

На правах рукописи

ПАЧКОВСКИЙ
Сергей Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВЫГОРАНИЯ
ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ФАКЕЛА С УЧЕТОМ РЕАКЦИОННЫХ И
ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПРОЦЕССОВ ТЕРМООБРАБОТКИ ТОПЛИВА**

05.14.04 – промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2008

Работа выполнена в Политехническом институте
ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель:	кандидат технических наук, доцент, Бойко Евгений Анатольевич
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Скуратов Александр Петрович кандидат технических наук, доцент Исламов Сергей Романович
Ведущая организация:	Сибирский теплотехнический научно- исследовательский институт ВТИ Красноярского филиала ОАО «Сибирский ЭНТЦ» (г. Красноярск)

Защита состоится «13» ноября 2008 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.07 при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. Д-501.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Политехнического института ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет».

Автореферат кандидатской диссертации размещен на официальном сайте Политехнического института ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» (<http://www.sfu-kras.ru/science/disscrtations>).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ПИ СФУ, Ученому секретарю диссертационного совета ДМ 212.099.07.

факс (391) 243-06-92 (для кафедры ТЭС)

e-mail: boiko@krgtu.ru

Автореферат разослан «13» октября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Е. А. Бойко

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 является основным источником для производства энергии на длительную перспективу, поэтому проблема повышения эффективности его использования и экономного расходования является актуальной.

Длительный опыт использования канско-ачинских углей на тепловых электростанциях показал, что традиционные способы их сжигания не в состоянии удовлетворить современным требованиям обеспечения эффективности, надежности и экологической безопасности работы котельных агрегатов. По мере выработки угольных пластов добыча смещается на участки с резким колебанием теплотехнических характеристик, что оказывает влияние на качество товарного угля. Рост балласта и неблагоприятный химический состав золы усиливает шлакуемость поверхностей нагрева, затрудняет выход жидкого шлака, влияет на устойчивость горения пылеугольного факела, снижает надежность работы и мощность котлоагрегата. Эта проблема еще более усугубляется при внедрении технологий ступенчатого сжигания и предварительной термической подготовки топлива, а также при сжигании непроектных углей или углей ухужденного качества.

В связи с этим существенно возрастает роль научно-обоснованного подхода при расчете, проектировании и наладке эксплуатационных режимов топочных камер паровых котлов с учетом качества топлива и физико-химических закономерностей многостадийных процессов горения пылеугольных частиц. Наиболее рациональным средством решения указанных задач является использование метода математического моделирования, однако сложность проблемы требует его дальнейшего совершенствования. Одним из направлений развития вышеописанного подхода является необходимость учета реакционной способности угольного вещества на основе установления корректной взаимосвязи различных этапов и процессов термохимического превращения топлива.

Работа выполнена в соответствии с заданием по гранту РФФИ (№08-08-90253-Узб_а, 2008–2009 г.) и тематических планов выполнения хозяйственных договоров (2003–2007 г.) с Красноярской ТЭЦ-1, ОАО «Енисейская ТГК (ТГК-13)» (г. Красноярск).

Объектом исследования в настоящей работе является комплекс процессов термохимического превращения канско-ачинских углей Бородинского, Березовского и Назаровского месторождений.

Предметом исследования являются диффузионно-кинетические характеристики выгорания пылеугольных частиц в газовом потоке.

Целью работы является совершенствование методики расчета выгорания пылеугольного факела в топочных камерах паровых котлов на основе учета реакционных и температурно-временных характеристик многостадийных процессов термохимического превращения топлива для повышения эффективности энергетического использования канско-ачинских углей.

Задачи исследования:

1. Совершенствование расчетной схемы и математической модели кинетики процесса термохимического превращения твердого органического топлива.
2. Разработка математической диффузионно-кинетической модели выгорания пылеугольных частиц в газовом потоке и проведение численных исследований для определения влияния различных условий топочной среды на степень выгорания топлива.
3. Совершенствование методики расчета выгорания пылеугольного факела в топочных устройствах энергетических котлов и разработка на ее основе соответствующего алгоритмического и программного обеспечения.

4. Проведение экспериментальных исследований процесса выгорания пылеугольного факела в условиях промышленных энергетических установок с оценкой достоверности расчетной методики определения степени выгорания топлива и соответствующего программного обеспечения.

5. Обоснование рекомендаций по практическому использованию результатов экспериментально-расчетных исследований процесса выгорания пылеугольного факела для выбора рациональных способов и режимов подготовки и сжигания канско-ачинских углей в условиях котельных агрегатов тепловых электростанций.

Научная новизна работы:

1. Усовершенствована расчётная схема и математическая кинетическая модель термохимического превращения твердого органического топлива, основанная на контроле и оценке материальных балансов отдельно взятых стадий и в целом всего брутто-процесса.

2. Разработана математическая диффузионно-кинетическая модель горения и теплообмена пылеугольных частиц в газовом потоке, учитывающая химическую структуру, механизм превращения и реакционные характеристики индивидуальных многостадийных процессов выгорания топлива.

3. Впервые получены температурно-временные зависимости среднеинтегрального превышения температуры угольной частицы над температурой газов и длительности параллельно-последовательного протекания процессов воспламенения и горения коксового остатка, учитывающие теплофизические характеристики и реакционную способность топлива, а также режимные параметры работы топочных устройств паровых котлов.

4. Усовершенствована методика расчета выгорания пылеугольного факела в топочных устройствах энергетических котлов в части отдельной оценки и взаимного учета длительности протекания процессов воспламенения и горения коксового остатка.

5. Разработаны критерии оценки и способы расчетного обоснования требований к организации процессов и режимов подготовки и сжигания канско-ачинских углей с учетом их технических, теплофизических и реакционных характеристик.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны методические положения по учету кинетических и диффузионных процессов термохимического превращения бурых углей для установления количественной взаимосвязи между температурно-временными характеристиками выгорания пылеугольных частиц и локальными параметрами топочного процесса.

2. Выявлены особенности возникновения тепловых потерь с химическим и механическим недожогом при энергетическом использовании канско-ачинских углей и предложена система обоснованных требований к организации процессов их подготовки и сжигания с учетом исходного качества угля, а также режимов работы котельных установок.

3. Разработано и внедрено в практику выполнения проектных работ и режимно-наладочных мероприятий специализированное алгоритмическое и программное обеспечение, реализующее усовершенствованную методику позонного расчета выгорания пылеугольного факела в топках паровых котлов.

4. Разработаны способы регулирования режимов горения топлива в пылевидном состоянии, позволяющие повысить тепловую и экономическую эффективность энергетического использования канско-ачинских углей (патенты РФ №2252364 и №2277674).

5. Результаты исследований использованы в учебном процессе ФГОУ ВПО Сибирского федерального университета при изучении специальных дисциплин студентами направления 140100 «Теплоэнергетика».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Расчётная схема и математическая кинетическая модель термохимического превращения твердого органического топлива, обеспечивающие корректную оценку и исследо-

вание динамики процесса.

2. Математическая диффузионно-кинетическая модель горения и тепломассообмена пылеугольных частиц в газовом потоке, позволяющая учесть особенности органической и минеральной части сжигаемого топлива.

3. Температурно-временные зависимости среднеинтегрального превышения температуры угольной частицы над температурой газов и длительности параллельно-последовательного протекания процессов воспламенения и горения коксового остатка, позволяющие повысить точность определения степени выгорания твердого органического топлива.

4. Методика расчета выгорания пылеугольного факела, позволяющая повысить результативность проектных и режимно-наладочных мероприятий топочных устройств котельных агрегатов.

5. Технические решения, направленные на реализацию новых способов регулирования процесса горения угля в топочных камерах, позволяющие повысить надежность, тепловую, экологическую и экономическую эффективность работы котельных агрегатов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современных методов исследования процессов горения и тепломассопереноса, сопоставлением результатов физического и математического моделирования и подтверждается удовлетворительной сходимостью полученных результатов с данными других авторов и натурных экспериментов, проведенных на действующем промышленном оборудовании.

Личный вклад автора состоит в разработке расчетных схем и математических моделей, алгоритмов и программного обеспечения для расчета выгорания пылеугольного факела, в проведении вычислительных и натурных экспериментов, в обработке и интерпретации полученных результатов, формулировании основных выводов.

Апробация работы. Основные результаты исследований были представлены: на 9-ой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2003 г.); XXXVI KRAFTWERKSTECHNISCHES KOLLOQUIUM “Entwicklungspotentiale für Kraftwerke mit fossilen Brennstoffen” (Germany, Dresden, 2004); на всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: начало XXI века» (г. Красноярск, 2005 г.); на международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития энерготехнологии» (г. Иваново, 2005 г.); на всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука, технологии, инновации» (г. Новосибирск, 2005 г.); на VI всероссийской конференции «Горение твердого топлива» (г. Новосибирск, 2006 г.); на международной научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы развития энергетики» (г. Ташкент, 2006 г.); на IV научно-практической конференции «Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов» (г. Челябинск, 2007 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 14 печатных работ, из которых: 3 – статьи по списку ВАК, 2 – патенты на изобретения, 1 – свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, 8 – доклады на конференциях и статьи в межвузовских сборниках научных трудов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, научных выводов и рекомендаций, списка литературы из 178 наименований и содержит 186 страниц текста, включая 87 рисунков и 26 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, определены научная новизна и практическая значимость работы.

В первом разделе показана значимость углей Канско-Ачинского бассейна для топливно-энергетического баланса России и, особенно, для восточных ее районов. Рассмотрены теплотехнические свойства канско-ачинских бурых углей, опыт их сжигания в пылеугольных топках котельных агрегатов с жидким и твердым типами шлакоудаления и показана необходимость учета качества бурых углей при расчете, наладке режимов и проектировании систем подготовки и сжигания топлива, энергетических котлов и их топочных устройств.

Совершенствованию технологии производства и потребления энергии, вырабатываемой при использовании канско-ачинских углей, уделяется значительное внимание в энергетической отрасли. Создание новых и повышение эффективности существующих технологических приемов сжигания бурых углей на тепловых электростанциях основано на всесторонней оценке их состава и свойств. Для правильного определения степени термпреобразования углей в условиях реальных топочных устройств необходимо учитывать, что процесс горения пылеугольной частицы представляет собой сложный комплекс различных параллельно-последовательных многостадийных физико-химических явлений. Большой вклад в развитие научных основ исследования процессов термхимического превращения твердого органического топлива внесли Г. Ф. Кнорре, Б. В. Канторович, З. Ф. Чуханов, И. А. Яворский, М. С. Оренбах, В. В. Померанцев, А. А. Отс, В. В. Митор, В. И. Бабий, Д. М. Хзмалян, С. В. Бухман, Г. С. Головина, А. С. Федосеев, Д. Б. Сполдинг, С. Торнс, Л. Смут, Р. Эссенхай, М. Локвуд и др. Однако анализ работ показал, что феноменологическое описание процесса термхимического превращения угля нуждается в дополнительной информации, главным образом структурного характера, что особенно важно при исследовании динамики процессов.

Рациональным подходом при создании новых и повышении эффективности существующих технологических приемов термхимической 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 термхимического 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, А.А. Дектерев, R.H. Essenhigh, M.A. Field, F.C. Lockwood, L.D. Smoot, J. Szekely 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 термхимического превращения твердых органических топлив, пригодную для построения инженерных расчетов, определения контролирующих 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. Технология энергетического использования углей предусматривает в качестве неперемennого условия оценку реакционной способности топлива.

В заключение сформулированы основные задачи исследований, проводимых в диссертационной работе.

Во втором разделе выполнено совершенствование математических моделей идеального (кинетическая) и реального (диффузионно-кинетическая) горения пылеугольных частиц в газовом потоке. Математическая кинетическая модель, дополнительно учитывает динамику процессов испарения влаги, выхода летучих веществ с отдельной оценкой выхо-

да индивидуальных газообразных компонентов и смолывыделения, вторичного крекинга смол, горения летучих веществ, газификации и горения коксового остатка, превращения минеральной части топлива. Физико-химическая постановка задачи описана следующей расчетной схемой (рис. 1), позволяющей обеспечивать контроль выполнения материальных балансов отдельно взятых этапов и стадий горения угля, а также в целом всего брутто-процесса. При совершенствовании математической модели принималось, что многостадийные процессы термохимического превращения твердого топлива аддитивны, выход функциональных групп при термическом разложении топлива происходит независимо друг от друга, выходящие в процессе деструкции угольной пыли летучие вещества и нелетучий коксовый остаток идеально перемешиваются с окислителем (воздухом) и затем вступают в химическое реагирование.

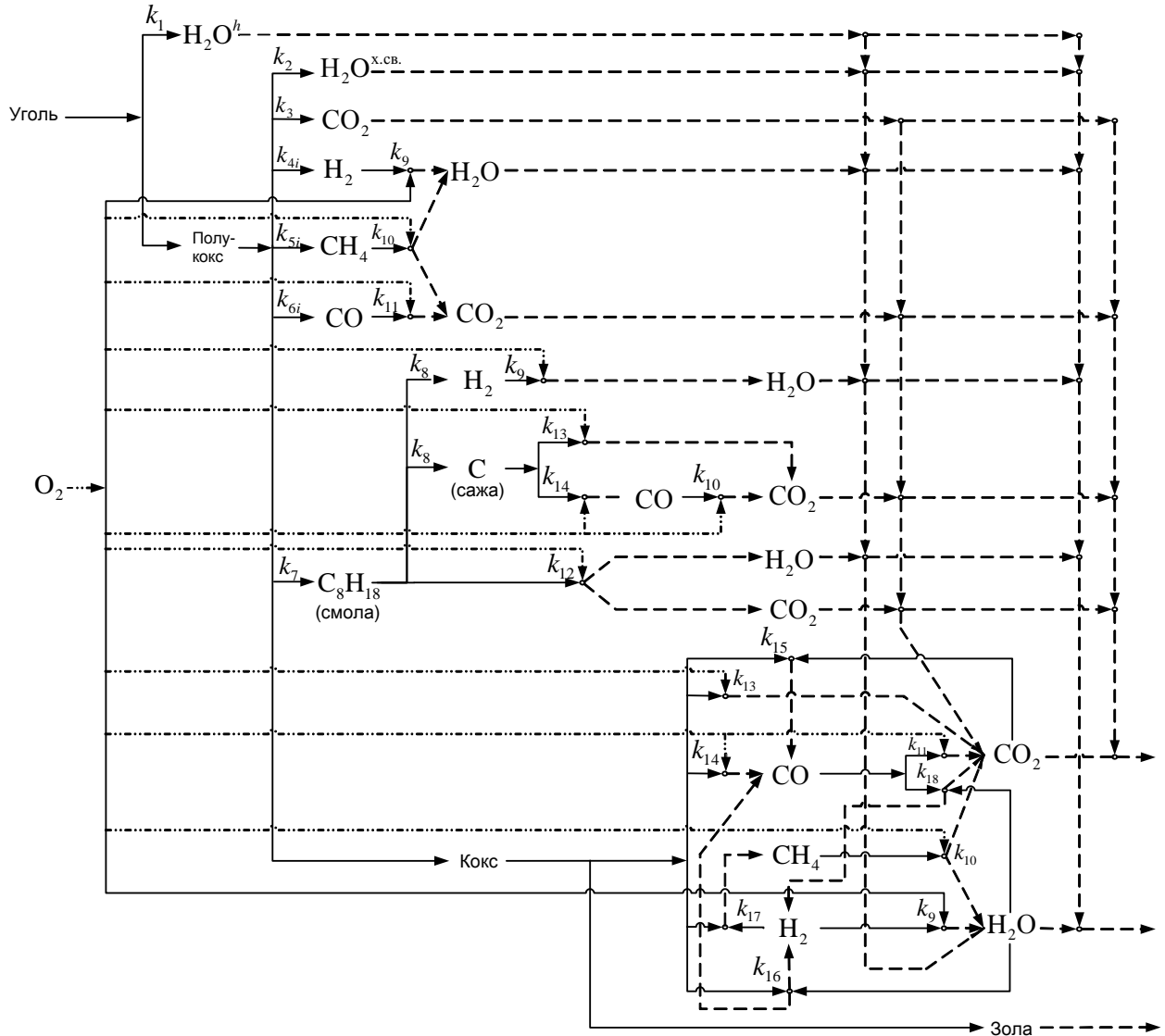


Рис. 1. Расчетная схема кинетики термохимического превращения твердого топлива.

Математическая модель кинетических процессов термохимического превращения твердого органического топлива в дифференциальной форме имеет следующий вид:

$$\frac{dH_2O_0^h}{d\tau} = -k_{H_2O_0^h} H_2O_0^h; \quad (1)$$

$$\frac{dV_{vol}}{d\tau} = \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} k_{V_0} V_0 - k_{V_{vol}} v_{V_{vol}} \prod_{a=1}^{n_a} S_a^{n_{S_a}}; \quad (2)$$

$$\frac{dV_0}{d\tau} = - \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} k_{v_{0i,j}} V_{0i,j}; \quad (3)$$

$$\frac{dC}{d\tau} = - \left[k_C v_C \prod_{b=1}^{n_b} S_b^{n_{S_b}} + \sum_{r=1}^{n_r} k_{C,r} v_{C,r} \prod_{l=1}^{n_l} S_l^{n_{S_{l,r}}} \right]; \quad (4)$$

$$\frac{dO_2}{d\tau} = - \left[k_{V_{vol}} v_{O_2} \prod_{a=1}^{n_a} S_a^{n_{S_a}} + k_C v_{O_2} \prod_{b=1}^{n_b} S_b^{n_{S_b}} + k_{P_g} v_{O_2} \prod_{z=1}^{n_z} S_z^{n_{S_z}} \right]; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP}{d\tau} = & k_{i_2} \hat{1}_0^h H_2 O_0^h + \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} k_{V_{0i,j}} V_{0i,j} + k_{V_{vol}} n_{P_{V_{vol}}} \varphi_{V_{vol}} \prod_{a=1}^{n_a} S_a^{n_{S_a}} + k_C n_{P_C} \varphi_C \prod_{b=1}^{n_b} S_b^{n_{S_b}} + \\ & + \sum_{r=1}^{n_r} k_{C,r} n_{P_{g_r}} \varphi_{C,r} \prod_{l=1}^{n_l} S_l^{n_{S_{l,r}}} + k_{P_g} v_{P_{g_g}} \varphi_{P_g} \prod_{z=1}^{n_z} S_z^{n_{S_z}} - \sum_{r=1}^{n_r} k_{C,r} v_{P,r} \prod_{l=1}^{n_l} S_l^{n_{S_{l,r}}} - k_{P_g} v_{P_g} \prod_{z=1}^{n_z} S_z^{n_{S_z}}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $H_2 O_0^h$, V_0 , – исходная концентрация, соответственно: влажности топлива и летучих веществ, кг/кг; $H_2 O^h$, $V_g = V_{bal} + V_{vol}$ – количество веществ, вышедших из топлива в газовый объем: испаренной влаги и летучих веществ (балластных - V_{bal} и горючих V_{vol}), кг/кг; O_2 – концентрация кислорода, кг/кг; C – концентрация углерода в топливе, кг/кг; $k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT(\tau)}\right)$ – константа скорости реакции 1/с (м/с); τ – продолжительность процесса, с; v – стехиометрический коэффициент; $i = 1 \mathbf{K} n_i$, $j = 1 \mathbf{K} n_j$, $a = 1 \mathbf{K} n_a$, $b = 1 \mathbf{K} n_b$, $l = 1 \mathbf{K} n_l$, $z = 1 \mathbf{K} n_z$ – количество реагирующих компонентов соответствующих химических реакций (см. рис. 1); $r = 1 \mathbf{K} n_r$ – число групп реакций, которое зависит от количества компонентов, вступающих в реакцию с углеродом; P – концентрация продуктов: термического разложения топлива испаренной влаги, выделившихся и негоревших летучих веществ, полного и неполного горения коксового остатка, кг/кг; φ_x – коэффициент, учитывающий мольную долю компонента x в газовой фазе.

Начальные условия для полученной системы следующие: $H_2 O_0^h = H_2 O_{0_{ucx}}^h$, $V_0 = V_{0_{ucx}}$, $C = C_{ucx}$, $O_2 = O_{2_{ucx}}$, $H_2 O^h = 0$, $V = 0$, $P = 0$. Помимо кинетических уравнений эта система обеспечивает закон сохранения массы. На основе кинетической модели выполнен численный эксперимент, применительно к решению задачи описания процесса выгорания бурых углей Канско-Ачинского бассейна (Бородинского, Березовского и Назаровского месторождений) на различные скорости линейного нагрева при $b = 10^{-1}$, 10^2 и 10^4 град/с ($b = \frac{dT}{d\tau}$ – темп нагрева).

На рис. 2 показаны результаты расчета динамики кинетических процессов горения частиц бородинского угля, как на каждой индивидуальной стадии, так и в совокупности.

Полученные результаты подтверждают существенную зависимость характера исследуемых кинетических процессов от скорости изменения температуры газовой среды. Увеличение скорости нагрева парогазовой среды приводит к значительному сокращению длительности протекания индивидуальных стадий, что как следствие приводит к их смещению относительно друг друга. Так, если при $b = 10^{-1}$ град/с относительная длительность наложения этапов сушки, выхода летучих веществ, горения и газификации коксового остатка составляет соответственно 6 и 13 %, то при $b = 10^2$ град/с – 17 и 28 %, при $b = 10^4$ град/с – 21 и 32 %. При этом ярко выраженным по всем типам реакций является смещение времени начала протекания процессов при повышении скорости нагрева в сторону меньших значений температур с некоторым изменением их продолжительности. Более того, если при скорости нагрева 10^{-1} град/с наложение процессов друг на друга носит не существенный характер, то при скорости подъема 10^4 град/с большинство процессов протекает преимущественно параллельно, а общая доля наложения друг на друга составляет 61 % от полного времени выгорания топлива.

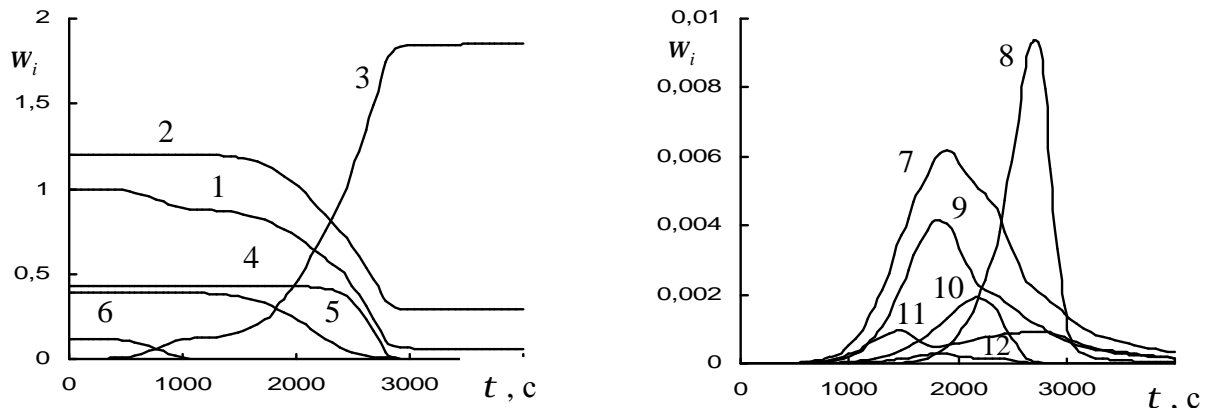


Рис. 2. Кинетика термохимического превращения бородинского угля при $b = 10^{-1}$ град/с; 1 – убыль массы топлива; 2 – концентрация кислорода; 3 – продукты сгорания; 4 – выгорание коксовой основы; 5 – выход летучих веществ; 6 – испарение влаги; 7 – горение летучих веществ; 8 – горение продуктов вторичной деструкции и газификации; 9 – горение CO ; 10 – горение H_2 ; 11 – горение смолы; 12 – горение CH_4 ; $w_i = m_i / m_0$, где m_i – текущая масса i -го реагирующего компонента; m_0 – начальная масса топливовоздушной смеси.

Результаты расчетов кинетической модели процессов термической деструкции, выгорания коксовой основы и термоокислительной деструкции канско-ачинских углей были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными Е.А. Бойко в условиях лабораторных и стендовых установок. Относительная погрешность экспериментальных и расчетных параметров исследуемых термохимических реакций при 95 %-ном доверительном интервале статистического теста Стьюдента – t составила 3-5 %.

Показано, что предложенная в работе кинетическая схема и соответствующая ей математическая модель позволяют, с одной стороны, проанализировать влияние отдельных стадий и процессов на динамику брутто-процесса, а с другой – использовать этот механизм при расчете степени термохимического превращения твердого органического топлива в условиях реальных теплотехнологических процессов и устройств.

Усовершенствованная кинетическая модель и ее расчетная схема положена в основу математической диффузионо-кинетической модели процесса горения и тепло-массообмена пылеугольных частиц в газовом потоке. Данная модель наряду с известными моделями дополнительно учитывает: вклад тепловых эндо- и экзоэффектов испарения влаги с поверхности угля и выхода летучих веществ; массообмена для промежуточных продуктов неполного горения и газификации коксового остатка; массообмена для конечных продуктов термохимического превращения пылеугольной частицы, в частности, диоксида углерода и водяных паров. Модель описывается следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений (кинетика процессов сушки, выхода и горения летучих веществ и повторной деструкции смол описываются уравнениями 1–3):

$$\frac{dC}{d\tau} = - \left[c_R (\phi_{ve} + \phi_{vf}) + c_{2R} (\phi_{vg} + \phi_{vh}) \right] \frac{273F_C}{T_g \rho_C V_C} \quad (7)$$

$$\frac{d\delta}{d\tau} = \frac{12}{32} \frac{dC}{d\tau} \frac{\delta_0}{C_0}; \quad (8)$$

$$\frac{d\alpha_i}{d\tau} = \phi_s; \quad (9)$$

$$\frac{dP_m}{d\tau} = \left[c_R \phi_{\gamma e} + c_{2R} (\phi_{\gamma g} + \phi_{\gamma h} - \phi_{\beta g}) \right] \frac{273F_C}{T_g \rho_C V_C} + \phi_{\gamma m} - \phi_{\nu l} - \phi_{\nu n}; \quad (10)$$

$$\frac{dP_u}{d\tau} = \phi_a + \phi_{\gamma d} + (c_R \phi_{\gamma f} - c_{2R} \phi_{\beta h}) \frac{273 F_C}{T_g \rho_C V_C} + \phi_{\chi n} + \phi_{\gamma l} - \phi_{\beta n}; \quad (11)$$

$$\frac{dO_2}{d\tau} = - \left[\phi_{\beta d} + (\phi_{\beta e} + \phi_{\beta f}) \frac{c_R 273 F_C}{T_g \rho_C V_C} + \phi_{\beta l} \right]; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_C}{d\tau} = & \left\{ -(r + c_{ws} T_C) \gamma_{ws} \phi_a - (Q_{vol} + c_{vol} T_C) \gamma_{vol} \phi_b + \right. \\ & + \left[c_R (\phi_{ve} + \phi_{vf}) Q_C - c_{2R} (\phi_{vg} + \phi_{vh}) Q_G \right] \frac{273 F_C}{T_g V_C} - \text{Nu} \frac{\lambda_g}{\delta} (T_C - T_g) \frac{F_C}{V_C} - \\ & - \sigma_0 \varepsilon_C \phi_C (T_C^4 - T_{burn}^4) \frac{F_C}{V_C} - \sum_{i=1}^n \gamma_{im} A_i^d (c_{im} T_C + Q_{im}^i) \phi_s - \\ & \left. - \left[c_R (\phi_{\beta e} + \phi_{\beta f}) + c_{2R} (\phi_{\beta g} + \phi_{\beta h}) \right] \frac{273 c_g F_C}{T_g \rho_g V_C} (T_C - T_g) \right\} \frac{6}{c_C \rho_C}; \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_g}{d\tau} = & \frac{1}{c_g} \left\{ - \frac{\phi_a c_{ws} V_C \gamma_{ws} T_g}{V_g} + \phi_{vd} Q_{com} \frac{1 - W^r - A^r}{\alpha V^0 + V_{H_2O}} + \phi_{vl} \rho_g Q_m - \phi_{vn} \rho_g Q_P + \right. \\ & + \left[(c_R (\phi_{ve} + \phi_{vf}) + c_{2R} (\phi_{vg} + \phi_{vh})) \frac{6 c_g 273 K^r F_C}{\rho_g \rho_C T_g V_g} + \phi_b \frac{c_g}{\rho_g} (1 - W^r - A^r) + \right. \\ & \left. \left. + \frac{6 \text{Nu} \lambda_g K^r F_C}{\rho_C V_g (V_C / F_C)} \right] \frac{(T_C - T_g)}{(\alpha V^0 + V_{H_2O})} - \sigma_0 \alpha_i (S/V)_i (T_g^4 - T_{burn}^4) \frac{T_g}{273} \right\}, \quad (14) \end{aligned}$$

где c_R и c_{2R} – концентрации кислорода и продуктов термохимического превращения на поверхности частиц, зависящие от констант реакций горения углерода и коэффициента диффузии, выраженные в кг O_2/m^3 ; δ_0 – начальный диаметр частицы, м; A_i^d – доля i -го минерального компонента относительно общей зольности угля; $d\alpha_i$ – доля прореагировавшего i -го минерального компонента, кг/кг топлива; ν , β , γ и χ – стехиометрические коэффициенты; $z_{i,j,r,s,m}$ – количество учитываемых компонентов соответствующих химических реакций; $z_{j,d}$ – количество индивидуальных стадий, ответственных за выделение i -го компонента из топлива и i_d -го продукта деструкции смол; z_y – число групп реакций взаимодействия продуктов неполного (P_m) и полного (P_u) горения топлива; Q – тепловые эффекты соответствующих химических реакций, Дж/(кг O_2); n – количество учитываемых минеральных компонентов, T_C – температура частицы, К; \dot{O}_g – температура газов, К; \dot{O}_{burn} – температура облучающей среды, К. f – уравнение химической кинетики, полученное на основе использования стехиометрических реакций первого порядка $A \xrightarrow{k} \hat{A}$: $f_A = \frac{d\hat{A}}{dt} = -kA$, $\phi_B = \frac{dB}{dt} = kA$, и второго порядка $\nu A + \beta B \xrightarrow{k} \gamma C + \chi D$: $\phi_A = \frac{dA}{dt} = -k\nu A^\nu B^\beta$, $\phi_B = \frac{dB}{dt} = -k\beta A^\nu B^\beta$, $\phi_C = \frac{dC}{dt} = k\gamma A^\nu B^\beta$ и $\phi_D = \frac{dD}{dt} = k\chi A^\nu B^\beta$; $\phi_s = k_{s_i} (1 - \alpha_i)^{n_i}$.

Вышеуказанная система дифференциальных уравнений (1-3,7-14) была положена в

основу вычислительного эксперимента по исследованию процесса выгорания бурых углей Канско-Ачинского бассейна и рассчитывалась при следующих начальных условиях: $\tau = 0$; $W^h = W_0^h$; $V_{vol} = V_0$; $V_{com} = 0$; $C = C_0$; $O_2 = (O_2)_0$; $P = 0$, где $P = P_m + P_u$; $\delta = \delta_0$; $T_C = (T_C)_0$; $T_g = (T_g)_0$; $\alpha_i = 0$.

Расчет проводился для частиц размерами от 50 до 1000 мкм. Исходная температура газового потока варьировалась в диапазоне $T = 1200\text{--}1700$ °С, коэффициент избытка воздуха в газовом потоке $\alpha = 1,0\text{--}1,2$, зольность топлива $A^{\delta} = 5\text{--}30$ %. Для численного решения системы дифференциальных уравнений использовался метод Рунге-Кутты-Фельберга с автоматическим выбором шага и точностью $\sim 10^{-4}$. Вычисления выполнялись на ЭВМ по программе, разработанной в среде программирования *Builder C++ 6.0*.

На рис. 4. показаны результаты расчета динамики термохимического превращения частицы канско-ачинского угля размером 250 мкм при изменении температуры газового потока и концентрации кислорода в газовом потоке.

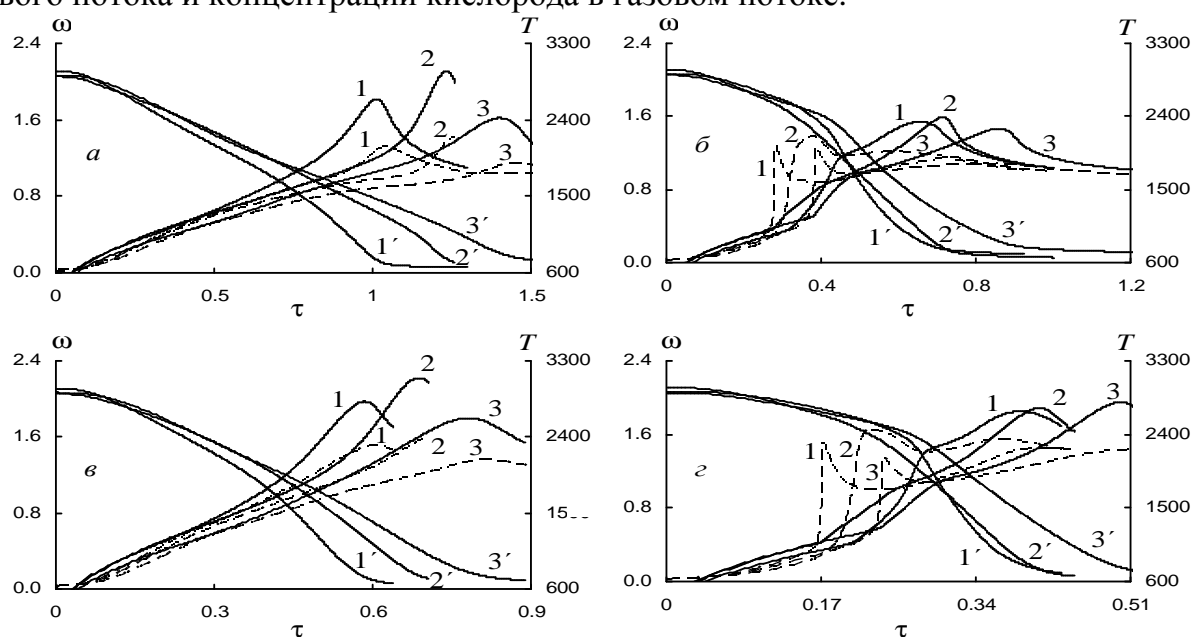


Рис. 4. Динамика термохимического превращения частицы канско-ачинского угля размером 250 мкм: а – $T = 1300$ °С, $\alpha = 1$; б – $T = 1300$ °С, $\alpha = 1,2$; в – $T = 1500$ °С, $\alpha = 1$; г – $T = 1500$ °С, $\alpha = 1,2$; уголь: 1 – березовский; 2 – назаровский; 3 – бородинский; сплошная линия – температура частицы; пунктирная линия – температура газов; индексы со штрихом – степень выгорания топлива; ω – степень термохимического превращения угля, T – температура процесса (°С); τ – время (с).

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 2,5–3,0 раза. Конвективный механизм выхода летучих веществ в факельных режимах горения определяет эффективность и динамику процесса выгорания угольных частиц. Этот эффект еще более очевиден для частиц с размером более 200 мкм. Именно в процессе деструкции топлива образуется до 90 % соединений азота, серы и углерода. Результаты расчетов позволяют сделать вывод, что динамика горения частиц канско-ачинских углей определяется в основном конвективным механизмом процессов сушки и выхода летучих веществ. Причем, в большой степени этот эффект проявляется при горении назаровских углей, в меньшей – бородинских.

Показано, что для практического применения результатов численного моделиро-

вания при определении степени выгорания угольного вещества, необходимо учитывать продолжительность одновременного протекания стадий воспламенения ($\tau_{\text{вк}}$, с) и выгорания коксового остатка ($\tau_{\text{гк}}$, с). Установлено, что продолжительность воспламенения частицы $\tau_{\text{вк}}$ складывается из двух последовательных стадий: испарения влаги $\tau_{\text{с}}$ и смоловыделения в составе летучих веществ $\tau_{\text{вл}}$, с:

$$\tau_{\text{вк}} = \tau_{\text{с}} + \tau_{\text{вл}} - \Delta t, \quad (15)$$

где $\Delta t = t_{\text{ю}} \cdot \delta\tau$ – длительность параллельного протекания стадий испарения влаги, смоловыделения и выгорания коксового остатка, с. $t_{\text{ю}}$ – время пребывания угольных частиц в топочной камере с учетом их скорости витания, с; $\delta\tau$ – относительный показатель длительности наложения стадий. Изменение $\delta\tau$ для нескольких расчетных вариантов приведено на рис. 5.

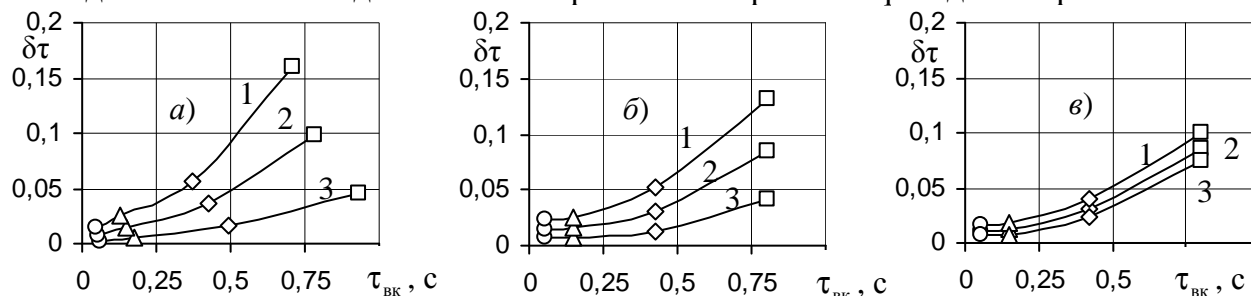


Рис. 5. Зависимость $\delta\tau$ от времени воспламенения частицы бородинского угля за время пребывания частицы в зоне активного горения топки котельного агрегата БКЗ-320-140 при d_0 : \circ – 100 мкм; Δ – 200 мкм; \diamond – 400 мкм; \square – 600 мкм; и: а) ϑ : 1 – 1600 °С; 2 – 1400 °С; 3 – 1200 °С при $\alpha_0 = 1,2$; $A^p = 5\%$; б) α_0 : 1 – 1,3; 2 – 1,2; 3 – 1,1 при $\vartheta = 1400$ °С; $A^p = 5\%$; в) A^p : 1 – 15%; 2 – 10%; 3 – 5% при $\vartheta = 1400$ °С; $\alpha_0 = 1,2$

Численное значение $\delta\tau$, как видно из рисунка, зависит от размера частиц d (мкм), температуры газов J_a (°С), значения коэффициента избытка воздуха α , зольности A^p (%) и времени воспламенения частицы $\tau_{\text{вк}}$ (с), которое, в свою очередь, определяется реакционными характеристиками рассматриваемых стадий. Значение $\delta\tau$ может возрастать вплоть до 0,2. Установлено, что наибольшее влияние на величину $\delta\tau$ оказывают диаметр и температура частицы. При увеличении диаметра со 100 до 600 мкм происходит увеличение $\delta\tau$ в 5-7 раз. Показано, что скорость стадий горения и газификации пылеугольной частицы в топочной камере в большей степени зависит от температуры частицы J_+ , которая превышает температуру газов J_a (см. рис. 4). Зависимость среднеинтегрального превышения температуры частицы над температурой газовой среды θ (°С) от размера частиц, температуры факела и зольности топлива показана на рис. 6.

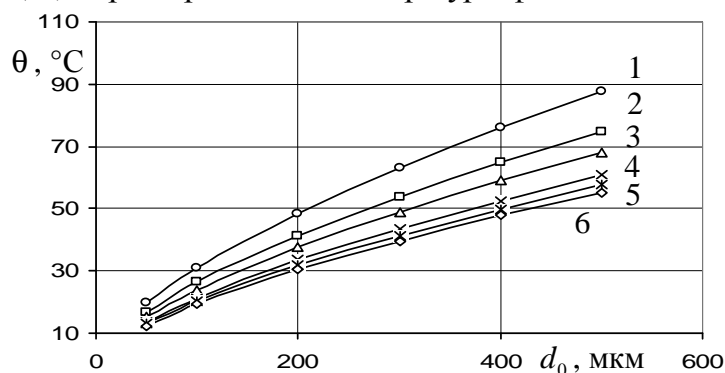


Рис. 6. Изменение среднеинтегрального показателя превышения температуры частицы θ (°С) в зависимости от диаметра частиц: $J_a = 1200$ °С, $\alpha = 1,1$; 1 – $A^c = 0\%$; 2 – $A^c = 4\%$; 3 – $A^c = 6\%$; 4 – $A^c = 10\%$; 5 – $A^c = 26\%$; 6 – $A^c = 30\%$.

Путем аппроксимации результатов вычислительного эксперимента (более 700 вариантов начальных условий) были получены зависимости для определения $\delta\tau$ и θ (°С):

$$\delta\tau = 7,81^{-4} J_{\text{a}}^{-3,3} \alpha^{-0,87} d^{4,37} (A^{\theta})^{0,5} \tau_{\text{aë}}^{-2,16}. \quad (16)$$

$$q = 1,316^{-10} J_{\text{a}}^{3,31} a^{0,4} d^{0,65} (A^{\theta})^{-0,23}. \quad (17)$$

Полученные расчетные зависимости могут быть использованы для разработки практических рекомендаций по расчетной оценке степени выгорания и теплообмена в зонах активного горения и догорания топочных камер паровых котлов: значений температур продуктов сгорания; промежуточных и конечных концентраций реагирующих компонентов в любой расчетной точке топочного пространства – для различных режимных характеристик работы и конструктивных особенностей топочных устройств.

В третьем разделе на основе полученных температурно-временных зависимостей процесса термообработки топлива в пылевидном состоянии выполнено совершенствование методики проектирования топочных устройств энергетических котлов (ЦКТИ-ВТИ, 1996), в которой расчет выгорания пылеугольного факела основан на молекулярном механизме диффузии и кинетики горения дрейфующих в потоке беззольных коксовых частиц. Предложена схема расчета степени выгорания топлива, как для зоны активного горения, так и для зон, расположенных в камере охлаждения топочного пространства. Сущность предлагаемого подхода заключается в раздельной оценке и учете длительности стадий испарения влаги, смолывыделения (как основного этапа выхода летучих веществ) и горения коксового остатка. Количественная оценка степени выгорания топлива ($\beta_{\text{cr}} = 100 - q_4$, %, где q_4 – величина механического недожога топлива, %) определяется в результате итеративного комплексного позонного расчета выгорания пылеугольного факела и теплообмена в топочной камере по следующему алгоритму:

– температура пылеугольной частицы (°C)

$$J_{\pm} = J_{\phi} + q, \quad (18)$$

где ϑ_{ϕ} – температура пылеугольного факела, °C; θ – среднеинтегральное превышение температуры частицы над температурой среды, рассчитывается по уравнению (17), °C;

– длительность выгорания наиболее крупных коксовых частиц (с)

$$\tau_{\text{гк}} = \tau_{\text{пр}} - \tau_{\text{вк}}, \quad (19)$$

где $t_{\text{aë}}$ – длительность воспламенения коксового остатка, с, см. уравнение (16).

При оценке длительности процесса воспламенения коксового остатка ($\tau_{\text{вк}}$) продолжительность испарения влаги (τ_{c}) и смолывыделения ($\tau_{\text{см}}$), как основной стадии выхода летучих веществ, вычисляются по индивидуальным для каждой стадии кинетическим параметрам посредством решения системы трансцендентных уравнений, полученной на основе анализа математического аппарата неизотермической кинетики:

$$\frac{k_0}{b} = \frac{E}{RT_{\text{max}}^2} \exp\left(\frac{E}{RT_{\text{max}}}\right); \quad (20)$$

$$\exp\left\{1 + \frac{E}{R T_{\text{н}} T_{\text{max}}} - \frac{2RT_{\text{max}}}{E} - \frac{T_{\text{н}}^2}{T_{\text{max}}^2} \left(1 - \frac{2RT_{\text{н}}}{E}\right) \exp\left(\frac{E}{R T_{\text{н}} T_{\text{max}}}\right)\right\} - \frac{1}{2} = 0; \quad (21)$$

$$t = 2\Delta T/b, \quad (22)$$

Расчет скорости нагрева b пылеугольных частиц осуществляется по уравнению (град/с):

$$b = \frac{a\lambda_{\text{r}}}{\lambda_{\text{t}}} \cdot \frac{\Delta T}{20d^2}, \quad (23)$$

где T_{i} – температура начала реакции, К; λ_{r} и a – коэффициенты теплопроводности (Вт/м К) и температуропроводности топлива ($\text{м}^2/\text{с}$), определяемые при средней температуре частицы $T_{\text{ч}}^{\text{cp}}$ (К); $\Delta T = T_{\text{a}} - T_{\text{+}}^{\text{нò}}$, К; $2\Delta T$ – ширина максимума дифференциальной кривой на половине его высоты (т. е. на $W_{\text{max}}/2$).

Расчет величины механического недожога на выходе из зон определяется по следующим уравнениям (%):

– в зоне активного горения

$$q_4 = I_1 \frac{Q_{\kappa}}{Q_{\text{H}}^{\text{P}}} \frac{100 - W^{\text{P}}}{100 - W^{\text{пл}}}; \quad (24)$$

– в зонах, расположенных выше зоны активного горения (камере охлаждения), предложено использовать

$$q_{4\text{ца}}^i = I_1^i \frac{Q_{\text{e}} K^{\text{P}}}{Q_i^{\delta}} \left(\frac{100 - \beta_{\text{на}}^{i-1}}{100} \right), \quad (25)$$

где I_1 – интегральная функция, учитывающая соотношение начальных и текущих размеров наиболее крупных частиц и зависящая от продолжительности горения коксового остатка $t_{\text{аэ}}$; Q_{e} – теплота сгорания коксового остатка, Дж/кг; W^{δ} и W^{ie} – содержание влаги на рабочую массу исходного топлива и угольной пыли, %; i – номер расчетной зоны по высоте топочной камеры; K^{δ} – содержание кокса на рабочую массу, %.

Впервые при определении степени выгорания пылеугольных частиц в позонном расчете топочных камер, предложено оценивать изменение максимального размера пылеугольной частицы (м), определяющей величину недожога топлива:

$$d_{\text{max}}^i = d_{\text{max}}^{i-1} \sqrt[3]{1 - b_{\text{на}}^i}, \quad (26)$$

где d_{max} – максимальный диаметр частицы, определяемый по рассеивочной кривой.

Расчет потери тепла с химическим недожогом на выходе из зон предложено определять по следующим уравнениям (%):

– в зоне активного горения

$$q_3 = V^{\text{P}} \sqrt[3]{1 - \beta_{\text{cr}}}; \quad (27)$$

где V^{P} – выход летучих веществ топлива на рабочую массу, %.

– в зоне, расположенных выше зоны активного горения (камера охлаждения)

$$q_{3\text{ца}}^i = q_3^{i-1} \sqrt[3]{1 - b_{\text{на}}^i}; \quad (28)$$

Далее по найденным значениям q_3 определяются концентрации веществ, находящихся в дымовых газах для каждого сечения по высоте топочной камеры: CO , H_2 , RO_2 , O_2 , N_2 и H_2O .

Усовершенствованная методика расчета выгорания пылеугольного факела реализована в виде программно-вычислительного комплекса (зарегистрированного в Роспатенте), который позволяет выполнить расчет: тепловых потоков на поверхностях нагрева, значений температур продуктов сгорания, промежуточных и конечных концентраций реагирующих веществ в любой расчетной точке по высоте топочного пространства с одновременной возможностью диагностики причин изменения длительности и механизма протекания сложных, последовательно-параллельных, физико-химических реакций горения и теплообмена; 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; расширить возможности изучения топочных процессов; увеличить точность и скорость вычислений.

С помощью программно-вычислительного комплекса реализован числительный эксперимент по определению степени выгорания бурых углей Бородинского месторо-

ждения в условиях реальных топочных процессов. Расчет проводился для частиц размерами от $d_{\text{ч}} = 100\text{--}600$ мкм, температура факела варьировалась в диапазоне $T = 1200\text{--}1600$ °С, коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,1\text{--}1,3$, зольность топлива $A^{\delta} = 5\text{--}15$ %. Для численного решения: системы трансцендентных уравнений использовался комбинированный метод, сочетающий методы бисекции и квадратичной интерполяции; интегральных функций – модификация метода Симпсона – метод полиномиальной аппроксимации (полином 8-ого порядка).

Результаты численного эксперимента по исследованию процесса горения бородинского угля в топке котла БКЗ-320-140 (ст. №19) Красноярской ТЭЦ-1 с жидким шлакоудалением представлены на рис. 7.

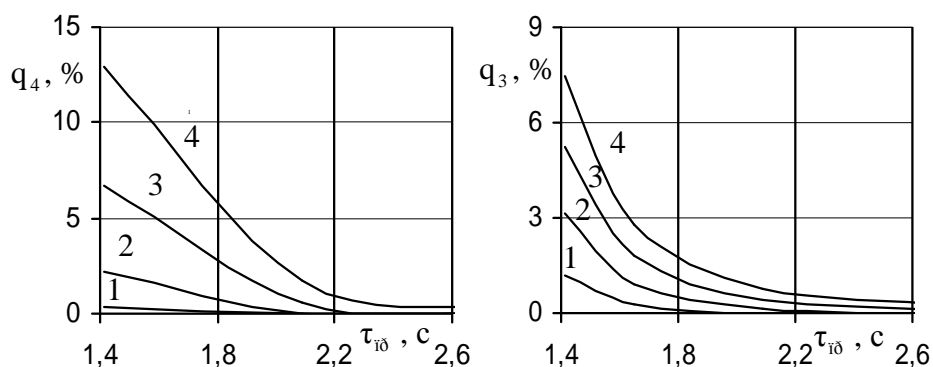


Рис.7. Изменение механической q_4 и химической q_3 неполноты сгорания частицы за время ее пребывания в топочной камере при $d_{\text{ч}}$ (мкм): 1 – 100, 2 – 200; 3 – 400; 4 – 600. $\vartheta = 1400$ °С, $\alpha = 1,2$ и $A^{\delta} = 5$ %.

Полученные результаты подтверждают существенную зависимость величины потерь с химическим q_3 и механическим q_4 недожогом от размера частицы, температуры факела, избытка воздуха и зольности топлива. Увеличение размера частицы со 100 до 600 мкм приводит к увеличению q_4 в 10–15 раз, q_3 – в 4–5 раза. Увеличение температуры факела с 1200 до 1600 °С приводит к снижению q_4 в 3–5 раз, q_3 – в 1,5–2 раза. Оптимальное значение избытка воздуха составило – 1,22. Исследование влияния зольности топлива на степень его выгорания показало, что ее изменение с 5 до 15 % приводит к увеличению q_4 на 3–10%, q_3 – на 2–8%. В зоне догорания влияние перечисленных факторов на степень выгорания частиц значительно снижается из-за пониженных температур продуктов сгорания и самой частицы: максимальное изменение q_4 происходит в пределах 1,05-2 раза и q_3 – в 1,01–1,5 раза. Результаты расчетов позволяют сделать вывод, что степень выгорания пылеугольных частиц существенно зависит от длительности параллельно-последовательных процессов испарения влаги, выхода летучих веществ, выгорания и газификации коксового остатка, температуры процесса и избытка воздуха, зольности и размера пылеугольных частиц.

Показано, что предложенная методика применима как при определении оптимальных режимных условий в топочной камере с учетом реакционной способности сжигаемого топлива, так и на стадии проектирования – для уточнения размеров топочной камеры и ее отдельных зон.

В четвертом разделе представлены результаты экспериментальных исследований процесса выгорания пылевидного твердого органического топлива в промышленных установках с сопоставлением полученных данных с результатами теоретических исследований и рассмотрены вопросы их внедрения.

Экспериментальные исследования топочных процессов проведены на котле БКЗ-320-140 (ст. № 19) Красноярской ТЭЦ-1. Топочная камера котла ст. №19 полуоткрытого типа предназначена для сжигания бородинских углей с жидким шлакоудалением. Камера

горения выполнена в виде двух сообщающихся восьмигранных предтопок, каждый из которых оборудован четырьмя угловыми прямоточными пылеугольными горелками.

При проведении экспериментальных исследований определялись следующие параметры: расход и температура первичного и вторичного воздуха по тракту; температура в ядре факела, по высоте топки и по газовому тракту котла; состав дымовых газов; содержание горючих в уносе и шлаке. Измерение температуры топочных газов осуществлялось при помощи оптического пирометра «Спектропир». Для зондирования топочной камеры использовался водоохлаждаемый трехточечный пылегазозаборный зонд типовой конструкции ВТИ длиной 4,3 м. Анализ топочных газов выполнялся непосредственно в точке отбора с использованием переносного газоанализатора «ДАГ-500» при прямом и обратном ходе зонда.

В результате опытно-промышленных испытаний котла ($D/D_{\text{ном}} = 0,7-0,9$; $\alpha''_{\text{ин}} = 1,09-1,51$; $R_{90} = 34-49$ %; $W^{\text{ин}} = 17,5-25,1$ %; $W^{\text{р}} = 31,5-33,4$ %; $A^{\text{р}} = 3,9-6,4$ %; $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 15800-16665$ кДж/кг) получены зависимости изменения температуры топочных газов, содержания H_2 , CO , O_2 , CH_4 , N_2 и RO_2 – по высоте топки.

Показано, что горение частиц бородинского угля среднеинтегральным размером ≈ 250 мкм в зоне активного горения происходит преимущественно в промежуточной области. При определении длительности выделения и выгорания газовых компонентов летучих веществ, выгорания коксового остатка бородинского угля, эти данные совместно с теплотехническими и кинетическими характеристиками были использованы для объяснения причин возникновения тепловых потерь с химическим и механическим недожогом. Установлено, что причиной появления тепловых потерь с химическим недожогом является затяжное выделение водорода и оксида углерода в пристенных и угловых зонах, где устойчивое воспламенение и интенсивное горение газовых смесей практически невозможно вследствие низкой концентрации горючих газов и кислорода ($C_{\text{H}_2} < 0,02$ %, $C_{\text{CO}} \approx 0,01-0,06$ %, $C_{\text{O}_2} \approx 3,0-10,0$ %). Минимальное значение тепловых потерь с химическим недожогом $q_3 \approx 0,1$ % соответствует коэффициенту избытка воздуха $\alpha''_{\text{ин}} = 1,21-1,27$. Показано, что время пребывания газов в зоне активного горения сопоставимо с длительностью смолывыделения. С угрублением помола угольной пыли процесс деструкции топлива затягивается, увеличивается диффузионное сопротивление процессу подвода окислителя к коксовому остатку, снижается степень его выгорания и температура факела. Аналогично проявляет себя изменение зольности топлива.

Наличие механического недожога q_4 при сжигании бородинского угля является следствием высокой длительности выгорания наиболее крупных коксовых частиц (размером более 250 мкм). При этом их исключение из процесса горения путем более тонкого измельчения угольной пыли не целесообразно с точки зрения затрат на пылеприготовление. Показано, что оптимальная тонкость помола бородинского угля при сжигании в топке котла БКЗ-320-140 составляет $R_{90} = 40-45$ %. Внутритопочными исследованиями котельных агрегатов при сжигании канско-ачинских углей подтверждена возможность варьирования тонкости помола угольной пыли для обеспечения необходимых по условиям шлакования и жидкого шлакоудаления, степени выгорания и уровня температур газов на выходе из топки и в зоне активного горения.

На рис. 8 представлено сопоставление основных экспериментальных и расчетных характеристик выгорания пылеугольного факела в топочной камере парового котла БКЗ-320-140 (ст. №19) Красноярской ТЭЦ-1.

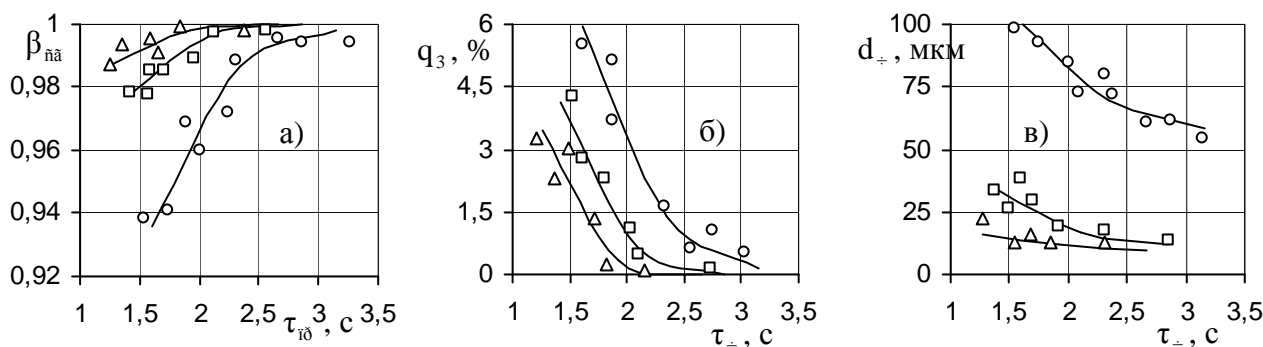


Рис. 8. Изменение: а) степени выгорания топлива; б) химической неполноты сгорания; в) диаметра частицы – за время пребывания ее в зоне догорания топки котла БКЗ-320-140 при $\alpha_0 = 1,2$, $A^p = 5\%$, $d_0 = 250$ мкм и ϑ : — расчет; эксперимент: \circ – 1200 °С; \square – 1400 °С; Δ – 1600 °С.

Как видно из графиков, имеет место удовлетворительное совпадение, между расчетными и экспериментальными данными (коэффициент корреляции составил 0,934–0,951), что свидетельствует о надежности усовершенствованной методики позонного расчета степени выгорания пылеугольного факела топочных камерах паровых котлов.

Расчет выгорания β_{cr} бородинского угля (с отдельной оценкой длительности испарения влаги, выделения летучих веществ и горения коксового остатка) в топочной камере котла по усовершенствованной методике позволил разработать практические рекомендации по повышению эксплуатационной надежности и тепловой эффективности работы топочных камер котлов БКЗ-320-140 Красноярской ТЭЦ-1: уточнены пределы изменения тонкости помола R_{90}^{opt} , обеспечивающие необходимый уровень температуры газов $\vartheta_{зар}''$ в зависимости от качества сжигаемого бородинского угля и его реакционной способности. Так, при $A^c = 5,8–9,4\%$ $R_{90}^{opt} = 37–42\%$. В этом же диапазоне R_{90}^{opt} наблюдалось снижение температуры газов на выходе из топки ϑ_r'' . При $R_{90} > 42\%$ достижима минимальная $\beta_{cr} = 0,95$ при одновременном снижении ϑ_r до 1520 °С. Таким образом, при R_{90} до 55 %, рекомендуем при сжигании бурых углей, максимально достижимы величины $\beta_{cr} = 0,95$ и $\vartheta_r = 1520$ °С, что явно ограничивает работу котла по условию нормального жидкого шлакоудаления при повышении зольности топлива сверх проектных значений ($A^c = 9,0\%$). При $R_{90} = 47,0–49,5\%$ температура $\vartheta_{зар}''$ практически мало отличается от температур газов, измеренных на уровне горелок. При тонком помоле в зоне активного горения достигается более высокий уровень температур, однако средняя температура факела $\vartheta_{ф}$ близка к $\vartheta_{зар}''$. Следует отметить, что значения q_{4r} , рассчитанные по $\vartheta_{зар}''$ в зависимости от остатка на сите R_{90} и степени полидисперсности n , соответствуют значениям q_{4r} , определенным с отдельной оценкой длительности выделения летучих веществ и горения нелетучего (коксового) остатка.

Анализ полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований процесса выгорания пылеугольного факела позволил разработать технические решения (на уровне изобретений) направленных на реализацию способов регулирования режимов работы котельного агрегата. Принципиальной особенностью данных технических решений является то, что наряду с интегральными технологическими показателями режима работы паропроизводительной установки (расход, давление и температура перегретого пара и т.д.) для регулирования режима горения топлива дополнительно используются расчетные значения потерь тепла с химическим и механическим недожогом (рис. 9).

Предложено выполнять оперативную корректировку значения избытка воздуха в топочной камере котла по результату оперативного расчетного контроля потерь тепла с

неполнотой горения угля. Расчетная поправка на величину избытка воздуха в топочной камере котла определяется через соотношение абсолютных температур продуктов сгорания на выходе из зоны активного горения и горячего воздуха (T_r/T_b), отношение теоретического объема воздуха V_b^0 , м³/кг к теоретическому объему продуктов сгорания V_r^0 , м³/кг, паровой нагрузки D , кг/с и разности энтальпий перегретого пара и питательной воды Δh , кДж/кг и теплоту сгорания топлива Q_H^p , кДж/кг по следующей зависимости:

$$\Delta\alpha = \frac{V_b^0}{V_r^0} \cdot \frac{Q_H^p}{\Delta h} \cdot \frac{T_r}{T_b} \cdot (\eta_{ка} \pm \Delta q_3 \pm \Delta q_4) \cdot \frac{K_{вп} \sqrt{\Delta P}}{D} \quad (29)$$

где ΔP – аэродинамическое сопротивление воздухоподогревателя, Па; $K_{вп}$ – тарировочный коэффициент; $\eta_{ка}$ – проектный к.п.д. котла; Δq_3 , Δq_4 – расчетное отклонение от проектных тепловых потерь с химическим и механическим недожогом топлива.

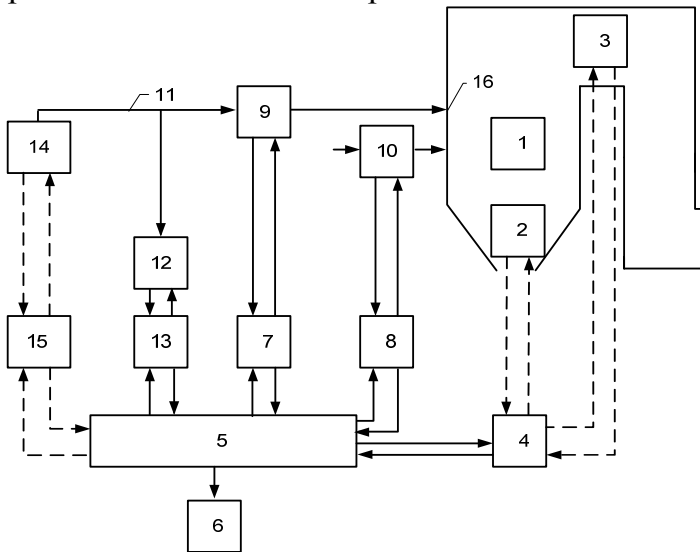


Рис. 9. Функциональная схема для реализации способа регулирования режимов сжигания пылевидного твердого топлива в котельном агрегате: 1 – камера сгорания; 2, 3 – датчики параметрических данных; 4 – система обработки данных; 5 – устройство регулирования; 6 – прибор визуальной индикации текущей информации; 7, 8, 13 – модули регулирования; 9, 10 – исполнительные органы, осуществляющие подачу топлива и воздуха; 11 – линия подачи топлива; 12 – приборы индикации технических и теплофизических характеристик, реакционной способности топлива; 14 – питатель сырого угля; 15 – модуль управления; 16 – горелка

На основании данных режимных параметров работы котла, а также значений технических, теплофизических и реакционных характеристик сжигаемого топлива вычисляется соотношение количества топлива и воздуха, которое необходимо подать в камеру сгорания, чтобы обеспечить максимальную степень выгорания топлива с последующей корректировкой топочного режима котельного агрегата.

Расчетами экономической эффективности практического применения предложенных в работе способов и режимов, в технологическом цикле сжигания канско-ачинских углей на тепловой электростанции показано, что годовой экономический эффект от внедрения таких способов и устройств применительно к котельным агрегатам средней мощности с паропроизводительностью от 210 до 500 т/ч за счет повышения надежности, тепловой и экологической эффективности работы котельных агрегатов 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 РАБОТЫ

1. Усовершенствована расчётная схема и математическая кинетическая модель термохимического превращения угольного вещества, учитывающие динамику процессов испарения влаги, выхода летучих веществ с отдельной оценкой длительности индивидуальных газообразных компонентов и смолы выделения, вторичного крекинга смол, горения летучих веществ, горения и газификации коксового остатка, превращения мине-

ральной части топлива, что обеспечивает выполнение материальных балансов отдельно взятых этапов, стадий и в целом всего брутто-процесса горения.

2. Разработана диффузионно-кинетическая модель горения и теплообмена пылеугольных частиц в газовом потоке, что позволило определить скорость изменения концентраций реагирующих веществ, температур газов и частицы в зависимости от теплофизических и реакционных характеристик топлива, избытка воздуха, зольности и размеров пылеугольных частиц. Установлено, что увеличение температуры облучателя на 200 °С (от 1300 °С) приводит к сокращению времени полного выгорания мелких частиц $d_{\pm} \leq 250$ мкм в 1,8 раза, для крупных частиц $d_{\pm} > 500$ мкм в 2,5–3,0 раза. При факельных режимах горения эффективность и динамику процесса выгорания угольных частиц размером 200 мкм и более определяет конвективный механизм процесса выхода летучих веществ.

3. Впервые получены температурно-временные зависимости изменения среднеинтегрального превышения температуры угольной частицы над температурой газов и длительности параллельно-последовательного протекания процессов испарения влаги, выхода летучих веществ и выгорания коксового остатка от зольности топлива, размера частиц, продолжительности стадии воспламенения коксового остатка, температуры факела и избытка воздуха, что позволило повысить точность определения тепловых потерь с механической и химической неполнотой сгорания канско-ачинских углей на 10–15 %.

4. Выполнено усовершенствование методики расчета и разработано алгоритмическое и программное обеспечение совместного позонного расчета степени выгорания и теплообмена в топочных камерах паровых котлов. Достоверность методики подтверждена сопоставлением результатов вычислений с данными, полученными при испытаниях энергетических котлов БКЗ-320-140 при сжигании канско-ачинских углей. Получено хорошее согласование между расчетными и экспериментальными данными (коэффициент корреляции составил 0,934–0,951).

5. Теоретически и экспериментально обоснованы требования к организации систем подготовки и сжигания твердого органического топлива: $q_{4\min} \approx 0,6$ % при $A^c = 5,8–9,4$ % $R_{90}^{\text{opt}} = 37–42$ % и при $9,4 < A^c < 11,4$ % $R_{90} > 37–42$ %; $q_{3\min} \approx 0,1$ % при $\alpha_r^* = 1,2–1,27$. 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 (годовой экономический эффект составляет 5,38–46,2 млн. руб. или 12,5–107,3 тыс. т.у.т.).

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. **Пачковский, С. В.** Термокинетическая математическая модель выгорания твердого топлива / С. В. Пачковский // Сб.: девятой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. М.: Издательство МЭИ. Т. 3. 2003. С. 103–104.

2. Boiko, E. A. Verfahren und Einrichtung zur Regelung des Arbeitsregimes der Kesselanlage bei variabler Qualitaet / E. A. Boiko, **Patschkowskij S. W.** // XXXVI. KRAFTWERKSTECHNISCHES KOLLOQUIUM "Entwicklungspotentiale fur Kraftwerke mit fossilen Brennstoffen". Dresden. 2004. P. 4-6.

3. Свидетельство РФ №2004611403. Комплекс программ имитационного моделирования выгорания пылеугольного факела на основе реакционной способности топлива, решения тренажерных задач управления и технической диагностики топочных процессов (SystemFurnaceMonitor) / Е. А. Бойко, Д. Г. Дидичин, В. Н. Вольнев, М. В. Турок, **С. В. Пачковский** // Регистр. 07.06.2004.

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

5. 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. Т. 41. №1. 2005. С. 55–65.
6. Патент РФ №2252364, кл. 7F23N 5/00. Способ и устройство регулирования режима горения паропроизводительной установки / Е. А. Бойко, Д. Г. Дидичин, П. В. Шишмарев, **С. В. Пачковский**, Е. М. Жадовец // Бюлл. №14. опубл. 20.05.2005.
7. **Пачковский, С. В.** Математическое моделирование выгорания твердого органического топлива в энергетических устройствах / С. В. Пачковский // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: начало XXI века». Красноярск. Ч. 4. 2005. С. 10–12.
8. **Пачковский, С. В.** Комплексный подход к оценке эффективности энергетического использования твердых органических топлив / **С. В. Пачковский**, Е. А. Бойко // Материалы международной научно-технической конференции «XII Бенардосовские чтения». Иваново. 2005. Т. 2. С. 53.
9. **Пачковский, С. В.** Расчетные исследования диффузионно-кинетических процессов выгорания твердых органических топлив / **С. В. Пачковский** // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука, технологии, инновации». Новосибирск. Ч. 3. 2005. С. 77–79.
10. Патент РФ №2277674, кл. F23K 1/00. Котельный агрегат / Е. А. Бойко, П. В. Шишмарев, **С. В. Пачковский** // Бюлл. №16. опубл. 10.06.2006.
11. Бойко, Е. А. Диффузионно-кинетическая модель термохимического превращения твердых органических топлив / Е. А. Бойко, **С. В. Пачковский** // Материалы VI Всероссийской конференции «Горение твердого топлива». Новосибирск. ИГ СО РАН. Ч. 1. 2006. С. 113–120.
12. 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. 2006. С. 43–46.
13. Бойко, Е. А. Расчетный анализ динамики выгорания канско-ачинских углей с учетом кинетики термохимического превращения их минеральной части / Е. А. Бойко, **С. В. Пачковский** // Сб.: IV научно-практической конференции «Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов». Челябинск. Т. 2. 2007. С. 62–70.
14. Бойко, Е. А. Диффузионно-кинетическая модель горения и тепломассообмена пылеугольных частиц в газовом потоке. / Е. А. Бойко, **С. В. Пачковский** // Химия твердого топлива. № 6. 2008. С. 3–13.

Пачковский Сергей Владимирович
Совершенствование методики расчета выгорания пылеугольного факела с учетом
реакционных и температурно-временных характеристик
процессов термообработки топлива

Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата техн. наук

Подписано в печать 09.10.2008 г. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Типография Политехнического института
ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»