}}. \quad (4)$$

Большой практический интерес представляет связь температурного положения максимума дифференциальной кривой с кинетическими параметрами реакции и скоростью нагрева. Указанная связь может быть установлена по второй производной уравнения (4)

$$\frac{\beta}{RT_{\max}^2} = \frac{k_0 C_0^{n-1}}{E} \exp\left(-\frac{E}{RT_{\max}}\right). \quad (5)$$

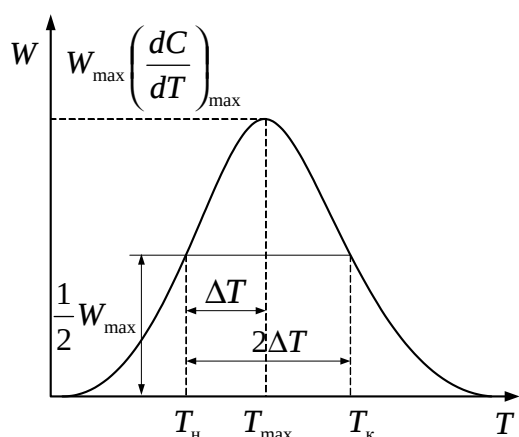


Рис. 3. Общий вид дифференциальной кривой первого порядка

теля k_0 , 1/с, характеризующих реакцию способность конкретной стадии термохимического превращения угольного вещества, и скорости нагрева β , град/с, первоначально по уравнению (6) определяется величина температуры, соответствующей максимальной скорости реакции – $T_{\max}$, °С, а затем по уравнению (7) – величина ΔT , °С, которая в последствии используется для оценки длительности протекания реакции τ , с, по уравнению (8).

$$\frac{k_0}{\beta} = \frac{E}{RT_{\max}^2} \exp\left(\frac{E}{RT_{\max}}\right), \quad (6)$$

$$\exp\left\{1 + \frac{E}{R} \frac{\Delta T}{T_n T_{\max}} - \frac{2RT_{\max}}{E} - \frac{T_n^2}{T_{\max}^2} \left(1 - \frac{2RT_n}{E}\right) \exp\left(\frac{E}{R} \frac{\Delta T}{T_n T_{\max}}\right)\right\} - \frac{1}{2} = 0, \quad (7)$$

$$\tau = 2\Delta T/\beta. \quad (8)$$

На рис. 4 приведена номограмма, позволяющая напрямую выполнять оценку длительности протекания физикохимических реакций (в частности процессов сушки и выхода летучих веществ) при различных скоростях нагрева твердого органического топлива. Номограмма составлена применительно к следующим условиям: пределы изменяемых величин $E = 20$ –

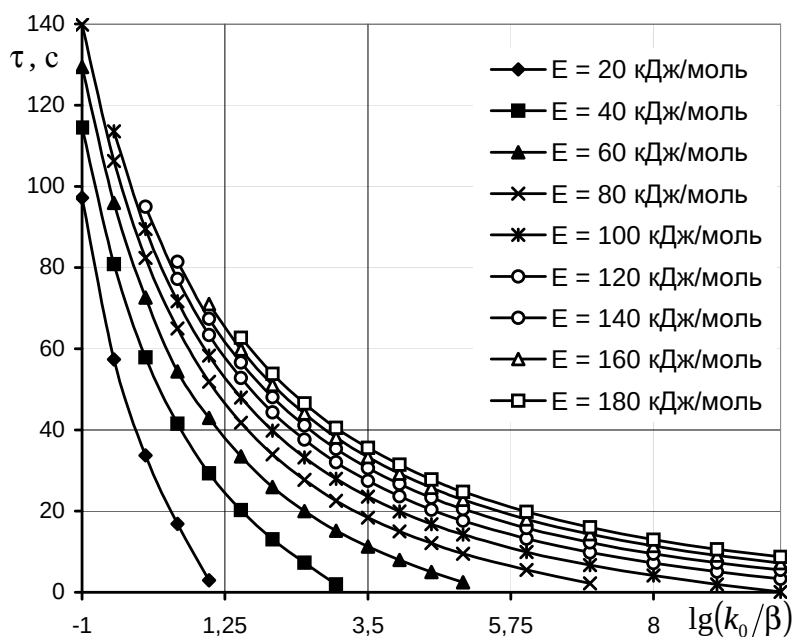


Рис. 4. Зависимость длительности выделения различных газообразных компонентов летучих веществ от скорости нагрева

Дополнив отражаемую трансцендентным уравнением (5) связь шириною максимума дифференциальной кривой $2\Delta T$ на половине его высоты (т.е. $W_{\max}/2$ – рис. 3) получим аналитические зависимости для экстраполяции результатов комплексного термического анализа твердого органического топлива на условия протекания реальных процессов топливоиспользующих устройств и агрегатов. Экстраполяция данных комплексного термического анализа выполняется следующим образом: по значениям энергии активации E , кДж/моль, и предэкспоненциального множителя

k_0/β , 1/с, характеризующих реакцию способность конкретной стадии термохимического превращения угольного вещества, и скорости нагрева β , град/с, первоначально по уравнению (6) определяется величина температуры, соответствующей максимальной скорости реакции – $T_{\max}$, °С, а затем по уравнению (7) – величина ΔT , °С, которая в последствии используется для оценки длительности протекания реакции τ , с, по уравнению (8).

На рис. 4 приведена номограмма, позволяющая напрямую выполнять оценку длительности протекания физикохимических реакций (в частности процессов сушки и выхода летучих веществ) при различных скоростях нагрева твердого органического топлива. Номограмма составлена применительно к следующим условиям: пределы изменяемых величин $E = 20$ –180 кДж/моль, $\lg(k_0/\beta) = -1$ –10, $T_{\max} = 50$ –1400 °С, $\Delta T = 50$ –750 °С; точность расчетов составляет 10^{-3} °С; реализован комбинированный метод, основанный на использовании сочетания методов бисекции, линейной и квадратичной интерполяции.

Преимущества неизо-термической кинетики (одновременный учет измене-

ния температуры процесса и концентрации реагирующих компонентов) обуславливают перспективность ее применение и для оценки скоростей гетерогенных реакций. Принимая в качестве окислителя кислород воздуха, горение коксового остатка при температурах ниже 900 °С можно рассматривать как химическую активированную, протекающую в объеме частицы реакцию, скорость которой описывается следующим уравнением

$$W = \frac{dC}{d\tau} = \xi k P_{O_2} (1 - C), \quad (9)$$

где C – отношение выгоревшего к данному моменту времени углерода кокса к общей потере веса (на daf); $k = k_0 \exp(-E/RT)$ – константа скорости реакции, м/с; ξ – коэффициент, отражающий относительную, доступную для реагирования, поверхность пор, являющейся функцией степени выгорания; P_{O_2} – парциальное давление кислорода.

Использование уравнения (7) для экстраполяции процесса горения углеродной (коксовой) основы на высокие скорости нагрева затруднено, вследствие различной размерности предэкспоненциального множителя k_0 (м/с вместо 1/с). В этой связи предложен формальный прием для обработки ДТГ-кривой гетерогенного процесса горения коксовых частиц с оценкой ее кинетических параметров на основе обобщенного математического аппарата неизотермической кинетики в размерностях, принятых для мономолекулярных реакций, т.е. без учета изменения размера коксовых частиц. Подставляя полученные значения E , кДж/моль и k_0 , 1/с, в уравнение (7), осуществляется построение дифференциальных кривых убыли массы образца при экстремальных скоростях нагрева, выполняется решение обратной кинетической задачи с учетом диаметра коксовых частиц и определяются кинетические параметры процесса горения нелетучей основы (E и k_0) с общепринятыми для гетерогенных реакций размерностями.

Систематизация и обобщение математического аппарата неизотермической кинетики позволили разработать универсальный подход к оценке кинетических характеристик широкого класса реакций термохимического превращения угольного вещества по результатам его комплексного термического анализа.

В четвертом разделе представлена экспериментально-расчетная методика и результаты оценки реакционных характеристик основных этапов термохимического превращения канско-ачинских и кузнецких углей.

Методика определения кинетических характеристик методом комплексного термического анализа реализуется посредством выполнения следующих этапов: опыт в инертной среде с газовым анализом летучих веществ, по результатам которого определяется динамика испарения влаги, общий выход и состав летучих веществ; опыт в окислительной среде – реализуется выгорание нелетучего (коксового) остатка, полученного в предыдущем опыте; опыт в окислительной среде (термоокислительная деструкция исходного угольного вещества), сопровождающийся одновременным смолотделением, выходом газообразных продуктов и горением коксовой основы. Кинетика смолотделения в инертной среде оценивается по разности скоростей суммарного выхода летучих веществ (ДТГ-кривая) и выхода газообразных продуктов (первый опыт, рис. 5). Учитывая одновременность протекания при термоокислительной деструкции двух процессов, суммарная скорость которых регистрируется в виде ДТГ-кривой, осуществляется выделение процесса выхода летучих веществ («синтетические» летучие) вычитанием из ДТГ-кривой

термоокислительной деструкции скорости окисления коксового остатка.

Скорость окисления коксового остатка определяется в эксперименте по вто-

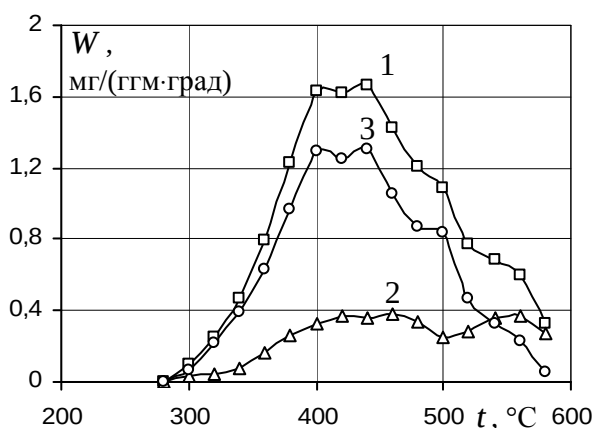


Рис. 5. Выход летучих веществ при нагреве бородинского угля в инертной среде (термическое разложение, $d_0 < 0,1$ мм):

1 – обобщенная ДТГ-кривая; 2 – парогазовые компоненты; 3 – смолы

выделения соответствующей кривой газовой выделенности получаем дифференциальную кривую смолы выделенности в окислительной среде («синтетические» смолы) (рис. 7). Кинетическая обработка полученной кривой смолы выделенности осуществляется по уравне-

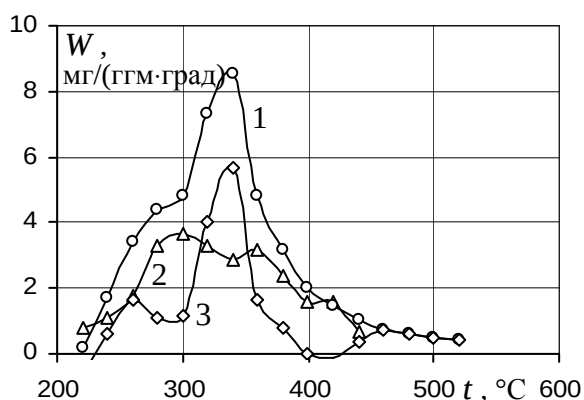


Рис. 6. Скорость выхода летучих веществ в окислительной атмосфере: 1 – ДТГ-кривая термоокислительной деструкции; 2 – ДТГ-кривая горения коксового остатка; 3 – ДТГ-кривая выхода летучих веществ в окислительной атмосфере («синтетические» летучие)

Для математического описания многостадийного процесса термической деструкции выбрана дифференциальная форма записи кинетического уравнения:

$$\frac{dC}{d\tau} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{0ij} \left(1 - \frac{C_{ij}}{C_{0ij}} \right) k_{0ij} \exp \left[-\frac{E_{ij}}{RT(\tau)} \right], \quad (10)$$

где $i = 1, \dots, n$ – количество учитываемых парогазовых компонентов; $j = 1, \dots, m$ – количество индивидуальных стадий, ответственных за выделение i -го компонента; C_{0ij} , C_{ij} – соответственно, начальная и текущая концентрации прореагировавшего i -го компонента на j -й стадии, кг; E_{ij} , k_{0ij} – соответственно, энергия активации (кДж/моль) и

второму варианту и накладывается на ДТГ-кривую термоокислительной деструкции при соответствующей корректировке температурных интервалов (рис. 6). Полученная в первом опыте суммарная кривая скорости газовой выделенности совмещается с выделенной при термоокислительной деструкции периодом выхода летучих веществ путем пересчета ее по отношению скорости выделения летучих веществ в инертной и окислительной средах, принимая неизменным общее количество газового компонента. При вычитании из дифференциальной кривой выделения летучих веществ в окислительной среде («синтетических» летучих) соответствующей кривой газовой выделенности получаем дифференциальную кривую смолы выделенности в окислительной среде («синтетические» смолы) (рис. 7). Кинетическая обработка полученной кривой смолы выделенности осуществляется по уравнению первого порядка. Исследование процесса выделения газовых компонентов летучих веществ при нагреве канско-ачинских и кузнецких углей показало, что он является многостадийным процессом и описывается несколькими индивидуальными реакциями первого порядка. Для оценки кинетических параметров многостадийных процессов термической деструкции твердых органических топлив по данным комплексного термического анализа был разработан новый экспериментально-расчетный метод, реализация которого базируется на принципе последовательного поиска и обработки элементарных стадий с вычитанием кинетических кривых найденных стадий из исходного процесса.

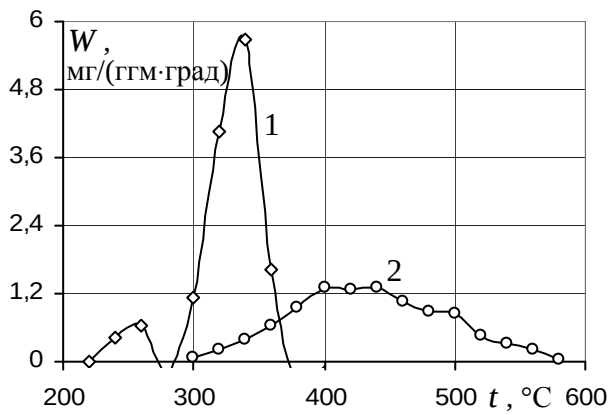


Рис. 7. Скорость смоловыделения при нагревании бородинского угля ($d_0 < 0,1$ мм) в окислительной и инертной атмосферах: 1 – ДТГ-кривая смоловыделения в окислительной атмосфере («синтетические» смолы); 2 – ДТГ-кривая смоловыделения в инертной среде

предэкспоненциальный множитель ($1/c$), отвечающие за протекание реакции выхода i -го компонента на j -й стадии.

Уравнение (10) принято в качестве математической модели при следующих допущениях: потеря массы топливного образца непосредственно связана с процессом термодеструкции и мгновенным выходом парогазовых продуктов разложения в каждый фиксируемый момент времени; много-стадийный процесс термической деструкции аддитивен, что позволяет проводить независимую обработку каждой отдельной стадии. Учитывая принятые допущения можно провести независимый анализ произвольно взятой j -той стадии брутто-

процесса. Кинетическое уравнение в этом случае запишется следующим образом:

$$\frac{\partial C_j(\tau)}{\partial \tau} = C_j^{n_j}(\tau) k_{0j} \exp\left[-\frac{E_j}{RT(\tau)}\right]. \quad (11)$$

Задача поиска на суммарной кинетической кривой $C_i(\tau)$ участка изолированной стадии решается с помощью корреляционного анализа экспериментальных точек в координатах Аррениуса $\left(\frac{1}{T_j(\tau)}, \ln\left[\frac{\partial C_j(\tau)}{\partial \tau} \cdot \frac{1}{C_j^{n_j}(\tau)}\right]\right)$. Искомые кинетические параметры определяются через коэффициенты линейной регрессии. Расчетная зависимость степени превращения на j -той стадии определяется из соотношения:

$$\tilde{C}_j(\tau) = \exp\left\{\frac{1}{n_j} \ln\left[(C_j^{\max})^{n_j} + k_{0j} n_j' F_j(\tau)\right]\right\}, \quad (12)$$

где $C_j^{\max}$ – значение доли прореагировавшего вещества при максимальной температуре j -той стадии – $T_j^{\max}$; $n_j' = 1 - n_j$; $F_j(\tau) = \int_{\tau_m}^{\tau} \exp\left[-\frac{E_j}{RT_j(\tau)}\right] d\tau$ – интегро-экспоненциальная функция.

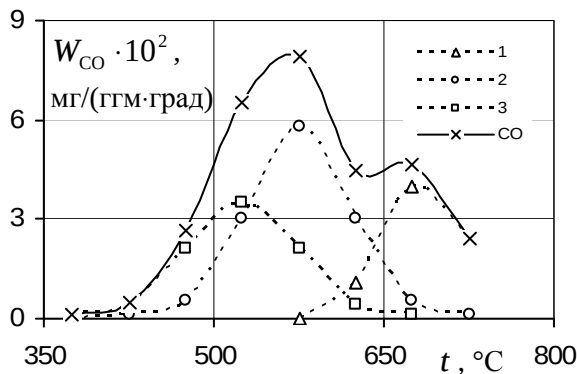


Рис. 8. Дифференциальные кривые на примере выхода оксида углерода при термическом разложении бородинского угля с разбивкой на независимые стадии

После вычитания полученных расчетных значений C_j и $\partial C_j / \partial \tau$ из исходных кинетических кривых C_j и $\partial C_j / \partial \tau$ начинается процесс поиска и определения параметров следующей стадии. Математическая модель независимых параллельных реакций положена в основу алгоритма обработки брутто-процесса, позволяющего определять всю совокупность элементарных стадий и их кинетические параметры. На рис. 8 на примере газовыделения при термическом разложении

бородинского угля представлены дифференциальные кривые выхода оксида углерода с разбивкой на независимые стадии по вышеизложенной методике.

Обработку экспериментальных ТГ-кривых убыли массы навески нелетучего остатка выполняли по уравнению:

$$k = \frac{W\delta_i}{(C_0 - C)} \cdot 10^{-1}. \quad (13)$$

где k – константа скорости реакции горения коксовых частиц, м/ч; W – скорость убыли массы навески, определяемая по ДТГ-кривой в i -тый момент времени (при i -той температуре), мг/мин; δ_i – текущий (по мере выгорания) размер частицы, м.

Экспериментально установлено влияние условий получения нелетучего остатка на скорость его выгорания. Сравнение результатов исследований, на примере скоростей горения коксового остатка бородинского угля, полученных в инертной, окислительной и окислительно-восстановительной атмосферах, представлены на рис. 9. Получено, что взаимодействие органической массы угля с окислителем в период коксования вызывает изменение реакционной способности

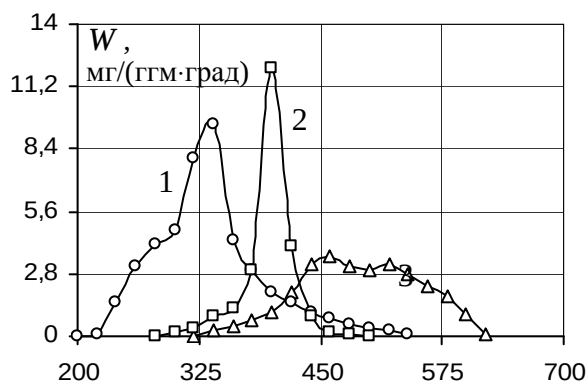


Рис. 9. Скорость горения коксового остатка бородинского угля, полученного в инертной, окислительной и окислительно-восстановительной атмосферах ($d < 0,1$ мм): 1 – одновременное горение кокса и выделение летучих в окислительных условиях; 2 – горение кокса в окислительно-восстановительных условиях; 3 – горение кокса, полученного в инертной среде

кокса по сравнению с классическим случаем, когда коксование осуществляется в инертной среде. Смещение кривой (2) в область более низкой температуры относительно кривой (3) подтверждает правильность принятой ранее корректировки температурных интервалов при смещении ДТГ-кривых термоокислительной деструкции и горения кокса, полученного в инертной среде.

Применение комплексного термического анализа для оценки реакционной способности коксового остатка натуральных углей по отношению к CO_2 и H_2O в неизотермических условиях позволяет, используя в низкотемпературной области первый порядок реагирования, оценить константы скорости процессов ($\text{см}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$) по выражениям:

$$k_{\text{CO}_2} = \frac{W_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}_2}(C_0 - C_{\text{CO}_2})}; \quad k_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{W_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}(C_0 - C_{\text{H}_2\text{O}})} \quad (14)$$

где C_0 – начальная масса коксового материала, мг; P_{CO_2} , $P_{\text{H}_2\text{O}}$ – соответственно весовые концентрации CO_2 и H_2O в потоке, моль/ см^3 ; C_{CO_2} , $C_{\text{H}_2\text{O}}$ – количество прореагировавшего кокса при взаимодействии с CO_2 и H_2O , мг.

Найденные в соответствии с описанными выше методиками значения реакционных характеристик процессов термохимического превращения на примере средне-статистических проб канско-ачинских углей, а также данные о температурных диапазонах протекания процессов и температурах, соответствующих максимальным скоростям реакций, сведены в таблице 1. Относительная погрешность методик при 95%-ном доверительном интервале (по Стьюденту) составляет не более 2–3%. Аналогичные

данные получены в работе и для кузнецких углей марки Г, СС и Т. Обобщение полученных реакционных характеристик от содержания C^{daf} представлено на рис. 10–13.

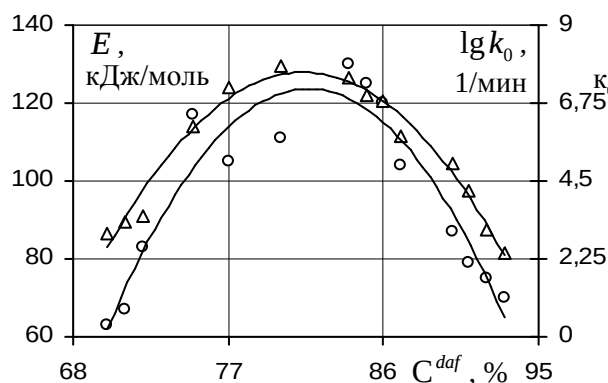


Рис. 10. Кинетические параметры смоловы-деления энергетических углей: $\bullet$ – энергия активации; Δ – вероятностный фактор

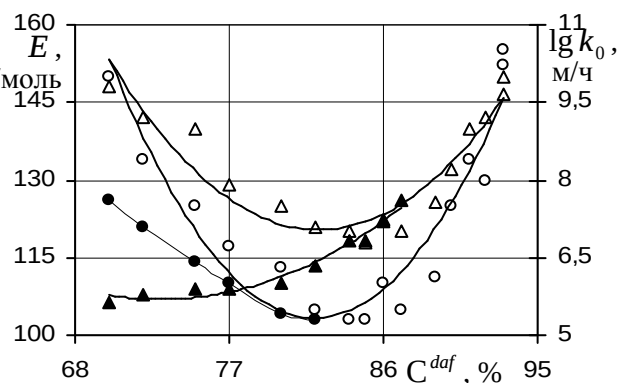


Рис. 11. Кинетические параметры горения коксового остатка: $\bullet$ – E ; Δ – k_0 канско-ачинских углей; — и р – кузнецких углей

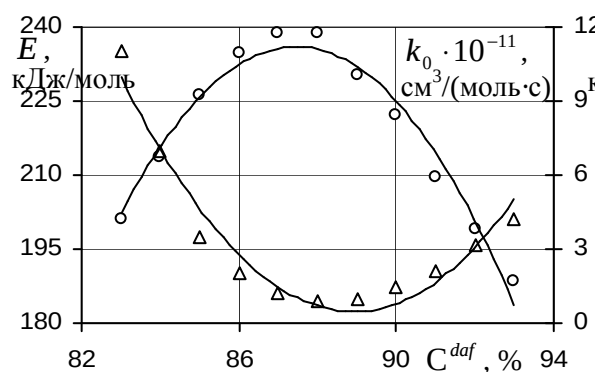


Рис. 12. Кинетические параметры взаимодействия CO_2 с коксовой основой: $\bullet$ – E ; Δ – $k_0 \cdot 10^{-11}$

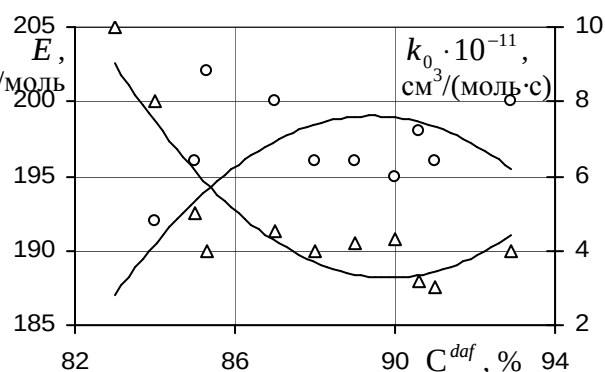


Рис. 13. Кинетические параметры взаимодействия H_2O с коксовой основой: $\bullet$ – E ; Δ – $k_0 \cdot 10^{-11}$

Количественная оценка кинетики протекания сложных физико-химических процессов превращения минеральной части твердых органических топлив осуществлялась на основе предположения, что рассматриваемые реакции являются топочимическими, относятся к классу $A_{тв} \rightarrow B_{тв} + C_{газ}$ и следовательно, могут быть описаны с позиций как микро-, так и макрокинетики формально-кинетическим уравнением:

$$\frac{d\alpha_i}{d\tau} \sum_{i=1}^m \left(k_{0i} \exp \left[-\frac{E_i}{RT(\tau)} \right] (1 - \alpha_i)^n \right), \quad (15)$$

где i – количество стадий ($i=1, \dots, m$); α_i , E_i , k_{0i} – соответственно доля прореагировавшего вещества, энергия активации и предэкспоненциальный множитель i -й стадии.

Кинетические кривые и параметры термохимического превращения минеральной части на примере березовского угля представлены на рис. 14 и табл. 2.

Для повышения информативности, надежности и точности результатов экспериментального моделирования изложенные выше методики определения реакционной способности углей реализованы в виде аппаратно-программного комплекса, автоматизирующего процессы сбора, обработки и интерпретации данных комплексного термического анализа в режиме реального времени.

Таблица 1

**Кинетические параметры термохимического превращения канско-ачинских углей
по данным комплексного термического анализа**

Процесс	Элемент, газовый компонент	№ стадии	Бородинский				Березовский				Назаровский			
			Температурный диапазон, °С	Температура максим. скорости, °С	Энергия активации, Е, кДж·моль ⁻¹	Вероятностный фактор, k_0 , *) с ⁻¹	Температурный диапазон, °С	Температура максим. скорости, °С	Энергия активации, Е, кДж·моль ⁻¹	Вероятностный фактор, k_0 , *) с ⁻¹	Температурный диапазон, °С	Температура максим. скорости, °С	Энергия активации, Е, кДж·моль ⁻¹	Вероятностный фактор, k_0 , *) с ⁻¹
Испарение влаги	W	1	20÷160	120	18,3	5,22	20÷160	120	14,4	4,01	20÷160	120	16,2	4,66
Выход летучих веществ (термическое разложение)	Н ₂	1	570÷900	705	87,6	$1,0 \cdot 10^3$	520÷900	740	92,4	$4,5 \cdot 10^3$	580÷900	740	126,5	$1,3 \cdot 10^4$
		2	440÷720	590	149,9	$2,0 \cdot 10^4$	490÷715	640	142,3	$4,9 \cdot 10^6$	510÷750	620	94,2	$1,1 \cdot 10^5$
		3	355÷570	505	115,7	$2,1 \cdot 10^4$	—				375÷715	565	148,4	$7,2 \cdot 10^6$
	СО	1	535÷900	785	108,8	$5,6 \cdot 10^3$	590÷890	760	90,2	$8,8 \cdot 10^3$	485÷875	715	83,1	$8,9 \cdot 10^3$
		2	525÷720	660	184,6	$6,1 \cdot 10^5$	490÷720	655	141,2	$4,6 \cdot 10^6$	465÷725	635	116,0	$2,5 \cdot 10^4$
		3	350÷605	400	67,2	$6,6 \cdot 10^2$	280÷535	410	71,5	$4,4 \cdot 10^2$	210÷515	395	56,1	$1,3 \cdot 10^2$
		4	180÷360	260	41,3	$2,5 \cdot 10^2$	180÷340	250	43,2	$3,5 \cdot 10^2$	—			
	СО ₂	1	305÷590	465	95,4	$3,9 \cdot 10^4$	280÷470	380	71,7	$1,1 \cdot 10^4$	450÷700	590	79,4	$1,6 \cdot 10^3$
		2	250÷415	345	76,5	$5,2 \cdot 10^6$	—				410÷600	540	117,0	$3,2 \cdot 10^5$
		3	—				—				300÷530	420	95,4	$3,9 \cdot 10^3$
	СН ₄	1	415÷815	655	58,1	$7,2 \cdot 10^2$	390÷705	600	106,9	$1,4 \cdot 10^5$	580÷760	720	199,2	$2,4 \cdot 10^7$
		2	290÷565	495	69,8	$1,1 \cdot 10^3$	285÷465	365	92,3	$5,2 \cdot 10^5$	430÷725	575	74,9	$4,1 \cdot 10^3$
		3	—				—				300÷620	535	102,2	$1,2 \cdot 10^4$
	Смола	1	300÷580	440	81,7	$8,4 \cdot 10^4$	280÷780	500	75,9	$2,5 \cdot 10^3$	300÷640	480	78,4	$2,8 \cdot 10^6$
	«Синтетическая» смола	1	220÷440	300	209,0	$5,8 \cdot 10^{15}$	210÷430	290	188,6	$3,2 \cdot 10^4$	220÷450	310	196,3	$1,2 \cdot 10^{15}$
Выгорание коксового остатка	С	1	380÷940	440	103,9	$2,5 \cdot 10^6$	390÷950	450	147,0	$8,5 \cdot 10^8$	440÷980	520	132,8	$2,8 \cdot 10^8$
Газификация коксового остатка	Н ₂ О	1	500÷900	700	191,4	$2,6 \cdot 10^5$	510÷920	705	201,2	$5,8 \cdot 10^5$	480÷880	675	189,4	$2,9 \cdot 10^5$
	СО ₂	1	780÷1140	990	214,0	$7,9 \cdot 10^6$	750÷1120	980	210,1	$5,5 \cdot 10^6$	800÷1180	1000	221,9	$3,8 \cdot 10^6$

*) — для процесса выгорания коксового остатка предэкспоненциальный множитель k_0 имеет размерность (м/с);

— для процесса газификации коксового остатка k_0 имеет размерность (см³/(моль·с))

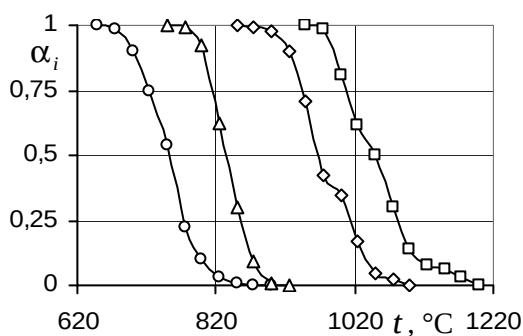


Рис. 14. Кинетические кривые термохимического превращения минеральной части березовского угля в условиях термического анализа ($\beta = 5$ град/мин): $\bullet$ – FeCO_3 ; Δ – MgCO_3 ; $\diamond$ – CaCO_3 ; $\square$ – $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

Таблица 2
Кинетические параметры термохимического превращения некоторых минералов неорганической части березовского угля

Минеральное вещество	Энергия активации, E , кДж/моль	Вероятностный фактор, k_0 , 1/с
Кальцит CaCO_3	179,0	$1,23 \cdot 10^6$
Магнезит MgCO_3	132,3	$4,22 \cdot 10^4$
Сидерит FeCO_3	118,7	$6,46 \cdot 10^5$
Доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	197,2	$5,29 \cdot 10^7$

Характеристики реакционной способности энергетических углей используются в дальнейшем для расчетной оценки протекания процессов термохимического превращения пылевидного топлива в условиях реальных технологических устройств его подготовки и сжигания.

В пятом разделе представлены результаты экспериментальных исследований процесса термохимического превращения твердого органического топлива при его термической обработке и сжигании в условиях лабораторных, полупромышленных и промышленных установок с сопоставлением полученных данных по определению видимых констант скоростей горения угля.

С целью сопоставления результатов, полученных при низких скоростях нагрева (5–20 град/мин), присущих условиям комплексного термического анализа, с данными по термохимическому превращению угля при высокоскоростном нагреве (10^4 – 10^6 град/с), соответствующему условиям реальных теплотехнологических процессов и устройств, были проведены исследования процессов термообработки и сжигания пылевидного твердого топлива на экспериментальной установке с вертикальной реакционной камерой (рис. 15). Установка обеспечивает термообработку пылеугольных частиц в различных газовых средах в диапазоне от 200 до 1500 °C при времени пребывания в реакционном пространстве от 0,5 до 4,5 с. Полученные экспериментальные данные в виде зависимостей $\lg k = f(1/T)$ используются для оценки кинетических характеристик различных стадий термохимического превращения топлива.

Анализ результатов исследования процесса кинетики сушки при различных условиях термообработки топлива (рис. 16) позволяет констатировать, что реакционный механизм и профиль кривых процесса сушки пылевидного топлива полностью согласуется со схемой испарения гигроскопической влаги по классификации П.А. Ребиндера и соответствует испарению капиллярной влаги, влаги моно- и полимолекулярной адсорбции, обусловленной водородными связями молекул воды с активными центрами поверхности угля. При высокоскоростном нагреве пылеугольной частицы скорость выхода, W , отдельных газовых компонентов для произвольного порядка реакции, n , определяется выражением:

$$\frac{1}{W^{\frac{n}{n-1}}} = (n-1)k^n \tau + \frac{1}{C_0^{n-1} k^{\frac{n}{n-1}}}, \quad (16)$$

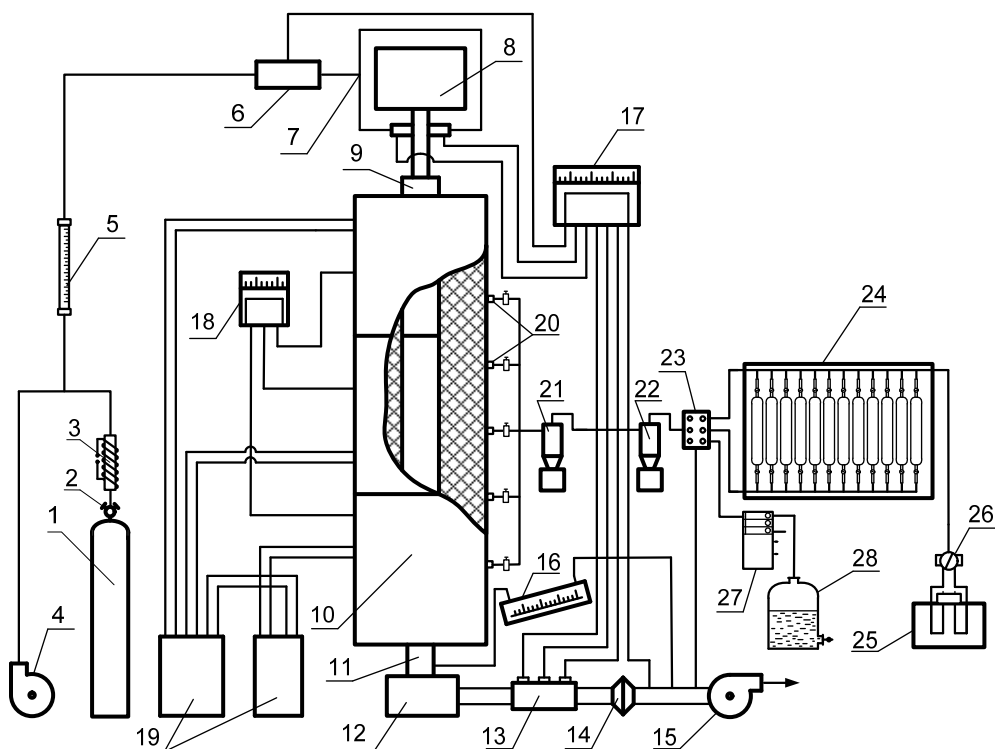


Рис. 15. Принципиальная схема экспериментальной установки для высокотемпературной обработки пылевидного топлива: 1 – баллон с инертным газом; 2 – регулятор расхода инертного газа; 3 – реактор для удаления кислорода на линии подачи инертного газа; 4 – вентилятор для подачи воздуха; 5 – ротаметр; 6 – теплообменник; 7 – тройник; 8 – аэромеханический пылепитатель; 9 – пылеугольная горелка; 10 – реакционная камера; 11 – хвостовая часть; 12 – приемный бункер; 13 – газоход; 14 – золоуловитель; 15 – дымосос; 16 – тягонапормер; 17 – самописец (КСП-4); 18 – самописец (КСП-3); 19 – регулятор напряжения (РНО); 20 – устройство для отбора газообразных продуктов; 21 – обогреваемый пылеулавливающий циклон; 22 – водоохлаждаемый циклон для конденсации жидких продуктов деструкции; 23 – многоходовой кран; 24 – штатив газовых пипеток; 25 – газоанализатор; 26 – кран дозатор; 27 – перистальтический насос; 28 – газометр

где C_0 – суммарное количество выделяющегося газового компонента за весь период изотермической выдержки, кг; k – константа скорости процесса, 1/мин.

В общем случае, зависимость $1/W^{n-1} = f(\tau)$ представляет собой прямую линию, тангенс угла наклона которой определяется величиной k .

Полученные экспериментальные данные по динамике термического разложения канско-ачинских и кузнецких углей в

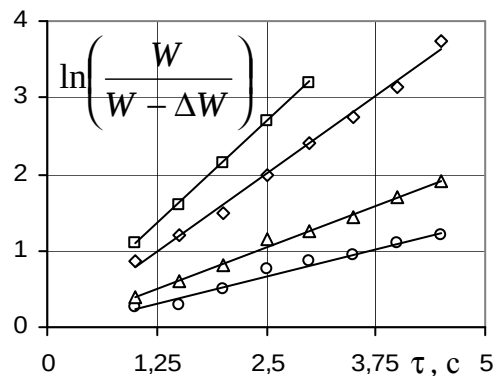


Рис. 16. Зависимость изменения $\ln(W/(W - \Delta W))$ от времени термообработки для полифракции бородинского угля; температура обработки, °C: ● – 200; Δ – 250; ◇ – 300; □ – 400

условиях высокоскоростного нагрева отражают сложную зависимость выхода индивидуальных компонентов суммарного газа как от времени, так и от температуры протекания процесса (рис. 17). При этом характер соответствующих закономерностей различен для каждого из компонентов. Например, в первые 1,5–2 с массовый выход CO_2 снижается с повышением температуры, а у CO , CH_4 и H_2 возрастает. Количественная оценка скоростей реакций позволила выделить параллельно-додовательные группы, константы скорости которых отличаются в 2–5 раз.

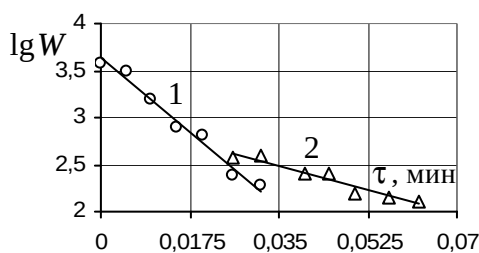
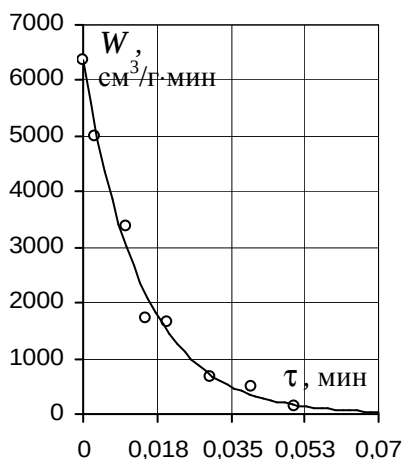


Рис. 17. Динамика выделения H_2 при термическом разложении бородинского угля в условиях высокоскоростного нагрева ($\beta = 10^4 - 10^5$ град/с) до $t_k = 900$ °С

Более быстрые из них обусловлены разрывом слабых периферийных кислородосодержащих связей, а группа медленных реакций включает в себя процессы более глубокой деструкции ядра макромолекулы угля. Интере-

ресно отметить, что в суммарном газе низкотемпературных опытов преобладают продукты группы более быстрых реакций – CO и CO_2 . С повышением температуры неуклонно возрастает доля продуктов медленных реакций – H_2 и CH_4 . Роль последовательных стадий увеличивается с повышением температуры процесса, параллельных – с увеличением скорости нагрева.

Для определения кинетических констант процесса выгорания нелетучих ос-

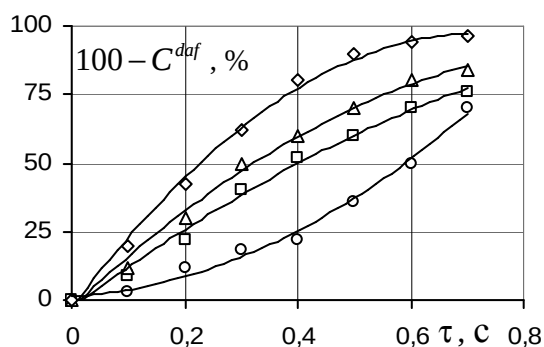


Рис. 18. Интенсивность выгорания коксовых частиц (размер 63–100 мкм) бородинского угля. Температура обработки, °С: $\bullet$ – 1040; $\square$ – 1180; Δ – 1315; $\diamond$ – 1455

татков термического разложения канско-ачинских и кузнецких углей пробы коксовых частиц различного фракционного состава сжигались при четырех значениях температуры: 1040, 1180, 1315 и 1455 °С. Время пребывания коксовых частиц в реакционном пространстве экспериментальной установки составляло 0,85 с.

Исследование кривых выгорания коксовых остатков (рис. 18) показало, что при скоростях нагрева менее 10^3 град/с выгорание кокса завершается в период прогрева частицы. При больших скоро-

стях нагрева время выгорания коксовых частиц складывается из неизотермической и изотермической составляющих.

Анализ экспериментальных данных по исследованию кинетики различных этапов термохимического превращения пылевидного топлива (табл. 3) позволяет констатировать, что реакционный механизм и профиль кривых остаются неизменными при экстремальных скоростях нагрева (в пределах $10^{-2} - 10^6$ град/с), что позволяет рекомендовать комплексный термический анализ для оценки реакционной способности энергетических углей.

Сформулированные выводы подтверждены результатами тепловых испытаний систем подготовки и сжигания топлива котлов БКЗ-320 ТЭЦ АГК, БКЗ-500-140 Красноярской ТЭЦ-2 и П-67 Березовской ГРЭС-1, работающих на канско-ачинских углях. Получены зависимости изменения температуры топочных газов, содержания кислорода, трехатомных газов и горючих газообразных компонентов, концентрации твердой фазы и степени выгорания топлива, интенсивности шлакования поверхностей нагрева и образования оксидов азота (рис. 19).

Таблица 3

Сопоставление констант скоростей различных стадий, ответственных за термохимическое превращение канско-ачинских углей

Марка угля	№ ста- дии	Константы скорости, K_{900}							
		Испарение влаги		Выход летучих веществ				Горение кокса	
		1/мин						м/мин	
		5 °C/мин	$10^4\text{--}10^6$ °C/с	CO		H ₂		5 °C/мин	$10^4\text{--}10^6$ °C/с
5 °C/мин	$10^4\text{--}10^6$ °C/с			5 °C/мин	$10^4\text{--}10^6$ °C/с				
Бородин- ский	1	0,79	0,92	3,63	4,55	$1,49\cdot10^{-1}$	$3,3\cdot10^{-1}$	99,5	$1,92\cdot10^2$
	2	—	—	—	—	—	—	—	—
	3	—	—	—	—	$1,27\cdot10^{-1}$	$2,7\cdot10^{-1}$	—	—
Березов- ский	1	0,92	1,1	4,18	3,97	2,28	2,81	$2,44\cdot10^2$	$2,74\cdot10^2$
	2	—	—	—	—	$3,48\cdot10^{-1}$	—	—	—
	3	—	—	2,42	2,66	—	—	—	—
Назаров- ский	1	0,88	1,04	0,415	0,401	1,79	1,65	$3,68\cdot10^2$	$4,03\cdot10^2$
	2	—	—	0,172	—	7,07	6,89	—	—
	3	—	—	1,78	2,04	—	—	—	—

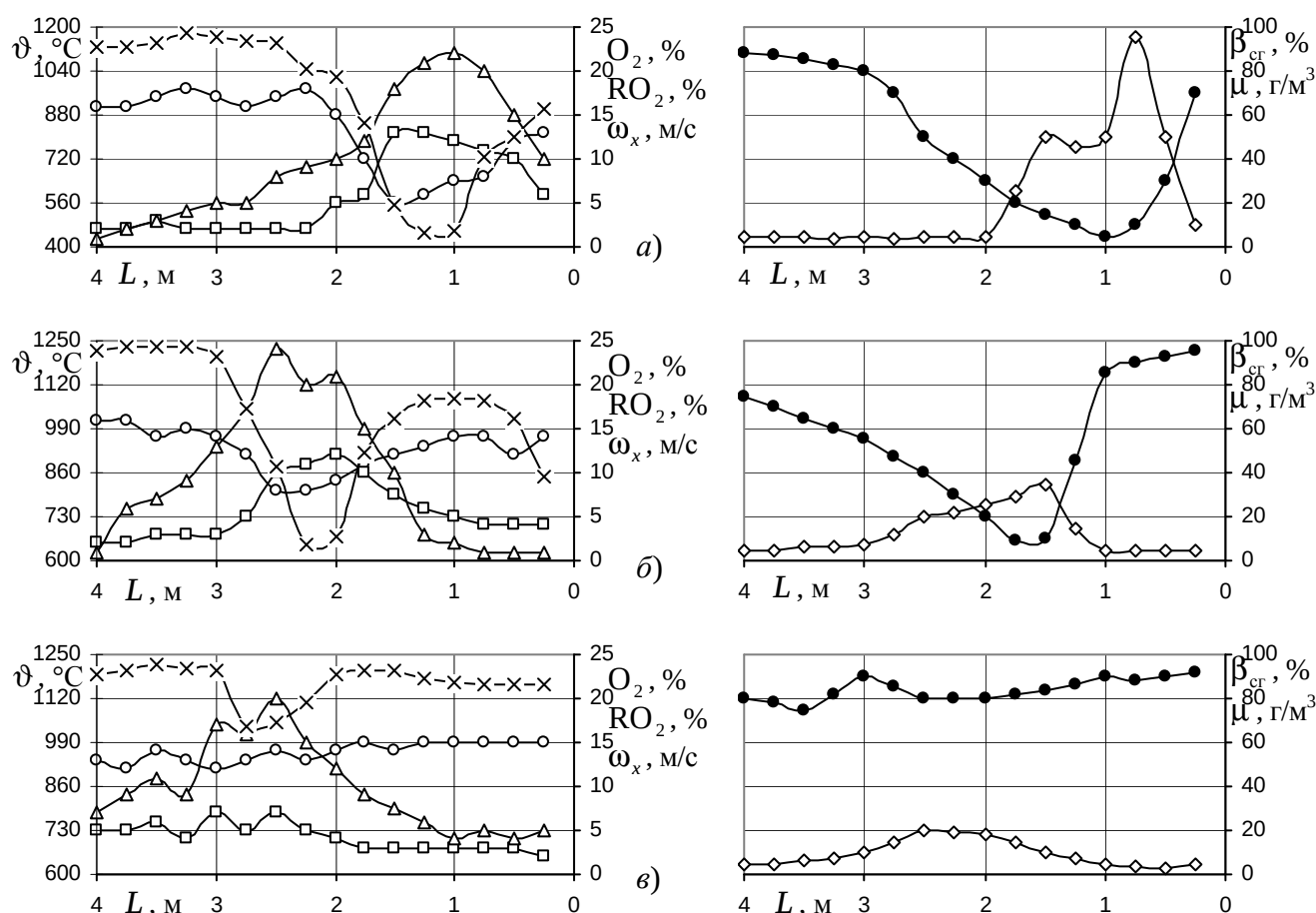


Рис. 19. Структура факела первого яруса горелок котла БКЗ-500-140: а – сечение 1,54 м; б – сечение 2,81 м; в – сечение 4,19 м; × – θ – температура факела; □ – O_2 – концентрация кислорода; ● – RO_2 – концентрация трехатомных газов; D – ω_x – горизонтальная составляющая скорости потока; ◇ – μ – концентрация твердой фазы; ● – β_{cr} – степень выгорания топлива

Экспериментально показано, что время пребывания газов в зоне активного горения всех испытанных котлов сопоставимо с длительностью сушки и смоловыделения в составе летучих веществ. С угрублением помола угольной пыли

процессы сушки и выделения летучих веществ затягиваются, увеличивается диффузионное сопротивление подводу окислителя к коксовому остатку, снижается температура факела и степень выгорания топлива. Аналогично проявляет себя и изменение зольности исходного угля.

Причиной появления тепловых потерь с химическим недожогом является затяжное выделение водорода и оксида углерода в зонах, где устойчивое воспламенение и интенсивное выгорание газовых смесей практически невозможно вследствие низкой концентрации горючих газов и кислорода. Минимальное значение тепловые потери с химической неполнотой горения ($q_3 \approx 0,1\%$) принимают при коэффициенте избытка воздуха $\alpha_t = 1,21\text{--}1,27$. Наличие механического недожога q_4 при сжигании канско-ачинских углей является следствием высокой длительности выгорания наиболее крупных коксовых частиц ($R_{90}^{\text{опт}} = 40\text{--}55\%$). Анализ тепловых потерь с химическим и механическим недожогом топлива показал, что колебания по выходу летучих веществ, по теплоте сгорания топлива, приведенной зольности и другим общепринятым теплотехническим характеристикам не определяют однозначно специфику выгорания исследуемых топлив.

С целью развития исследований термохимического превращения угля, определения степени влияния режимных параметров процессов предварительной термической обработки и сжигания углей на интенсивность их выгорания, экспериментального обоснования технических решений по организации термоподготовки топлива, осуществляемой высокотемпературными продуктами сгорания части исходного топлива, выполнен цикл экспериментальных работ в полупромышленных условиях на экспериментальном огневом стенде кафедры ТЭС СФУ (рис. 20), включающий систему пылеприготовления с шаровой барабанной мельницей, котельную установку с вертикальной топочной камерой циклонного типа и горизонтальным конвективным газоходом, устройства подачи воздуха и удаления газообразных продуктов сгорания. Система пылеприготовления производительностью до 300 кг/ч позволяет получить готовую угольную пыль с характеристикой фракционного состава $R_{90} = 10\text{--}60\%$ и влажностью $W'' = 5\text{--}24\%$.

Запатентованное устройство для исследования процесса термической подготовки топлива состоит из камеры подогрева угольной пыли, линейного горизонтального участка термообработки и байпаса, предусмотренного для сжигания исходного топлива и обеспечивает предварительный подогрев топлива от 300 до 900 °С при избытках воздуха $\alpha = 0,2\text{--}0,9$. При этом время пребывания угольных частиц в установке составляет от 2,5 до 0,6 с. Конструктивно узел для термоподготовки угольной пыли состоит из двух коаксиальных цилиндров. Внутренний цилиндр выполняет функцию муфеля, наружный – подогревателя угольной пыли. Угольная пыль на входе в подогреватель делится на две части, меньшая часть топлива подается на сжигание в муфель для поддержания температурного режима, а остальная часть направляется в межтрубное пространство пылеподогревателя. Термообработка основной части топлива осуществляется за счет теплоты, выделившейся при сгорании угольной пыли в муфеле. Для регулирования температуры подогрева топлива предусмотрена возможность изменения расхода угольной пыли на муфель. Получено, что для осуществления процесса предварительной термообработки канско-ачинских углей является достаточным использование тепла, выделяющегося при сгорании парогазовых компонентов – продуктов термического разложения исходного топлива.

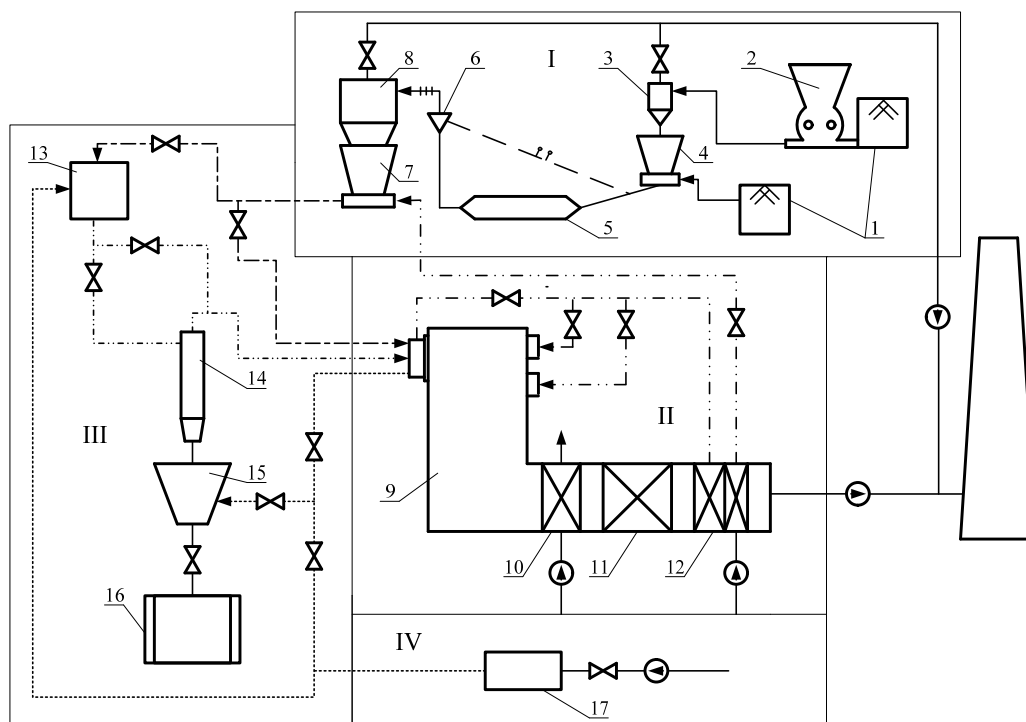


Рис. 20. Принципиальная схема экспериментального стенда для термической обработки и сжигания твердых органических топлив: I – разомкнутая система пылеприготовления; II – огневой стенд; III – установка термической переработки угля; IV – блок для генерации пара; 1 – генератор высокотемпературных газообразных продуктов; 2 – валковая дробилка; 3 – циклон дробленки; 4 – бункер дробленого топлива; 5 – шаровая барабанная мельница; 6 – сепаратор угольной пыли; 7 – промежуточный бункер угольной пыли; 8 – трехсекционный рукавный фильтр; 9 – циклонная топка; 10 – воздухо- и водоохлаждаемые трубные пучки; 11 – экспериментальный газопровод; 12 – двухступенчатый воздухоподогреватель; 13 – устройство для термической подготовки топлива; 14 – циклон горячего термоугля; 15 – бункер горячего термоугля; 16 – бункер-охладитель термоугля; 17 – парогенератор

Термическая обработка канско-ачинских углей ($\vartheta_{\text{тн}} = 350\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{тн}} = 0,8\text{--}1,2\text{ с}$) приводит к повышению теплоты сгорания твердых продуктов термообработки с 23 до 29,5 МДж/кг, при этом содержание влаги и балластных летучих веществ (CO_2) в них равно нулю. Установлено, что продукты термоподготовки угля устойчиво горят при температуре сжигания выше $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ с коэффициентом избытка воздуха не менее 1,2. При этом величина химического недожога составляет 0,1–1,5%, а механического 0,8–3%.

Исследования процесса загрязнения поверхностей нагрева котельного агрегата показали, что интенсивность загрязнения при сжигании продуктов термообработки угля независимо от марки угля в 2,5–3 раза ниже, чем при сжигании исходных топлив (рис. 21). Сжигание канско-ачинских углей после их термообработки позволило установить, что с увеличением температуры обработки сжигаемого топлива, содержание оксидов азота (NO_x) снижается (рис. 22). Так при сжигании березовского угля ($\vartheta_{\text{ф}} = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\alpha = 1,25$) при температуре обработки $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ концентрация NO_x в продуктах сгорания составила 680 мг/м^3 , а при сжигании в тех же условиях продуктов термообработки при температуре подготовки $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 350 мг/м^3 .

В шестом разделе представлены математическая диффузионно-кинетическая модель термохимического превращения твердых органических топлив в газовом потоке и результаты численного расчета динамики этого процесса на примере выгорания канско-ачинских углей в пылевидном состоянии при

различных условиях обработки и параметрах модели.

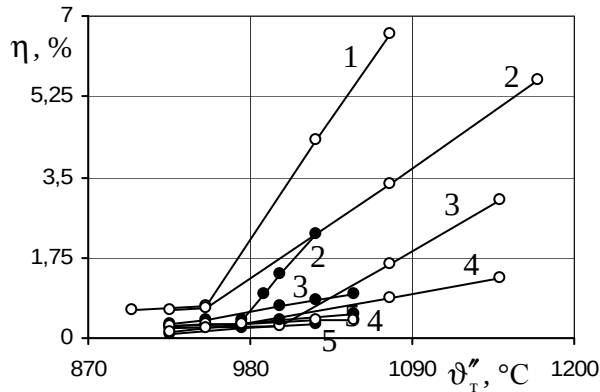


Рис. 21. Интенсивность шлакования поверхностей нагрева: **○** – окисленный уголь; **●** – рядовой уголь; 1 – без термообработки; $\vartheta_{\phi} = 1275$ °C; 2 – без т/о; $\vartheta_{\phi} = 1290$ °C; 3 – без т/о; $\vartheta_{\phi} = 1240$ °C; 4 – $\vartheta_{\text{тп}} = 600$ °C; $\vartheta_{\phi} = 1240$ °C; 5 – $\vartheta_{\text{тп}} = 630$ °C; $\vartheta_{\phi} = 1240$ °C

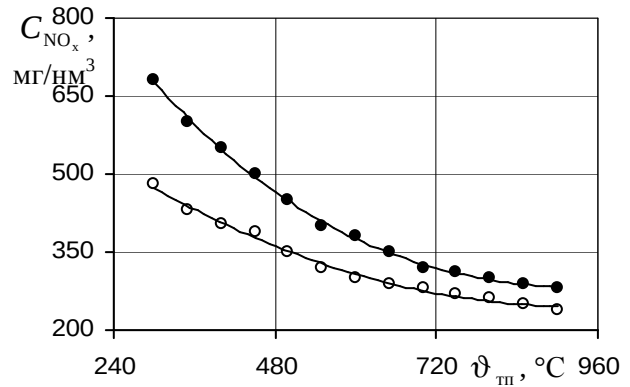


Рис. 22. Зависимость изменения концентрации оксидов азота в дымовых газах при сжигании березовских углей разной степени окисленности от температуры предварительной термической обработки ($\vartheta_{\phi} = 1200$ °C; $\alpha_{\text{т}} = 1,25$; $\tau_{\text{тп}} = 0,8-1,2$ с): **●** – рядовой уголь; **○** – окисленный уголь

Вывод математической модели базируется на предположении, что частицы угля состоят из органической и минеральной части, фазовые переходы осуществляются вследствие термического разложения органической массы угля. При построении математической модели принималось, что многостадийные процессы термохимического превращения твердого топлива аддитивны, выход функциональных групп при термическом разложении топлива происходит независимо друг от друга, соотношение функциональных групп в смоле такое же, как в исходном угле, выходящие в процессе пиролиза угольной пыли летучие вещества и нелетучий коксовый остаток идеально перемешиваются с окислителем (воздухом) и затем вступают в химическое реагирование. Математическая модель диффузионно-кинетических процессов термохимического превращения твердого органического топлива с учетом принятых допущений представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, включающая в себя зависимости, описывающие:

– динамику испарения влаги

$$\frac{dW^h}{d\tau} = k_{W^h} W_0^h; \quad (17)$$

– динамику выделения летучих веществ

$$\frac{dV_{\text{vol}}}{d\tau} = - \sum_{i=1}^{z_i} \sum_{j=1}^{z_j} k_{V_{i,j}} V_{0_{i,j}}; \quad (18)$$

– динамику выгорания летучих веществ

$$\frac{dV_{\text{com}}}{d\tau} = \sum_{j_0=1}^{z_{j_0}} k_{V_{i,j_0}} V_{0_{i,j}} + \sum_{i_d=1}^{z_{i_d}} \sum_{j_d=1}^{z_{j_d}} k_{V_{i_d,j_d}} V_{\text{pitch}} - \sum_{i=1}^{z_i} k_{d_i} v_{1_i} V_{\text{com}_i}^{v_{1_i}} O_2^{\beta_{1_i}}; \quad (19)$$

– изменение концентрации углерода

$$\frac{dC}{d\tau} = - \left[c_R (k_e v_2 C^{v_2} O_2^{\beta_2} + k_f v_3 C^{v_3} O_2^{\beta_3}) + c_{2R} \left(\sum_{r=1}^{z_r} k_{g_r} v_{4_r} C^{v_{4_r}} P_{m_r}^{\beta_{4_r}} + \sum_{s=1}^{z_s} k_{h_s} v_{5_s} C^{v_{5_s}} P_{u_s}^{\beta_{5_s}} \right) \right] \frac{273 F_C}{T_g \rho_C V_C}; \quad (20)$$

– изменение концентрации горючих продуктов неполного горения и газификации коксового остатка

$$\frac{dP_m}{d\tau} = \sum_{y=1}^{z_y} k_{n_y} \gamma_{7_y} P_m^{\nu_{7_y}} P_u^{\beta_{7_y}} - \sum_{m=1}^{z_m} k_{l_m} \nu_{6_m} P_m^{\nu_{6_m}} O_2^{\beta_{6_m}} - \sum_{y=1}^{z_y} k_{n_y} \nu_{7_y} P_m^{\nu_{7_y}} P_u^{\beta_{7_y}} +$$

$$+ \left[c_R k_e \gamma_2 C^{\nu_2} O_2^{\beta_2} + c_{2R} \left(\sum_{r=1}^{z_r} k_{g_r} \gamma_{4_r} C^{\nu_{4_r}} P_{m_r}^{\beta_{4_r}} + \sum_{s=1}^{z_s} k_{h_s} \gamma_{5_s} C^{\nu_{5_s}} P_{u_s}^{\beta_{5_s}} - \right. \right.$$

$$\left. \left. - \sum_{r=1}^{z_r} k_{g_r} \beta_{4_r} C^{\nu_{4_r}} P_{m_r}^{\beta_{4_r}} \right) \right] \frac{273 F_C}{T_g \rho_C V_C};$$

– изменение концентрации кислорода

$$\frac{dO_2}{d\tau} = - \left[\sum_{i=1}^{z_i} k_{d_i} \beta_{1_i} V_{com_i}^{\nu_{1_i}} O_2^{\beta_{1_i}} + (k_e \beta_2 C^{\nu_2} O_2^{\beta_2} + k_f \beta_3 C^{\nu_3} O_2^{\beta_3}) \frac{c_R 273 F_C}{T_g \rho_C V_C} + \sum_{m=1}^{z_m} k_{l_m} \beta_{6_m} P_m^{\nu_{6_m}} O_2^{\beta_{6_m}} \right]; \quad (22)$$

– изменение концентрации конечных продуктов горения

$$\frac{dP_u}{d\tau} = k_{w^h} W_0^h + \sum_{i=1}^{z_i} k_{d_i} \gamma_{1_i} V_{com_i}^{\nu_{1_i}} O_2^{\beta_{1_i}} + \sum_{y=1}^{z_y} k_{n_y} \chi_{7_y} P_m^{\nu_{7_y}} P_u^{\beta_{7_y}} + \sum_{m=1}^{z_m} k_{l_m} \gamma_{6_m} P_m^{\nu_{6_m}} O_2^{\beta_{6_m}} +$$

$$+ \left(c_R k_f \gamma_3 C^{\nu_3} O_2^{\beta_3} - c_{2R} \sum_{s=1}^{z_s} k_{h_s} \beta_{5_s} C^{\nu_{5_s}} P_{u_s}^{\beta_{5_s}} \right) \frac{273 F_C}{T_g \rho_C V_C} - \sum_{y=1}^{z_y} k_{n_y} \beta_{7_y} P_m^{\nu_{7_y}} P_u^{\beta_{7_y}};$$

– изменение размера пылеугольной частицы

$$\frac{d\delta}{d\tau} = - \frac{12}{32} \cdot \frac{dC}{d\tau} \cdot \frac{\delta_0}{C_0}; \quad (24)$$

– динамику реагирования химических компонентов минеральной части топлива

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = k_{s_i} (1 - \alpha_i)^{n_i}; \quad (25)$$

– изменение температуры пылеугольной частицы

$$\frac{dT_C}{d\tau} = \left\{ - (r + c_{ws} T_C) \gamma_{ws} \frac{dW^h}{d\tau} - (Q_{vol} + c_{vol} T_C) \gamma_{vol} \frac{dV_{vol}}{d\tau} + \right.$$

$$+ \left[c_R (k_e \nu_2 C^{\nu_2} O_2^{\beta_2} + k_f \nu_3 C^{\nu_3} O_2^{\beta_3}) + c_{2R} \left(\sum_{r=1}^{z_r} k_{g_r} \nu_{4_r} C^{\nu_{4_r}} P_{m_r}^{\beta_{4_r}} + \sum_{s=1}^{z_s} k_{h_s} \nu_{5_s} C^{\nu_{5_s}} P_{u_s}^{\beta_{5_s}} \right) \right] \frac{273 F_C}{T_g \rho_C V_C} -$$

$$- \left[c_R (k_e \beta_2 C^{\nu_2} O_2^{\beta_2} + k_f \beta_3 C^{\nu_3} O_2^{\beta_3}) + c_{2R} \left(\sum_{r=1}^{z_r} k_{g_r} \beta_{4_r} C^{\nu_{4_r}} P_{m_r}^{\beta_{4_r}} + \sum_{s=1}^{z_s} k_{h_s} \beta_{5_s} C^{\nu_{5_s}} P_{u_s}^{\beta_{5_s}} \right) \right] \frac{273 c_g F_C}{T_g \rho_g V_C} (T_C - T_g) -$$

$$- Nu \frac{\lambda_g}{\delta} (T_C - T_g) \frac{F_C}{V_C} - \sigma_0 \varepsilon_C \Phi_C (T_C^4 - T_{burn}^4) \frac{F_C}{V_C} - \sum_{i=1}^n \gamma_{im} A_i^d (c_{im} T_C + Q_{im}^i) \frac{d\alpha}{d\tau} \left. \right\} \frac{6}{c_C \rho_C};$$

– изменение температуры газовой фазы

$$\frac{dT_g}{d\tau} = \frac{1}{c_g} \left\{ \frac{1 - W^r - A^r}{\alpha V^0 + V_{H_2O}} \left(\sum_{i=1}^{z_i} k_{d_i} \nu_{1_i} V_{com_i}^{\nu_{1_i}} O_2^{\beta_{1_i}} \right) \rho_{com} + \left(\sum_{m=1}^{z_m} k_{l_m} \nu_{6_m} P_m^{\nu_{6_m}} O_2^{\beta_{6_m}} \right) \rho_g Q_m + \right.$$

$$+ \left[c_R (k_e \nu_2 C^{\nu_2} O_2^{\beta_2} + k_f \nu_3 C^{\nu_3} O_2^{\beta_3}) + c_{2R} \left(\sum_{r=1}^{z_r} k_{g_r} \nu_{4_r} C^{\nu_{4_r}} P_{m_r}^{\beta_{4_r}} + \sum_{s=1}^{z_s} k_{h_s} \nu_{5_s} C^{\nu_{5_s}} P_{u_s}^{\beta_{5_s}} \right) \right] \frac{6 c_g 273 K^r F_C}{\rho_g \rho_C T_g V_g} +$$

$$+ \frac{dV_{vol}}{d\tau} \cdot \frac{c_g}{\rho_g} (1 - W^r - A^r) + \frac{6 Nu \lambda_g K^r F_C}{\rho_C V_g (V_C / F_C)} \left. \right\} \frac{(T_C - T_g)}{(\alpha V^0 + V_{H_2O})} - \left(\sum_{y=1}^{z_y} k_{n_y} \nu_{7_y} P_m^{\nu_{7_y}} P_u^{\beta_{7_y}} \right) \rho_g Q_p -$$

$$- \sigma_0 a_t \left(\frac{S}{V} \right)_t (T_g^4 - T_{burn}^4) \frac{T_g}{273} - \frac{c_{ws} V_C \gamma_{ws} T_g}{V_g} \frac{dW^h}{d\tau} \left. \right\},$$

где k_{W^h} , $k_{V_{i,j}}$, $k_{V_{id,jd}}$, k_d – константы скорости соответственно процессов испарения влаги, выхода летучих веществ, деструкции вышедших летучих веществ и горе-

ния летучих веществ, 1/с; τ – время, с; V_{com} – концентрация летучих веществ в газовой фазе, кг/кг; ν – стехиометрический коэффициент; k_f , k_g – константы скорости соответственно горения углерода и восстановления продуктов сгорания, м/с; c_R и c_{2R} – концентрации кислорода и продуктов термохимического превращения на поверхности частиц, выраженные соответственно в кг O_2 и кг $O_2/м^3$; k_p , k_{p_m} – константы скорости соответственно взаимодействия продуктов неполного и полного сгорания и окисления горючих газообразных продуктов неполного сгорания и газификации, 1/с; δ_0 – начальный диаметр частицы, м; C_0 – исходная концентрация углерода в топливе (твердой фазе), кг/кг; V_C – объем частицы, $м^3$; Q_{vol} – теплота разложения летучих веществ, Дж/кг; Q_C – тепловой эффект реакций выгорания и газификации, приведен к 1 кг кислорода, кДж/(кг O_2); T_{burn} – температура облучающей среды, К; Q_{im}^i – тепловой эффект превращения i -го минерала золы, Дж/кг; Q_{com} – теплота сгорания летучих веществ, Дж/кг; Q_m – тепловые эффекты реакций горения неполных продуктов сгорания и горючих продуктов газификации, приведенные к 1 кг кислорода, Дж/(кг O_2); Q_p – тепловые эффекты реакций газификации продуктов неполного и полного горения, приведенные к 1 кг кислорода, Дж/(кг O_2); α – коэффициент избытка воздуха.

Вышеуказанная система дифференциальных уравнений рассчитывалась на следующие начальные условия: $\tau = 0$; $W^h = W_0^h$; $V_{vol} = V_0$; $V_{com} = 0$; $C = C_0$; $O_2 = (O_2)_0$; $P = 0$, где $P = P_m + P_u$; $\delta = \delta_0$; $T_C = (T_C)_0$; $T_g = (T_g)_0$; $\alpha_i = 0$. Помимо диффузионно-кинетических зависимостей эта система обеспечивает закон сохранения массы: $W^h + V + V_{com} + C + O_2 + P = W_0^h + V_0 + C_0 + (O_2)_0$, так как выполняется соотношение

$$\frac{dW^h}{d\tau} + \frac{dV}{d\tau} + \frac{dC}{d\tau} + \frac{dO_2}{d\tau} - \frac{dP}{d\tau} = 0.$$

Данная математическая модель положена в основу вычислительного эксперимента, проводимого применительно к решению задачи описания процесса выгорания бородинского, назаровского и березовского бурых углей Канско-Ачинского месторождения. Расчет термохимического превращения углей выполнялся для частиц размерами от 50 до 1000 мкм. Исходная температура газового потока варьировалась в диапазоне $T = 1200–1700$ °С, коэффициент избытка воздуха в газовом потоке $\alpha = 1,0–1,3$. Для численного решения системы дифференциальных уравнений использовался метод Рунге-Кутты-Фельберга с автоматическим выбором шага и точностью – 10^{-4} . Результаты аналитического эксперимента на примере выгорания частиц бородинского угля представлены на рис. 23.

Выявлена существенная зависимость исследуемых процессов от качества исходного топлива, температуры газового потока, избытка воздуха и размеров пылеугольных частиц. Увеличение температуры облучателя на 200 °С (от 1300 °С) приводит к сокращению времени полного выгорания мелких частиц в 1,8 раза, для крупных частиц в 2,5–3 раза. Этот эффект еще более очевиден для частиц с размером более 250 мкм. Именно в процессе деструкции топлива образуется до 90 % соединений азота, серы и углерода. Установлено, что процесс выделения летучих веществ в окислительной среде протекает в области более низких температур (740–860 °С) и с более высокой скоростью ($W_{max} = 5,4–5,6$ мг/(г·град)) по сравнению с аналогичным процессом в инертной среде (800–980 °С и $W_{max} = 1,29–1,36$ мг/(г·град)).

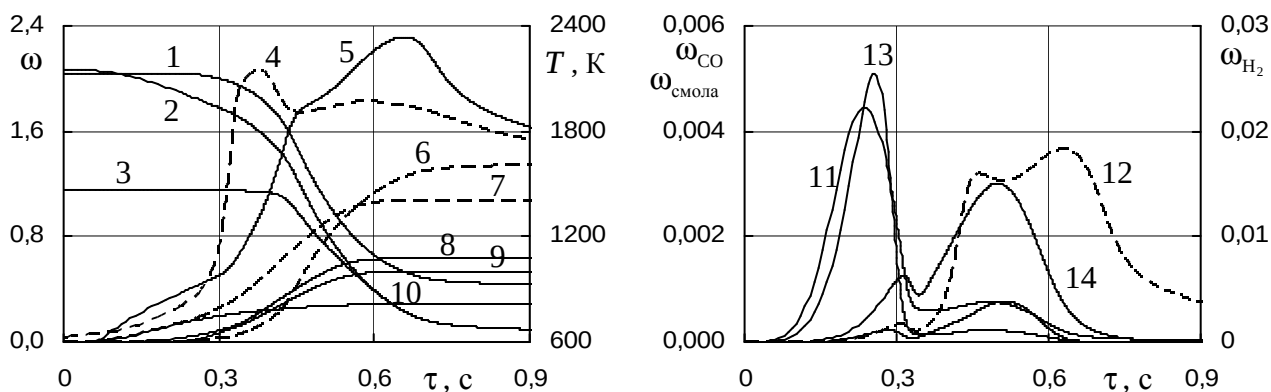


Рис. 23. Динамика термохимического превращения частиц бородинского угля размером 250 мкм ($T_{burn} = 1573$ К, $\alpha = 1,2$): 1 – концентрация окислителя; 2 – выгорание топлива; 3 – горение коксового остатка; 4 – температура газов; 5 – температура частицы; 6 – образование CO_2 ; 7 – образование H_2O ; 8 – выход летучих веществ; 9 – горение летучих веществ; 10 – испарение влаги; 11 – горение CO ; 12 – горение продуктов вторичной деструкции и газификации; 13 – горение H_2 ; 14 – горение смолы; ($\omega_i = m_i / m_0$, где m_i, m_0 – текущая и начальная масса i -го реагирующего компонента)

По результатам численных экспериментов определены моменты перехода от режима сушки к режиму выхода летучих веществ и далее к стадии горения углеродного коксового остатка. При этом для крупных угольных частиц (>250 мкм) переход органической массы в газообразные продукты горения осуществляется в основном газификацией нелетучего остатка парогазовыми компонентами летучих веществ. Отмечен ряд закономерностей горения угольных частиц. Например, при одной и той же температуре газового потока (1300 °C) увеличение коэффициента избытка воздуха с 1,0 до 1,1 приводит к увеличению образования индивидуальных газообразных компонентов CO , HCN , CO_2 и N_2 на 17, 6, 5,6 и 56 % соответственно и к уменьшению образования NH_3 на 8 %; увеличение коэффициента избытка воздуха с 1,0 до 1,2 приводит к увеличению образования CO на 33 %, HCN и CO_2 на 11 %, N_2 – на 85 % и к уменьшению выхода NH_3 на 85 %.

Результаты расчетов позволяют сделать вывод, что динамика горения частиц бурых канско-ачинских углей определяется в основном конвективным механизмом процесса выхода летучих веществ. Из полученных данных по моделированию процесса термохимического превращения угля на условия высокоскоростного нагрева следует, что выделение оксида углерода не успевает закончиться в период прогрева (выделяется 60–80 % от общего количества), что может создавать диффузионные осложнения горению коксового остатка. Получено, что процесс взаимодействия нелетучего остатка с окислителем протекает как в период прогрева (при неизотермическом режиме), так и при постоянной установившейся температуре коксовой частицы (изотермические условия). При скоростях нагрева $\beta > 10^3$ град/с доля кокса канско-ачинских углей, выгоревшего в период прогрева, составляет около 50 % и снижается при увеличении скорости нагрева. Изотермическая составляющая при этом соответственно увеличивается.

Анализ температурно-временных зависимостей термохимического превращения твердых органических топлив позволил определить ряд количественных показателей, характеризующих особенность данного процесса, в частности продолжительность различных стадий выгорания пылеугольных частиц и превышение их

температуры над температурой облучателя. Установлено, что время воспламенения коксового остатка, как стадии выгорания пылеугольных частиц сопоставимо с суммарной длительностью протекания параллельно-последовательных процессов сушки и смолы выделения: $\tau_{\text{вк}} = \tau_{\text{с}} + \tau_{\text{см}} - \Delta\tau$, с, где $\Delta\tau$ – длительность наложения стадий. В отличие от класса мелких частиц, где превышение температуры частицы над темпе-

ратурой облучателя ($\theta = \frac{1}{\tau_2} \int_{\tau_1}^{\tau_1 + \tau_2} (T_{\text{с}} - T_{\text{burn}}) d\tau$, °C, где τ_1 и τ_2 – соответственно время

прогрева частицы до температуры среды и превышения температуры частицы над температурой среды, с) меньше зависит от последней температуры, для крупных частиц оно имеет наибольшие значения при низких температурах топочной среды. Полученные закономерности изменения среднеинтегрального показателя θ , °C от различных режимных факторов топочного процесса и свойств сжигаемого топлива удовлетворительно описываются следующим аппроксимационным уравнением

$$\theta = 1,316 \cdot 10^{-10} \vartheta_{\text{г}}^{3,31} \alpha_{\text{г}}^{0,4} \delta_0^{0,65} (A^{\text{г}})^{-0,23}, \quad (28)$$

где $\vartheta_{\text{г}}$ – температура газов, °C; $\alpha_{\text{г}}$ – коэффициент избытка воздуха в топке; δ_0 – размер пылеугольной частицы, мкм; $A^{\text{г}}$ – зольность топлива на рабочую массу, %.

В наибольшей мере показатели термохимической обработки зависят от реакционной способности топлива, размера частиц, системы подготовки топлива к сжиганию, температуры топочной среды, избытка воздуха, теплонапряжения зоны активного горения. Выявленные аналитические закономерности используются для разработки практических рекомендаций по комплексной расчетной оценке выгорания топлива и теплообмена в топочных камерах паровых котлов.

В седьмом разделе рассмотрены вопросы внедрения комплексного метода исследования реакционной способности углей в практику их энергетического использования.

Полученные результаты экспериментально-расчетных исследований термохимического превращения твердого органического топлива позволили усовершенствовать методику расчета степени выгорания ($\beta_{\text{сг}}$, %) пылевидного топлива в топочных камерах паровых котлов. В качестве базовой методики использованы «Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов» (ЦКТИ-ВТИ, 1996) в которой расчет выгорания угля основан на молекулярном механизме диффузии и кинетики горения дрейфующих в потоке беззольных коксовых частиц. Сущность предлагаемого подхода заключается в раздельной оценке и учете длительности стадий сушки, смолы выделения (как основного этапа выхода летучих веществ) и горения коксового остатка. Величина механического недожога топлива определяется в результате итеративного комплексного позонного расчета выгорания пылеугольного факела и теплообмена в топочной камере по величине длительности выгорания наиболее крупных коксовых частиц: $\tau_{\text{гк}} = \tau_{\text{пр}} - \tau_{\text{вк}}$, где $\tau_{\text{пр}}$ – время пребывания угольных частиц в топочной камере с учетом их скорости витания, с. При оценке длительности процесса воспламенения коксового остатка ($\tau_{\text{вк}}$) продолжительность сушки ($\tau_{\text{с}}$) и смолы выделения ($\tau_{\text{см}}$) находятся по индивидуальным для каждой стадии кинетическим параметрам с помощью системы трансцендентных уравнений (6)–(8). Предложена схема расчета степени выгорания топлива, как для зоны активного горения, так и для зон, расположенных в камере

охлаждения топочного пространства. Методика дополнена определением длительности выделения индивидуальных газовых компонентов летучих веществ с использованием кинетических характеристик независимых индивидуальных реакций для одновременной оценки величины тепловой потери с химическим недожогом. Для расчета и проектирования топочных камер при сжигании бурых углей показана целесообразность учета и разработана методика определения концентрации сажистых частиц, образующихся в результате крекинга смол с последующей корректировкой значений коэффициента ослабления излучения факела, степени черноты и температуры газов, что, как следствие, позволяет уточнить параметры оптических свойств топочной среды в среднем на 5–10%. Количественная оценка степени выгорания топлива выполняется по найденным значениям времени выгорания ($\tau_{\text{гк}}$, с) и температуре коксовой частицы ($\vartheta_c = \vartheta_\phi + \theta$, °C), где ϑ_ϕ – температура пылеугольного факела, °C; θ – среднее интегральное превышение температуры частицы над температурой среды, приходящееся на единицу времени того периода, в котором это превышение развивается (рассчитывается по уравнению (28)), °C.

Реализованная в виде автоматизированного расчетного комплекса усовершенствованная методика оценки выгорания пылевидного топлива позволяет учесть не только режимные параметры топочных устройств, такие как тонина помола, коэффициент избытка воздуха, нагрузка, высота размещения факела и доля воздуха, подаваемого в виде вторичного и третичного дутья, но и индивидуальные особенности органической и минеральной части сжигаемого топлива, посредством использования данных о реакционной способности отдельных этапов термохимического превращения угля. Достоверность методики подтверждена сопоставлением результатов вычислений с данными, полученными при испытаниях энергетических котлов (БКЗ-75-40, БКЗ-210-100, БКЗ-320-140, БКЗ-420-140, БКЗ-500-140, БКЗ-640-140, ПК-38, ТПП-804, П-57, П-67) при сжигании широкого класса топлив (бородинского, назаровского, березовского и кузнецкого углей). Получено хорошее согласование между аналитическими и экспериментальными данными (рис. 24, коэффициент корреляции составил 0,993–0,995).

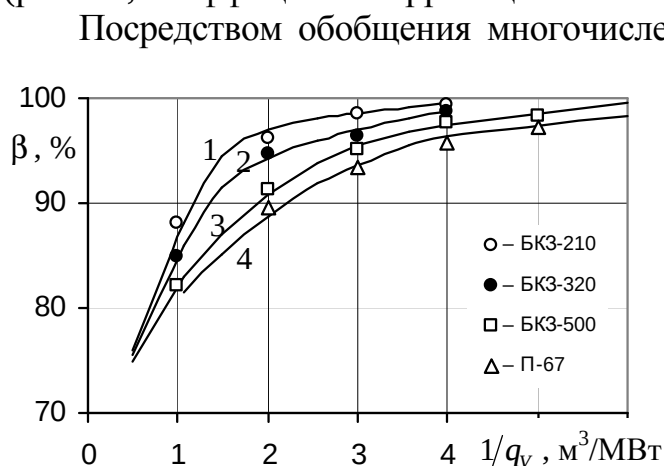


Рис. 24. Сопоставление расчетных (сплошная линия, 1 – БКЗ-210; 2 – БКЗ-320; 3 – БКЗ-500; 4 – П-67) и экспериментальных значений (маркер) степени выгорания угля от величины $1/q_v$, где q_v – теплонапряжение топочного объема, МВт/м³

Посредством обобщения многочисленных результатов расчетных исследований выгорания топлива в пылеугольных котлах, выполненных с помощью вышеизложенной методики, была разработана имитационная динамическая модель рабочих процессов топочных устройств. Необходимость решения этой задачи обусловлена существенным влиянием эксплуатационных факторов и качества топлива на статические и динамические характеристики котельного агрегата и необходимостью обеспечения проектных требований, предъявляемых к паровым котлам в отношении маневренности и точности поддержания рабочих параметров. Коэффициент избытка воздуха варьиро-

вался в пределах $\alpha_t = 1,1-1,5$. Для выявления влияния только температуры газов значение теплоты сгорания изменялось в пределах $\pm 20\%$ от проектного значения. Тонина помола R_{90} изменялась: для кузнецких углей от 20 до 50%; для канско-ачинских углей от 40 до 60%. Для определения влияния времени пребывания топлива в расчетной зоне вычисления проводились на различные нагрузки в диапазоне от 50 до 100% номинальной. При анализе результатов использовалось понятие приведенной доли выгорания топлива в каждой зоне $\Delta\beta_{np}$, характеризующее отношение количества топлива, сгоревшего в данной зоне, к количеству топлива, поступившего в нее (как через горелочные устройства, так и из предыдущей зоны). При этом учитывалось различное время пребывания топлива в топке при многоярусном расположении горелочных устройств с различным распределением топлива по ярусам. С целью упрощения расчетов зоны с подачей топлива объединены в единую зону максимального тепловыделения. Полученные зависимости приведенной доли выгорания в каждой зоне от эксплуатационных факторов аппроксимированы алгебраическими зависимостями. Для объединенной зоны максимального тепловыделения уравнение имеет вид

$$\Delta\beta_{np} = k_0 + k_1 \left(1 - \exp \left(-a \left(\left(21 - \frac{21}{\alpha''} \right) - 0,03 \right) \right) \right) + k_2 \vartheta''_{заг} - k_3 R_{90} + \frac{1}{m} k_4 \sum_{k=1}^m (1 - \exp(-b(\tau_k - \tau_0))), \quad (29)$$

для зон без ввода топлива, расположенных выше зоны максимального тепловыделения:

$$\Delta\beta_{np} = k_{0i} + k_{1i} \left(21 - \frac{21}{\alpha''} \right) + k_{2i} \vartheta''_i - k_{3i} R_{90} + k_{4i} (1 - \exp(-c_i(\tau_i - \tau_0))), \quad (30)$$

где $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_{0i}, k_{1i}, k_{2i}, k_{3i}, k_{4i}, a, b, c_i$ – аналитические коэффициенты, зависящие от реакционной способности сжигаемого топлива и от относительной высоты расположения среднего сечения зоны от пода топки (h_i/H_t); m – число ярусов горелочных устройств; ϑ'', α'' – соответственно температура газов ($^{\circ}\text{C}$) и коэффициент избытка воздуха на выходе из зоны; R_{90} – остаток на сите размером 90 мкм; τ – время пребывания пылеугольных частиц в расчетной зоне, с.

К числу входных параметров динамической модели топочного устройства относятся изменение расходов воздуха и топлива, доли рециркуляции дымовых газов и т.д., выходными координатами являются отклонения расхода газов и температуры на выходе из топки, а также тепловые потоки к поверхностям нагрева в каждой выделенной зоне топки.

Динамика топочных процессов учитывается звеном первого порядка с постоянной времени (T_t), равной сумме постоянных времени всех малоинерционных элементов. Для топочных камер с твердым шлакоудалением T_t принималась 7 с, для котлов с жидким шлакоудалением 4,5 с. Разработанная динамическая модель положена в основу имитационных тренажерных комплексов рабочих процессов топочных устройств котлоагрегатов ТЭС, внедренных на ряде энергетических предприятий для отработки оперативных задач управления. Наряду с этим данный подход позволяет эффективно решать задачи управления (от выбора целей до синтеза управляющих структур) топочными процессами, а также может быть использован при выполнении проектных и наладочных работ, связанных с реконструкцией и модернизацией существующего оборудования, при

переводе котлов на сжигание непроектного топлива.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов подготовки и сжигания энергетических углей позволили разработать на уровне изобретений ряд технических решений, обеспечивающих совершенствование технологического цикла и создание надежных, эффективных и экологически безопасных котельных агрегатов на твердом топливе. К числу мероприятий, положенных в основу концептуального подхода, относятся: обеспечение высокой эффективности систем подготовки угольной пыли перед сжиганием; применение рациональных конструкций горелочных устройств, а также схем их расположения в топочной камере; совершенствование топочного процесса за счет применения конструктивных, режимных и организационных мероприятий. Для повышения эффективности процесса сушки в системах пылеприготовления предложены новые конструкции пыледелителей и пылеконцентраторов, совершенствование работы которых достигается за счет организации фонтанирующей, либо кольцевой траектории движения угольной пыли с рециркуляцией в горизонтальной или вертикальной плоскости. Такие устройства позволяют не только более глубоко производить отделение угольной пыли от забалластированного сушильного агента ($g/l=80/20\%$), но и увеличить длительность сушильного процесса (с 0,5 до 3 с) и как следствие минимизировать влажность угольной пыли ($W'' \approx 0\%$). Реализация технических решений, связанных с предварительной термохимической обработкой топлива, осуществляется двумя принципиально отличающимися способами. К первому способу относятся мероприятия, устройства и аппараты, обеспечивающие термообработку топлива до его попадания в топочную камеру, в частности предвключенные многоступенчатые пылеподогреватели и циклонные предтопки, поточные либо секционные пылеподогреватели фонтанирующего или винтового типов с нисходящими и восходящими направлениями движения пылегазовых струй. Ко второму способу относятся технические решения, позволяющие реализовать протекание предварительной термохимической обработки топлива непосредственно в топочной камере котла. Такая организация процесса стала возможной за счет совершенствования конструкций топочных камер: фестонированием определенных ее участков, организацией многокамерных топок и топок объемного охлаждения с вертикальными и горизонтальными предтопками. Характерной особенностью всех вышеперечисленных конструкций топочных камер является наличие зон и условий с пониженной концентрацией кислорода ($\alpha \approx 1,0$), снижение приосевой рециркуляции газов, повышение значения разности скоростей аэросмеси и вторичного воздуха (более 20 м/с), перераспределение зон теплообмена и стадий реагирования пылеугольных частиц, локальные и наведенные аэродинамические вихревые структуры.

Для проработки вопросов внедрения технических решений, обеспечивающих высокую эффективность, надежность и экологическую безопасность топливоиспользования на тепловых электростанциях, выполнено расчетное обоснование режимов работы и конструктивных характеристик разработанных устройств. Расчетами экономической эффективности практического применения предложенных в работе режимов, способов и устройств в технологическом цикле подготовки и сжигания твердого органического топлива на тепловой электростанции показано, что годовой экономический эффект от внедрения таких устройств применительно к котельным агрегатам средней мощности паропроизводительностью от 210 до 500 т/ч в зависимости от масштабов реализации составляет 5,38–46,2 млн.

руб. (12,5–107,3 тыс. т.у.т.), при сроке окупаемости 1,1–3,5 года, что подтверждает их высокую инвестиционную привлекательность.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Усовершенствованы схема и установка комплексного термического анализа твердых органических топлив, а также обоснованы экспериментальные условия выполнения комплексного термического анализа для оценки кинетических характеристик процессов, ответственных за термохимическое превращение угольного вещества, что позволило повысить информативность, надежность и точность результатов экспериментальных исследований.

2. Разработана и апробирована экспресс-методика определения теплотехнических характеристик твердого органического топлива по результатам его комплексного термического анализа, основанная на обработке термогравиметрических кривых убыли массы навески в соответствующей температурной области и атмосфере печи, позволяющая сократить общую продолжительность оценки влажности, выхода летучих веществ, зольности и теплоты сгорания угля в условиях эксплуатации и наладки топочно-горелочных устройств котельных установок в 2,5–4 раза при аналогичной точности в сопоставлении с методиками ГОСТ.

3. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена применимость математического аппарата неизотермической кинетики для оценки реакционной способности энергетических углей и разработаны практические рекомендации по его использованию для экстраполяции результатов комплексного термического анализа на условия реальных теплотехнологических процессов и установок. Установлено, что с ростом скорости нагрева угольных частиц на 5–6 порядков происходит сдвиг термохимической реакции в область повышенных температур с одновременным расширением температурной области протекания реакции и уменьшением значений максимальной скорости процесса. Получено, что при высоких скоростях нагрева выделение летучих веществ может лимитировать длительность выгорания углей (выделяется 60–80 % от общего количества) и создавать диффузионные осложнения горению коксового остатка.

4. Разработан новый экспериментально-расчетный метод и соответствующее алгоритмическое и программное обеспечение для исследования кинетики многостадийных процессов термохимического превращения твердого органического топлива, использующий аппроксимацию экспериментальных термогравиметрических кривых полиномом, коэффициенты которого определяются исходя из реализации принципа последовательного захвата, расчета и исключения изолированных стадий с помощью корреляционно-регрессионного анализа термоаналитических зависимостей, что позволяет устранить ограничения по количеству подлежащих определению искомым стадий, число которых может быть заранее неизвестно и кинетических параметров. Получены предельные значения погрешностей определения кинетических констант, что позволяет учесть влияние на эти погрешности случайных искажений экспериментальных данных.

5. Разработана методика определения реакционной способности твердого органического топлива, основанная на его комплексном термическом анализе в инертной и окислительных средах, и получен банк экспериментальных значений кинетических параметров, характеризующих особенности протекания процессов испарения влаги, выхода летучих веществ с отдельной оценкой смолы выделения

и выхода индивидуальных парогазовых компонентов, горения и газификации нелетучего (коксового) остатка, термического превращения химических компонентов минеральной части углей Кузнецкого и Канско-Ачинского месторождений и установлена их связь с основными структурными параметрами органической массы угольного вещества.

6. Сопоставлением значений видимых констант скорости термохимического превращения угля с размером частиц менее 250 мкм, полученных при низких скоростях нагрева ($\beta = 5\text{--}20$ град/мин), присущих условиям комплексного термического анализа, с экспериментом при высокоскоростном нагреве топлива ($\beta = 10^4\text{--}10^6$ град/с) в условиях лабораторных, полупромышленных и промышленных установок доказана неизменность механизмов протекания отдельных этапов процесса горения угольного вещества (сушки, термической деструкции и горения нелетучего остатка) при экстремальных изменениях значений скорости нагрева, что позволяет рекомендовать комплексный метод термического анализа твердого органического топлива в неизотермических условиях для объективной и адекватной оценки реакционной способности энергетических углей.

7. Разработана математическая диффузионно-кинетическая модель процесса термохимической обработки угля, учитывающая химическую структуру, механизм превращения и реакционную способность твердых органических топлив, а также межфазный тепло- и массоперенос и выполнена оценка температурно-временных интервалов протекания различных стадий превращения угля от качества исходного топлива, температуры обработки, размера пылеугольных частиц, коэффициента избытка воздуха и т.д. Установлено, что время воспламенения коксового остатка, как стадии выгорания пылеугольных частиц сопоставимо с суммарной длительностью протекания процессов сушки и смолотделения. В качестве показателя температурной обработки пылеугольных частиц предложено использовать величину среднего превышения температуры частицы над температурой топочной среды. В отличие от класса мелких частиц, где это превышение меньше зависит от температуры среды, для крупных частиц (более 500 мкм) оно имеет наибольшие значения при низких температурах облучателя.

8. Усовершенствована методика расчета степени выгорания пылевидного топлива в топочных камерах паровых котлов в части учета характеристик реакционной способности для раздельной оценки длительности протекания различных стадий горения угля и на ее основе разработана динамическая позонная модель пылеугольной топки, учитывающая изменение приведенной доли выгорания от эксплуатационных факторов, и позволяющая осуществлять синтез имитационных и управляющих систем рабочих процессов топочных устройств, посредством выбора целевой функции и диагностируемых параметров.

9. По результатам численного моделирования и экспериментальных исследований процесса термохимического превращения твердого органического топлива в условиях лабораторных и опытно-промышленных установок обоснованы требования к организации систем подготовки и сжигания твердого органического топлива, а также разработаны на уровне технических решений, защищенных патентами РФ, способы и устройства по их реализации в условиях тепловой электростанции, обеспечивающие повышение эффективности и надежности работы котельных агрегатов, снижение выбросов вредных веществ в атмосферу, вовлечение в топливно-энергетический баланс страны низкокачественных углей.

Основное содержание работы изложено в публикациях:

1. Дубровский, В. А. Система подготовки канско-ачинских углей для котлов с жидким шлакоудалением / В. А. Дубровский, **Е. А. Бойко** // Межвуз. сб. научн. тр.: Комплексное использование углей Канско-Ачинского бассейна. Л.: ЛТИ, 1990, С. 77–83.
2. **Бойко, Е. А.** Результаты испытаний и разработка варианта реконструкции системы подготовки топлива для котлов сжигающих угли Канско-Ачинского бассейна / **Е. А. Бойко**, В. А. Дубровский // Красноярск: Деп. в ВИНТИ 15.09.1992, №3355-эн92. 21 с.
3. А.с. №1740869 СССР, МКИ³, кл. F23 C5/24. Топочное устройство / В. А. Дубровский, И. С. Деринг, **Е. А. Бойко** и др. Оpubл. 15.06.92. Бюл. №22.
4. А.с. №1740886 СССР, МКИ³, кл. F23 K1/00. Система пылеприготовления котла / В. А. Дубровский, **Е. А. Бойко**, Ж. Л. Евтихов и др. Оpubл. 15.06.92. Бюл. №22.
5. **Бойко, Е. А.** Особенности термического разложения канско-ачинских углей разной степени окисленности / **Е. А. Бойко**, В. А. Дубровский // Журнал прикладной химии. 1992. Т. 65. №10. С.1654–1659.
6. А.с. №1751595 СССР, МКИ³, кл. F23 C5/24. Топка / В. А. Дубровский, Ж. Л. Евтихов, **Е. А. Бойко**, и др. Оpubл. 30.07.92. Бюл. №28.
7. А.с. №1751604 СССР, МКИ³, кл. F23 K1/00. Делитель-пылеконцентратор / В. А. Дубровский, С. М. Куликов, **Е. А. Бойко** и др. Оpubл. 30.07.92. Бюл. №28.
8. **Бойко, Е. А.** Исследование процесса предварительной термической подготовки канско-ачинских углей на основе их комплексного термического анализа / **Е. А. Бойко**, В. А. Дубровский, С. А. Михайленко // Межвуз. сб. науч. тр.: Гидродинамика больших скоростей (теплоэнергетика). Красноярск: КрПИ, 1992. С. 91–97.
9. А.с. №1760253 СССР, МКИ³, кл. F23 K1/00. Система пылеприготовления котла / В. А. Дубровский, **Е. А. Бойко**, Ж. Л. Евтихов и др. Оpubл. 07.09.92. Бюл. №33.
10. А.с. №1774132 СССР, МКИ³, кл. F23 C5/24. Делитель-пылеконцентратор / В. А. Дубровский, Ж. Л. Евтихов, **Е. А. Бойко** и др. Оpubл. 07.11.92. Бюл. №41.
11. А.с. №1816931 СССР, МКИ³, кл. F23 K1/00. Котельный агрегат / В. А. Дубровский, **Е. А. Бойко**, С. М. Куликов и др. Оpubл. 23.05.93. Бюл. №19.
12. Дубровский, В. А. Глубокая термopодготовка угольной пыли – путь уменьшения шлакования и вредных выбросов паровых котлов / В. А. Дубровский, И. С. Деринг, **Е. А. Бойко** и др. // Энергетик. 1994. №1. С. 5–8.
13. Патент РФ №1740869, МКИ³, кл. F23 C5/08. Топочное устройство / И. С. Деринг, В. А. Дубровский, **Е. А. Бойко** и др. Оpubл. 20.04.94. Бюл. №22.
14. **Бойко, Е. А.** Кинетика температурной обработки бурых углей Канско-Ачинского бассейна / **Е. А. Бойко** // Химия твердого топлива. 1995. №5. С. 31–38.
15. Деринг, И. С. Оптимизация режимов и схем безмазутной растопки паровых котлов / И. С. Деринг, **Е. А. Бойко**, Ж. Л. Евтихов // Энергетика. Изв. ВУЗов. 1995. №5–6. С. 62–65.
16. **Бойко, Е. А.** Получение карбида кальция и ацетилена из отходов угледобычи Канско-Ачинского бассейна / **Е. А. Бойко**, В. А. Дубровский, Ж. Л. Евтихов, Л. В. Степанова, В. А. Владимиров // Журнал прикладной химии. 1995. Т. 68. №10. С. 1727–1731.
17. **Бойко, Е. А.** Экспериментально-расчетный метод оценки кинетики многостадийных процессов термической деструкции твердого топлива / **Е. А. Бойко** // Красноярск: Вестник КГТУ, 1996. Вып. 3. С. 119–124.
18. **Бойко, Е. А.** Численное и экспериментальное моделирование процессов

аэродинамики и сложного теплообмена в пылеугольных топочных камерах реальной геометрии / **Е. А. Бойко**, А. А. Дектерев, Л. П. Каменьщиков и др. // Межвуз. сб. науч. тр.: Новые методы и средства экономии энергоресурсов и экологические проблемы энергетики, СПб.: СПбГТУ, 1996. С. 15–19.

19. **Boiko, E. A.** Der experimentelle Berechnungskomplex fuer die Bewertung der Waermephysikalischen und Reaktionskennziechen fester Brennstoffe / **Е. А. Boiko**, S. M. Kulikow // XXVIII Kraftwerktechnisches Kolloquium. Germany. Dresden: Technische Universitaet Dresden, 5 und 6 October 1996. S. 105–109.

20. Патент РФ №2072479, МКИ³, кл. F23 K1/00. Пылесистема / В. А. Дубровский, **Е. А. Бойко**, Ж. Л. Евтихов. Опубл. 27.01.97. Бюл. №3.

21. **Бойко, Е. А.** Экстраполяция результатов термического анализа твердого органического топлива применительно к условиям реальных топочных процессов / **Е. А. Бойко** // Красноярск: Вестник КГТУ, 1997. Вып. 8. С. 117–121.

22. **Бойко, Е. А.** Исследование, разработка и внедрение мероприятий по повышению надежности и эффективности работы паровых котлов при сжигании канско-ачинских углей / **Е. А. Бойко**, В. А. Дубровский, И. С. Деринг и др. // Красноярск: Вестник КГТУ, 1997. Вып. 8. С. 127–133.

23. Патент РФ №208851, МКИ³, кл. F23 K1/00. Котельный агрегат / В. А. Дубровский, И. С. Деринг, **Е. А. Бойко** и др. Опубл. 27.08.97. Бюл. №24.

24. Патент РФ №2096688, МКИ³, кл. 6F23 K1/00. Система безмазутной растопки парового котла / И. С. Деринг, **Е. А. Бойко**, Ж. Л. Евтихов. Опубл. 20.11.97. Бюл. №32.

25. **Бойко, Е. А.** Исследование процесса испарения влаги канско-ачинских углей при их термообработке / **Е. А. Бойко** // Журнал прикладной химии. 1998. Т. 71. Вып. 10. С. 1736–1742.

26. Шишканов, О. Г. Аналитическое исследование теплообмена с учетом динамики выгорания пылеугольного факела в топках энергетических котлов / О. Г. Шишканов, **Е. А. Бойко** // Труды 2-й Российской национальной конференции по теплообмену. М.: МЭИ, 1998. Т. 9. С. 289–292.

27. **Бойко, Е. А.** Численное моделирование аэродинамики топочной камеры, оборудованной системой термической подготовки топлива / **Е. А. Бойко**, А. А. Дектерев, В. А. Дубровский, Ж. Л. Евтихов // Красноярск: Вестник КГТУ. 1998. Вып. 14. С. 105–112.

28. Патент РФ №2113655, МКИ³, кл. F23 C5/08. Топка парового котла / В. А. Дубровский, **Е. А. Бойко**, И. С. Деринг и др. Опубл. 20.06.98. Бюл. №17.

29. **Бойко, Е. А.** Системный анализ факторов шлакования поверхностей нагрева паровых котлов / **Е. А. Бойко**, Е. М. Жадовец, П. Ю. Гребеньков // Красноярск: Вестник КГТУ, 1998. Вып. 14. С. 128–132.

30. **Бойко, Е. А.** Комплексный подход к оценке эффективности технических решений энергетического использования канско-ачинских углей / **Е. А. Бойко**, О. Г. Шишканов // Энергетика. Изв. Вузов. 1999. №5. С. 71–79.

31. **Бойко, Е. А.** Автоматизированная система контроля и технической диагностики паровых котлов / **Е. А. Бойко**, Д. Г. Дидичин, В. Н. Вольнев и др. // Компрессорная техника и пневматика. 1999. № 3–4. С. 114–122.

32. **Бойко, Е. А.** Численное моделирование процесса образования золошлаковых отложений на поверхностях нагрева котельных агрегатов / **Е. А. Бойко**, Е. М. Жадовец // Красноярск: Вестник КГТУ, 1999. Вып. 19. С. 100–114.

33. **Boiko, E. A.** Research on kinetics of the thermal processing of brown coals of

various oxidative ageing degree using the non-isothermal methods / **E. A. Boiko** // *Thermochimica Acta*. 2000. Vol. 348. P. 97–104.

34. **Бойко, Е. А.** Численное моделирование процесса образования отложений на полурадационных поверхностях нагрева котлоагрегата БКЗ-420-140 / **Е. А. Бойко**, Е. М. Жадовец, П. В. Шишмарев // Материалы Всероссийской научно-практической конференции: Проблемы использования канско-ачинских углей на ТЭС. Красноярск: 2000. С. 382–389.

35. **Boiko, E. A.** Die Vervollkommnung der Kesselanlagen-Konstruktionen fuer die Verbrennung von Kansk-Atschinsker Kohlen / **E. A. Boiko** // XXXI Kraftwerktechnisches Kolloquium. Germany. Dresden: Technische Universitaet Dresden, 24 und 25 October 2000. S. 77–80.

36. **Бойко, Е. А.** Кинетика термохимических превращений компонентов минеральной части канско-ачинских углей / **Е. А. Бойко**, П. В. Шишмарев, Д. Г. Дидичин, Е. М. Жадовец // Материалы III Научно-практической конференции: Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов, Челябинск: 2001. Т. 1. С. 116–124.

37. **Бойко, Е. А.** Экспериментально-расчетное исследование процесса образования золошлаковых отложений на полурадационных поверхностях нагрева котельных агрегатов / **Е. А. Бойко**, Е. М. Жадовец, С. А. Михайленко, С. В. Порозов // Межвуз. сб. науч. тр.: Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на ТЭС. СПб.: СПб ГТУ РП, 2001. С. 146–157.

38. **Бойко, Е. А.** Полупромышленные исследования технологии подавления NO_x при энергетическом использовании канско-ачинских углей / **Е. А. Бойко**, Д. Г. Дидичин, П. В. Шишмарев // Сб. докл. III-го Российского национального симпозиума по энергетике. Казань: 2001. С. 135–142.

39. **Boiko, E. A.** Perfecting of ways power usages kansk-achinsk coal on the basis of the technology of CFD-simulation / **E. A. Boiko**, P. U. Grebenkov, P. V. Shishmarev, D. G. Didichin // International congress on FEM-Technology and 19th all-European CAD-FEM user' meeting. Germany. Berlin-Potsdam: 2001. P. 456–468.

40. **Бойко, Е. А.** Совершенствование схемы комплексного термического анализа твердых топлив для оценки экологических показателей ТЭС / **Е. А. Бойко**, Д. Г. Дидичин, М. Ю. Угай и др. // Сб. статей по материалам 2-й Всероссийской научно-практической конференции: Проблемы экологии и развития городов. Красноярск: Т. 1. 2001. С. 314–319.

41. Свидетельство ГОСФАП №2145. Кинетическая обработка экспериментальных данных комплексного термического анализа твердых топлив / **Е. А. Бойко**, Д. Г. Дидичин, П. В. Шишмарев // Регистр. 20.09. 2002 г.

42. **Бойко, Е. А.** Тепломассообмен при деструкции твердого топлива в условиях комплексного термического анализа / **Е. А. Бойко**, П. В. Шишмарев, Д. Г. Дидичин // Труды XXII Российской школы «Наука и технологии». М.: РАН, 2002. С. 55–61.

43. Свидетельство РФ №2002611755. Оценка кинетических параметров скоростей реакций термохимического превращения твердых топлив / Д. Г. Дидичин, **Е. А. Бойко** // Регистр. 11.10.2002.

44. **Бойко, Е. А.** К вопросу о тепломассообмене при комплексном термическом анализе твердого топлива / **Е. А. Бойко**, П. В. Шишмарев, Д. Г. Дидичин // Материалы XXII Всероссийской школы по проблемам науки и технологий. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2002. С. 46–48.

45. **Бойко, Е. А.** Кинетика изменения химического состава минеральной части канско-ачинских углей в условиях комплексного термического анализа / **Е. А. Бойко**, П. В. Шишмарев, Д. Г. Дидичин, Е. М. Жадовец // Химия твердого топлива. 2003. №4. С. 70–78.

46. Патент РФ №2212586, МПК⁷, кл. F23 N5/00. Способ и устройство регулирования режима горения паропроизводительной установки / **Е. А. Бойко**, Д. Г. Дидичин, П. В. Шишмарев. Оpubл. 20.09.2003. Бюл. №26.

47. **Бойко, Е.А.** Комплексный термический анализ процессов термолиза и горения нелетучих продуктов канско-ачинских углей разной степени окисленности / **Е. А. Бойко**, Д. Г. Дидичин, П. В. Шишмарев // Журнал прикладной химии. 2003. Т. 76. Вып. 4, С. 605–610.

48. Свидетельство РФ №2003610936. Программно-методическое обеспечение для отработки оперативных задач управления энергетическим котлом ПК-10Ш / **Е. А. Бойко**, Д. Г. Дидичин // Регистр. 25.02.2003.

49. Свидетельство РФ №2003610937. Программно-методическое обеспечение для отработки оперативных задач управления энергетическим котлом БКЗ-320-140 / **Е. А. Бойко**, Д. Г. Дидичин // Регистр. 17.04.2003.

50. **Бойко, Е. А.** Учебно-методическое и программное обеспечение для отработки оперативных задач управления энергетическим оборудованием / **Е. А. Бойко**, П. В. Шишмарев // Материалы 2-ой Всероссийской научно-технической конференции «Тренажерные технологии». С-Пб.: СПбГПУ, 2003. С. 89–93.

51. Свидетельство РФ №2003612099. Аппаратно-программный комплекс для оценки реакционной способности твердых топлив / Д. Г. Дидичин, **Е. А. Бойко** // Регистр. 08.09.2003.

52. **Бойко, Е. А.** Кинетика термохимических превращений углей Канско-Ачинского бассейна / **Е. А. Бойко**, Д. Г. Дидичин, П. В. Шишмарев // Химия твердого топлива. №3. 2004. С. 3–12.

53. Свидетельство РФ №2004611403. Комплекс программ имитационного моделирования выгорания пылеугольного факела, решения тренажерных задач управления и технической диагностики топочных процессов / **Е. А. Бойко**, Д. Г. Дидичин, В. Н. Вольнев и др. // Регистр. 07.06.2004

54. **Бойко, Е. А.** Кинетическая модель термохимического превращения твердых органических топлив / **Е. А. Бойко**, С. В. Пачковский // Журнал прикладной химии. 2004. Т. 77. Вып. 9. С. 1558–1567.

55. **Boiko, E. A.** Verfahren und Einrichtung der Regelung des Arbeitsregimes der Kesselanlage bei der Arbeit auf den Kohlen der variablen Qualität / **Е. А. Boiko**, S. W. Patschkowskij // XXXVI Kraftwerktechnisches Kolloquium. Technische Universität Dresden. Germany. Dresden: 19 und 20 October 2004. S. 145–153.

56. **Бойко, Е. А.** Комплексный термический анализ твердых органических топлив: Монография / **Е. А. Бойко**. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. 383 с.

57. Патент РФ №2252364, МПК⁷, кл. F23 N5/00. Способ и устройство регулирования режима горения паропроизводительной установки / **Е. А. Бойко**, Д. Г. Дидичин, В. Н. Вольнев и др. Оpubл. 20.05.2005. Бюл. №14.

58. **Бойко, Е. А.** Экспериментально-расчетная методика оценки кинетических процессов термохимического превращения твердых органических топлив / **Е. А. Бойко**, С. В. Пачковский, Д. Г. Дидичин // Физика горения и взрыва. 2005. №1. С. 55–65 (Experimental and Numerical Technique for Estimating Kinetic Processes of Thermochemical Conversion of Solid Organic Fuels / E.A. Boiko, S.V. Pachkovskii,

D.G. Didichin // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2005, Vol. 41. №1. pp. 47–56).

59. Свидетельство РФ №2005611258. Программно-методическое обеспечение для отработки оперативных задач управления дубль энергоблоком К-160-130 с котельными агрегатами ПК-38 / **Е. А. Бойко**, Д. Г. Дидичин, П. В. Шишмарев, М. В. Турок // Регистр. 27.05.2005.

60. **Бойко, Е. А.** Имитационная динамическая модель управления пылеугольной топki / **Е. А. Бойко** // IV Международная научно-техническая конференция «Достижения и перспективы развития энергетики Сибири». Красноярск: СибВТИ–СибЭНТИЦ, 2005. С. 308–321.

61. Свидетельство РФ №2005611627. Программно-методический комплекс для отработки оперативных задач управления котельным агрегатом БКЗ-500-140 с АСУ ТП «Teleperm (Siemens)» / **Е. А. Бойко**, В. Н. Вольнев, Ю. А. Величко и др. // Регистр. 29.06.2005.

62. Патент РФ №2277674, МПК⁷, кл. F23K C1/00. Котельный агрегат / **Е. А. Бойко**, П. В. Шишмарев, С. В. Пачковский. Оpubл. 10.06.2006. Бюл. №16.

63. Свидетельство РФ №2006612782. Программно-методический комплекс для отработки оперативных задач управления котельным агрегатом БКЗ-420-140 ПТ-2 / **Е. А. Бойко**, В. Н. Вольнев, П. В. Шишмарев и др. // Регистр. 04.08.2006.

64. **Бойко, Е. А.** Сравнительный анализ процессов термoxимического превращения углей Канско-Ачинского бассейна / **Е. А. Бойко**, П. В. Шишмарев // Сб. докладов VI всероссийской конференции «Горение твердого топлива». Новосибирск: ИТ СО РАН, Ч.3. 2006. С. 4–11.

65. **Бойко, Е. А.** Диффузионно-кинетическая модель термoxимического превращения твердых органических топлив / **Е. А. Бойко**, С. В. Пачковский // Сб. докладов VI всероссийской конференции «Горение твердого топлива». Новосибирск: ИТ СО РАН, Ч.1. 2006. С. 113–121.

66. **Бойко, Е. А.** Аналитические исследования динамики выгорания пылеугольных частиц с учетом их реакционной способности / **Е. А. Бойко**, С. В. Пачковский // Сб. трудов международной научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы развития энергетики». Ташкент: ТашГТУ им. Беруни, 2006. С. 43–46.

67. **Бойко, Е. А.** Имитационная динамическая модель шлакования полурадационных поверхностей нагрева паровых котлов / **Е. А. Бойко**, Е. М. Жадовец // Сб. докладов IV всероссийской научно-практической конференции «Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов». Челябинск: УралВТИ, 2007. Т.2. С. 3–14.

68. **Бойко Е. А.** Расчетный анализ динамики выгорания канско-ачинских углей с учетом кинетики термoxимического превращения их минеральной части / **Е. А. Бойко**, С. В. Пачковский // Сб. докладов IV всероссийской научно-практической конференции «Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов». Челябинск: УралВТИ, 2007. Т.2. С. 62–70.

69. **Бойко, Е. А.** Методика и результаты теплового расчета устройства для предварительной термической обработки пылевидного твердого органического топлива / **Е. А. Бойко**, Шишмарев П.В. // Материалы 3-ей международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики». Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. С. 105–109.

Позиции 5; 12; 14–16; 25; 30; 31; 33; 45; 47; 52; 54; 58 опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Бойко Евгений Анатольевич
Разработка и практическое использование комплексного метода определения
реакционной способности энергетических углей.
Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук.
Подписано в печать _____ 2008 г. Заказ № _____
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 2. Тираж 100 экз.
Типография ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»