

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

СБОРНИК ТЕЗИСОВ И ДОКЛАДОВ
Всероссийской молодежной конференции

03-05 октября 2012 г.



Томск 2012

УДК 544+620.9(063)

ББК 24.5+31л0

X462

X462 **Горение твердого топлива:** сборник тезисов и статей Всероссийской молодежной конференции / под ред. Г.В. Кузнецова, Е.Е. Бульбы, А.В. Захаревича, В.И. Максимова, Т.А. Нагорновой; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 310 с.

ISBN

Сборник содержит труды Всероссийской молодежной конференции «Горение твердого топлива», посвященной фундаментальным и прикладным проблемам горения твердого топлива и современной энергетики. Материалы отражают аспекты консолидации возможностей и усилий научно-инженерного сообщества на инновационном направлении в решении проблем химической физики и технологий энергетического производства. Особое внимание уделено вопросам энергосбережения и эффективности технологий сжигания органического топлива, надежности и безопасности технологических систем энергетики. Рассмотрены вопросы технологии мониторинга взаимодействия объектов энергетики с окружающей средой, технологии переработки и утилизации техногенных отходов, а также энергосберегающие технологии транспортировки, распределения и потребления тепловой энергии.

Предназначен для научных работников, аспирантов и специалистов, работающих в области химической физики и энергетики, а также для студентов вузов физического, химического и энергетического профиля.

УДК 544+620.9(063)

ББК 24.5+ 31 л0

Редакционная коллегия

Г.В. Кузнецов, доктор физико-математических наук, профессор ТПУ;

Е.Е.Бульба, кандидат технических наук, доцент ТПУ;

В.И. Максимов, кандидат технических наук, доцент ТПУ;

А.В. Захаревич, кандидат физико-математических наук, ст.преп. ТПУ;

Т.А. Нагорнова, кандидат технических наук, ст.преп. ТПУ.

Всероссийская молодежная конференция организована и проведена при финансовой поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы ГК№ 12.741.11.0226

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ГОРЮЧЕГО НА ГОРЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Архипов В.А., д. ф.-м. н., Пестерев А.В., Савельева Л.А., к. т. н.

НИИ прикладной математики и механики

Томского государственного университета, г. Томск

raw_85@bk.ru

Добавки порошков различных металлов в композиции высокоэнергетических материалов (ВЭМ) могут привести к модификации характеристик горения, в частности, к одной из основных характеристик – линейной скорости горения и ее зависимости от давления.

В настоящем сообщении рассмотрено влияние состава смешанного металлического горючего на уровень и закон скорости горения ВЭМ.

Исследовались модельные композиции ВЭМ с коэффициентом избытка окислителя $\alpha = 0,5$, содержащие перхлорат аммония в качестве окислителя, инертное горючее-связующее марки СКДМ-80 и 15 мас. % порошка смешанного металлического горючего. В качестве металлического горючего использовались механические смеси и сплавы порошков алюминий/медь, алюминий/никель, и алюминий/кобальт и базовая композиция, содержащая порошок алюминия марки АСД-1. Дисперсность порошков всех рассмотренных металлов и сплавов составляла ~ 10 мкм.

Скорость горения образцов ВЭМ измеряли в приборе постоянного давления в атмосфере азота в интервале давлений ($2 \div 8$) МПа методом перегорающих проволочек. Для каждой экспериментальной точки по давлению проводили ($3 \div 7$) параллельных экспериментов. Относительная погрешность измерения скорости горения при доверительной вероятности 0,95 не превышала ($10 \div 15$) %. Полученные данные по скорости горения аппроксимировали степенным законом скорости горения.

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Замена АСД-1 на смешанное металлическое горючее идентичной дисперсности приводит к увеличению скорости горения в ($1,6 \div 1,9$) раз, а также к увеличению показателя в степенном законе скорости горения от 0,45 до 0,52.

2. Влияние способа получения металлического горючего незначительно влияет на характеристики горения. Скорость горения образцов

ВЭМ с механическими смесями металлов и аналогичными сплавами отличается не более чем на (4÷5) %.

3. По эффективности влияния на увеличение скорости горения ВЭМ смешанные металлические горючие можно расположить в ряд

$Al/Co > Al/Ni, Al/Cu > Al$.

УДК 662.311

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВСПЛЫТИЯ ПОДЪЕМНОГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ТВЕРДОТОПЛИВНОГО ОТКРЫТОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА

В.Д. Барсуков, д.т.н., С.А. Басалаев, С.В. Голдаев, д.ф-м. н.

НИИ прикладной математики и механики

Томского госуниверситета, г. Томск,

E-mail: Tarm@niipmm.tsu.ru

Для совершенствования доставки на поверхность воды затонувших на большой глубине малогабаритных объектов, предложено подъемное устройство (ПУ) [1], содержащее перфорированный кожух 1 с днищем и горловиной, в котором расположен открытый газогенератор (ОГ) 2, эластичная оболочка 3, закрепленная краями по горловине (рис. 1).

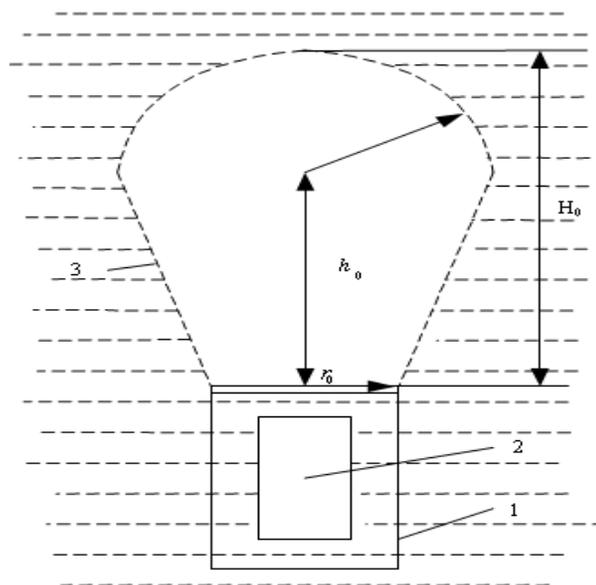


Рис. 1 Схематическое изображение подъемного устройства

Предполагалось, что процесс создания положительной плавучести протекает следующим образом. После запуска ОГ происходит частичное наполнение охлажденными за счет барботажа через окружающую воду продуктами сгорания (ПС) верхней части оболочки. Под действием силы Архимеда оболочка вытягивается из кожуха ПУ до максимальной высоты и в итоге образует тело вращения в виде полусферы с пристыкованным к ней усеченным конусом, частично заполненным водой. Затем осуществляется дальнейшее наполнение эластичной емкости газами, которая принимает форму полусферы в своей верхней части. При этом оболочка оказывается полностью развернутой, причем ее нижняя половина остается заполненной водой. Под действием избыточного давления, создаваемого поступающими ПС, вытесняется вода через горловину оболочки, зафиксированную фланцем. Можно считать, что эластичная емкость на данной (наиболее продолжительной) стадии процесса является квазижесткой.

Математическая модель функционирования ПУ, учитывающая наполнение эластичной оболочки охлажденными продуктами сгорания и дальнейшее всплытие устройства с грузом, рассмотрена в работе [2] и здесь не приводится из-за своей громоздкости. Реальная оболочка заменялась пузырем сферической формы, который увеличивался в размерах до значения, соответствующего вместимости оболочки.

Для установления достоверности функционирования предложенной модели был проведен физический эксперимент на установке с прозрачными стенками (рис 2).

Регистрация перемещения подъемного устройства (ПУ) осуществлялась фотокамерой SONY, обеспечивающей скорость съемки 30 кадров в секунду.

С помощью программы VirtualDub в видеофайл «монтировалась» виртуальная линейка. Далее фрагмент видеозаписи от начала и до конца горения «вырезался» и разбивался на серию кадров, каждый кадр имел продолжительность $1/30$ секунды. Производилось сравнение положения ПУ по сравнению с виртуальной линейкой рис 2. Затем осуществлялось масштабирование. По полученным данным строился график зависимости координаты движения ПУ h от времени t (рис. 3).

Кривая 1 получена при численном решении поставленной задачи, кривая 2 построена по данным опыта.



Рис. 2 Визуализация процесса измерения всплытия ПУ

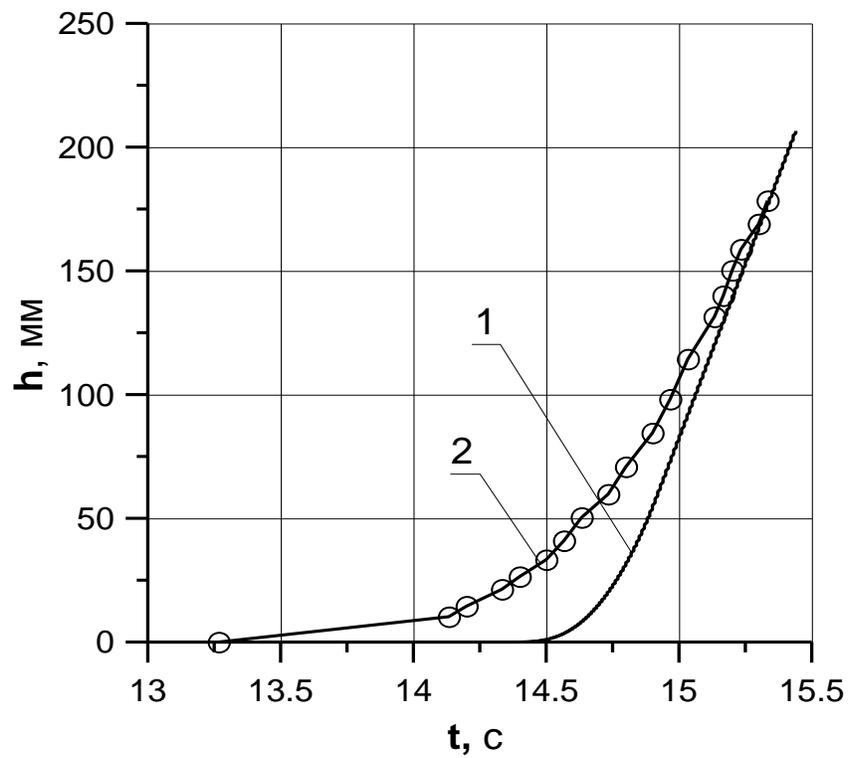


Рис. 3 График зависимости глубина всплытия ПУ от времени.

Как видно из рис. 3, всплытие начинается с 13 секунды, до данного момента происходит развёртывание оболочки. Максимальное различие между ними наблюдается в момент начала движения ПУ и с течением времени уменьшается.

Список литературы:

1. Барсуков В.Д., Голдаев С.В. Подводное зажигание и горение унитарных твердых топлив. Теория, эксперимент, технические приложения. – Томск Изд-во Том. ун-та, 2003. 352 с.
2. Барсуков В.Д., Басалаев С.А., Голдаев С.В. Математическое моделирование подъема малогабаритных предметов мягким понтоном, наддуваемым газогенератором открытого типа //Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – С.32–33.

УДК 681.3.06:66:048.57

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УНИТАРНЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ ПРИ ТЕПЛОМ И СИЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ОБЪЕКТЫ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

Басалаев С.А.¹, Барсуков В.Д.¹, д.т.н., Голдаев С.В.², д.ф-м.н.

1 – Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета, г. Томск

2 – Энергетический институт Томского политехнического университета, г. Томск

E-mail: Tarm@niipmm.tsu.ru

С целью повышения эффективности выполнения работы по созданию избыточного давления, требуемого для перемещения жидкости на большой глубине (продувка балластных цистерн понтонов, старт ракет из шахт, гидравлический разрыв нефтеносного пласта), была осуществлена замена компрессоров, баллонов высокого давления на твердотопливные газогенераторы [1–3].

При разработке подобных газогенераторов используются различные подходы. Один из них основан на многолетнем опыте решения аналогичных задач внутренней баллистики – зажигание и горение унитарных твердых топлив (способных гореть без внешнего кислорода) в квазиadiaбатических условиях [1–3]. Причем, штатные составы таких топлив, способных находиться при повышенных температурах окружающей скважинной жидкости, модернизировались, проходили многочисленные испытания, а затем допус-

кались к эксплуатации [2].

В ходе выполнения цикла исследований изучены закономерности зажигания и горения унитарных твердых топлив в водной среде, отработаны устройства, совершенствующие технологию проведения работ по подъему затонувших на большой глубине объектов, восстановлению коллекторских свойств призабойной зоны нефтеносного пласта. Например, предложен способ, позволяющий запускать газогенератор за счет энергии окружающей жидкости [3].

Анализ возможности применения для обезвреживания промышленных сточных вод открытого газогенератора (ОГ), представляющего шашку твердого топлива баллиститного типа, имеющего полость, свободно сообщающуюся с внешней средой, выполнен в работе [4]. Отсутствие металлического корпуса снижает цену подобного устройства. Использование барботажа продуктов сгорания через сточные воды способствует термическому воздействию на них. Дополнительная интенсификация процесса термического обезвреживания достигается при обеспечении вращения жидкости [5]. При этом снижается отрицательное воздействие химической неполноты сгорания.

Другое направление по совершенствованию устройств, использующих процесс горения твердого топлива в жидкой среде, основано на информационных технологиях [6,7]. Так, в работе [6] описан программный комплекс позволяющий моделировать новые перспективные устройства на основе твердого топлива для повышения продуктивности нефтяных скважин. Предложена новая конструкция устройства комплексного термогазохимического воздействия. Однако в нем должен применяться состав с такими баллистическими характеристиками (температурой горения, теплотой сгорания и др.), которые физически и экономически трудно реализуемы.

Список используемой литературы

1. Шишков А.А., Румянцев Б.В. Газогенераторы ракетных систем – М.: Машиностроение, 1981 – 152 с.
2. Термогазохимическое воздействие на малодебитные и осложненные скважины/Г.А. Чазов, В.А. Азиматов, С.В. Якимов, А.И. Савич – М.: Недра, 1986. – 150 с.
3. Барсуков В.Д., Голдаев С.В. Подводное зажигание и горение унитарных твердых топлив. Теория, эксперимент, технические приложения. Томск: Изд. Томского. ун-та. – 2003. – 352 с.

4. Басалаев С.А., Барсуков В.Д., Голдаев С.В. Об использовании центробежных сил для интенсификации теплового воздействия на промышленные стоки при горении в них унитарных твердых топлив / Энергетика и человек: Сб. трудов международной молодежной научной школы – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С.176–179.
5. Исследование подводного горения конденсированных веществ в поле центробежных сил /В.Д. Барсуков, С.А. Басалаев, С.В. Голдаев и др. Изв. вузов. Физика – 2010. –№12/2. –С.31–34.
6. Мухутдинов А.Р., Корсуков М.С. Современные информационные технологии в разработке устройств, повышающих продуктивность нефтяных скважин //Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 11. – С. 112 – 115.
7. Мухутдинов А.Р., Марченко Г.Н. Нейросетевое моделирование процесса горения твёрдого топлива в жидкой среде при давлении 30 МПа // Проблемы энергетики. – 2007. № 7–8. С. 100 – 109.

УДК 629.7.036.054.001

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ОТКРЫТОМ СЖИГАНИИ ЗАРЯДОВ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

И.С. Бондарчук, А.С. Жуков
Томский государственный университет, г. Томск
E-mail: E-mail: isbs@mail.ru

Проблема уничтожения больших количеств твердых ракетных топлив (ТРТ) существует во многих странах мира. Ее наличие объективно обусловлено необходимостью уничтожения дефектных зарядов, а также зарядов военных ракет, выработавших гарантийный срок службы.

Из сравнительного анализа способов утилизации ТРТ наибольшей простотой обладает производительный и относительно безопасный способ открытого сжигания зарядов с применением экологических защитных систем, наиболее простой и эффективной из которых является водное орошение (разбавление) струи продуктов сгорания (ПС). Проблема количественной оценки концентраций образующихся при сжигании крупных зарядов ТРТ вредных газообразных и конденсированных продуктов горения и анализа пространственно-временного поведения концентраций этих веществ является актуальной задачей как для оценки степени экологической опасности, так и для разработки способов ее минимизации.

Важной составной частью данной проблемы является задача оценки концентраций экологических опасных продуктов сгорания в истекающей из двигателя струи, для чего необходимо достаточно адекватное моделирование внутрибаллистических процессов в камере сгорания при нерасчетном режиме работы установки.

Сжигание крупногабаритных твердотопливных зарядов сложной геометрии с демонтированными сопловым блоком и днищами накладывает свои особенности на газодинамику течения продуктов сгорания и, как следствие, на их состав и структуру потока. Данные условия определяют, в конечном итоге, динамику расходной характеристики и состав продуктов сгорания. Существенными особенностями реализующихся течений при этом являются "нерасчетно" низкое давление, при котором сгорает топливо; значительная газодинамическая напряженность течения; высокие перепады скорости потока вдоль тракта канала заряда и "плывущая" поверхность, где реализуется значение критическая величина скорости потока. Кроме этого, существенными факторами становятся нестационарность процессов горения; полнота сгорания; особенности образования и эволюции конденсированной фазы.

Вычисления проводились на базе разработанного программного-методического обеспечения для двух схемных решений по утилизации крупногабаритных РДТТ – с демонтированным сопловым блоком и с частично открытым передним днищем. Расчеты проводились в два этапа. Сначала по штатным параметрам горения топлива определялся приблизительный уровень реализующегося среднего внутрикамерного давления; затем для этого давления по термодинамическому расчету корректировались свойства продуктов сгорания и вычисления повторялись.

На рис. 1 приведены зависимости давления от времени для начального периода работы системы. На рис. 2 представлены распределения давления и скорости вдоль канала заряда в момент времени после охвата горением всей рабочей поверхности. Поскольку истечение продуктов сгорания происходит непосредственно в атмосферу (выходные сечения канала меньше отверстий в днищах), то на определенных областях канала реализуется режим сверхзвукового течения; перепады давления по длине канала достигают значительных величин ($\approx 1,2$ МПа).

Можно отметить, что существенно эрозионный режим горения, реализующийся на данном этапе, определяет повышение скорости горения более чем в 2 раза.

После разгара канала до состояния, когда критическое сечение потока "садится" на отверстие днища, продольные градиенты давления существенно уменьшаются (рис. 3) и, соответственно, все течение в области канала заряда становится дозвуковым. На рис. 4 приведено изменение давления для полного времени процесса горения для двигателя с демонтированным сопловым блоком.

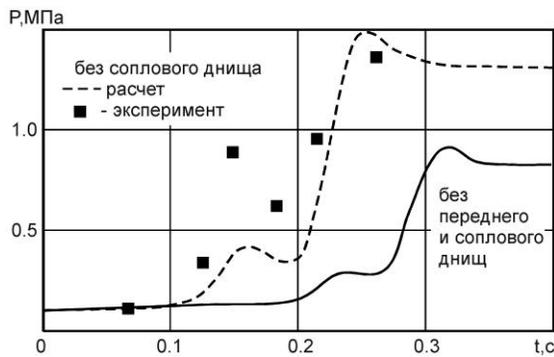


Рис. 1. Зависимости давления от времени

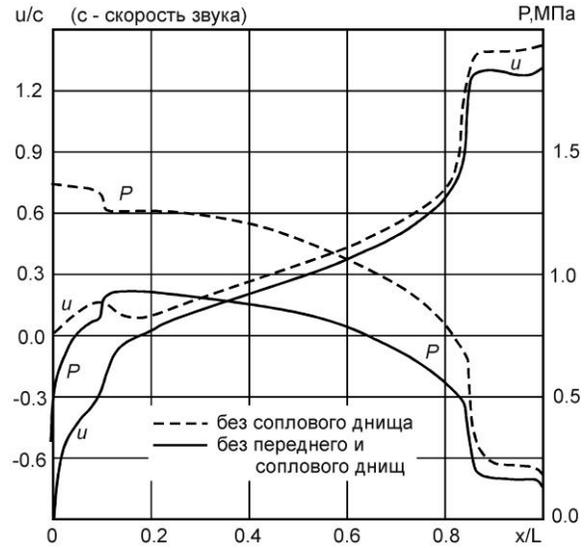


Рис. 2. Распределения скорости и давления по длине двигателя

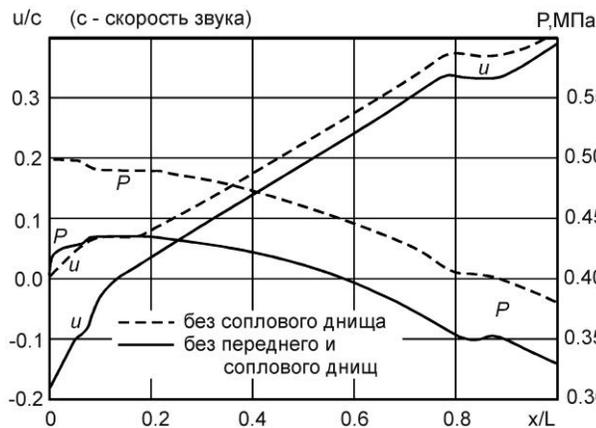


Рис. 3. Распределения скорости и давления

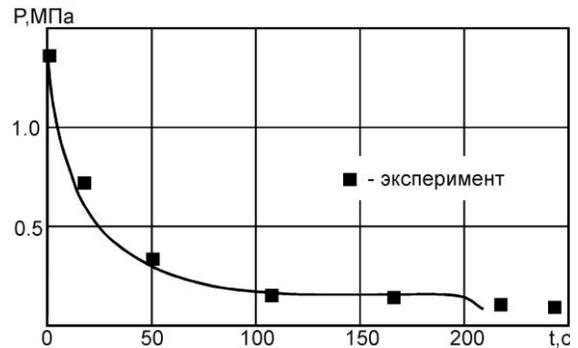


Рис. 4. Зависимость давления от времени

Можно определить следующие главные особенности режимов реализующихся течений:

наличие значительных перепадов давления по длине двигателя в начальный период работы;
реализующиеся околосвуковые скорости внутриканального потока;
существенное влияние эрозионной составляющей скорости горения на начальных этапах горения.

Результаты вычислений показали, что для двигателей всех трех ступеней ракеты РСМ-52, несмотря на существенные различия зарядов по массе, диаграммы давления в камере сгорания качественно идентичны – имеется начальный участок с повышенным давлением длительностью (50-70) с, а затем в течение (120-200) с происходит стационарное горение топлива при давлении около $\approx 0,2$ МПа. Расходные и "концентрационные" характеристики продуктов сгорания, реализующиеся температура и давление струи, режимы водного разбавления факела определяют геометрические и структурные характеристики формирования и облака ПС.

Одним из главных экологически опасных компонентов продуктов сгорания являются хлор и хлорсодержащие вещества, в частности кислота HCl. На рис. 5 представлена зависимость изменения отношения концентрации кислоты к начальной, содержащейся в ПС на выходе из двигателя, для различных степеней орошения струи водой для двигателя первой ступени.

Численное исследование подъема и переноса примеси проведено в на базе уравнений Рейнольдса и k - ϵ модели турбулентности. На рис. 6 представлены результаты расчета параметров эволюции облака примеси на начальных этапах его развития. Перегретые газы, образовавшиеся при выбросе примеси, формируют в результате действия выталкивающей силы пусковой факел, основание которого подобно начальной области стационарной струи (рис. 6). В начальные моменты времени t наблюдается распространение факела вверх; далее по мере сгорания заряда процесс стабилизируется. После прекращения действия источника происходит вырождение основания факела в результате чего выброс примеси можно классифицировать как термик.

Образовавшаяся структура термика поднимается в атмосфере, вовлекая в движение окружающий воздух; его масса возрастает в разы и, соответственно, концентрация примеси в нем падает. Расчеты показывают, что для класса G устойчивости атмосферы спустя ≈ 15 минут после прекращения выброса концентрация примеси в термике уменьшается примерно на 3-5 порядков.

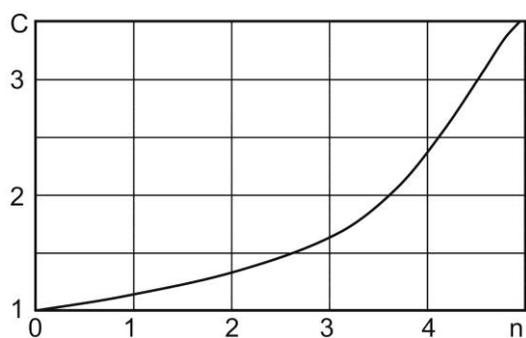


Рис. 5. Относительная концентрация HCl в зависимости от степени орошения

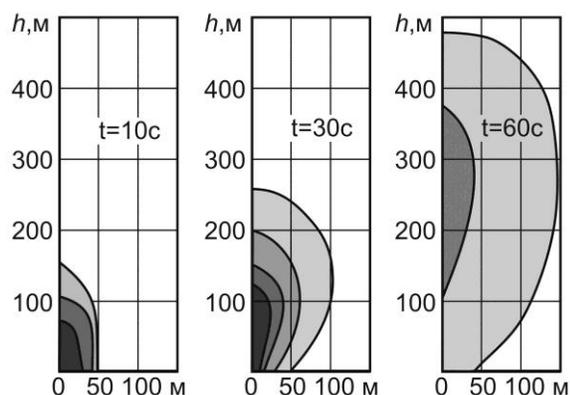


Рис. 6. Эволюция облака примеси

Сравнительный анализ адекватности разработанных математических моделей подтвержден уникальным экспериментальным материалом по сжиганию больших зарядов твердого ракетного топлива на уникальном стенде ФНПЦ "Алтай".

Таким образом, в работе представлена методология и результаты практической оценки экологического риска для разработки комплекса мероприятий по снижению вредного воздействия продуктов сгорания на окружающую среду при открытом сжигании больших зарядов ТРТ. Полученные данные будут использоваться при проектировании и модернизации терминалов по уничтожению ТРТ методом открытого сжигания. Результаты также могут быть использованы для оценки экологической опасности при аварийных ситуациях (пожары, природные катастрофы) на предприятиях, использующих ТРТ в процессе производства.

УДК 519.95: 629.7

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОРОШКООБРАЗНОГО АЛЮМИНИЯ В ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ НА ОБЕДНЕННОМ ДВУХКОМПОНЕНТНОМ ТОПЛИВЕ В РАМКАХ ТЕОРИИ РЕАКТОРА ИДЕАЛЬНОГО СМЕШЕНИЯ

И.С. Бондарчук¹, Б.В. Борисов², А.С. Жуков¹

¹ Томский государственный университета, г. Томск, Россия

² Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Рассмотренная схема газогенератора (ГГ) предусматривает использование газообразных (предварительно газифицированных) компонентов

топлива, когда для повышения температуры рабочего тела в камеру сгорания вдувается порошкообразный алюминий. Истечение продуктов сгорания происходит через профилированный сопловой блок. Схема ГГ соответствует предлагаемой авторами конструкции двигательной установке для увода с орбиты ступеней ракет-носителей, использующей гарантированные остатки топлива и инертного вещества (гелия) служащего рабочим телом для системы (вытеснительной) подачи топлива в камеру сгорания. Для повышения энерготяговых характеристик ГГ, при наличии существенно обедненного топлива вследствие большого количества гелия из системы вытеснения, в камеру сгорания дополнительно вводят порошок алюминия [1]. Малая молекулярная масса гелия способствует повышению тяги двигателя.

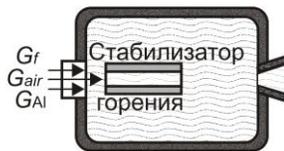
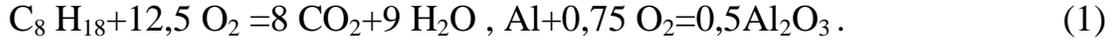


Рис. 1. Схема реактора идеального смешения

При математическом описании протекающих процессов рассматривалась следующая картина их развития. Со стартового начального момента времени в камеру сгорания поступает газообразное (в рассматриваемом случае керосин) и конденсированное (мелкодисперсный порошок алюминия) горючее; в качестве окислителя вдувается воздух. Начинается

истечение холодных исходных компонентов через сопло. В тоже время от внешнего источника энергии до определенной достаточно высокой температуры нагревается расположенный в камере сгорания стабилизатор горения (рис. 1), представляющий собой небольшую металлическую трубку. В течение периода индукции стабилизатор прогревает обтекающую его смесь горючего и воздуха до некоторого значения температуры, при которой начинается химическая реакция горения с интенсивным тепловыделением, достаточным для дальнейшей возникновения самоподдерживающейся реакции горения. Внешний источник энергии отключается, далее температура стабилизатора поддерживается механизмом теплообмена с горячими продуктами реакции горения. В тоже время некоторая часть выделяемой при горении газообразных продуктов энергии расходуется на прогрев частиц металлического горючего [2], обуславливая его горение, что, в свою очередь, повышает температуру газа в камере сгорания.

Горение газообразного топлива (керосина) и порошка алюминия в окислительной среде (кислороде воздуха) соответствует уравнениям следующих брутто-реакций



Математическое описание процессов, происходящих в камере сгорания, базируется на законах сохранения массы и энергии смеси компонентов, являющихся топливом, окислителем, нейтральным газом и продуктами горения топлив; смесь является идеальным газом. Уравнение баланса массы смеси газов предусматривает поступление в камеру газообразных компонентов $G_{\Sigma} = G_{air} + G_f$ воздуха G_{air} , горючего G_f , расхода смеси через сопло и имеет вид

$$\frac{d}{dt}[\rho W] = G_{\Sigma} - k_{Al} m_{Al} - G_*,$$

где t – время, ρ – плотность газовой смеси, W – объем; m_{Al} – массовая скорость горения алюминия, описывающая безвозвратную потерю газообразного окислителя при горении, поскольку в результате реакции (1) образуется только конденсированный продукт.

Коэффициент k_{Al} потребления окислителя при горении определяется через молекулярные массы и стехиометрические коэффициенты реакции. Расход газа через сопло G_* определяется через соотношения квазистационарной теории изоэнтропического течения.

Уравнение изменения массовой доли газообразного горючего c_f имеет вид

$$\frac{d}{dt}[\rho W c_f] = G_f - m_f - c_f G_*, \quad m_f = (\rho c_f)(\rho c_{ox}) Z \exp\left(-\frac{E_a}{R_0 T}\right),$$

где T – температура газа,

Z, E_a, R_0 – предэкспонент, энергия активации и универсальная газовая постоянная.

Уравнение изменения массовой доли окислителя c_{ox} определяется соотношением

$$\frac{d}{dt}[\rho W c_{ox}] = G_{ox} - m_{ox} - c_{ox} G_*, \quad m_{ox} = k_{Al} m_{Al} + k_f m_f.$$

Коэффициент k_f потребления окислителя при горении в данном случае керосина определяется через молекулярные массы и стехиометрические коэффициенты реакции (1).

Изменение доли образующихся в результате реакции газообразных продуктов – углекислого газа c_{CO_2} и парообразной воды c_{H_2O} описывается уравнениями

$$\frac{d}{dt}[\rho W c_{\text{CO}_2}] = k_{\text{CO}_2} m_r - c_{\text{CO}_2} G_*, \quad \frac{d}{dt}[\rho W c_{\text{H}_2\text{O}}] = k_{\text{H}_2\text{O}} m_r - c_{\text{H}_2\text{O}} G_*.$$

Суммарная массовая скорость образования продуктов реакции m_r определяется уравнением $m_r = (1 + k_f) m_f$, коэффициенты распределения суммарного продукта реакции по компонентам (k_{CO_2} по углекислому газу и $k_{\text{H}_2\text{O}}$ по воде) рассчитываются по их молекулярным весам и стехиометрическим коэффициентам этих реакций.

Изобарическая теплоемкость газовой смеси C_p и ее газовая постоянная R определяются аддитивно через концентрации компонент и их индивидуальные свойства. По значениям C_p и R посредством закона Майера определяется показатель адиабаты смеси γ . Баланс энергии в камере сгорания учитывает поступление энтальпии за счет вдуваемых компонентов, химической реакции; поступления или потерь энергии вследствие теплообмена со стабилизатором горения, на нагрев частиц алюминия и за счет истечения продукта из камеры сгорания:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{pW}{\gamma - 1} \right] = H_\Sigma + H_f m_f - Q_s - Q_{\text{Al}} - C_{p,ox} T k_{\text{Al}} m_{\text{Al}} - \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho} G_*.$$

Здесь суммарный приток энтальпии H_Σ за счет поступающей массы воздуха и горючего с температурой T_0 определяется соотношением $H_\Sigma = G_{\text{air}} C_{p,\text{air}} T_0 + G_f C_{p,f} T_0$.

Величина $H_f m_f$ – суммарный приток энтальпии за счет теплоты сгорания топлива (H_f – удельная теплота реакции); член $C_{p,ox} T k_{\text{Al}} m_{\text{Al}}$ представляет убыль энергии вследствие затрат окислителя, связанных с образованием конденсированного оксида алюминия.

Оценка потерь тепла Q_{Al} газообразных продуктов на нагрев поступающего в камеру сгорания алюминия представляется уравнением

$$Q_{\text{Al}} = \frac{6W}{D^2} \frac{\rho}{\rho_{\text{Al}}} \lambda \text{Nu}_p c_{\text{Al}} (T - T_p),$$

где T_p – средняя за время пребывания в камере температура частицы алюминия,

c_{Al} – массовая доля "газа" алюминия;

λ – коэффициент теплопроводности окружающей каплю алюминия парогазовой смеси;

ρ_{Al}, D – плотность материала капли и ее средний диаметр;

Nu_p – число Нуссельта относительно движения капли в потоке.

Теплообмен Q_S газообразных продуктов со стабилизатором горения описывается через уравнение изменения его осредненной температуры после времени индукции реакции t_{ind} , а до указанного момента температура считается постоянной, равной значению, обусловленному внешним "стартовым" источником энергии.

Уравнение для изменения c_{Al} – массовой доли "газа" алюминия

$$\frac{d}{dt}[\rho W c_{Al}] = G_{Al} - m_{Al} - c_{Al} G_*,$$

где G_{Al} – массоприход алюминиевого порошка, $[G_{Al}] = \text{кг/с}$.

Скорость горения алюминия m_{Al} в предположениях диффузионного механизма определяется по формуле Б.И. Срезневского [2]. Коэффициент испарения в рамках диффузионной теории горения [3, 4] определяется числами Нуссельта Nu_p и Сполдинга B .

Оценку значения температуры T_p поверхности капли можно выполнить по приближенному уравнению изменения ее осредненного значения

$$\frac{\lambda_{Al}}{\alpha_{Al}} \frac{dT_p}{d\tau} = \lambda Nu_p \frac{6}{D^2} (T - T_p), \quad \tau \in [0; t_p],$$

где λ_{Al} , α_{Al} – коэффициенты и теплопроводности и температуропроводности алюминия.

Время t_p воздействия теплового потока со стороны газовой фазы на каплю определяется минимальным из времени t_g пребывания частицы алюминия в камере $t_g = (\rho W)/G_\Sigma$ и времени t_{Al} полного сгорания частицы, которое, в свою очередь, можно оценить по ее диаметру и скорости горения, $D_0 = D(\tau=0)$: $t_p = \min\{t_g; t_{Al}\}$.

Таким образом, представленные выше уравнения представляют собой замкнутую математическую постановку задачи расчета параметров функционирования газогенератора при поступлении в камеру сгорания газообразного и металлического горючего в виде мелкодисперсного порошка алюминия.

По сформулированной математической постановке задачи расчета параметров реактора с учетом поступления в камеру сгорания мелкодисперсного порошка алюминия численно моделировалось устройство со следующими основными характеристиками: диаметр и длина камеры сгорания – 10 см и 20 см; диаметр критического сечения сопла – 1,6 см; истечение продуктов горения происходит в вакуум; время индукции воспламенения – 50 мс; расход топливной смеси – 8,5 г/с.

На рис. 2 приведены расчетные зависимости давления в камере сгорания от времени для различной массовой доли горючего φ в топливной смеси. Значение $\varphi=0,09$ находится близко к обусловленному стехиометрией уровню. Данные рис. 3 показывают значительную зависимость реализуемого в камере сгорания уровня температуры от размеров порошка алюминия, которые определяют не только поверхность горения, но и уровень затрат тепла на их прогрев и время пребывания частиц в камере сгорания. Согласно рис. 4 величина ψ (отношение массы порошка алюминия, вдуваемого в камеру, к массе поступающего туда же газообразного горючего) значительно, как это и должно быть, влияет на значения температуры в камере сгорания.

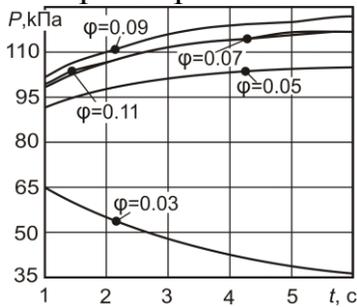


Рис. 2. Зависимость давления для различной массовой доли горючего

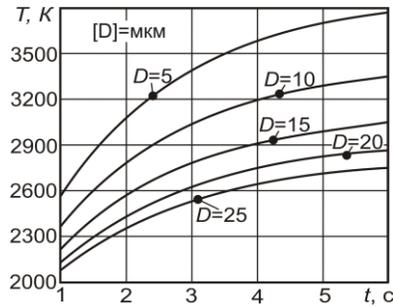


Рис. 3. Температура в камере сгорания для различной дисперсности алюминия

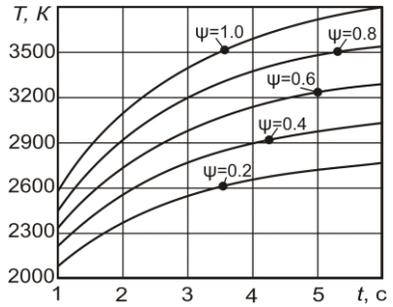


Рис. 4. Зависимость температуры при различных отношениях масс алюминия и газообразного горючего

Данные рис. 5 позволяют произвести оценку реализуемых внутрикамерных параметров в зависимости от дисперсности вдуваемого порошка алюминия.

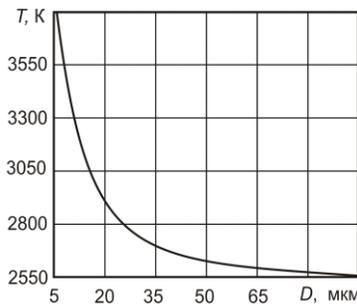


Рис. 5. Зависимость температуры в камере сгорания от размеров вдуваемого порошка алюминия

Таким образом, сформулирована математическая модель, описывающая параметры рабочих процессов в камере сгорания ГГ с учетом бедности топливной смеси и дополнительного ввода порошка алюминия для повышения энерготяговых характеристик ГГ. Описаны и учтены параметры процессов запуска реактора и наличие в камере сгорания обеспечивающего устойчивость работы устройства теплоемкого элемента стабилизатора горения. Представленные результаты позволяют использовать предложенную модель для предварительного анализа подобных газогенерирующих устройств на этапе проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. П.Ф. Похил, А.Ф. Беляев, Ю.В. Фролов, В.С. Логачев, А.И. Коротков. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972. 361 с.
2. Сакович Г.В., Архипов В.А., Ворожцов А.Б., Бондарчук С.С., Певченко Б.В. Исследование процессов горения ВЭМ с нанопорошками алюминия // Российские нанотехнологии. – 2010. Т. 5, № 1-2. С. 89–101.
3. В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др. Основы практической теории горения. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 315 с.
4. Варшавский Г.А. Горение жидкого топлива. Диффузионная теория. // В сб. Теория горения порохов и взрывчатых веществ. М.: Наука, 1982. С. 87–106.

УДК 662.62

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Магистрант: Булутбаева Ж.С.
bulutbaeva.zhann@mail.ru

Томский политехнический университет, г. Томск

С ростом цен на традиционные энергоносители все актуальней становятся исследования, связанные с получением энергии (в частности тепловой) из отходов промышленного производства, сельского хозяйства и жизнедеятельности человека. Изучение процессов, сопровождающих утилизацию (сжигание) древесных отходов позволяет найти наиболее оптимальные режимы получения теплоты. Особенно это важно для тех районов, в которых имеются значительные лесные ресурсы или деревоперерабатывающие комплексы.

В настоящее время существует достаточно много различных моделей, которые описывают процессы сжигания.

Использование таких моделей позволяет моделировать воспламенение и горение топлива в газофазной [1], гетерогенной [2-5], и твердофазной (тепловой) [6-9] теории.

Данные модели необходимы в том числе для прогноза пожарной опасности горючих веществ на производстве, в быту и лесу. На практике наибольшую опасность для окружающей среды представляют технологические процессы: сварка и резка металлов, сжигание мусора и промышленных отходов на неподготовленных или плохо подготовленных для этого площадках

Моделирование режимов воспламенения, горения и погасания древесных опилок важно и для оценки пожара и взрыва безопасности на данных предприятиях. Для решения задачи пожарной безопасности при хранении и утилизации опилок была выбрана следующая физико-математическая модель [8]

При горении древесины рассматриваются следующие физико-химические процессы:

кинетический режим горения, при котором скорость процесса определяется скоростью протекания гетерогенных химических реакций окисления конденсированных продуктов пиролиза древесины (угля);

диффузионный режим горения, при котором скорость разрушения древесины определяется скоростью диффузии окислителя (кислорода);

возможен третий режим разрушения горячей древесины, при котором происходит растрескивание продуктов пиролиза древесины, механический унос частиц кокса и их догорание в воздухе.

Газовая фаза будет состоять из семи компонентов (CO , O_2 , CO_2 , H_2 , CH_4 , H_2O , N_2).

Кроме данных реакций учитывались гетерогенная реакция горения кокса и гомогенные реакции окисления оксида углерода, водорода и метана:



Уравнения учитывающие тепло- и массообмен с приземным слоем воздуха и подстилающей поверхностью

С учетом сделанных допущений имеем следующую систему уравнений, которая получена на основе сведений, представленных в работах [7]:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -\kappa_p \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_p}{RT}\right), \quad \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -\kappa_{2s} \varphi_2 \exp\left(-\frac{E_{2s}}{RT}\right), \quad (1)$$

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c \rho_1 R_p - s R_{3s}, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \alpha_s \rho_1 R_p, \quad \sum_{i=1}^5 \varphi_i = 1, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_5 \varphi_5) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_5 \varphi_5 u) = \alpha_g \rho_1 R_p - \rho_2 R_{2s} + s R_{3s} - (\rho_5 \varphi_5 \nu)_w / H, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_5 \varphi_5 c_\alpha) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_5 \varphi_5 u c_\alpha) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial x} \right) + R_{5\alpha} - s R_{5\alpha s} - R_{5\alpha w} / H,$$

$$\alpha = \bar{1}, \bar{6}, \quad \sum_{\alpha=1}^7 c_\alpha = 1, \quad R_{5\alpha w} = \alpha_1 \varphi_5 (c_\alpha - c_{\alpha e}) / c_{p5}, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^5 \rho_i \varphi_i c_{pi} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_5 \varphi_5 c_{p5} u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left((\lambda_s + \lambda_R) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q_{3s} s R_{3s} - q_{2s} \rho_2 R_{2s} -$$

$$(1 - \varphi_5) (\varphi_f \varepsilon_f \sigma T_f^4 - \varepsilon_w \sigma T^4) / H - \frac{\alpha_1}{H} (T - T_e) - \frac{\alpha_2}{H} (T - T_s),$$

$$u = \frac{\kappa}{\mu + \kappa \beta \rho_5 |u|} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad p = \frac{\rho_5 R T}{M}, \quad M = \frac{1}{\sum_{\alpha=1}^7 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}}. \quad (6)$$

Здесь коэффициент теплоотдачи $\alpha_1 = \alpha_0 [1 + \kappa_0 (\rho_5 \varphi_5 \nu)_w]$; α_0 – коэффициент теплоотдачи, характеризующий теплообмен непроницаемой стенки с потоком газа, Вт/(м²·К); второе слагаемое в формуле учитывает изменение теплообмена на поверхности вследствие вдува через пористую стенку; κ_0 – эмпирическая константа, м²с/кг.

Краевые условия для системы уравнений (1) – (6)

$$t = 0: \varphi_i = \varphi_{iH}, i = \bar{1}, \bar{4}, \quad c_\alpha = c_{\alpha H}, \quad \alpha = \bar{1}, \bar{6},$$

$$T /_{x=x_0} = T_H, T /_{x=x_0} = T_0, \rho_5 = \rho_{5H}, u = 0;$$

$$x = x_0: u = 0, \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial x} = 0, \quad \lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} = \rho_0 c_0 x_0 \frac{dT_0}{dt};$$

$$x = L: c_\alpha = c_{\alpha H}, \quad T = T_H, \quad p = p_H.$$

$\varphi_j, \rho_j (j = 1 \dots 5)$ – объемные доли и истинные плотности, соответственно, опилок, воды, кокса, шлака и газовой фазы соответственно, м³/м³, кг / м³;

c_α – массовая концентрация α - компоненты газовой фазы, кг/кг;

D_α – эффективный коэффициент диффузии α -компоненты газовой фазы, м²/с; k_p – пред экспоненциальный множитель гомогенной реакции разложения древесин, 1/с; $k_s, k_{s1}, k_{s2}, k_{s3}, k_{s4}$ – пред экспоненциальные множители гетерогенных реакции, соответственно, испарения влаги и окисление кокса, м/с; $\alpha_c, \alpha_s, \alpha_g$ – массовая доля, соответственно, кокса, золы, газовой фазы образующегося при пиролизе древесин; v_1, v_3, v_4, v_5 – стехиометрические коэффициенты; s – удельная поверхность пор, 1/м; u, ϑ – компоненты скорости фильтрации газообразных продуктов, м/с; $M_{51, \dots, 57}$ – молекулярные массы, соответственно, кислорода, оксида углерода, диоксида углерода, водорода, метана, поров воды и азота, кг/моль; $c_{1, \dots, 7}$ – массовые концентрации, соответственно, кислорода, оксида углерода, диоксида углерода, водорода, метана, паров воды и азота, кг/кг; $q_p, q_{s2}, q_{s3}, q_{CO}, q_{H_2}, q_{CH_4}$ – тепловые эффекты реакций, соответственно, пиролиза древесины, испарения влаги, окисления кокса, окисления углерода, водорода и метана, Дж/кг; $\alpha_{CO} = \frac{v'_{52} M_{52}}{v_1 M_1}$, $\alpha_{H_2} = \frac{v'_{54} M_{54}}{v_1 M_1}$, $\alpha_{CH_4} = \frac{v'_{55} M_{55}}{v_1 M_1}$, $\alpha_{H_2O} = \frac{v'_{56} M_{56}}{v_1 M_1}$ – массовые доли, соответственно, оксида углерода, водорода, метана и водяного пара, образующиеся при пиролизе угля; c_{pj} (j=1..5) – удельные теплоемкости, соответственно, опилок, воды, кокса, золы и газовой фазы соответственно, Дж/(кгК); R_p, R_{2s}, R_{3s}, R_5 – массовая скорость разложения, соответственно, опилок, испарения окисления кокса, образования газовой фазы при протекании реакции окисления кокса кг/(м³с); ; $R_{CO}, R_{CH_4}, R_{H_2}$ – массовые скорости окисления, соответственно, оксида углерода, метана и водорода, кг/(м³с); $E_{3s}, k_{3s}, E_{2s}, k_{2s}, E_p, k_p, E_{CO}, k_{CO}, E_{H_2}, k_{H_2}, E_{CH_4}, k_{CH_4}$ – энергия активации и предэкспоненциальный множитель гетерогенных реакций, соответственно, горения кокса, испарения влаги углерода, Дж/моль, м/с и гомогенных реакций разложения древесины, окисления оксида углерода, диоксида углерода, водорода и метана Дж/моль, 1/с; μ – коэффициент динамической вязкости, Н с/м²; p – давление газообразных продуктов в порах, Па; g – ускорение свободного падения, м/с²;

Список литературы

1. Вилунов В.Н. К тепловой теории зажигания // ФГВ. -1966, - № 2. – С.77 – 82.

2. Берцун В.Н., Гришин А.М. О концентрационном и комбинированном пределах гетерогенного воспламенения // ФГВ. - 1973 - Т.9, № 3. -С. 404-409.
3. Гришин А.М., Игнатенко Н.А. О тепловом пределе гетерогенного воспламенения // ФГВ. -1973. - Т.9, № 2. - С. 249-255.
4. Семенов Н.Н. Тепловая теория горения и взрыва //УФН. – 1940. Т.24,В.4. – С. 432-846.
5. Зельдович Я.Б. Теория зажигания накаливаемой поверхностью. // ЖЭТФ. – 1939. /Т.9, В.12. – с. 1530-1534.
6. Тодес О.М. Теория теплового взрыва // ЖФХ. – 1939. – Т.13, В. 7. – С. 498-524.
7. Исаков Г.Н,Субботин А.Н. Воспламенение и горение пористого продуваемого слоя отходов деревообработки при различных условиях теплообмена // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. №5.

УДК 662.612.12

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ СМЕСЕВОГО ТОПЛИВА ИСТОЧНИКОМ ОГРАНИЧЕННОГО ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЯ ПРИ УЧЕТЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ И ВЕЩЕСТВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Глушков Д.О.

Томский политехнический университет, Томск

E-mail: dmitriyog@tpu.ru

Выполнено математическое моделирование процесса зажигания типичного металлизированного твердого топлива широко распространенным источником ограниченного теплосодержания – разогретой до высоких температур металлической частицей в форме параллелепипеда малых размеров. Численные исследования проведены в рамках модели, учитывающей в явной форме структурную неоднородность топлива, а также зависимость теплофизических характеристик материалов и веществ от температуры.

Моделирование исследуемых физико-химических процессов проводилось в системе «смесевое твердое топливо – источник ограниченного теплосодержания – воздух». В качестве источника нагрева рассматривалась разогретая до высоких температур стальная частица малых размеров в форме параллелепипеда. Численные исследования выполнены на примере

типичного смесового топлива с известными теплофизическими и термохимическими характеристиками. Структурная неоднородность СТТ, обусловленная включениями частиц алюминия, учитывалась при моделировании реальной гетерогенной структуры топлива.

Предполагалась реализация следующей схемы исследуемого процесса. В начальный момент времени разогретая до высоких температур металлическая частица инерционно осаждается на поверхность металлизированного топлива. Последнее нагревается за счет кондуктивного отвода энергии, аккумулированной в «горячей» частице. При прогреве вещества скорость экзотермической реакции в приповерхностном слое экспоненциально возрастает по закону Аррениуса.

В результате численных исследований проведен анализ влияния условий подвода энергии (локальный источник энергии, массивная пластина) на времена задержки зажигания структурно-неоднородного топлива при учете зависимости теплофизических характеристик материалов и веществ от температуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-620.2012.8).

УДК 536.468

ПРЕДЕЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ВОЗГОРАНИЯ В ГЕТЕРОГЕННОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРЕВЕ

Глушков Д.О., Захаревич А.В., к.ф.-м.н., Стрижак П.А., д.ф.-м.н.

Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: dmitriyog@tpu.ru

Выполнено численное и экспериментальное исследование макроскопических закономерностей зажигания в гетерогенной системе при взаимодействии с типичным источником ограниченной энергоемкости.

Рассматривалась система «одиночная нагретая до высоких температур металлическая частица – ткань, пропитанная горючей жидкостью – парогазовая смесь». Характерные размеры частицы сопоставимы с толщиной ткани. Принималось, что в начальный момент времени в ткани содержится жидкое горючее вещество, объемная доля которого известна. При попадании на поверхность ткани нагретой до высоких температур частицы компоненты горючей жидкости начинают испаряться. Образующиеся пары горючего перемешиваются с окислителем – воздухом и нагреваются за счет

энергии разогретой частицы. При достижении предельных температур парогазовой смеси и концентраций в ней горючего происходит воспламенение.

В результате выполненных численных и экспериментальных исследований установлены необходимые и достаточные условия возгорания сложных гетерогенных структур – широко распространенных тканей, пропитанных типичными горючими жидкостями, при локальном нагреве. При этом показано, что времена задержки зажигания для большей части практических приложений могут быть существенно меньше приведенных в [1].

Проиллюстрирована достаточно хорошая сходимость результатов выполненных численных и экспериментальных исследований. Определены факторы, главным образом влияющие на сходимость. Получено хорошее соответствие результатов выполненных исследований закономерностям, описанным для гомогенных структур – жидких топлив.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-620.2012.8).

Список литературы:

1. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Пожароопасность процессов взаимодействия разогретых до высоких температур частиц с тканями, пропитанными горючими жидкостями // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – № 5. – С. 16–22.

УДК 662.612.12

ЗАЖИГАНИЕ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНОГО ТВЕРДОГО КОНДЕНСИРОВАННОГО ВЕЩЕСТВА ЛОКАЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ

Глушков Д.О.

E-mail: dmitriyog@tpu.ru

Выполнено численное исследование твердофазного зажигания типичного структурно-неоднородного металлизированного конденсированного вещества (КВ) разогретыми до высоких температур частицами малых размеров. При моделировании структуры вещества в работе использован подход, заключающийся в учете его реальной гетерогенности. При этом в области решения выделялись участки, соответствующие частицам металла, а также «связке» вещества, способного к экзотермическому реагированию (например, бутилкаучуку), с окислителем (например, перхлоратом аммо-

ния). В качестве модельных источников зажигания приняты одиночные металлические частицы в форме параллелепипеда и цилиндрического диска малых размеров. Такая форма частиц позволяет достаточно просто описать условия теплового контакта источника ограниченной энергоемкости и твердого КВ.

В результате выполненных исследований установлены масштабы влияния формы, глубины внедрения в приповерхностный слой КВ, теплосодержания локального источника энергии, шероховатости поверхности КВ на интегральные характеристики процесса зажигания структурно-неоднородного КВ.

Сравнение полученных зависимостей с экспериментальными данными позволило сделать вывод о том, что усреднение по объему КВ теплофизических характеристик всех компонентов приводит к возрастанию по сравнению с экспериментальными данными времени задержки зажигания и предельной температуры зажигания вещества при прочих равных условиях. Это объясняется увеличением теплопроводности приповерхностного слоя гомогенизированного вещества по сравнению с условиями эксперимента. Соответственно возрастает скорость отвода энергии от поверхности нагрева вглубь вещества по сравнению с опытом. В результате приповерхностный слой КВ прогревается быстрее и температура поверхности нагрева в идентичные моменты времени будет существенно меньше достигаемых в экспериментах.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-620.2012.8).

УДК 662.612.16

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАЖИГАНИЯ ЖИДКОГО КОНДЕНСИРОВАННОГО ВЕЩЕСТВА ПОГРУЖАЮЩИМСЯ ИСТОЧНИКОМ ОГРАНИЧЕННОГО ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЯ

Глушков Д.О., Захаревич А.В., к.ф.-м. н., Стрижак П.А., д.ф.-м. н.
E-mail: dmitriyog@tpu.ru

В результате проведения численных и экспериментальных исследований процесса зажигания широко распространенного жидкого конденсированного вещества (КВ) погружающимся в него типичным источником ограниченной энергоемкости – разогретой до высоких температур металлической частицей малых размеров установлено, что в зависимости от

теплосодержания источника возможна реализация нескольких режимов зажигания, отличающихся положением зоны ведущей реакции окисления и интервалами изменения основной интегральной характеристики – времени задержки зажигания. Выявлено, что зона ведущей реакции окисления может располагаться в газовой области над погружающейся частицей, вблизи боковой грани не полностью погруженного в КВ источника нагрева, в паровом зазоре между частицей и жидкостью вблизи боковой поверхности источника. Установлено, что ни при каких условиях зажигание не происходит в паровом зазоре под частицей. Эта закономерность обусловлена недостаточным содержанием в данной области окислителя, существенным поглощением энергии фазового перехода при испарении жидкого горючего КВ и значительным остыванием источника ограниченной энергоемкости вблизи границы раздела «частица – жидкость».

Выявлено, что при затоплении «горячей» частицы происходит интенсивное испарение жидкости. Однако, температура вдуваемых паров КВ и изолированного слоя жидкости окислителя недостаточна для ускорения реакции окисления. При дальнейшем погружении затопленного локального источника его температура снижается, скорость испарения уменьшается и замедляется вдув паров КВ в газовую область. Как следствие, происходит медленное остывание и погружение источника энергии. Можно заключить, что если зажигание не произошло при выпадении на поверхность горючей или легковоспламеняющейся жидкости разогретой до высоких температур частицы и последующем ее частичном погружении, то условия воспламенения не будут достигнуты при полном затоплении локального источника энергии.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-620.2012.8).

УДК 662.61

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В КОТЛАХ МАЛОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ЗАГРУЗКОЙ ТОПЛИВА

Гринкруг М.С., к.т.н., Казаков М.Ю.

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, г.

Комсомольск-на-Амуре

E-mail: grin@knastu.ru

В настоящее время для выработки тепловой энергии на малых котельных часто используются твердотопливные котлы. Подача топлива в них осуществляется, как правило, периодически. Процесс сгорания твердого топлива после загрузки его в топку является более сложным, чем сгорание жидкого и газообразного видов топлива, и в литературе не описан. Частота и объемы подачи твердого топлива в топку регулируется только по личному усмотрению оператора котельной установки, что, естественно, не является оптимальным с точки зрения экономичности расхода топлива. В данной статье предпринята попытка математически описать указанный процесс.

Требуемая часовая выработка тепла котельной складывается из расходов тепла на отопление, вентиляцию, горячее водоснабжение подключенных зданий, потерь тепла в сети и зависит от температуры наружного воздуха. Ее можно описать формулой:

$$Q(t_{\text{нв}}) = Q_{\text{отопл}}(t_{\text{нв}}) + Q_{\text{вент}}(t_{\text{нв}}) + Q_{\text{твс}}(t_{\text{нв}}) + Q_{\text{ном}}.$$

Температура наружного воздуха меняется с течением времени. В настоящее время можно получить достаточно точный прогноз температуры воздуха на сутки в определенной местности. Используя эти данные можно построить кубический сплайн зависимости температуры наружного воздуха от времени на каждый отрезок времени:

$$t_{\text{нв}}(\tau) = a_0 + a_1 \cdot \tau + a_2 \cdot \tau^2 + a_3 \cdot \tau^3,$$

где τ - время (с).

Часовой расход тепла на отопление складывается из расходов тепла на отопление каждого здания, которые зависят от объемов зданий, их удельных тепловых характеристик и разности между температурой, которую нужно обеспечить в здании, и температурой наружного воздуха [1]:

$$Q_{\text{отопл}} = \sum_{i=1}^N (q_{oi} \cdot V_i \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{нв}}) \cdot k_t)$$

где q_0 - удельная тепловая характеристика здания на отопление, ккал/(м³·ч·°С); V - объем здания, м³; $t_{\text{вн}}$ - требуемая температура в здании, °С; α - поправочный коэффициент к q_0 , зависящий от температуры наружного воздуха; k_t - коэффициент, учитывающий влияние температуры наружного воздуха на теплопотери за счет инфильтрации.

Расчет коэффициента k_t приведен в [1].

Таблица значений коэффициентов α при различных значениях температуры наружного воздуха приведена в [2]. Данные значения были аппроксимированы полиномом третьей степени:

$$\alpha(t_{\text{нв}}) = b_0 + b_1 \cdot t_{\text{нв}} + b_2 \cdot t_{\text{нв}}^2 + b_3 \cdot t_{\text{нв}}^3,$$

где $b_0 = 2.0156$, $b_1 = 0.068039$, $b_2 = 0.0014897$, $b_3 = 0.000012028$.

Часовой расход тепла на вентиляцию определяется по формуле [1]:

$$Q_{\text{вент}} = \sum_{i=1}^N (q_v \cdot V \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{нв}}))$$

где q_v - удельная тепловая характеристика здания на вентиляцию, ккал/(м³·ч·°C).

Часовой расход тепла на горячее водоснабжение равен [1]:

$$Q_{\text{ГВС}}(t_{\text{нв}}) = 1.2 \cdot G_{\text{ГВС}} \cdot N \cdot (t_{\text{ГВ}} - t_{\text{ХВ}}) / 24,$$

где $G_{\text{ГВС}}$ - норматив расхода горячей воды на человека, кг/сут; N - количество человек; $t_{\text{ГВ}}$ - требуемая температура горячей воды при текущей температуре наружного воздуха, °C; $t_{\text{ХВ}}$ - требуемая температура холодной воды при текущей температуре наружного воздуха, °C.

Потери тепла в сети составляют обычно 15-20% от общей выработки тепла котельной.

Таким образом, имея зависимость температуры наружного воздуха от времени можно получить прогнозное значение мощности работы котельной в каждый момент времени.

При работе котельной требуемая нагрузка должна распределяться между установленными котлами из условия равенства производных расходов топлива по теплопроизводительностям котлов по методике, описанной в [1]. Поэтому можно определить выработку тепла каждым котлом.

Рассмотрим процесс горения твердого топлива в котле при его периодической загрузке. Его можно разбить на три этапа:

- 1) разогрев топлива и испарение содержащейся в нем влаги;
- 2) разгорание топлива
- 3) сгорание топлива

Количество тепла, требуемое для разогрева топлива и испарения влаги равно:

$$Q_1 = Q_{\text{разогр}} + Q_{\text{нагр. вод}} + Q_{\text{испар}} + Q_{\text{нагр. пар}}$$

где $Q_{\text{разогр}} = m \cdot c_t \cdot (t_{\text{гор}} - t_{\text{топ}}) \cdot (1 - W)$ - количество тепла, необходимое на нагрев топлива до температуры горения, кал; $Q_{\text{нагр. вод}} = W \cdot m \cdot c_g \cdot (100 - t_{\text{топ}})$

- количество тепла, требуемое для нагрева воды до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, кал;
 $Q_{\text{испар}} = W \cdot m \cdot r$ - количество тепла, необходимое для испарения воды, кал;
 $Q_{\text{нагр пар}} = W \cdot m \cdot (t_{\text{ух}} - 100)$ - количество тепла, необходимое для нагрева пара до температуры уходящих газов, кал; m – масса загруженного топлива, кг; W – процент влаги в топливе; $c_{\text{в}}$ – удельная теплоемкость воды, кал/кг $\cdot^{\circ}\text{C}$; $c_{\text{п}}$ – удельная теплоемкость пара, кал/кг $\cdot^{\circ}\text{C}$; r – удельная теплота парообразования, кал/кг; $t_{\text{ух}}$ – температура уходящих газов, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{гор}}$ – температура горения топлива, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{топ}}$ – температура загружаемого топлива, $^{\circ}\text{C}$.

При этом хотя пар и нагревается до температуры горения топлива, часть своей энергии он возвращает обратно, и покидает котел при температуре уходящих газов. Поэтому в выражении $Q_{\text{нагр пар}}$ участвует именно температура уходящих газов.

На первом этапе вновь заброшенное топливо забирает часть тепла, выделяемого уже горящим топливом.

Примем, что тепло отбирается равномерно, тогда поглощаемая мощность на первом этапе будет равна:

$$P(t) = \frac{Q_1}{t_1},$$

где t_1 – длительность первого этапа, $0 \leq t \leq t_1$

На втором этапе заброшенное топливо постепенно разгорается.

Примем, что разгорание происходит одинаково по ширине слоя, а скорость разгорания постоянна. При этом разгоревшееся топливо начинает сгорать и выделять тепловую энергию.

Скорость сгорания топлива пропорциональна массе горящего топлива:

$$G = k \cdot m_{\text{гор}},$$

где k – коэффициент скорости сгорания топлива, определяющий какая часть горящего топлива сгорает за единицу времени.

Масса горящего топлива на этом этапе увеличивается в связи с разгоранием части загруженного топлива и уменьшается в связи с полным сгоранием части горящего топлива.

Этот процесс описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{dm_{\text{гор}}}{dt} = v - k \cdot m_{\text{гор}}$$

В результате решения данного уравнения, получим:

$$m_{\text{гор}}(t) = \frac{v}{k} + \left(m_{\text{гор}0} - \frac{v}{k} \right) \cdot e^{-k(t-t_1)}$$

где v – скорость разгорания топлива, кг/с; $m_{\text{гор}0}$ – количество загруженного топлива, кг.

Тогда выделяемая мощность на втором этапе

$$P(t) = qG = q \cdot k \cdot \left(\frac{v}{k} + \left(m_{\text{гор}0} - \frac{v}{k} \right) \cdot e^{-k(t-t_1)} \right),$$

где q – высшая теплота сгорания топлива, ккал/кг; t_2 – время окончания второго этапа; $t_1 \leq t \leq t_2$.

На третьем этапе происходит только сгорание топлива.

Этот процесс описывается уравнением:

$$\frac{dm_{\text{гор}}}{dt} = -km_{\text{гор}}.$$

В результате его решения, получим

$$m_{\text{гор}}(t) = m_{\text{гор}1} \cdot e^{-k(t-t_2)},$$

где $m_{\text{гор}1}$ – масса горящего топлива в начале данного этапа.

Соответственно мощность, выделяемая на третьем этапе:

$$P(t) = q \cdot k \cdot m_{\text{гор}1} \cdot e^{-k(t-t_2)}$$

Загрузка топлива в топку происходит неоднократно, поэтому описанные этапы повторяются для каждой загрузки. По выведенным зависимостям были произведены расчеты процесса горения топлива в топке котла. При этом определялись относительная тепловая мощность $\bar{p}/\bar{p}_{\text{max}}$, выделяющаяся в топке котла и относительная масса топлива $\bar{m}/\bar{m}_{\text{max}}$, находящегося в топке котла. Данные зависимости приведены на рисунке 1.

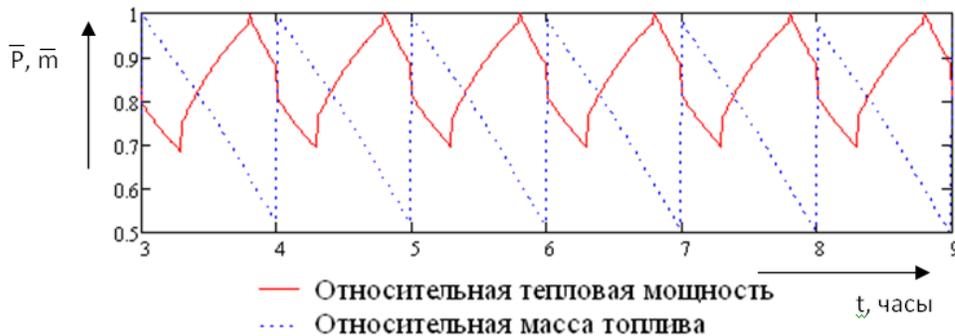


Рис.1. Зависимость относительной тепловой мощности, выделяемой при сгорании топлива, и относительной массы топлива в топке котла от времени

В расчетах принималось, что загрузка происходит каждый час, масса забрасываемого топлива равна 50 кг, $k=1,67$, $v = 33,3$. При указанных значениях после выхода системы на периодический режим выделяемая мощность изменяется в пределах 70-100% от максимума, а масса топлива в топке в пределах 50-100%. При других значениях параметров диапазон изменения указанных характеристик может отличаться.

Выработка тепла, обеспечиваемая котлом за отрезок времени $[t_1;t_2]$, определяется по формуле:

$$Q_{\text{кот}}(t) = \int_{t_1}^{t_2} P(t) \cdot \eta dt,$$

где η - коэффициент полезного действия котла.

Абсолютного равенства требуемого и вырабатываемого количества тепла в каждый момент времени достичь не удастся, так как количество вырабатываемого тепла меняется с периодом значительно меньшим, чем количество требуемого тепла. Поэтому нужно обеспечить, чтобы за каждый час общее количество вырабатываемого тепла было равно количеству требуемого тепла. И это можно сделать с помощью управления процессом загрузки топлива в котел.

Список литературы:

1. Практическое пособие по выбору и разработке энергосберегающих проектов. / В семи разделах. Под общей редакцией д.т.н. О.Л. Данилова, П.А. Костюченко, 2006, 668 с.
2. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей: Справочник / Манюк В.И., Каплинский Я.И., Хиж Э.Б. и др. М.: Стройиздат, 1988 - 432 с.

УДК 662.62

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ИЗ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ ЖИВОТНОВОДСТВА С НЕПРЕРЫВНОЙ ПОДАЧЕЙ СЫРЬЯ В ТОПОЧНУЮ КАМЕРУ

Даирбекова С.М., магистрант
Томский политехнический университет, г. Томск
E-mail: simba_aipet@mail.ru

В процессе хозяйственной деятельности человека накапливается огромное количество твердых и жидких органических отходов. Если тот же метан, образующийся из таких отходов не утилизировать, то огромное

его количество, попадающее в атмосферу, может способствовать глобальному потеплению климата.

На современном этапе развития производства важными являются вопросы энергоэффективности. При переработке органических веществ значительное количество от получаемого биогаза затрачивается на собственные нужды. Сократить эти потери можно оптимизировав (улучшив) тепловую изоляцию метантенка и привлекая нетрадиционные, возобновляемые источники тепловой энергии. Одним из таких источников является гелиоколлектор, которые для территории, например, Южного Казахстана в достаточной мере применимы.

По результатам анализа литературных источников была сформулирована математическая модель функционирования биогазовых установках, которая включает математическое описание следующих процессов: теплообмена в биореакторе (тенке), процесс превращения органического вещества (выбрана модель с одним промежуточным продуктом летучих жирных кислот), процесс перемещения биомассы в секциях биореактора, получение тепла от гелиоколлекторов и газового котла.

Список литературы:

1. Сорокин О.А. Переработка отходов сельскохозяйственных производств биоконверсией // Промышленная энергетика, 2005, №8.
2. Осадчий Г.Б. Гелиометантенк-реактор биогазовой установки.– Промышленная энергетика, 2006, №12

УДК 614.84

ОБ ОДНОМ ИЗ ВОЗМОЖНЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

Дементьев В.Ю., аспирант¹, Ткачев А.И., ст.н.с., к.т.н.²

¹Томский политехнический университет, г. Томск

²Томский государственный университет, г. Томск

Известно [1], что при горении твердых топлив (ТТ) достаточно часто происходит диспергирование тонкого, прогретого до высоких температур, приповерхностного слоя ТТ. Для анализа интенсивности протекания этого процесса до настоящего времени используются или экспериментальные данные или полуэмпирические выражения, полученные также по результа-

там обработки экспериментальных данных [1]. Физические и математические модели этого процесса не разработаны.

Целью настоящего исследования является формулировка по результатам анализа и обобщения известных экспериментальных данных физической и математической модели процесса диспергирования одиночной частицы из приповерхностного слоя нагретого до высоких температур натурального твердого топлива (угля) в условиях, соответствующих условиям топочных процессов котельного оборудования тепловых электрических станций.

При постановке задачи в приповерхностном слое ТТ выделяется область решения прямоугольной формы. Предполагается, что уголь представляет собой структурно-неоднородную среду, основными компонентами которой являются минеральная (неразлагающаяся в условиях высоких температур) и органическая части. Рассматриваются достаточно типичная структура элементарной (малой по размерам) области, состоящей из пяти основных элементов. Верхняя, нижняя и боковые границы области моделирования являются границами прямоугольных элементов малой толщины, представляющих собой непроницаемые фрагменты минеральной части (например окислы железа). Внутри области расположен пятый элемент прямоугольной формы – органическая часть топлива, разлагающаяся при нагреве до высоких температур с образованием газообразных и твердых продуктов термического разложения. Сформулирована физическая модель процесса тепломассопереноса в такой «ячейке» твердого топлива в условиях интенсивного подвода теплоты. При достижении температуры начала термического разложения органической части ТТ начинается его пиролиз, скорость которого экспоненциально зависит от температуры. Газообразные продукты термического разложения накапливаются в пористой структуре рассматриваемой «ячейки» ТТ. поры образуются неравномерно по всей органической части топлива. По мере удаления от поверхности нагрева пористость уменьшается. В результате интенсивного газоприхода в замкнутом объеме, ограниченном непроницаемой минеральной частью, растет внутрипоровое давление. На элемент «ячейки» ТТ, разделяющий внешнюю (топочную) среду и пористую часть твердого топлива, действуют напряжения, обусловленные перепадом давления. Если эти напряжения превышают предел прочности ТТ при соответствующей температуре происходит разрушение одиночного фрагмента приповерхностного слоя топлива – диспергирование.

Сформулированная физическая модель в целом имеет много общего с одной из моделей термомеханического разрушения теплозащитных материалов в высокотемпературных газовых потоках [2].

В связи с этим при записи системы уравнений, описывающих рассматриваемый процесс, использовались элементы математических моделей процессов теплопереноса в тепло- и огнезащитных материалах [3-6]. Модели [3-6] апробированы при решении группы достаточно сложных нелинейных задач математической физики, сформулированных для анализа не только работоспособности тепло- и огнезащитных материалов в условиях взаимодействия с высокотемпературными газовыми потоками [3-6], но и закономерностей зажигания жидких и твердых конденсированных веществ [7-9].

Математическая модель, описывающая процессы тепломассопереноса в условиях, предшествующих диспергированию приповерхностных слоев твердых топлив включает нестационарные нелинейные уравнения энергии для каждого из пяти элементов рассматриваемой системы, уравнения неразрывности и состояния для газообразных продуктов термического разложения, краевые условия и дополнительные соотношения [3-6] для характеристик изменяющейся с ростом температуры органической части топлива.

Список литературы:

1. Ассовский И.Т. Физика горения и внутренняя баллистика. –М.: Наука, 2005. – 357с.
2. Полежаев Ю.В., Панкратов Б.М., Рудько А.К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками. –М.: Машиностроение, 1976. – 228с.
3. Strakhov V.L., Garashchenko A.N., Kuznetsov G.V., Rudzinskii V.P. Mathematical simulation of thermophysical and thermo chemical processes during combustion of intumescent fire-protective coatings// Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2001. Т. 37. № 2. С. 178-186.
4. Кузнецов Г.В., Рудзинский В.П. Высокотемпературный тепломассоперенос в слое кокса теплозащитных материалов.// Теплофизика высоких температур. 2000. Т. 38. № 4. С. 654.
5. Кузнецов Г.В., Рудзинский В.П. Высокотемпературный тепломассоперенос в слое бетона биологической защиты ядерных реакторов при критических тепловых нагрузках// Теплофизика высоких температур. 1999. Т. 37. № 5. С. 809.
6. Страхов В.Л., Гаращенко А.Н., Кузнецов Г.В., Рудзинский В.П. Тепломассообмен в тепло- и огнезащите с учетом процессов термического разложе-

- ния, испарения-конденсации, уноса массы и вспучивания-усадки.// Математическое моделирование. 2000. Т. 12. № 5. С. 107.
7. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Моделирование воспламенения жидкого вещества горячей частицей.// Химическая физика. 2009. Т. 28. № 5. С. 91-98.
 8. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное решение задачи воспламенения жидкого пожароопасного вещества одиночной "горячей" частицей.// Физика горения и взрыва. 2009. Т. 45. № 5. С. 42-50.
 9. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Математическое моделирование зажигания дерева хвойной породы наземным грозовым разрядом.// Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 17. № 3. С. 41-45.

УДК 544.478:-44

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НАНОПОРОШКОВ ОКСИДА МАРГАНЦА И ЖЕЛЕЗА НА ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ОПИЛОК

М.В.Жданова, А.В.Мостовщиков
Томский политехнический университет, г. Томск
E-mail: marina.zhdanova@mail.ru

В настоящее время потребность населения в энергии постоянно возрастает [1]. Актуальность использования традиционных источников энергии связана с рядом проблем: с ограниченными запасами нефтяных и газовых месторождений, с проблемами утилизации продуктов горения угля и газа, для атомных электростанций – с переработкой и хранением радиоактивных отходов, с экологическим ущербом от гидроэлектростанций. Поэтому актуально совершенствование традиционных возобновляемых и экологически безопасных источников энергии, среди которых практический интерес представляет использование отходов деревообработки [2]. Процесс их горения можно регулировать с помощью различных добавок, при этом повышая энергоэффективность данного процесса. Обычное сжигание не позволяет сделать этот процесс энергоэффективным и снизить содержание примесей вредных газов, загрязняющих атмосферу.

Целью настоящей работы являлся поиск добавок ряда неорганических веществ, обеспечивающих низкотемпературный беспламенный каталитический режим горения и увеличивающих полноту сгорания, снижающих содержание вредных газообразных выбросов.

В качестве объекта исследования были выбраны опилки березы, не содержащие смолистых веществ, наличие которых при сгорании снижает

воспроизводимость термических параметров. Размер частиц опилок составлял максимум 1 мм. Навеску опилок перемешивали с необходимым количеством добавки в сухом виде. Однородность полученного образца достигалась с помощью длительного процесса перемешивания с использованием шаровой мельницы. Для изучения влияния катализатора на процесс горения использовали четыре параметра химической активности горючих веществ [3]. Исследование процессов, протекающих при нагревании опилок проводили с помощью термоанализатора Q600 STD, совмещенного с масс-спектрометром (Научно-аналитический центр Томского политехнического университета). Масса анализируемой навески составляла около 10 мг, катализатор добавляли сверх 100%. Нагрев со скоростью 10°/мин проводили в атмосфере воздуха с отбором газообразных продуктов горения на анализ в масс-спектрометре. Диапазон регистрируемых масс составлял от 2 до 60 а.е.м.

В состав образцов 2 – 6 вводили каталитическую добавку $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MnO}_2$ (1:1), её содержание увеличивали с 0,5 до 3 мас.%. Процесс окисления опилок (рис. 1, рис. 2) с выделением теплоты происходил в три стадии: на первой стадии наблюдали взаимодействие кислорода воздуха с поверхностью частиц опилок. Когда первая стадия еще не закончилась, процесс горения переходил во вторую стадию, во время протекания которой горение распространялось в объем частиц опилок. На этой стадии окислялись все оставшиеся органические соединения и одновременно происходило термическое разложение древесины с образованием сажи (рис.1). На последней стадии происходило горение сажи (аморфного графита).

С учетом ранее проведенных исследований [4] действия катализаторов Fe_2O_3 и MnO_2 в настоящей работе было изучено действие комплексного катализатора, представляющего собой смесь Fe_2O_3 : MnO_2 = 1:1. При действии катализатора на опилки, как и при действии на образец опилок без добавок, также наблюдались три стадии процесса горения.

Для оценки влияния катализаторов на процесс окисления и для расчетов параметров химической активности были записаны термограммы (рис.1, 2) серии образцов опилок с добавками катализатора $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MnO}_2$. На рис. 1,2 представлены типичные термограммы образцов опилок.

Величины параметров отражают химическую активность всех горючих веществ и в работе использовались для определения реакционной способности опилок и смесей с различными катализаторами.

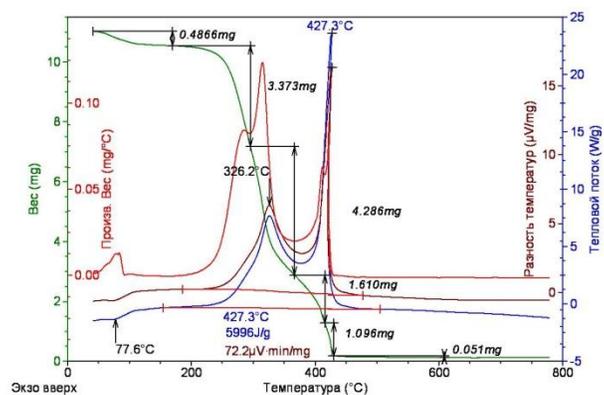


Рис. 1. Термограмма опилок без добавок (табл.1, образец №1)

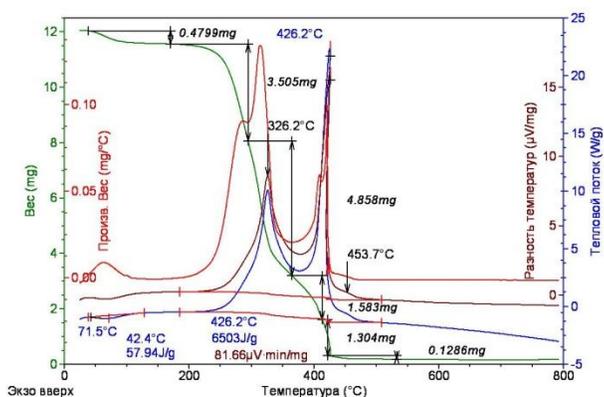


Рис. 2. Термограмма опилок с содержанием катализатора $Fe_2O_3 \cdot MnO_2$ 1,5 мас. % (табл.1, образец №3)

Таблица 1. Зависимость термических параметров смеси опилок от содержания катализатора

№ п/п	1	2	3	4	5	6
Температура начала окисления, °С	187,5	190,6	177,4	177,4	200, 0	200, 0
Температура max окисления, °С	326,2 427,3	326,2 423,0	325,0 425,0	326,2 426,2	329,4 421,2	329,4 421,7
Максимальная скорость окисления, мг	0,0046	0,0183	0,0144	0,0205	0,0217	0,1156
Относительная скорость горения, отн.ед	1,0	4,0	3,1	4,5	4,7	25,1
Тепловой эффект, Дж/г*	6612,4	7089,4	7052,5	7718,6	7710,7	7542,8
Относительный тепловой эффект, отн.ед.	1,00	1,07	1,07	1,17	1,17	1,14

Добавка катализатора, мас. %	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0
---------------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

* Тепловой эффект приведен к одной массе образца, равной 10 мг

Исходя из полученных данных, введение катализатора в смесь с опилками неоднозначно повлияло на температуру начала окисления, а именно, при содержании катализатора в количестве 1,0-1,5 мас.% происходило уменьшение температуры примерно на 10 °С (табл.1). Тем не менее, с увеличением содержания добавки катализатора от 2,0 до 3,0 мас.% происходил рост температуры начала окисления также на 10 °С. Максимальная скорость горения опилок достигалась при максимальном содержании катализатора: она увеличилась в 25,1 раза. Тепловой эффект также возрос, его величина проходила через максимум от содержания катализатора и составляла 1,17 раза в сравнении с тепловым эффектом опилок без катализатора. Дальнейшее увеличение содержания катализатора приводило к уменьшению теплового эффекта (табл.1). Таким образом, оптимальное содержание катализатора составляло 1,5 – 2.0 мас.%.

Выводы

1. Экспериментально установлено, что при введении каталитических добавок MnO_2 и НП Fe_2O_3 наблюдалось увеличение удельной теплоты сгорания березовых опилок на 17% за счет более оптимальных условий сгорания.
2. Катализатор способствует протеканию процесса горения древесных опилок с высокой скоростью и с более высоким тепловым эффектом сгорания, протекающем в две стадии.

Список цитированной литературы:

1. Energy for the Future Renewable Sources of Energy. White Paper for a Community Strategy and Action Plan.COM (97)599 final (26/11/1997) 54p. Bruxelles,1997.
2. Парфенов В.И. «Утилизация отходов лесной промышленности». Изд-во «Уральский рабочий» М. – 1993, 59 с.
3. Ильин А.П., Яблуновский Г.В, Громов А.А. Об активности порошков алюминия// Физика горения и взрыва. 2001.Т.37.№4.С.58-62.
4. Жданова М.В., Мостовщиков А.В., Зависимость состава газообразных продуктов от режимов горения древесных опилок// Новые материалы, химические технологии и реагенты для промышленности, медицины и сельского хозяйства на основе нефтехимического и возобновляемого сырья: Материа-

лы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2011. С. 91-94.

УДК 621.128

ОДИН ИЗ СПОСОБОВ УМЕНЬШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ПРИ СЖИГАНИИ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

Жуйков А.В. аспирант
Политехнический институт СФУ, Красноярск
E-mail: a.v.zhuikov@mail.ru

После экономически обоснованной реконструкции котла БКЗ-75-39ФБ, работающего на Канско-Ачинских бурых углях, на ООО «КраМЗЭнерго» г.Красноярска, а точнее, ввода сопла нижнего дутья, удалось снизить выбросы NOx на 25-40% без увеличения потерь q_4 .

Основное отличие предлагаемого способа от классической схемы заключается в том, что эффект снижения температуры топочных газов получен за счет воздействия двух факторов. Во-первых, созданием в топочном объеме турбулентных пульсаций с большой глубиной зоны перемешивания за счет взаимодействия струи топливно-воздушной смеси с плоской струей вторичного дутьевого воздуха, направленного под углом к аксиальной оси факела. Такое взаимодействие привело к размыванию факела по объему топки и созданию циркуляционных потоков, включивших в работу объем «холодной воронки» топочной камеры. В процессе перераспределения факела температура его ядра уменьшилась, что повлияло на выход оксида азота. Второй фактор связан с обдувом устья факела потоком газа из холодной воронки, когда газ из «холодной воронки» охлаждает начальный участок факела. Такое взаимодействие кроме гидродинамической неустойчивости приводит к неустойчивости, обусловленной эффектом термоэмиссии, сопровождающимся возникновением турбулентных вихрей значительно меньших размеров, заполняющих циркуляционные потоки в объеме топки. Подвод окислителя и отвод продуктов реакции горения в данном случае более эффективен, чем в традиционной схеме, т.к. потери q_4 не увеличились [1,2].

Список литературы:

1. Пат. № 116203 Российская Федерация, МПК⁷ F23C 5/24 Низкоэмиссионная вихревая топка / А. В. Жуйков; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего про-

- фессионального образования «Сибирский федеральный университет». – 20111449438/06; заявл. 05.12.11; опубл. 20.05.2012, Бюл. № 14.
2. Жуйков, А. В., Способ уменьшения выбросов оксидов азота от котла БКЗ-75-39ФБ, работающего на ирша-бородинских углях / А. В. Жуйков, В. А. Кулагин, А. Ю. Радзюк // Промышленная энергетика, 2011. - № 8. – С. 9-11;

УДК 536.468

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ ЗАЖИГАНИЯ ДИСПЕРГИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРЕВЕ

Захаревич А.В., Мошков А.Г., магистрант
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск
bet@tpu.ru

Сухие диспергированные отходы лесопиления и деревообработки (опилки древесины) являются материалами высокой пожарной опасности [1]. Установлено, что возможно зажигание сухой диспергированной древесины одиночными нагретыми до высоких температур стальными частицами [2] при выпадении последних на поверхность слоя опилок. Показано [2], что предельные условия и времена задержки зажигания диспергированной древесины незначительно отличается от аналогичных характеристик типичного дистиллятного (дизельного) топлива [3]. В тоже время в реальной практике возможно образование не только нагретых до высоких температур частиц металлов, характеризующихся высокой теплопроводностью и объемной теплоемкостью. Высока вероятность образования частиц неметаллов (углеродистых, керамических, окислов металлов) с существенно отличающимися теплофизическими характеристиками. Но до настоящего времени не опубликованы результаты исследований, используя которые можно было бы оценить характеристики зажигания диспергированных пожароопасных материалов при воздействии одиночных частиц неметаллов.

Цель настоящей работы – экспериментальное изучение закономерностей зажигания сухой диспергированной древесины нагретыми до высоких (более 1000 К) температур керамическими частицами.

Исследования проводились на экспериментальной установке [4] по методике [5]. Опилки сосны с характерными размерами 0,5-1 мм, соответ-

ствующими отходами типичного лесопильного технологического процесса, предварительно в течение длительного времени высушивались до полного удаления влаги. Затем навеска исследовавшегося материала (≈ 20 г) помещалась в стеклянную емкость [6] малых размеров таким образом, чтобы толщина слоя диспергированной древесины составляла 3-3,5 мм на площади около 10 см^2 . Нагрев частиц керамики диаметром $d = 6 \cdot 10^{-3}$ м и толщиной $h = 3 \cdot 10^{-3} \div 7 \cdot 10^{-3}$ м проводился аналогично [4-6]. Затем частица, нагретая до запланированной температуры, сбрасывалась из камеры нагрева на поверхность слоя древесины. Для обеспечения достоверности результатов измерений проводилась серия опытов 5 \div 7 раз подряд при одинаковых условиях. Регистрация времени задержки зажигания проводилась аналогично [4,5]. Кривые построены в результате аппроксимации экспериментальных данных. Аппроксимационные зависимости получены методом наименьших квадратов. Систематическая погрешность определения τ_{ind} не превышала $\pm 1,5 \%$. На рисунке 1 приведены полученные в проведенных экспериментах значения τ_{ind} .

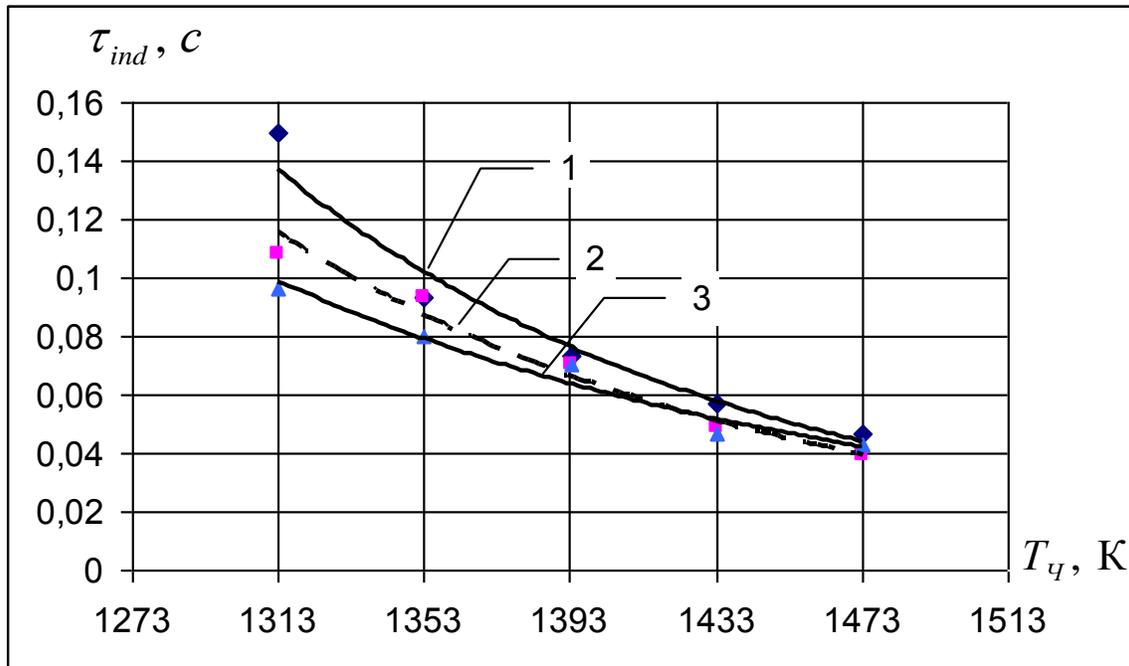


Рис.1. Экспериментальные зависимости времени задержки зажигания опилок из сосны от начальной температуры керамической частицы (1 – $d = 6 \cdot 10^{-3}$ м, $h = 3 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – $d = 6 \cdot 10^{-3}$ м, $h = 5 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – $d = 6 \cdot 10^{-3}$ м, $h = 7 \cdot 10^{-3}$ м).

На основании анализа проведенных экспериментов можно провести уточнение физической модели зажигания пожароопасного диспергирован-

ного вещества при локальном нагреве, сформулированной в [2]. Зажигание древесины происходит в газовой фазе, но зона реакции расположена в непосредственной близости от поверхности нагрева. По существу, скорее всего, продукты пиролиза древесины реагируют с нагретым частицей воздухом в малой окрестности источника нагрева.

Следует отметить, что выпадение нагретых до высоких температур керамических частиц на поверхность монолитной древесины сосны (пластинки толщиной 2÷3 мм) приводило только к локальному обугливанию древесины в месте контакта с источником нагрева. Воспламенение вещества не происходило даже при значениях T_c более 1400 К. Полученные результаты могут быть следствием следующих причин. При выпадении нагретой до высоких температур частицы на поверхность слоя диспергированной древесины, размеры одиночных фрагментов (опилок) которой существенно меньше характерных размеров источника нагрева, осуществляется интенсивный подвод теплоты как непосредственно в древесину, так и в воздушные зазоры между отдельными фрагментами конденсированного вещества. Происходит быстрый прогрев одиночного фрагмента древесины и его термическое разложение. При этом энергия от этого фрагмента отводится плохо – воздух достаточно хороший теплоизолятор. Структура пористого слоя опилок, как правило, такова, что конвективный теплоперенос в этом слое практически невозможен – поры по существу замкнуты. В итоге происходит быстрый разогрев одиночного фрагмента до высоких температур, при которых древесина интенсивно разлагается с выделением газообразных продуктов (горючего для последующего взаимодействия с окислителем – воздухом).

При попадании же одиночной «горячей» частицы на поверхность, например, сухой доски механизм теплопереноса в рассматриваемой системе существенно отличается от выше описанного. Частица прогревает тонкий слой древесины, расположенной непосредственно под источником нагрева. Но теплопроводность даже сухой древесины многократно выше теплопроводности воздуха. Поэтому происходит интенсивный отвод теплоты по всем трем координатным направлениям из зоны непосредственного нагрева. Частица при этом остывает, снижается тепловой поток в прогретый слой древесины и его температура будет существенно ниже той, которая достигается при нагреве опилок. Соответственно ниже будет скорость пиролиза древесины и температура газообразных продуктов этого процесса. Условия зажигания не будут достигнуты.

Подводя итог выше изложенному можно сделать вывод, что локальные источники нагрева – одиночные нагретые до высоких температур частицы представляют пожарную опасность только для диспергированной сухой древесины, размеры одиночных фрагментов которой существенно меньше размеров источника нагрева. В этом случае возможно возгорание с последующим распространением пламени по слою опилок.

Список литературы:

1. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник : в 2 ч. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Пожнаука, 2004.
2. Кузнецов Г.В., Захаревич А.В., Максимов В.И., Мошков А.Г. Условия зажигания отходов деревообработки // Пожаровзрывобезопасность, Москва, 2012, Том 21-№5. С. 21-23.
3. Кузнецов Г.В., Захаревич А.В., Максимов В.И. Зажигание дизельного топлива одиночной горячей металлической частицей // Пожаровзрывобезопасность, Москва, 2008 - т. 17, - № 4. - С. 28-30.
4. Захаревич А.В., Кузнецов В.Т., Кузнецов Г.В., Максимов В.И. Зажигание модельных смесевых топливных композиций одиночной, нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, №5. С. 10-15.
5. Захаревич А.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И. О механизме зажигания бензина одиночной нагретой до высоких температур металлической частицей // Пожаровзрывобезопасность, 2008 – т. 17, – № 5. – С. 39-42.
6. Кузнецов Г. В., Стрижак П.А. Зажигание накаливаемой одиночной частицей жидких углеводородных топлив // Известия Томского политехнического университета, 2008. - т.312 - № 4. Энергетика. - с. 5-10.

УДК 536.468

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ
ЗАЖИГАНИЯ ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ УГЛЕЙ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ
НАГРЕВЕ**

Захаревич А.В., Огородников В.Н., магистрант
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск
bet@tpu.ru

Знание пожаровзрывоопасных свойств веществ является основой инженерных методов обеспечения безопасности зданий и сооружений, тех-

нологических процессов и оборудования, безопасности людей. Эти данные необходимы для разработки мер предотвращения возникновения пожаров и взрывов, а также для оценки условий их развития и подавления.

За 150 лет статистических наблюдений из недр Земли извлечено 33 % экономически доступной части разведанных запасов нефти, 14% газа и 9% урана, но только 4% углей[1]. Также в перспективе реальные источники нефти и газа перемещаются в труднодоступные районы, в зоны северных морей. Это вызывает многократный рост затрат, необходимость применения новых дорогостоящих технологий. Соответственно доступность эффективных энергоресурсов станет определять развитие антропогенной энергетики в ближайшее десятилетия. Исходя из этого, вопросы энергосбережения и энергоиспользования на промышленных предприятиях приобретают актуальное значение в связи с высокой стоимостью мазута, природного газа и твердого топлива, поэтому должны разрабатываться и реализовываться мероприятия по сокращению расходов топлива и теплоты на действующем и вновь проектируемом энергетическом и технологическом оборудовании с целью обеспечения конкурентоспособности выпускаемой продукции. Соответственно исследование процессов, протекающих при горении пылеугольного факела в топках котлов ТЭС – одна из наиболее актуальных проблем современной теплофизики [2].

Целью работы является экспериментальное исследование основных закономерностей и процессов зажигания угольной пыли одиночными нагретыми до высоких температур частицами.

Исследования проводились на экспериментальной установке [3] по методике [4]. Исследованное топливо: Уголь каменный марки ДР (зольность (Ad)% — 12-25; влажность, (Wrt)% — 10-20; летучие вещества, (Vdaf)% — 42-45, массовая часть серы, (Std)% — 0,5; низшая теплота сгорания (Qn) — 23 -27 МДж/кг). Результаты экспериментальных исследований закономерностей зажигания топлива «горячей» одиночной частицей металла представлены на рис. 1. Аппроксимационные кривые, получены методом наименьших квадратов. Левое предельное значение температуры на рисунке соответствует минимальному значению $T_{ч}=1040^{\circ}\text{C}$, при котором еще происходило зажигание угольной пыли. При дальнейшем снижении $T_{ч}$ зажигание исследуемого образца не происходило. Сопоставление экспериментальных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что увеличение характерного поперечного размера частицы в диапазоне от $3 \cdot 10^{-3}$ до $7 \cdot 10^{-3}$ м приводит к заметному изменению значения τ_{ind} при $T_{ч} = 1040^{\circ}\text{C}$ на 28%. При дальнейшем

увеличении начальной температуры частицы, времена задержки зажигания стремятся к одному значению и при более высоких температурах (более 1200°C), не зависят от размера частицы. Доверительные интервалы меняются в диапазоне от $\pm 0,023$ до $\pm 0,011\text{с}$.

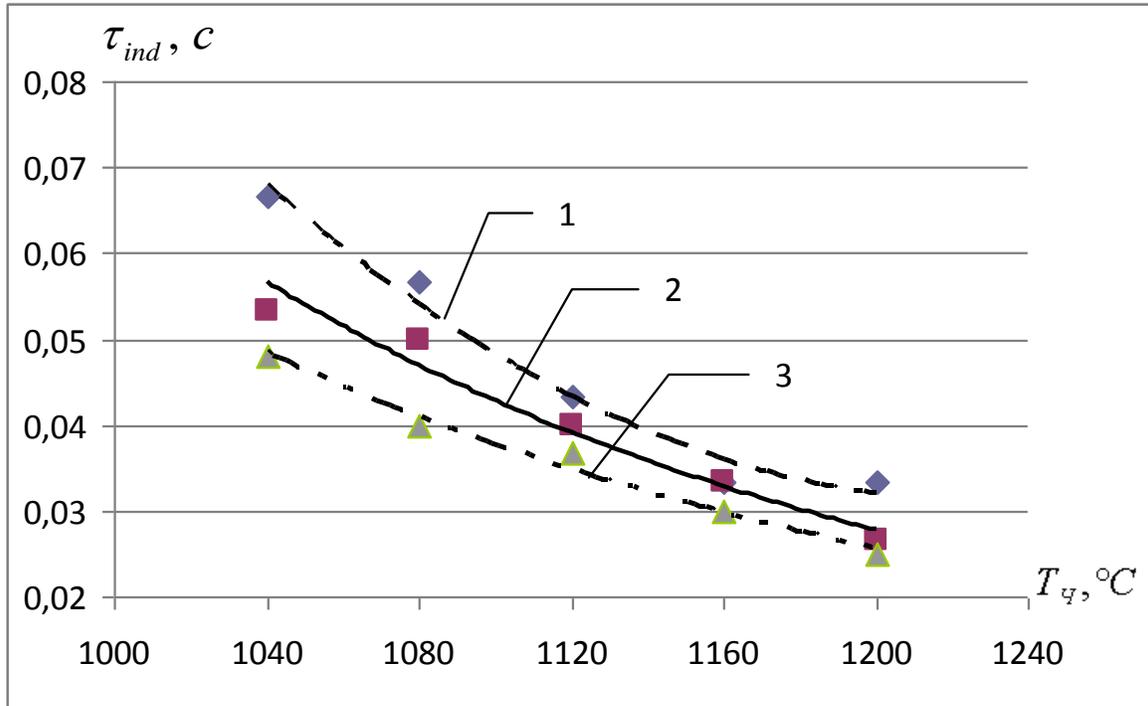


Рис.1. Экспериментальные зависимости времени задержки зажигания каменного угля ($d \leq 0,1 \cdot 10^{-3}$ м) от температуры металлической частицы (диаметр $d=6 \cdot 10^{-3}$ м, 1 – $h=3 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – $h=5 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – $h=7 \cdot 10^{-3}$ м).

На основании анализа результатов выполненных экспериментов можно сформулировать физическую модель зажигания угля одиночными нагретыми до высоких температур частицами.

Частица – источник зажигания при попадании на поверхность угольной пыли интенсивно охлаждается за счет теплоотвода как в вещество, так и в воздух с боковой и верхней поверхностями. В результате температура частицы падает и, соответственно, снижается тепловой поток в зону реакции. В процессе этого нагрева, еще до начала воспламенения, происходит термическое разложение органической массы топлива с выделением паро- и газообразных веществ, которые в значительной мере определяют условия воспламенения топлива. Исследования процесса зажигания показывают, что в момент воспламенения частица окружена облаком воспламененных летучих, причем начальные стадии горения представляют собой ярко

выраженный процесс выгорания летучих которые оказывают прямое влияние, определяя условия протекания процесса. Так как для большинства твердых топлив воспламенение начинается в газовой фазе уже выделившихся летучих, которые, быстро выгорая, резко поднимают температурный уровень процесса, обеспечивают устойчивое воспламенение и последующее интенсивное горение коксового остатка. Чем больше летучих содержится в исходном топливе, тем, при прочих равных условиях, быстрее происходит его воспламенение и тем интенсивнее оно выгорает, а особенно на начальных стадиях процесса. Условия нагрева частиц топлива оказывают решающее влияние на динамику выхода летучих. По существу анализ процесса воспламенения начинается с определения характера частиц топлива. Можно сделать вывод, что в рассматриваемых условиях справедливы гетерогенные реакции газофазной модели зажигания твердого топлива. Процесс остывания является существенно нестационарным, и в результате механизм процесса зажигания угля одиночной частицей существенно отличается от аналогичных механизмов для конвективного, лучистого и кондуктивного (массивное тело) источников нагрева. Это отличие наиболее ярко проявляется в том, что времена задержки зажигания КВ одиночными частицами не могут составлять (как для массивного тела) десятков секунд при относительно низких температурах. Если зажигание КВ массивным телом может реализоваться и при $T < 450$, то в условиях частицы это невозможно. Соответственно на время задержки зажигания влияют и размеры частицы. Чем больше ее поперечный характерный размер, тем меньше τ_{ind} .

На основании анализа результатов выполненных экспериментов сформулирована физическая модель зажигания измельченного угля одиночными нагретыми до высоких температур частицами. Установлено, чем ближе по своим размерам частица к массивному телу без ограничений по второй координате, тем меньше время задержки зажигания.

Список литературы.

1. Дахин С.В. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: учеб.пособие/С.В. Дахин. Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2010. 182 с.
2. Макаров А.А. Проблемы и перспективы развития топливно-энергетического комплекса России // Энергоэффективность: Тезисы докладов Междунар. науч.-техн. конф. (6 -8 октября 2008 г., Киев, Украина). – Киев: Институт газа НАНУ, 2008. С. 7 – 10.

3. Захаревич А.В., Кузнецов В.Т., Кузнецов Г.В., Максимов В.И. Зажигание модельных смесевых топливных композиций одиночной, нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, №5. С. 10-15.
4. Захаревич А.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И. О механизме зажигания бензина одиночной нагретой до высоких температур металлической частицей // Пожаровзрывобезопасность, 2008 – т. 17, – № 5. – С. 39-42.

УДК 544-971:452.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИОННОГО МЕХАНИЗМА ГОРЕНИЯ НАНОПОРОШКА АЛЮМИНИЯ В ВОЗДУХЕ ПРИ УМЕРЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

Звягинцева Е.С., Роот Л.О., к.т.н.

Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: genja_zwjjan@mail.ru

Экспериментально установлено образование самостоятельных кристаллических фаз нитридов при сгорании в воздухе нанопорошка (НП) алюминия [1], что показало возможность синтеза нитридсодержащих керамических порошков в воздухе. Согласно расчетам [2] нитрид алюминия может образовываться в качестве промежуточного продукта горения, но обязательно должен окисляться до оксида. Стабилизация нитрида возможна в случае протекания фильтрационного эффекта, но даже в поверхностном слое сгоревших продуктов нитриды обнаруживаются с помощью рентгенофазового анализа. Другим механизмом образования нитрида алюминия является вытеснение азотом кислорода из субоксида алюминия (Al_2O) при 2000 – 2400 °С [3]. Критерием возможности или невозможности протекания реакции является величина изобарно-изотермического потенциала (энергии Гиббса, ΔG). Термодинамически разрешенный ($\Delta G < 0$) экзотермический процесс горения алюминия и формирование фазы оксида тормозится и приводит к стабилизации фаз нитридов. Ранее [4], было показано, что выход нитрида алюминия может быть повышен путем изменения условий горения. Одним из способов повышения выхода нитрида алюминия является увеличение массы навески при горении. С увеличением массы образцов исходного НП алюминия, содержание нитрида алюминия в продуктах сгорания увеличивается, содержание остаточного алюминия антибатно содержанию нитрида алюминия. Содержание нитрида алюминия не достигает максимума и имеет тенденцию к росту с увеличением массы

исходного НП алюминия. Соотношение оксид/нитрид $\sim 1/3$ в продуктах сгорания в стационарной области меняется слабо при увеличении массы образцов. Рассчитанная по составу продуктов сгорания степень превращения исходного алюминия в продукты (без учета недогорания) показывает, что во всем диапазоне масс образцов алюминий реагирует преимущественно с азотом. Самостоятельная фаза нитрида алюминия в продуктах сгорания является основной (по результатам РФА), начиная с массы исходных образцов 1,0 г. Рефлексы оксида алюминия проявляются на рентгенограммах, но максимальная относительная интенсивность 100-процентного рефлекса не превышает 30 % по отношению к 100-процентному рефлексу нитрида алюминия.

Согласно полученным данным, ограничение доступа воздуха позволяет увеличить содержание связанного азота в конечных продуктах горения (на 13,2 мас. % в пересчете на нитрид алюминия). Снижение давления в результате преимущественного выгорания кислорода воздуха должно приводить к быстрому затуханию процесса: НП алюминия устойчиво горит в среде азота лишь при избыточном давлении 203 кПа и более. В то же время снижение давления должно способствовать протеканию реакций в газовой фазе (по правилу Ле-Шателье) при горении НП алюминия в воздухе. Рентгенофазовый анализ продуктов показал, что относительная интенсивность рефлексов фазы нитрида алюминия возрастает при сжигании в бомбе по сравнению с рефлексами нитрида алюминия, при сжигании в условиях свободного доступа воздуха.

Согласно предварительным исследованиям, добавки некоторых веществ в НП алюминия могут повышать содержание нитрида алюминия в продуктах сжигания НП [2]. Добавки порошков d-металлов к НП алюминия и прерывание горения их смесей приводят к росту соотношения $AlN:Al_2O_3$ и $AlN:Al_3O_3N$: если в промежуточных продуктах горения НП алюминия оно равно 2,9:1,0 и 1,6:1,0, соответственно, то для смесей с порошком хрома оно достигает 5,2:1,0 и 4,5:1,0; с НП молибдена – 5,5:1,0 и 3,2:1,0; с НП вольфрама – 5,0:1,0 и 2,8:1,0. Продукты горения исследуемых смесей содержат больше нитрида алюминия в сравнении с содержанием оксинитрида алюминия. Образование нитрида алюминия в качестве самостоятельной кристаллической фазы предполагает взаимодействие алюминия в объеме пространства и в течение определенного времени только с азотом, а оксинитрид, по-видимому, является продуктом окисления нитрида алюминия. Повышенный выход нитрида алюминия относительно выхода оксида алюминия позволяет сделать заключение о том, что в присут-

ствии добавок Cr, Mo, W, на начальной стадии горения алюминий в основном реагирует с азотом, а не с кислородом воздуха. При полном сгорании алюминия без добавок выход нитрида алюминия составляет около 50 мас. %, а с добавками – выход увеличивается примерно в 1,5 раза. В то же время, образование нитрида алюминия в газовой фазе является эндотермическим процессом, поэтому необходимо принять, что значительная часть γ - Al_2O_3 , образующаяся с большим экзоэффектом, переходит в нитрид алюминия с эндоэффектом. Учитывая, что практический выход нитрида алюминия с добавками достигает только 66 %, значительная часть нитрида алюминия, как промежуточного продукта, переходит в оксиды алюминия. Полученные результаты позволяют экспериментально показать, что часть нитрида алюминия доокисляется при полном горении, а с помощью добавок изучаемых d-металлов и прерывания горения можно увеличить относительное содержание нитрида алюминия в шихте [4].

Целью данной работы являлось рассмотрение процессов фазообразования при горении нанопорошка алюминия в воздухе с позиций возможных флуктуаций термодинамических характеристик и структуры в наночастицах алюминия.

Процесс горения НП алюминия в воздухе протекает в две стадии: в течение 20–80 с по поверхности свободнонасыпанного НП алюминия распространяются тепловые волны с невысокой температурой (800–900 °С). Затем процесс горения самопроизвольно переходит во вторую стадию: горение сопровождается ярким свечением, которое протекает в течение 30–50 с. На этой стадии температура продуктов горения достигает 2000–2400 °С. Уже на первой стадии заметны флуктуации температуры в поверхностном и приповерхностном слоях образца: тепловые волны могут несколько раз проходить через одну точку поверхности НП алюминия. Более существенными являются высокотемпературные колебания скорости окисления и эмиссии излучения от горящего образца: флуктуация температуры достигает ± 200 °С [5]. При нагревании НП алюминия в атмосфере азота (рис.2.) процесс окисления алюминия наблюдается выше температуры плавления алюминия (660 °С) и с высокой скоростью происходил в интервале температур 730–750 °С. При этом следует отметить, что процесс окисления НП алюминия в азоте протекает плавно: масса образца монотонно возрастает, при тепловыделении колебательных процессов не наблюдается (рис. 2.). Согласно термограмме (рис. 2.) процесс взаимодействия алюминия с азотом, в отличие от взаимодействия с кислородом, тре-

бует более высокой энергии активации, но не сопровождается колебательными процессами.

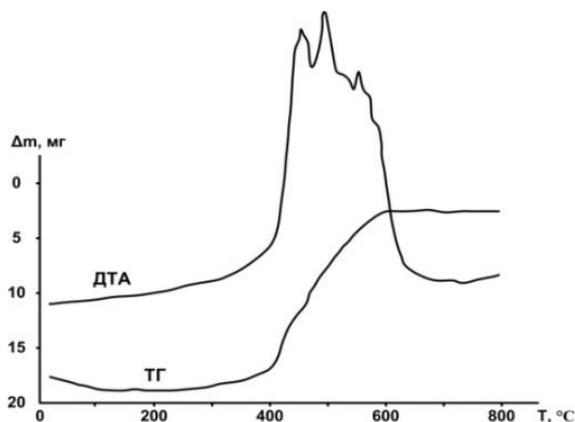


Рис. 1. Дериватограмма нанопорошка алюминия в атмосфере воздуха ($m = 50$ мг, скорость нагрева – 10 град/мин, тигель – платина).

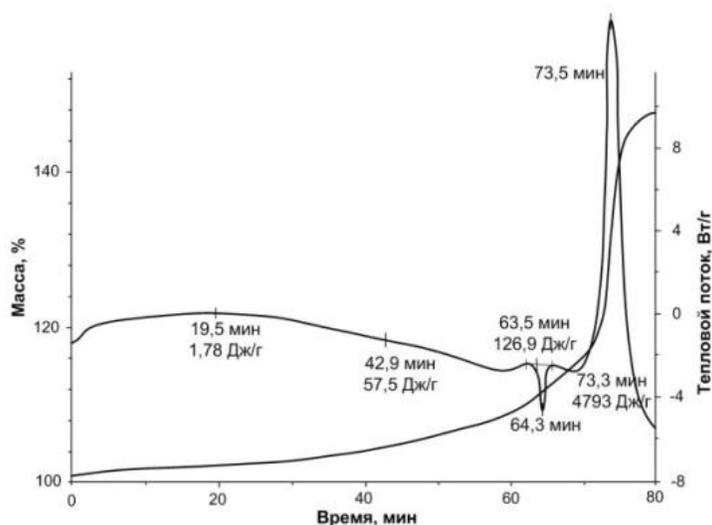


Рис. 2. Термограмма нанопорошка алюминия в атмосфере азота (масса образца – 10 мг, скорость нагрева – 10 град/мин).

Выводы

1. Для вытеснения кислорода азотом необходимы флуктуации термодинамических параметров промежуточных продуктов горения нанопорошка алюминия, характеризующихся изменением ΔG на 2000 кДж/моль. В настоящее время в химии неизвестны флуктуации вещества с такой энергетикой.

2. Вероятность процессов вытеснения кислорода азотом даже с учетом возможных химических процессов ограничивается 1000 ± 200 кДж/моль.

Список литературы:

1. Ильин А.П., Громов А.А. Горение алюминия и бора в сверхтонком состоянии. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – 154 с.
2. Ильин А.П., Проскуровская Л.Т. Двухстадийное горение ультрадисперсного порошка алюминия в воздухе // Физика горения и взрыва. – 1990. – Т.26, №2. – С. 71–72.
3. Боборыкин В.М., Геремьякин В.М. и др. О влиянии азота на горение алюминия // Физика горения и взрыва. – 1983. – № 3 . – С. 22–29.
4. Звягинцева Е.С. Методы повышения выхода нитрида алюминия при горении порошкообразного алюминия в воздухе. – Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. отв. ред. О.Э. Оразов. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2011. – С. 97–100.
5. Смолуховский М. Границы справедливости второго начала термодинамики / УФН. – 1967. – Т.93, вып.4. – С. 724–748.

УДК 662.62

**ОБ ОДНОМ ИЗ ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА
ПОЛУЧЕНИЯ ТЕПЛОТЫ ИЗ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ
ЖИВОТНОВОДСТВА (ПТИЦЕВОДСТВА) И ЛЕСОПЕРЕРАБОТКИ**

Иримбетова Н.Р. магистрант.

E-mail: nukibaby@mail.ru

Томский политехнический университет, г. Томск

В настоящее время рост цен на энергоресурсы обусловили значительный интерес к использованию твердых отходов для получения теплоты. Интенсивно развиваются два основных направления утилизации твердых отходов – прямое сжигание и получением биогаза. Прямое сжигание отходов менее экологично. Технология получения сырого биогаза исключительно проста: (чаще всего отходы животноводства) складывается в ёмкость и изолируется без доступа воздуха. В течение нескольких дней бактерии расходуют остатки кислорода и переходят на анаэробный цикл, отходом которого является биогаз. Отделение биогаза от исходного сырья трудностей не представляет, так как исходное сырьё является жидким либо

твёрдым. Отходов после производства биогаза нет, так как продукт переработки биогаза по сути, является органическим удобрением.

Целью настоящего исследования является моделирование получения теплоты путем применения биохимических технологий к твердым отходам животноводства (птицеводства) и лесопереработки в целях получения из них биогаза, который и используется как горючее.

По результатам анализа литературных источников для моделирования процессов тепломассопереноса в биореакторе выбранной цилиндрической формы с теплообменником сформулирована математическая модель процесса естественной (гравитационной) конвекции в приближении Буссинеска в [1]. Уравнения записываются в естественных переменных и включают уравнения движения, уравнение неразрывности и уравнение энергии с учетом теплообмена на стенках биореактора и нагревателя. Механическая смесь воды и твердых отходов рассматривается как простая (однокомпонентная) ньютоновская несжимаемая жидкость при постоянных вязкости, теплопроводности и теплоемкости. В сделанных предположениях система уравнений тепломассопереноса выглядит следующим образом:

уравнение сохранения количества движения:

$$\frac{\partial}{\partial t}(p\vec{U}) + \operatorname{div}(p\vec{U}) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad}\vec{U}) - \frac{\partial P}{\partial n} + \vec{g}\rho,$$

уравнение неразрывности:

$$\operatorname{div}(p\vec{U}) = 0,$$

Уравнение энергии:

$$c\rho \cdot \operatorname{div}(\vec{U}T) = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad}T),$$

где U —вектор скорости; μ — коэффициент динамической вязкости; T — текущая температура; P — давление; ρ — плотность; λ — теплопроводность; g — вектор ускорения свободного падения; c —теплоемкость жидкости.

Согласно приближение Буссинеска зависимость плотности от температуры учитывается лишь в одном слагаемом уравнений движения, а именно в слагаемом с объемной силой гравитации $\vec{g}\rho$. А в остальных местах, куда входит плотность, полагают

$$\rho = \rho_0 = \text{const.}$$

Температура в рассматриваемой расчетной области мало отклоняется от некоторого характерного для этой области среднего значения T_0 . Таким образом выражение для зависимости плотности от температуры записывается следующим образом:

$$\rho(T) = \rho(T_0) + \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_{T=T_0} (T - T_0)$$

Вводится коэффициент теплового объемного расширения β :

$$\beta = \frac{1}{\rho_0} \cdot \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_{T=T_0}$$

где $\rho_0 = \rho_0(T_0)$, то $\rho(T) = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)]$

С учетом этого система уравнений будет записана так:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{U}) + \text{div}(\rho \vec{U}) = \text{div}(\mu \text{grad} \vec{U}) - \frac{\partial P}{\partial n} + \rho_0 \vec{g}[1 - \beta(T - T_0)],$$

$$\text{div}(\rho \vec{U}) = 0, \text{div}(\rho \vec{U} T) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c} \text{grad} T\right)$$

Разделив на ρ_0 получим:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\vec{U}) + \text{div}(\vec{U}) = \text{div}(v \text{grad} \vec{U}) - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial n} + \vec{g}[1 - \beta(T - T_0)],$$

$$\text{div}(\vec{U}) = 0, \text{div}(\vec{U} T) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c \rho_0} \text{grad} T\right).$$

Здесь давление включает давление под газгольдером, гидростатическое давление и динамическое давление:

$$P = P_0 + \rho g z + P',$$

где z — текущая высота.

Тогда уравнение движения примет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\vec{U}) + \text{div}(\vec{U}) \\ & = \text{div}(v \text{grad} \vec{U}) - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial (P_0 + \rho_0 g z + P')}{\partial n} + \vec{g}[1 - \beta(T - T_0)]. \end{aligned}$$

Формулируются начальные и граничные условия. Для данной системы уравнений требуется задать граничные условия для трех переменных u, v, T , а также для поправки давления.

—для уравнений движения:

$$z=0, 0 < r < R, u=0, v=0;$$

$$z=H, 0 < r < R, u=0, v=0;$$

$$r=0, 0 < z < H, u = \frac{\partial v}{\partial r} = 0;$$

$$z=R, 0 < z < H, u=0, v=0;$$

$$z=R_C, z_1 < z < z_2, u=0, v=0,$$

где R_C —радиус цилиндрического теплообменника, расположенного соосно с реактором;

—для уравнения энергии:

$$z=0, 0 < r < R, -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = g_s; \frac{\partial(T-T_x)}{\partial z} = \frac{g_s}{-\lambda}$$

или в безразмерном виде, заменив переменные безразмерными величинами:

$$\bar{r} = \frac{r}{R}, \bar{z} = \frac{z}{R}, \bar{T} = \frac{(T - T_x)}{(T_2 - T_x)};$$

$$z = H, 0 < r < R, \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{z}} = \frac{g_n R}{-\lambda(T_2 - T_x)};$$

$$r = 0, 0 < z < H, \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{r}} = 0;$$

$$z = R, 0 < z < H, \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{z}} = \frac{g_e R}{-\lambda(T_2 - T_x)};$$

$$z = R_c, z_1 < z < z_2, T = T_2; \bar{T} = 1,$$

где R , H —радиус и высота реактора; R_c —радиус теплообменника; z_1, z_2 —вертикальные координаты начала и конца греющей поверхности; λ —теплопроводность жидкости, Вт/мК; q_s, q_n, q_e —удельный тепловой поток; Сформулированная математическая модель решается численным методом Патанкара [2].

Список литературы

1. Землянка А. А. Математическая модель гидродинамики и теплообмена в цилиндрическом ферментаторе биогазовой установки с погруженным в него цилиндрическим теплообменником // Альтернативная энергетика и экология журнал. 2009. №10. С. 79—84.
2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. Пер. с англ. / Под ред. Виленского. — М.: Энергоатомиздат, 1984. —152с.

УДК 544.452.2

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ НАНОПОРОШКА МОЛИБДЕНА НА СИНТЕЗ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ ПРИ СЖИГАНИИ НАНОПОРОШКА AL В ВОЗДУХЕ

Коновчук Т.В., Роот Л.О., Сморгина К.С.
Томский политехнический университет, г. Томск
E-mail: Konovchuk2008@mail.ru

Для синтеза нитрида алюминия наиболее широко используется карбо-термический метод: восстановление Al_2O_3 графитом в потоке азота при

1600 - 1800°C [1]. Длительное время считалось, что кислород в процессе синтеза нитридов ухудшает качество нитрида и снижает его выход [2]. Другим направлением в науке по химическому связыванию азота было создание восстановительной среды при низких температурах [3]. В работе [4] нитрид алюминия был получен путем сжигания НП алюминия на воздухе с использованием в качестве добавки нанопорошка Мо, но содержание добавки в смеси превышало 16,7 мас.%. Целесообразно было изучить влияние малых добавок нанопорошка молибдена для экономии дорогостоящей добавки.

Целью настоящей работы являлось определение выхода нитрида алюминия в конечном продукте сжигания в воздухе нанопорошка алюминия с добавкой нанопорошка молибдена (0,1 – 1,6 мас.%).

Использованные в работе НП металлов были получены в условиях электрического взрыва проводника (ЭВП) в среде аргона в установке УДП-4Г. Были рассчитаны по данным ДТА параметры активности [5] (температура начала окисления, степень окисленности, максимальная скорость окисления и удельный тепловой эффект) исходных НП и смесей НП Al с добавкой нанопорошка Мо. Состав конечных продуктов сжигания НП алюминия на воздухе, выход нитрида алюминия были определены с помощью рентгенофазового анализа. Для определения формы и размера частиц определяли при помощи сканирующей электронной микроскопии (JSM-740).

Параметры химической активности НП алюминия без добавок были определены на основе данных ДТА.

Исходя из полученной термограммы (рис.1), были рассчитаны параметры химической активности исходного нанопорошка алюминия без добавок, которые представлены в табл.1.

Таблица 1. - Параметры химической активности НП алюминия без добавок

№ п/п	Обозн. образца	m _{образца} , мг	T _{н.о.} , °C	Q _{max1} , Дж/г	α ₆₆₀ , %	α ₉₀₀ , %	V _{max} , мг/с
1	КС-0	4,806	400	12131	54,8	70,3	1,8

НП алюминия, полученный в условиях ЭВП и пассивированный малыми добавками воздуха, не проявляет пирофорных свойств и характеризуется относительно высокой температурой начала окисления (400 °C). При линейном нагреве свыше 400°C процесс окисления НП алюминия пе-

реходит в режим теплового взрыва. В процессе окисления НП алюминия условно можно выделить две стадии: до температуры плавления алюминия (660,1 °С) и выше данной температуры. Горение считается эффективным при окислении большей массы алюминия в ходе протекания первой стадии.

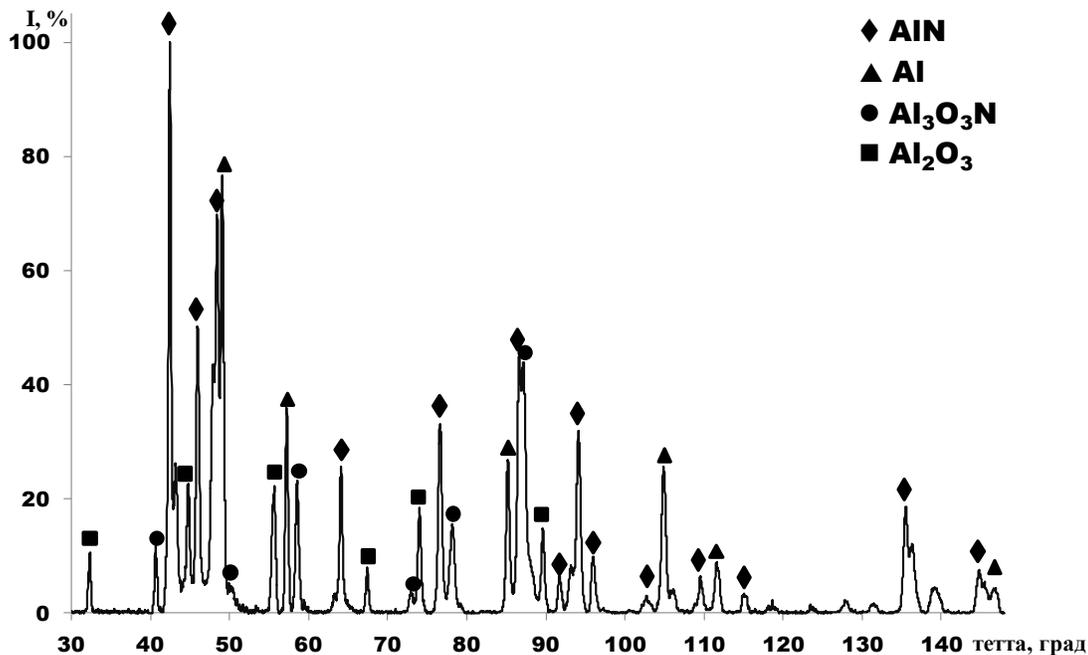


Рис.1. Рентгенограмма продуктов сгорания нанопорошка алюминия в воздухе

Согласно результатам РФА (рис.2), основной кристаллической фазой в продуктах сгорания НП алюминия без добавок является нитрид алюминия (также имеется фаза оксинитрида алюминия и гамма-оксида алюминия). Параметры химической активности смеси НП алюминия с НП Мо были рассчитаны из данных ДТА (рис.3) и представлены в таблице 2. В присутствии добавки НП Мо процесс окисления протекает с высокой скоростью (1,4 – 5,0 мг/с), которая снижается при увеличении содержания добавки.

Добавка НП Мо приводит к снижению температуры начала окисления НП алюминия, что, вероятно, связано с инициированием процесса на границе раздела $\text{Mo} - \text{MoO}_3$ и $\text{Al} - \text{Al}_2\text{O}_3$. Использование в качестве добавки НП Мо по данным РФА (рис.3) заметно снижает содержание остаточного НП алюминия (в 5 раз).

Образец: КС-103
 Размер: 4.9280 mg
 Метод: Ramp

DSC-TGA

Файл: C:\ТА\Результаты\Ильин А.ПКС-103
 Оператор: Mirozova T.
 Дата: 14-Сен-2011 09:45
 Прибор: SDT Q600 V20.9 Build 20

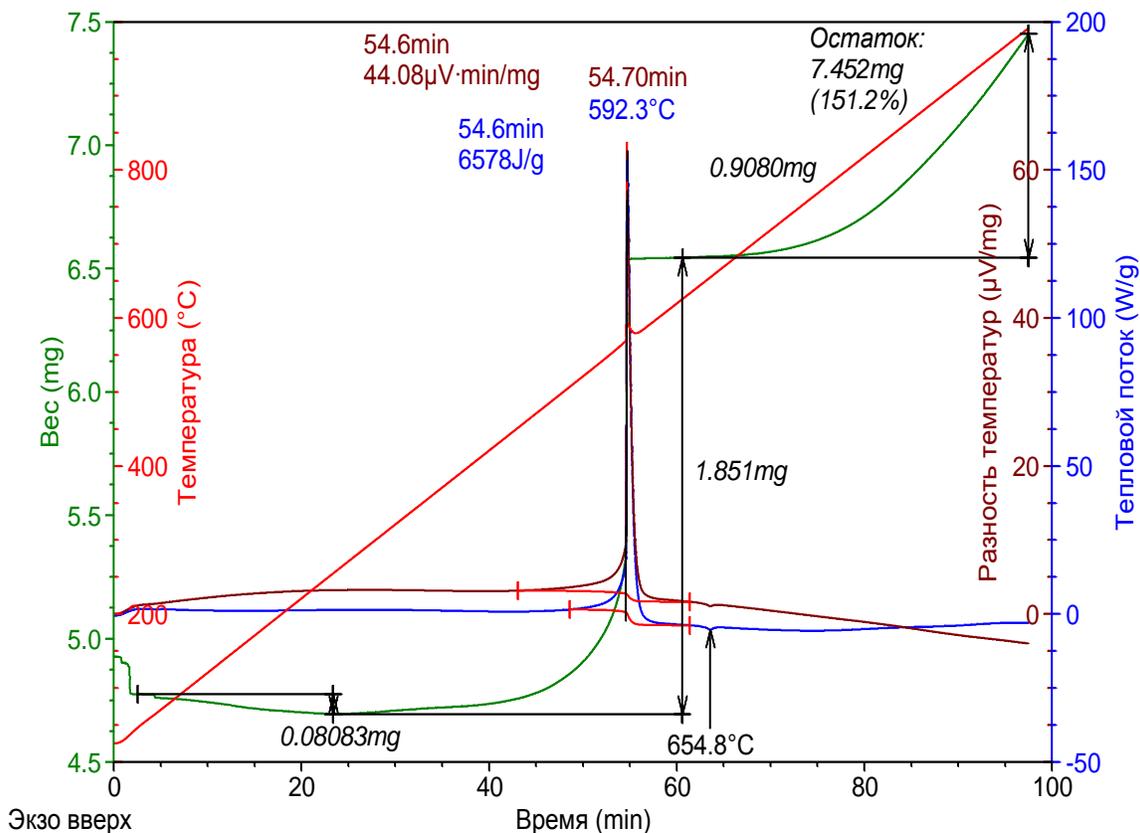


Рис.2. Термограмма НП алюминия с добавкой НП молибдена (0,2мас.%)

Таблица 2. - Параметры активности смеси НП алюминия с НП молибдена

№ п/п	Обозн. образца	m _{образца} , мг	T _{н.о.} , °C	Q _{max1} , Дж/г	α ₆₆₀ , %	α ₉₀₀ , %	V _{max} , мг/с
1	КС-000	4,806	400	12131	46,9	65,8	1,8
2	КС-101	5,303	380	7443	41,3	60,7	1,4
3	КС-102	4,870	350	8107	42,8	63,8	5,0
4	КС-103	4,928	270	6578	40,0	61,4	2,4
5	КС-104	5,062	350	5961	33,0	68,9	2,3
6	КС-105	5,071	325	5597	33,2	69,3	0,5

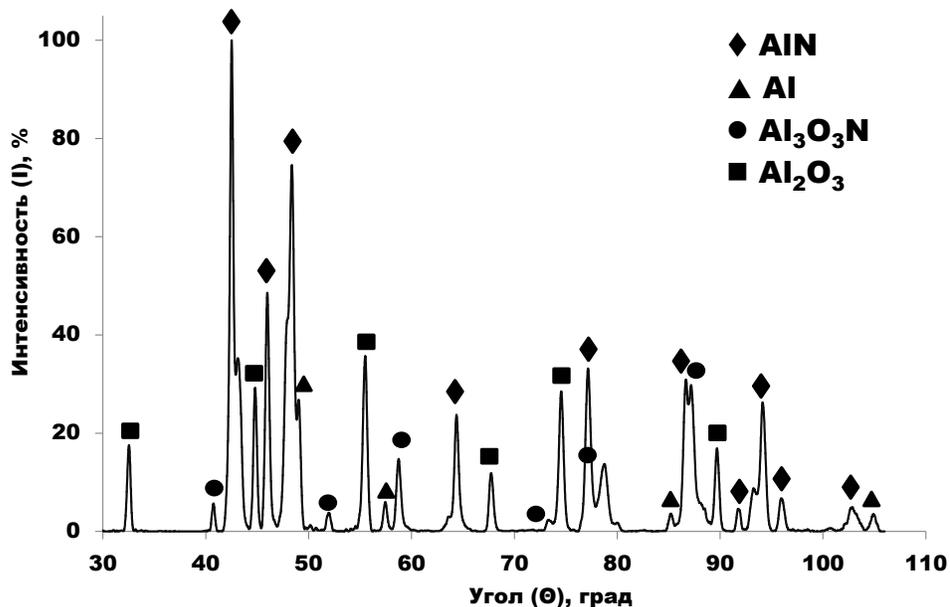


Рис.3. Рентгенограмма продуктов сгорания смеси НП алюминия с НП молибдена в воздухе (0,2 мас.%)

В то же время тепловой эффект (Q) при горении НП на первой низкотемпературной стадии в присутствии добавки НП Мо снижается с увеличением ее содержания. Вероятно, добавка НП Мо способствует протеканию процесса окисления на второй высокотемпературной стадии. По данным РФА продуктов сжигания НП Al с добавкой НП Мо (рис.3) основным продуктом горения также является нитрид алюминия (100% рефлекс).

Выводы:

1. Согласно результатам количественного РФА при малом содержании (0,1 – 1,6 мас.%) добавка НП Мо не приводит к повышению выхода нитрида алюминия: отношение содержания нитрида алюминия к содержанию оксида алюминия в конечном продукте практически не меняется и составляет 3,3/1.
2. По результатам ДТА, использование в качестве добавки НП Мо приводит к увеличению скорости горения НП алюминия с 1,8 мг/с до 5,0 мг/с

Список литературы:

1. Самсонов Г.В. Нитриды. Киев: Наукова думка. 1978. 356 с.
2. Чухломина Л.Н., Максимов Ю.М., Верещагин В.И. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез композиционных нитридсодержащих керамических материалов. Новосибирск: Наука. 2012. 260 с.

3. Денисов Н.Т., Кобелева С.И., Шестаков А.Ф. Механизм восстановления молекулярного азота до гидразина гидроксидом двухвалентного хрома // Кинетика и катализ. 1996. Т. 37. № 4. С. 528 – 533.
4. Ильин А.П., Громов А.А., Тихонов Д.В. и др. Свойства сверхтонкого порошка алюминия, стабилизированного диборидом алюминия // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37, № 4. – С. 58 - 62.
5. Толбанова Л.О., Ильин А.П. Формирование нитевидных кристаллов в промежуточных продуктах горения в воздухе нанопорошка алюминия и его смесей с нанопорошками молибдена и вольфрама // Известия ТПУ. 2007. № 2. С. 74 - 77.

УДК 662.62

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА FLUENT ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ТОПОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТИПИЧНОМ ДИАПАЗОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА

Корецкий Д.А., Фомичев А.С., Заворин А.С., д.т.н.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск

E-mail: koretskiy-d@yandex.ru

Программный комплекс FLUENT является универсальной программой, предназначенной для комплексного расчета аэрогидродинамических течений при наличии тепломассообмена, излучения, химических реакций в многофазных системах самой сложной геометрии.

Математическое моделирование топочных устройств является на сегодняшний день одним из важнейших способов получения наиболее представительной информации об аэродинамике, локальном и суммарном теплообмене. При существенном сокращении затрат на проведение экспериментальных и опытных работ на лабораторных установках и действующих котельных агрегатах, моделирование позволяет корректно изучать режимы работы топочных камер и оптимизировать процесс горения.

В данной работе представлены результаты численного моделирования процессов горения пылеугольного топлива и шлакования Т-образной топочной камеры котла П-67 блока 800 МВт.

Процесс моделирования состоит из двух основных этапов: моделирование параметров топочной среды и расчет скорости роста золовых отложений на экранах топки.

На первом этапе все топочные процессы, такие как аэродинамика, воспламенение, выгорание, теплообмен, химические реакции рассмотрены взаимосвязано и в едином комплексе. Принято, что газовая среда в топке состоит из химически инертных диоксида углерода CO_2 , молекулярного азота N_2 , паров воды H_2O , реагирующих кислорода O_2 и летучих веществ. Расчет траекторий движения твердых частиц угля был выполнен в Лагранжевой постановке. Для дисперсной фазы описывался теплообмен, определялись траектории частиц с использованием стохастической модели случайных блужданий в турбулентной среде.

В расчете принималось, что частица имеет сферическую форму и представляет собой смесь зольного остатка с коксом. Кроме того, она включает в себя влагу и горючие составляющие (летучие вещества). Для учета полидисперсности частиц была использована формула Розина-Раммлера. Учитывалась стадийность горения угольных частиц: прогрев до начала испарения влаги топлива, испарение влаги, выход летучих, горение коксового остатка, движение золового остатка (рис.1).

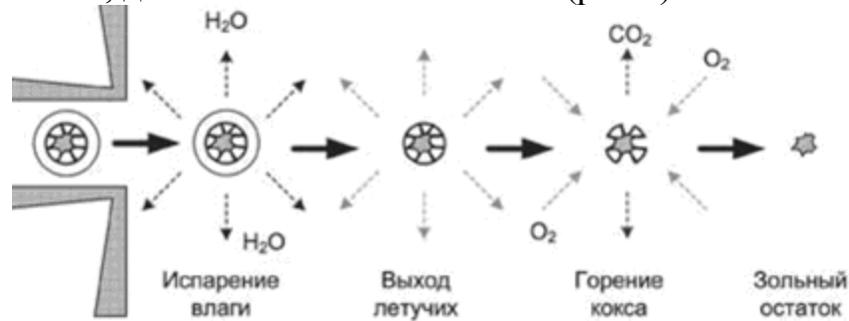


Рис.1. Стадии горения угольной частицы

На втором этапе рассчитывалась скорость роста золовых отложений на экранах топки. Расчет выполнен с применением UDF-функций, написанными на языке «С» и встроенными в программу FLUENT. UDF-функции используют дополнительные исходные данные: гранулометрический состав золы, химический состав золы и т.п. UDF-функции используют программу FLUENT в качестве источника исходных данных о месте столкновения частицы с экраном, температуре частицы в этот момент, компонентах скоростей и т.п. Численное значение скорости роста золовых отложений экспортируется в программу FLUENT для того, чтобы визуализировать и обрабатывать результаты расчёта штатными средствами программы FLUENT. Принято, что скорость шлакования пропорциональна

вероятности прилипания частицы к экрану, которая рассчитывается по модели захвата Уолша [1].

$$P_{\text{прилипания}} = \frac{m_{\text{отлож}}}{m_{\text{общ}}} = \min \left[\frac{\mu_{\text{крит}}}{\mu}, 1 \right],$$

где $\frac{m_{\text{отлож}}}{m_{\text{общ}}}$ – отношение массы “прилипших” частиц к общей массе;

μ – вязкость частицы; $\mu_{\text{крит}}$ – вязкость в критической точке, при которой частица считается “липкой”.

Зависимость вязкость-температура определяется по уравнению модели вязкости Браунинга[2]:

$$\log \left(\frac{\mu}{T - T_s} \right) = \frac{14788}{T - T_s} - 10.931,$$

где T – температура частицы, T_s – Температурный сдвиг.

Согласно статье [3] две вышеописанные модели расчета дают наилучшие результаты по сравнению с другими алгоритмами.

Численное моделирование показало, что аэродинамическая структура газовых потоков в топочной камере обладает высокой неравномерностью. Образующийся центральный вихрь инициирует вторичные вихри в углах топочной камеры, которые приводят к набросу потока на стенки топки, что приводит к шлакованию поверхностей нагрева (рис.2).

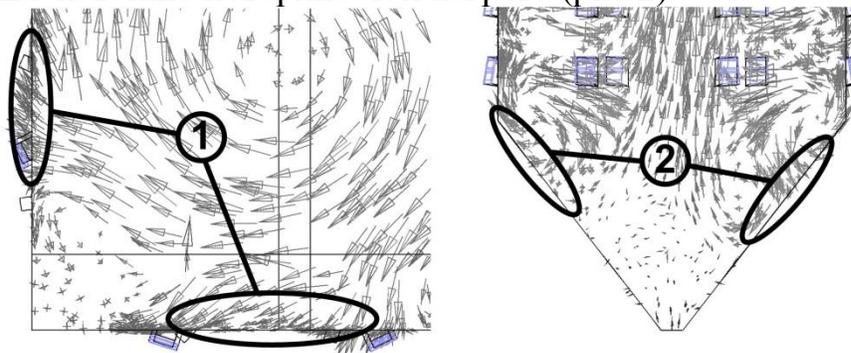


Рис.2. Наброс топочных газов:

1) между 1-м и 2-м ярусами горелок; 2) на скаты холодной воронки.

Также наблюдается интенсивное шлакование на скатах холодной воронки и в области около горелок, особенно по нечетным вертикальным рядам. Основной причиной является осаждение мелкой фракции золы. Данные частицы вовлекаются в движение вторичных вихрей в углах топочной

камеры. Обладая достаточно высокой температурой, частицы золы достигают экрана и образуют шлаковые отложения (рис.3).



Рис.3. Толщина слоя золовых частиц на экранах:

1) между 1-м и 2-м ярусами горелок; 2) на скатах холодной воронки

Моделирование шлакования экранов (рис.3) даёт результаты, качественно согласующиеся с натурными наблюдениями (рис.4).

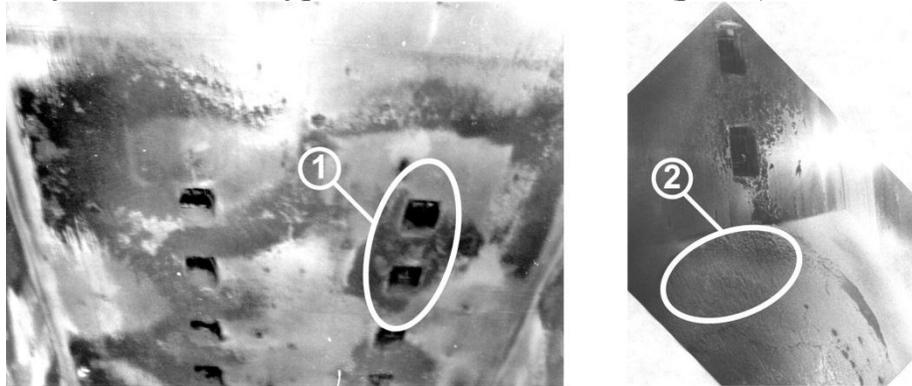


Рис.4. Шлакование экранов (натурные наблюдения [4]):

1) между 1-м и 2-м ярусами горелок; 2) на скаты холодной воронки

Однако количественная оценка образования отложений на экранах при сжигании берёзовского угля по модели Уолша–Браунинга показывает, что эффективная интенсивность образования отложений оказывается су-

щественно выше, чем в действительности, что говорит о необходимости применения более многофакторного механизма процесса шлакования при моделировании.

Таким образом, в данной работе проведено всестороннее численное исследование процесса горения с применением программы FLUENT. Получена полная картина газодинамических и тепловых процессов в топочном объеме, детальная информация о распределении тепловых полей, полей концентраций в газовой и дисперсной фазах на основании численного моделирования. При этом полученные значения основных теплотехнических характеристик топки согласуются с данными опытно-промышленных испытаний.

Список литературы:

1. Walsh, P.M., Sayre, A.N., Loehden, D.O., Monroe, L.S., Beer, J.M., Sarofim, A.F., (1990) "Deposition of Bituminous Coal Ash on an Isolated Heat Exchanger Tube: Effects of Coal Properties on Deposit Growth." *Progress in Energy and Combustion Science* 16: 327-346
2. Browning G.J., Bryant G.W., Hurst H.J., Lucas J.A., Wall T.F. (2003) "An Empirical Method for the Prediction of Coal Ash Slag Viscosity." *Energy & Fuels*. 17:731-737
3. Measurements and modeling of coal ash deposition in an entrained-flow reactor, by Ryan Blanchard, 2009, Brigham Young University, интернет-страница <http://contentdm.lib.byu.edu/ETD/image/etd2764.pdf>.
4. Васильев В.В. Результаты освоения сжигания канско-ачинских углей на ТЭС России // Горение твердого топлива: Матер. VI-й Всероссийской конф. "Горение твердого топлива" – Новосибирск, 2006.

УДК 536.46+532.685

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЗАЖИГАНИЯ ТОРФА РАЗЛИЧНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВНЕШНИМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА ОГРАНИЧЕННЫХ РАЗМЕРОВ

Р.Н. Кулеш, А.Н. Субботин
Томский политехнический университет
E-mail: ronikul@tpu.ru, subbot@inbox.ru

Торф имеет сложный химический состав, определяющийся условиями генезиса, химическим составом растений-торфообразователей и степенью разложения их органического вещества. Разнообразие условий образова-

ния торфа определяет многообразие областей его использования, структура которого приведена на рис. 1



Рис. 1. Структура комплексного использования торфа

В России учтено и частично разведано 65868 торфяных месторождений общей площадью 80,5 млн. га с запасами около 235 млрд. т или 47% от всех мировых запасов торфяного сырья, что делает торф особо важным и стратегически значимым сырьем, особенно учитывая ограниченность, а также приближающуюся исчерпаемость запасов традиционных горючих полезных ископаемых (нефть, газ, уголь) [1].

В целом технологию использования торфа, начиная с его добычи и заканчивая конечным продуктом, можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 2.



Рис. 2. Общая схема переработки торфа

Как показано на рис. 2, при использовании торфа для любых целей существует ряд общих операций, в основном связанных с добычей сырья и его подготовкой перед использованием. Эти операции характеризуются повышенной пожарной опасностью, т.к. из торфа выводится влага, в некоторых случаях способная сдерживать распространение торфяного пожара. На представленной схеме упомянутые операции помещены в заштрихованный прямоугольник.

Необходимо отметить, что степень пожароопасности торфа значительно выше, чем угля. Он легко самовозгорается и является горючим материалом, который может воспламениться от небольшого источника зажи-

гания [2, 3]. Зачастую при складировании торфа наблюдается его самовозгорание [4]. Причиной самовозгорания торфа являются взаимосвязанные биохимические, физические и химические процессы.

По другому сценарию происходит возгорание торфа от внешнего теплового источника. В большинстве случаев механизм рассматриваемого явления определяется тем, что вначале отдельные горячие очаги (электрическая, механическая или тепловая искра, горящая спичка, тлеющий окурок и т. д.) попадают на поверхность торфа. В случае если тепловой источник имеет достаточную энергию, может произойти возгорание торфа и заглубление очага горения, после чего тушение пожара становится более проблематичным, а в отдельных условиях и невозможным.

Известно, что влажность влияет на процессы воспламенения и горения, поэтому были проведены эксперименты по воспламенению нагретым телом образцов торфа различной влажности. Результаты экспериментальных исследований процессов теплообмена в слое торфа при его зажигании локальным источником тепла представлены на рис. 3. Получены значения времени задержки зажигания (t_3) торфа при различной его влажности. Все эксперименты проводились при минимальном запасе энергии источника зажигания, при которой происходило зажигание торфа во всех проведенных экспериментах. Так как, зная начальную температуру и размеры источника зажигания, можно определить начальную энергию источника, то при проведении экспериментов измерялась начальная и текущая температура источника зажигания и дополнительно в определенных точках слоя торфа. На представленных зависимостях начальная температура соответствует максимальному (стартовому) значению температуры кривая 1. Прочие кривые на рис. 3 показывают изменение температуры в слое торфа в определенных точках, местоположение которых известно. На рисунках введена следующая система обозначений координат термопар: \circ – $x=0$; $y=0$; $z=-2 \cdot 10^{-2}$, м; \blacktriangle – $x=2 \cdot 10^{-2}$; $y=0$; $z=-2 \cdot 10^{-2}$, м; \times – $x=2 \cdot 10^{-2}$; $y=-2 \cdot 10^{-2}$; $z=-2 \cdot 10^{-2}$, м; \blacksquare – $x=0$; $y=-2 \cdot 10^{-2}$; $z=-2 \cdot 10^{-2}$, м; \times – $x=-2 \cdot 10^{-2}$; $y=-2 \cdot 10^{-2}$; $z=-2 \cdot 10^{-2}$, м; \bullet – $x=-2 \cdot 10^{-2}$ м; $y=0$ м; $z=-2 \cdot 10^{-2}$, м; \square – $x=-2 \cdot 10^{-2}$, м; $y=2 \cdot 10^{-2}$; $z=-2 \cdot 10^{-2}$, м; Δ – $x=0$; $y=0$; $z=-4 \cdot 10^{-2}$, м; $-$ – $x=2 \cdot 10^{-2}$; $y=2 \cdot 10^{-2}$; $z=-2 \cdot 10^{-2}$, м; \diamond – $x=0$; $y=0$; $z=-2 \cdot 10^{-2}$, м; $*$ – $x=2 \cdot 10^{-2}$; $y=0$; $z=-4 \cdot 10^{-2}$, м; \blacklozenge – $x=2 \cdot 10^{-2}$; $y=-2 \cdot 10^{-2}$; $z=-4 \cdot 10^{-2}$, м.

В связи с густотой расположения кривых на представленных рисунках приведена только часть экспериментальных зависимостей с характерными изменениями температуры в относительно удаленных друг от друга точках. Пунктирная линия характеризует температуру зажигания, а точка пе-

ресечения пунктирной линии с кривой 1 – время зажигания. Как следует из зависимостей рис. 3 с увеличением влажности торфа время зажигания возрастает.

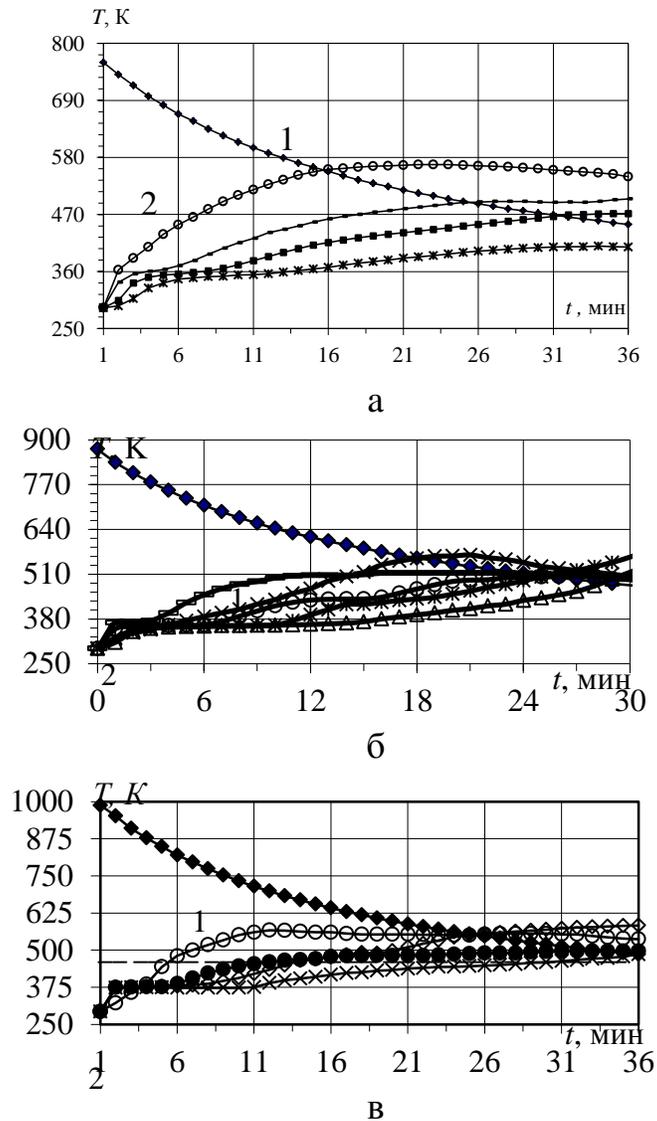


Рис. 3. Изменение температуры в массиве торфа, влажность которого: а) 10 %, б) 20 %, в) 30 %

При контакте источника зажигания со слоем торфа его температура начинает монотонно снижаться (кривые 1). При этом источник зажигания отдает свою энергию как в слой торфа посредством теплопроводности и излучения, так и в окружающую среду (приземный слой воздуха). Данный процесс приводит к повышению температуры в массиве торфа, что фикси-

руется установленными в нем термопарами. Это продолжается до момента времени, когда температуры источника зажигания и в какой-либо из фиксируемых точек области исследования торфа становятся одинаковыми. Температура, фиксируемая в этот момент, является температурой зажигания торфа. В последующей стадии эксперимента происходит дальнейшее снижение температуры источника.

Необходимо отметить, что в момент зажигания торфа в какой-либо области фиксируется локальное увеличение температуры, что является дополнительным подтверждением наличия возгорания торфа.

По полученным значениям температур можно проследить распространение очага горения. Продвижение очага горения от одной контролируемой области к другой отчетливо наблюдается на рис. 3б, где происходит локальное повышение температуры в момент времени 21 мин. в точке, в которой до этого момента возгорания не происходило. В дальнейшем очаг горения переместился в другую область, что привело к снижению температуры в рассматриваемой области.

Из приведенных выше зависимостей следует, что с повышением влажности торфа процесс испарения влаги становится продолжительнее (испарение осуществляется в пределах первых 3...9 мин эксперимента). Испарение влаги интенсивно охлаждает зону реакции горения и в конечном итоге приводит к уменьшению ее размеров, с одной стороны, вследствие общего дефицита кислорода, необходимого для реакции горения, а с другой стороны, из-за расхода энергии на испарение. В свою очередь, фильтрация испаренной влаги в порах массива торфа приводит к наиболее полному прогреву всего слоя торфа (рис. 3в). Данное явление отражается уменьшением разброса ΔT кривых, характеризующих температуры в массиве торфа (рис. 3а – $\Delta T \approx 200$ К, рис. 3в – $\Delta T \approx 100$ К).

Выводы

1. Установлено, что в среднем при неизменных размерах источника зажигания увеличение влажности торфа (на примере торфа Бакчарского месторождения Томской области) на 10% требует увеличения температуры источника зажигания на 100...110 К. В экспериментах с источником зажигания в тепловой изоляции интервал такого повышения температуры при увеличении влажности торфа на ту же величину 10% находится в пределах 80...90 К.

2. Выявлено, что при повышении влажности торфа до 35...40 % возгорания не происходило даже при нагреве источника зажигания до пре-

дельной для нагреваемой печи температуры – 1173 К. Таким образом горячий источник зажигания конечных размеров не может стать причиной возгорания массива торфа указанной влажности.

3. В серии экспериментов с источником зажигания в тепловой изоляции время задержки зажигания увеличивается в 2...2,5 раза при некотором снижении начальной температуры источника

4. Полученные в работе экспериментальные данные и их сопоставление с опубликованными результатами других авторов подтверждают выбор торфа как объекта исследования с типичными свойствами, что позволяет применять основные результаты работы к большинству торфов других месторождений.

Список литературы

1. Смольянинов С.И., Маслов С.Г. Термобрикетиrowание торфа. – Томск: Изд-во ТГУ, 1975. – 108 с.
2. Афанасьев А.Е., Чураев Н.В. Оптимизация процессов сушки и структурообразования в технологии торфяного производства. – М.: Недра, 1992. – 288 с.
3. Никифоров В.А. Разработка торфяных месторождений и механическая переработка торфа. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск: Выща школа, 1979. – 400 с.
4. Попов М.В., Шабаров А.М., Гуцин А.И. Энергетическое использование фрезерного торфа. – М.: Энергия, 1974. – 304 с.

УДК 662.62

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Леушина А.А., Лубяная С.В.

Новокузнецкий филиал Томского политехнического университета

г. Новокузнецк

E-mail: nftpu@inbox.ru

Развитие промышленности Кузбасса, особенно металлургии и машиностроительного комплекса, требуют увеличения местной материально-сырьевой базы черных и цветных металлов. Потенциальной материально – сырьевой базой многих ценных металлов являются отходы горно-

металлургического комплекса и, в первую очередь, золошлаковые отвалы угледобычи и углеобогащения. В Кузбассе ежегодно накапливается до 15 млн. т золошлаковых отходов, включая отходы металлургических и других предприятий; всего же в настоящее время накоплено около 0,5 млрд т. [1]. Оставшийся после извлечения металлов из золы материал можно использовать в строительстве (производство кирпичей, плит и т. д.). Получаемые строительные материалы будут безопасны для здоровья людей, так как многие ценные металлы, извлекаемые из золошлаковых отходов (Be, V, Co и др.), являются токсичными. Практический интерес в качестве дополнительной МСБ представляют запасы в углях и их отходах, таких металлов, как кремний, алюминий, железо и титан. Данные по содержанию полезных элементов в золе разных углей приведены в табл. 1.

Таблица 1. – Химический состав золы разных углей

Образцы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	S
Талдинский разрез	49,2	29,9	5,6	1,2	9,3	2,4	1,8	0,08	0,31
	58,7	25,3	2,5	1,59	4,1	0,93	1,26	0,086	0,13
	57,8	25,8	4,9	1,7	2,6	0,98	0,87	0,042	2,7
	58,3	19,6	7,9	1,8	5,8	0,65	1,1	0,23	3,9
Разрез «Че- ремново»	54,5	24,5	9,0	1,71	5,4	1,13			2,01
	51,4	25,6	4,14	1,32	16,7	1,58			1,54
Карагандин- ский	31,0	20,9	14,2	10,5	8,5	0,47	0,60	0,20	
Разрез «Евтинский»	62,0	21,0	4,4	2,0	6,6	0,25	0,99	0,1	
	55,0	25,0	4,1	2,1	8,0	0,9	1,3	0,1	
ООО «Хим- углепром»	55,0	24,7	5,9	1,9	3,9	1,04	1,27	0,07	2,1

Серьезная экологическая опасность от разработки рудных месторождений в Кемеровской области, заставляет решать проблему получения полезных металлов из техногенных месторождений, в том числе из отходов угольной продукции. Основными предприятиями энергетической отрасли Кузбасса являются: ГРЭС - Южно-Кузбасская (г. Калтан), Томь-Усинская (г. Мыски), Беловская (г. Белово), Кемеровская (г. Кемерово); ТЭЦ - Западно-Сибирская и Кузнецкая (г. Новокузнецк), Кемеровская и Новокемеровская (г. Кемерово). Эти предприятия являются поставщиками тонко-

дисперсной золы уноса, шлака и золошлаковой смеси. Ежегодно накапливается около 2,6 млн. т отходов (табл. 2).

Таблица 2. - Золошлаковые отходы на территории Кемеровской области

Наименование ТЭС	Объем отвалов, млн т	Площадь отвалов, га	Годовой выход золошлаковых отходов, тыс. т
Томь-Усинская ГРЭС	16,5	440	800
Южно-Кузбасская ГРЭС	1,8	Нет данных	400
Кузнецкая ТЭЦ	2,6	60	230
Западно-Сибирская ТЭЦ	6	Нет данных	530
Беловская ГРЭС	3,2	280	440
Кемеровская ГРЭС	3,5	82	100
Кемеровская ТЭЦ	1,4	Нет данных	100
Новокемеровская ТЭЦ	1	Нет данных	110

Годовой выход золы на энергетических предприятиях составляет несколько сотен тыс. т золы. Из накапливаемых за год зольных отвалов ТЭС (в основном предприятий юга Кузбасса) можно извлечь не менее 100 т Ti, Zr, 10 т V, 1 т Ga, Ge. Данные Ростовского государственного университета показывают, что на тепловых электростанциях, работающих на топливном мазуте, в шламе, образующемся после промывки котлов, находится значительное количество ванадия [2]. В среднем в 1 тонне сжигаемого мазута содержится 174,2 г V₂O₅. Часть пятиоксида ванадия попадает в обмывочные воды, где его концентрация достигает 885 мг/л. [2]. Разработка техногенных месторождений существенно улучшит экологическую ситуацию в области, где около 100 тыс. га земли заняты техногенными отходами. Это особенно важно в условиях подъема сельского хозяйства, увеличения урожайности зерновых и овощных культур. Кроме того, подобный подход к добыче цветных и редких металлов позволит сократить объемы геологоразведочных и горнодобычных работ на особо охраняемых природных территориях (например, в Горной Шории). Получаемые металлы могут быть востребованы в электротехническом машиностроении области, а также на машиностроительных, ферросплавных и других предприятиях субъектов СФО (Новосибирской и Иркутской областей, Красноярского края). Ряд ценных металлов (таких как Ti, Zr, Ga, Ge) может быть востребован и на внешних рынках. Запасы ряда цветных металлов, содержащихся в зольных отходах ТЭС Кузбасса, можно отнести к потенциально экономическим. При внедрении промышленных технологий извлечения метал-

лов из зольных отходов углей возможно использование в первую очередь титана и циркония, а в дальнейшем полиметаллов (ванадия, галлия, германия, ниобия и др.) [1].

Список литературы

1. Салихов В.А. Научные основы и совершенствование геолого-экономической оценки попутных полезных компонентов угольных месторождений (на примере Кузбасса) [Текст] / В.А. Салихов; СибГИУ.- 2-е изд., перераб. и доп. - Кемерово: Кузбассвузиздат, 2008. – 249 с.
2. Проблемы геологии и освоения недр: Труды Седьмого Международного научного симпозиума им. Академика М.А. Усова студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященного 140-летию со дня рождения академика, Лауреата Ленинской и Государственных Премий СССР, Почетного Президента Географического общества СССР В.А. Обручева. - Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2003. – 850 с.

УДК 539.52; 621.181

ЭКОНОМИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ КОТЛА БКЗ-75-39 И РАСЧЕТ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МЕТАЛЛА КОНВЕКТИВНОГО ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ

В.С. Логинов, А.Т. Парпиев

Энергетический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета

E-mail: azatparpiev@mail.ru

Получение перегретого пара осуществляется в пароперегревателе. В котлах средней и малой мощности обычно устанавливают конвективные пароперегреватели, в которых процесс теплопереноса происходит конвекцией. В котлах же с температурой перегрева свыше 773 К применяют комбинированные пароперегреватели, в которых поверхность получает теплоту конвекцией и излучением [1].

В данной работе рассмотрен конвективный пароперегреватель котла БКЗ-75-39. Рассматриваемая поверхность нагрева состоит из двух ступеней. Для поддержания необходимой температуры пара на выходе из второй ступени производственники зачастую увеличивают расход впрыскиваемой воды в пароохладитель. В работе [4] отмечается, что увеличение расхода впрыскиваемой в пароохладитель воды приводит к увеличению расхода топлива, что отрицательно сказывается на финансовых затратах предприятия.

Также следует отметить, что пароперегреватели, по сравнению с другими поверхностями нагрева работают в наиболее жестких условиях (высокие температуры нагревающей среды). Вследствие чего 80 – 85 % аварийных остановов котлов происходит в результате выхода из строя данных поверхностей нагрева [2]. Поэтому особое внимание уделяется рациональной эксплуатации пароперегревателей. Разрабатываются различные методы предотвращения износа данных поверхностей, так как замена какой – либо части пароперегревателя при его разрушении приводит к останову всего котельного агрегата и большим финансовым затратам.

Вопросы об экономии сжигаемого топлива и изучении различных методов расчета остаточного ресурса металла пароперегревателей, выработавших проектный срок, приобретают актуальную проблему в наши дни.

В работах [6,7] приводятся рекомендации по продлению срока службы металла пароперегревателей. Расчет температуры стенки трубы, расхода топлива, энтальпий пара на выходе из первой ступени, на входе во вторую ступень и выходе из нее проводится по методике, изложенной в [1,2]. Значение длины змеевика пароперегревателя в этом случае необходимо определять на основе метода, предложенного в работе [3], так как здесь наиболее подробно изложен способ нахождения данной геометрической характеристики. Эмпирические зависимости для расчета перерасхода топлива при стационарном режиме работы котельного агрегата, приводятся в работах [4-6]. В [7-9] приводятся зависимости для определения коэффициента запаса прочности при длительной прочности по заранее известной величине температуры стенки трубы.

В данной работе разработаны метод расчета перерасхода топлива в зависимости от расхода впрыскиваемой воды в пароохладитель и метод расчета остаточного ресурса металла пароперегревателя на основе работ [1-9]. Проведен анализ полученных результатов.

Рассматривается конвективный пароперегреватель котла БКЗ-75-39. На рис. 1 и 2 приведены схематичное изображение данного объекта и цикл с промежуточным перегревом.

Расчет проводится для стационарного режима работы котельного агрегата БКЗ-75-39. Коэффициенты теплоотдачи дымовых газов, пара, коэффициент теплопроводности стенки трубы и другие теплофизические свойства считаются постоянными во времени. Конвективный пароперегреватель, рассматриваемого котла, является смешаннопоточным, где движение сред в первой ступени осуществляется по прямоточно-противоточной схеме, а во второй – по прямоточной. Вид сжигаемого топлива в топке ко-

тельного агрегата Алмалыкского Горно – Metallургического комбината (Узбекистан) – газ Бухарского месторождения. Средний состав топлива для рабочего состояния и другие исходные данные, необходимые для расчета приведены в табл. 1. Температурой и энтальпией дымовых газов на входе в первую ступень задаются в начале расчетов.

Таблица 1

Исходные данные

Обозначение	Характеристика	Значение
C_{CH_4}	концентрация метана	93,75 %
$C_{C_2H_6}$	концентрация этана	3,06 %
$C_{C_3H_8}$	концентрация пропана	0,72 %
$C_{C_4H_{10}}$	концентрация бутана	0,28 %
$C_{C_5H_{12}}$	концентрация пентана	0,1 %
$C_{C_6H_{14}}$	концентрация гексана	0,04 %
C_{N_2}	концентрация азота	0,37 %
C_{CO_2}	концентрация углекислого газа	1,68 %
Q_H^P	низшая теплота сгорания	$36876 \cdot 10^3$ Дж/м ³
$D_{ПП}$	паропроизводительность котла	20,83 кг/с
t_{nn}	температура перегретого пара	440 °С
I_{nn}	энтальпия перегретого пара	$3313,4 \cdot 10^3$ Дж/кг
t_{ne}	температура питательной воды	102 °С
P_{σ}	давление в барабане	4,07 МПа
P_{ne}	давление питательной воды на входе в экономайзер	4,48 МПа
I_{ne}	энтальпия питательной воды	$430,75 \cdot 10^3$ Дж/кг
p	величина продувки	3 %
D_{np}	расход воды на продувку	0,6 кг/с
I_s	энтальпия продувочной воды	$1120,7 \cdot 10^3$ Дж/кг
$t'_{\partial \epsilon I}$	температура дымовых газов на входе в I ступень	970 °С
$I'_{\partial \epsilon I}$	Энтальпия дымовых газов на входе в I ступень	$16726,7 \cdot 10^3$ Дж/м ³
n	расчетный ресурс	50000 ч

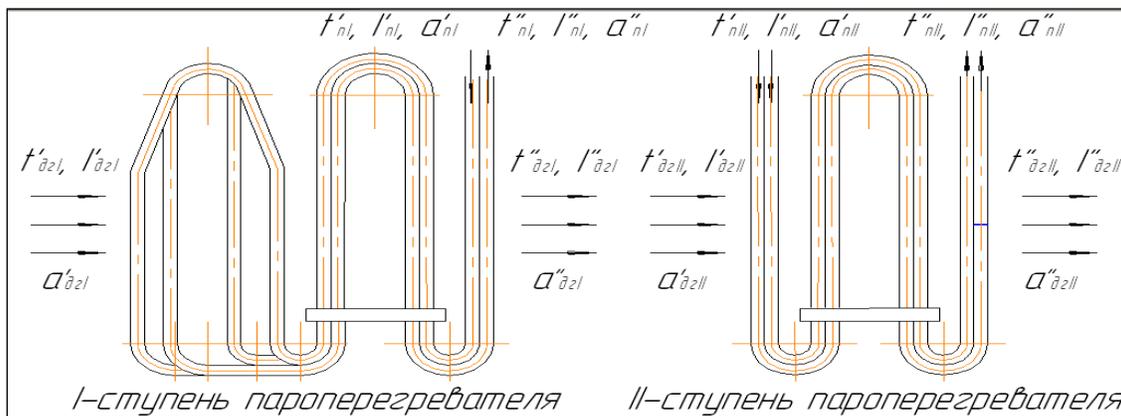


Рис. 1. Схема конвективного пароперегревателя котла БКЗ-75-39:

$t'_{\text{дзI}}, t''_{\text{дзI}}, t'_{\text{дзII}}, t''_{\text{дзII}}, t'_{\text{нI}}, t''_{\text{нI}}, t'_{\text{нII}}, t''_{\text{нII}}$ – соответственно температуры дымовых газов на входе и выходе в первую и во вторую ступень, температуры пара на входе и выходе в первую и во вторую ступень пароперегревателя; $\alpha'_{\text{дзI}}, \alpha''_{\text{дзI}}, \alpha'_{\text{дзII}}, \alpha''_{\text{дзII}}, \alpha'_{\text{нI}}, \alpha''_{\text{нI}}, \alpha'_{\text{нII}}, \alpha''_{\text{нII}}$ – соответственно коэффициенты теплоотдачи со стороны дымовых газов к наружной поверхности труб на входе и выходе в первую и во вторую ступень, коэффициенты теплоотдачи от внутренней поверхности труб к пару на входе и выходе в первую и во вторую ступень пароперегревателя; $I'_{\text{дзI}}, I''_{\text{дзI}}, I'_{\text{дзII}}, I''_{\text{дзII}}, I'_{\text{нI}}, I''_{\text{нI}}, I'_{\text{нII}}, I''_{\text{нII}}$ – соответственно энтальпии дымовых газов на входе и выходе в первую и во вторую ступень, энтальпии пара на входе и выходе в первую и во вторую ступень пароперегревателя.

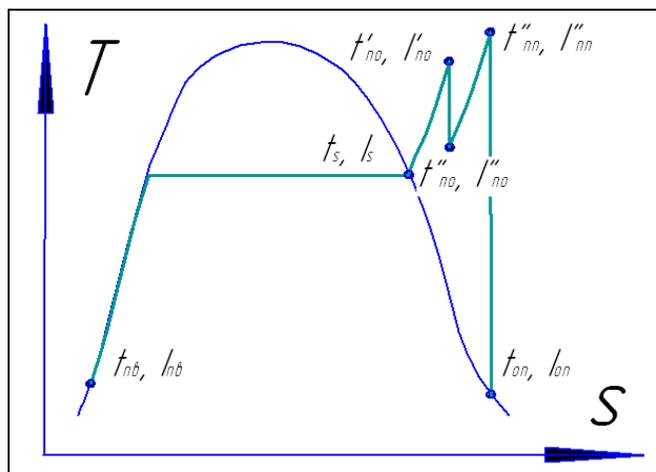


Рис. 2. Цикл с промежуточным перегревом котла БКЗ-75-39:

$I'_{\text{нI}}, I''_{\text{но}}, I'_{\text{но}}, I''_{\text{нII}}, I''_{\text{оп}}$ – энтальпия питательной воды, энтальпия пара на выходе из первой ступени, на входе во вторую и на выходе из второй ступени, энтальпия отработавшего пара соответственно, кДж/кг.

Рассмотрим методику определения длины змеевика конвективного пароперегревателя, приводимую в работе [3]. На рис. 3 представлены гео-

метрические характеристики, необходимые для расчета длины змеевика. Как указывается в работе [3], в целях повышения компактности змеевиковых конвективных пароперегревателей при сохранении требуемой поверхности теплообмена уголгиба змеевика обычно несколько превышает 180° . Поэтому вначале определяется уголгиба. Затем рассчитываются длина прямого участка и одногогиба, после чего определяется длина всего змеевика. Данная система уравнений выглядит следующим образом:

$$\sigma = \frac{2\sigma R}{2R}, \quad (1)$$

$$\alpha = \arccos \left(\frac{2\sigma R^2 + h\sqrt{h^2 + (\sigma R)^2 - 4R^2}}{h^2 + (\sigma R)^2} \right), \quad (2)$$

$$l_{n.уч} = \frac{h - 2R \sin \alpha}{\cos \alpha}, \quad (3)$$

$$l_2 = \frac{180 + 2\alpha}{180} \pi R, \quad (4)$$

$$l_{зм} = n_{n.уч} l_{n.уч} + n_2 l_2, \quad (5)$$

где σ – относительный горизонтальный шаг между осями соседних гибов одного змеевика, т.е. отношение расстояния по горизонтали между осями соседних гибов одного змеевика к удвоенному радиусугиба, м; α – величина отклонения углагиба от 180° ; h – высота змеевика по осигиба, м; R – радиуспетлигиба змеевика, м; $l_{n.уч}$, l_2 – длина прямого участка и одногогиба соответственно, м; $n_{n.уч}$, n_2 – количество прямых участков и гибов в змеевике соответственно.

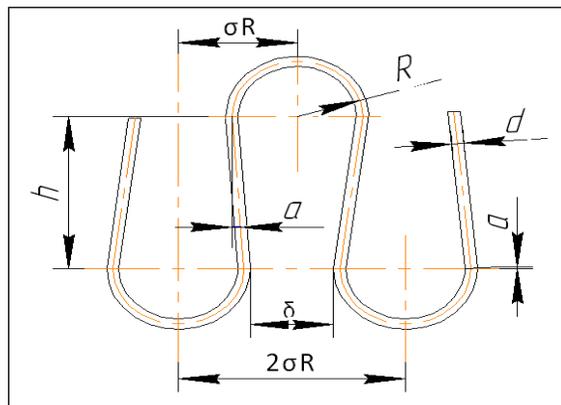


Рис. 3. Геометрические характеристики змеевика пароперегревателя

После определения длины змеевика рассчитывается общая поверхность пароперегревателя для каждой из ступеней в отдельности. Данная величина необходима при расчетах температуры стенки трубы, расхода топлива, энтальпий пара на выходе из первой ступени, на входе во вторую ступень и выходе из нее, которые определяются с помощью поверочного расчета, приведенного в источниках [1] и [2]. В основе данного расчета лежат уравнения теплового баланса (6-8) и метод последовательных приближений.

$$Q_{II} = \varphi \cdot (I'_{\text{дз}} - I''_{\text{дз}} + \Delta\alpha_{III} \cdot I_{II}^O), \quad (6)$$

$$Q_B = K \cdot H \cdot \Delta t / B_P, \quad (7)$$

$$\delta Q = \left| \frac{Q_{II} - Q_B}{Q_{II}} \right| \cdot 100\%, \quad (8)$$

где Q_{II} – количество тепла переданное ступени, кДж/м³; Q_B – количество тепла воспринятое ступенью, кДж/м³; φ – коэффициент сохранения тепла; $\Delta\alpha_{III}$ – величина присосов в пароперегреватель; I_{II}^O – энтальпия присоса воздуха, определяемая при температуре холодного воздуха, кДж/м³; K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°С); H – общая поверхность нагрева пароперегревателя, м²; Δt – температурный напор, °С; B_P – расход топлива, м³/с; δQ – относительная невязка баланса, %.

Задаваемой величиной, как указывалось выше, являются температура и энтальпия дымовых газов. Расчет осуществляется до тех пор, пока относительная невязка баланса не составит менее 2 %.

Определив значения расхода топлива, энтальпий пара на выходе из первой ступени, на входе во вторую ступень и выходе из нее, приступаем к расчету перерасхода топлива с помощью следующей системы уравнений (9-14), взятой из [5]:

$$\eta = \frac{I''_{nn} - I_{on}}{I'_{no} - I_{ne} + I''_{nn} - I''_{no}}, \quad (9)$$

$$\alpha_{\text{впр}} = \frac{D_{\text{впр}}}{D_{nn} - D_{\text{впр}}}, \quad (10)$$

$$\eta' = \frac{I''_{nn} - I_{on} + (1 - \alpha_{\text{впр}})(I'_{no} - I''_{no})}{I'_{no} - I_{ne} + I''_{nn} - I''_{no} + \alpha_{\text{впр}}(I''_{no} - I_{ne})}, \quad (11)$$

$$\delta\eta = \frac{\eta - \eta'}{\eta'}, \quad (12)$$

$$B_y = \mathcal{E}_T \cdot B_p, \quad (13)$$

$$\Delta B = \delta\eta \cdot B_y, \quad (14)$$

где η , η' – абсолютный внутренний КПД цикла с промежуточным перегревом без впрыска, с наличием впрыска соответственно, %; $\delta\eta$ – относительное изменение КПД цикла, %; $I_{не}$, $I'_{но}$, $I''_{но}$, I''_{nn} , $I_{он}$ – энтальпия питательной воды, энтальпия пара на выходе из первой ступени, на входе во вторую и на выходе из второй ступени, энтальпия отработанного пара соответственно, кДж/кг; $\alpha_{впр}$ – доля впрыскиваемой воды по отношению к расходу пара перед пароохладителем; D_{nn} , $D_{впр}$ – паропроизводительность котельного агрегата, расход впрыскиваемой воды в пароохладитель, кг/с; B_p , B_y – расчетный и условный расход топлива соответственно, м³/с; \mathcal{E}_T – калорийный эквивалент.

Расход впрыскиваемой воды в пароперегреватель берем из временной режимной карты котла БКЗ-75-39 при нагрузках: 11,1; 16,67; 20,83 и 22,2 кг/с. Калорийный эквивалент определяем с помощью таблицы приведенной в [6].

Далее рассчитываем остаточный ресурс металла пароперегревателя для каждой ступени в отдельности. Оценка остаточного ресурса металла труб проводится по коэффициенту запаса прочности при длительной прочности (15), (16), рассматриваемого в работах [7-9].

$$n_{он} = \frac{\sigma_{дон} \cdot 1,5}{\sigma_{np}}, \quad (15)$$

$$\sigma_{np} = \frac{p(D_n - S_R)}{2S_R}, \quad (16)$$

где $\sigma_{дон}$ – допускаемое нормативное значение напряжения, при эквивалентной температуре поверхности труб, МПа; 1,5 – коэффициент запаса прочности при проектировании; σ_{np} – приведенное рабочее напряжение от внутреннего давления при фактических геометрических размерах трубы, МПа; p – внутренне давление в трубах (давление среды протекающей

внутри трубы), МПа; D_n – наружный диаметр трубы, м; S_R – расчетная толщина стенки трубы, м.

Расчетная толщина стенки трубы определяется по методике, описанной в работе [9].

Ресурс надежной работы равен наработке, при которой значение коэффициента запаса прочности равно 1,2.

Результаты, полученные при расчетах, сведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

паропроизводительность котла, кг/с	расход впрыскиваемой воды в парохладитель, кг/с	внутреннее абсолютное КПД котла при наличии впрыска, %	перерасход условного топлива, кг/с
11,1	2,78	77,6	0,31
16,67	4,17	77	0,482
20,83	5,3	76,6	0,61
22,2	5,83	75,8	0,69

Таблица 3

Обозначение	Характеристика	Значение
Пароперегреватель I ступени		
$l_{зм}$	длина змеевика	27 м
$\alpha_{дг}$	коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к стенке	59,1 Вт/м ² ·°С
α_n	коэффициент теплоотдачи от стенки к пару	1743 Вт/м ² ·°С
$t_{ст}$	температуры стенки трубы	318 °С
$n_{дп}$	коэффициент запаса прочности при длительной прочности	1,5
Пароперегреватель II ступени		
$l_{зм}$	длина змеевика	24 м
$\alpha_{дг}$	коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к стенке	68,63 Вт/м ² ·°С
α_n	коэффициент теплоотдачи от стенки к пару	1482 Вт/м ² ·°С
$t_{ст}$	температуры стенки трубы	397 °С
$n_{дп}$	коэффициент запаса прочности при длительной прочности	1,5

Выводы

1. На основе известных экспериментальных данных [4,5] проведена оценка остаточного ресурса металла труб конвективного пароперегревателя котла БКЗ-75-39 при стационарном режиме работы. Получены следующие

щие значения коэффициентов запаса прочности при длительной прочности: I ступень пароперегревателя – 1,5; II ступень пароперегревателя – 1,5.

2. Основываясь на результатах табл. 3, можно сделать вывод о том, что повышение расхода впрыскиваемой воды в пароохладитель при стационарном режиме работы котла БКЗ-75-39 приводит к понижению внутреннего абсолютного КПД, но при этом относительный перерасход условного топлива повышается. Поэтому, согласно временной режимной карты, работа котельного агрегата БКЗ-75-39 при низких нагрузках является более рациональной с точки зрения экономии расхода, сжигаемого в топке, топлива.

Список литературы

1. Тепловой расчет котлов. Нормативный метод. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
2. Котельные установки и парогенераторы. Тепловой расчет котлов: учебное пособие / С.К. Карякин; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 156 с.
3. Губарев А.В., Горлов А.С., Кулешов М.И., Васильченко Ю.В. К определению длины змеевика конвективного пароперегревателя // Тяжелое машиностроение. 2010. № 12. С. 14.
4. Ермолаев В.В. Возможность использования питательной воды для впрысков котлов // Электрические станции. 2008. № 8. С. 17.
5. Кузнецов А.М., Таран О.Е., Кокурина Л.Г. Снижение КПД блока от впрыска воды в промежуточный пароперегреватель // Повышение экономичности и надежности тепловых электрических станций. 1977. С. 63.
6. СТО ГАЗПРОМ РД 1.19-126-2004. Методика расчета удельных норм расхода газа на выработку тепловой энергии и расчета потерь в системах теплоснабжения (котельные и тепловые сети). ОАО «Газпром» ООО «Информационно-рекламный центр газовой промышленности», 2004.
7. Любимова Л.Л., Макеев А.А., Заворин А.С., Ташлыков А.А., Фисенко Р.Н. Уровень внутренних структурных напряжений как показатель работоспособности длительно эксплуатируемого пароперегревателя // Известия Томского политехнического университета. 2011. № 4. С. 45.
8. Артамонов В.В. Электрохимическая диагностика пароперегревателей. Часть 2. Определение остаточного ресурса // Контроль. Диагностика. 2007. № 10. С. 62.
9. РД 10-249 – 98. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. СПб.: НПО ЦКТИ, 1999.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО СОВРЕМЕННОМУ СОСТОЯНИЮ СУШКИ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ В РЕАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР

Мелешкин Д.С., Бульба Е.Е., к.т.н.
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет, г. Томск
E-mail: M.D.S.2009@yandex.ru

Есть определение, что отходы - это продукт незавершенной технологической цепи, а потому древесные отходы надо рассматривать не как отходы, а как сырье для получения тепловой и электрической энергии. При этом использование древесины в таком качестве целесообразно рассматривать с точки зрения экологии, экономики и решения социальных вопросов [1].

Известно, что количество влажной древесины в общей массе древесных отходов достигает 70%, что приводит к трудностям при использовании ее в качестве топлива. Повышенная влажность снижает эффективность процесса горения, увеличивает объем и токсичность образующихся дымовых газов [1].

Таблица 1. - Уровни выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании различных видов топлива

Вид топлива	Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух без систем очистки, тонн на 1 тыс. тонн нат. топлива				
	CO ₂	NO ₂	SO ₂	Твердые частицы (пыль неорг.)	ИТОГО
Природный газ	1,18	3,52	0,00	0,00	4,70
Древесные брикеты, пеллеты	4,68	9,31	0,28	4,11	17,69
Древесина дровяная	4,9	9,4	0,3	4,3	18,9
Опилки древесные	5,0	9,6	0,5	5,0	20,0
Древесные отходы, обрезки	5,2	9,9	0,4	5,2	20,7
Быстрорастущая древесина	4,8	9,5	0,0	8,4	22,7
Щепа, сучья, кора	5,6	11,4	0,8	13,4	31,3
Мазут	5,20	5,20	35,30	0,30	45,90
Брикет торфяной	8,04	26,81	3,00	13,02	50,87
Каменный уголь	9,58	63,56	9,20	65,32	147,66

Из таблицы 1 следует, что древесное топливо (в первую очередь пеллеты и брикет) более предпочтительно, с точки зрения загрязнения атмосферы, в сравнении с мазутом (тем более с углем), так как имеет минимальное количество выбросов парниковых газов, прежде всего CO_2 [2].

Объем выбросов загрязняющих веществ при сжигании древесного топлива зависит не только от его вида и состава, но и от его влажности и КПД котла. Таким образом, эффективное использование древесного топлива напрямую зависит от его подготовки с учетом максимального удаления влаги. Данным требованиям в первую очередь соответствуют древесное топливо в виде пеллет, брикета и угля.

С использованием брикетов и пеллет решаются как глобальные, так и локальные экологические проблемы [3].

Среди глобальных проблем является снижение парникового эффекта и риска образования кислотных дождей за счет уменьшения выброса диоксида серы. В свою очередь сокращение концентрации кислотных дождей приводит к снижению дефолиации древесных растений и в конечном итоге – к сохранению лесов.

Среди локальных проблем выделяют сокращение объемов и экологичное использование отходов, а также снижение риска ЧС при транспортировке топлива, при которой происходит загрязнение окружающей среды. Опасность взрывов, аварий, вредных выбросов просто несоизмерима по сравнению с ископаемыми видами топлива.

Брикеты и пеллеты могут использоваться в качестве топлива для каминов, печей и специальных котлов и обеспечивают ровное и долгое пламя. При их сжигании резко снижается возможность увеличения концентраций серы в воздухе внутри помещения, а также в приземном слое воздуха и в почве рядом с домом. Низкая коррозионная агрессивность дымовых газов, образующихся при сжигании гранул, дает возможность конденсировать влагу дымовых газов и высвободить скрытую теплоту парообразования, а также увеличить срок службы котельного оборудования [4].

Список литературы:

1. Любов В.К., Дьячков В.А. Исследование теплотехнических характеристик древесных отходов и торфа // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на предприятиях и ТЭС: межвузовский сборник научных трудов.– СПб: СПбГТУ, 2001. С. 240–248.
2. Внуков А.К. Защита атмосферы от выбросов энергообъектов: справочник.– М.: Энергоатомиздат, 1992.– 176 с.

3. Доброхотов В.И. Основные направления научно технического прогресса в энергетике, решаемые в рамках Государственной программы России "Экологически чистая энергетика" // Теплотехника. 1993. №6. С.39–45.
4. Лебедев А.Н. Подготовка и размол топлива.–М.: Энергия,1969.– 520 с.

УДК 665.7.032.56

У 137

ИНЖЕНЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПИРОЛИЗА ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

А.Ю. Мищенко, А.А. Юнусов,
Томский политехнический университет, г.Томск
E-mail 87mischenko@mail.ru

Проблемой энерготехнологического использования древесного топлива и утилизации отходов древесины занимаются долгое время, однако в последнее десятилетие ей стали уделять больше внимания. Во многих странах с целью уменьшения зависимости от нефти и газа возрос интерес к использованию органического топлива [1]. Проблемы утилизации и рационального использования отходов древесного производства, можно решить нетрадиционными методами переработки, одним из которых является газификация, позволяющая конвертировать любые органические вещества в газ, состоящий в основном из CO , H_2 , CO_2 , CH_4 . Разработка технологий, позволяющих применять различные виды биомассы в энергетических целях, актуальна задача, как для рационального использования природных ресурсов, так и для создания автономных источников теплоснабжения и электроснабжения, работающих на местных видах топлива. В этом смысле весьма привлекательным сырьем являются древесина и торф, относящиеся к возобновляемым углеводородным ресурсам. В нашей стране сосредоточено около 47 % мировых запасов торфа и 24 % древесины. Запасы торфа в России в пересчете на условное топливо составляют 68,3 млрд. т., которые превосходят суммарные запасы нефти (31 млрд. т.), газа (22 млрд. т.), уступая лишь запасам угля (97 млрд. т.) [2]. Перспективным направлением данного процесса является высокотемпературная бескислородная паровая газификация.

В Кузбасском государственном техническом университете был создан экспериментальный стенд использованный при паровой газификации органического топлива, схема которого представлена на рисунке 1. Основ-

ным элементом экспериментального стенда является рабочий участок, изготовленный в виде цилиндрической трубы. В качестве исходного материала для процесса конверсии использовалась мелкая сухая древесная фракция, которой имела размер частицы 2 мм.

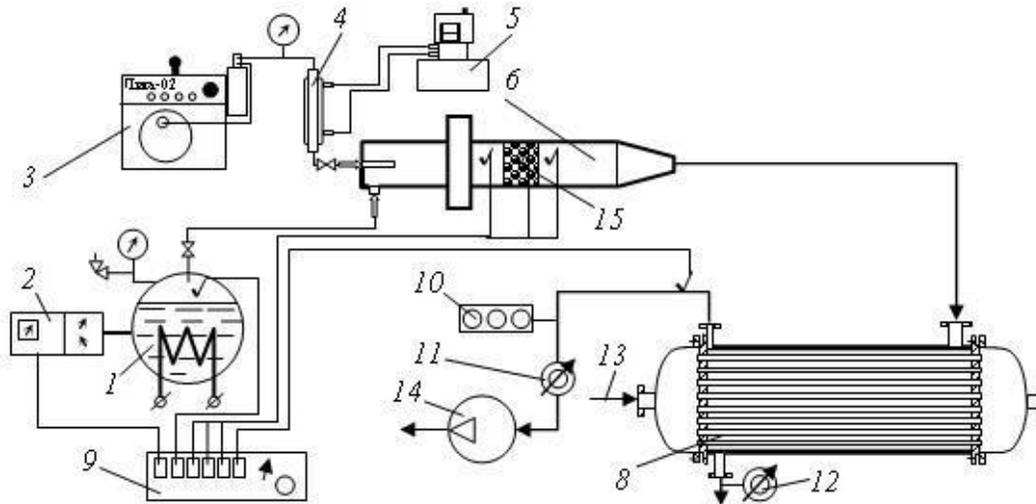


Рис.1. Схема экспериментального стенда конверсии углеродсодержащих материалов

1 – парогенератор; 2 – система термостабилизации генератора; 3 – генератор водород–кислородной горючей смеси; 4-система термостабилизации и огнезащиты горючей смеси; 5-термостат; 6-рабочий участок; 7-конденсатор-сепаратор; 8-система терморпар с АЦП; 9-система сбора газовых проб; 10-система измерения расхода газа; 11- система измерения расхода конденсата; 12-магистраль обратной воды; 13-вакуум-насос – компрессор; 14 – слой углеродсодержащего материала (сборка); 15- место засыпки древесной фракций.

Реакция водяного пара с углеродом топлива с образованием CO и H₂ [3]



описывается уравнением.

$$w \frac{dr_n}{dz} = -K_1 C_T r_n \quad (2)$$

Граничное условие

$$r_n \Big|_{z=0}^0 = 1.$$

В ходе решения данного уравнения при заданных граничных условиях получаем следующее

$$r_n = \exp\left(-\frac{K_1 C_T z}{w}\right), \quad (3)$$

где r_n – концентрация водяного пара, м³/м³; w – скорость парогазовой смеси при реальных параметрах с учетом порозности слоя, рассчитанная по составу продуктов реакции (1), м/с; z – расстояние до газораспределительной решетки, м; $K_1=7,2 \times 10^3 \exp(-9093/T)$ – константа скорости взаимодействия водяного пара с углеродом древесины, м³/(с кг); T – температура кипящего слоя, К; $C_T=(1-\varepsilon)\rho_y C_C/100$ – концентрация углерода топлива в слое, кг/м³; ε – порозность слоя насадки, м³/м³; ρ_y – плотность полукокса, кг/м³; C_C – содержание углерода в полукоксе на сухую массу, %.

Образование CO₂ и реагирование его с углеродом топлива (C+CO₂=2CO ΔH=+159.7 кДж/моль), описывается уравнением:

$$w \frac{dr_{CO_2}}{dz} = 0.5 K_1 C_T r_n - K_2 C_T r_{CO_2}, \quad (4)$$

$$r_{CO_2} |_{z=0} = 0,$$

где r_{CO_2} – концентрация углекислого газа, м³/м³; $K_2=5317 \exp(-7980/T)$ – константа скорости реагирования CO₂ с углеродом древесины, м³/(с кг).

Подставим уравнение (3) в (4) проинтегрируем его и получим:

$$r_{CO_2} = \frac{0.5 K_1}{K_2 - K_1} \times \left[\exp\left(-\frac{K_1 C_T z}{w}\right) - \exp\left(-\frac{K_2 C_T z}{w}\right) \right] \quad (5)$$

Образование CO и CO₂ описывается уравнением

$$w \frac{dr_{CO}}{dz} = 2 K_2 C_T r_{CO_2}, \quad (6)$$

$$r_{CO} |_{z=0} = 0,$$

где r_{CO} – концентрация оксида углерода, м³/м³.

Подставляя уравнение (5) в (6) и интегрируя его, получаем:

$$r_{CO_2} = \frac{K_2 K_1}{2(K_2 - K_1)} \times \left[\frac{1 - \exp\left(-\frac{K_1 C_T z}{w}\right)}{K_1} - \frac{1 - \exp\left(-\frac{K_2 C_T z}{w}\right)}{K_2} \right], \quad (7)$$

где r_{CO_2} коэффициент 2 в знаменателе учитывает уменьшение концентрации CO за счет увеличения объема продуктов реакции (8) в 2 раза.

Образование водорода из углерода и водяного пара осуществляется по реакции



$$r_{H_2} = 0.5(1 - r_n), \quad (9)$$

где r_{H_2} - концентрация водорода, m^3/m^3 ; коэффициент 0,5 учитывает уменьшение концентрации водорода за счет увеличения объема продуктов реакции (8) в 2 раза [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке ГК №14.740.11.0101

Список литературы

1. Грачёв А.Н., Совершенствование техники и технологии процесса термической переработки древесных отходов: Дис. . канд. тех. наук. Казань, 2005.- 186 с.
2. Зорина Г.И., Брух-Цеховой А.Р. Современное состояние технологии газификации за рубежом. -М.: ВНИИТЭнефтехим, 1986. 48с.
3. Исаева Е.Н., Иванова Л. Изучение пиролиза хвойных пород: Дис. . канд. техн. наук. -Ленинград, 1970. 223с.
4. Козлов В.Н. Пиролиз древесины. Под ред. Акад. И.П. Бардина. -М.: Академ. Наук СССР, 1954. 284с

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЖИГАНИЯ КУЗНЕЦКОГО УГЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ КРУТКИ ПОТОКА СМЕСИ ГОРЮЧЕГО И ОКИСЛИТЕЛЯ

Мурзина А.С., Гиль А.В.

Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: Andgil@tpu.ru

Одна из важных задач энергетики – обеспечить надежную и экономичную работу котлоагрегатов, на которую влияет большое количество факторов. Одним из этих факторов является организация процесса горения топлива в топочной камере котельного агрегата. Важность процесса горения в технических устройствах способствовала созданию различных моделей сжигания топлива. Одной из таких моделей является использование закрученных турбулентных струй.

Основной характеристикой вихревых горелок является параметр крутки – n , оказывающий крупномасштабное влияние на поле течения: на расширение струи, процессы подмешивания и затухания скорости в струе (в случае инертных струй), на размеры, форму и устойчивость пламени, а также на интенсивность горения (в случае реагирующих потоков). На все эти характеристики влияет интенсивность закрутки потока. Интенсивность закрутки обычно характеризуется параметром крутки, представляющим собой безразмерное отношение осевой компоненты потока момента количества движения к произведению осевой компоненты потока момента количества движения и эквивалентного радиуса сопла [1].

Для исследования влияния параметра крутки на процессы воспламенения и выгорания топлива наиболее перспективно использовать численные методы, позволяющие анализировать физические процессы во всей области исследования по большому числу параметров.

Численное моделирование исследуемой топочной камеры проводилось с использованием специализированного пакета прикладных программ FIRE 3D [2] основанного на современных подходах и методах математического описания сложных физико-химических процессов и имеющего высокую достоверность результатов расчетов.

Для построения математической модели аэродинамики, горения и теплообмена используется метод, совмещающий эйлеров и лагранжевы подходы для описания движения газа и взвешенных частиц. Турбулентные характеристики газа рассчитываются с использованием двухпараметрической « k - ε » модели турбулентности [3], также учитывающей влияние движущихся частиц.

Численные исследования проводились в топке котла БКЗ-420-140 с встречным расположением 12 вихревых лопаточно-лопаточных вихревых горелок в один ярус на боковых стенах.

На рисунках 1–3 представлены результаты распределения аксиальной и тангенциальной скоростей, температур на расстоянии $x = 1$ м от горелочных устройств, при различных вариантах закрутки первичного (n_1) и вторичного воздуха (n_2). Чем больше параметр n , тем меньше значения аксиальных скоростей, уменьшается дальнобойность струи. При увеличении параметра крутки так же наблюдается снижение аксиальных скоростей по ширине топочной камеры. Тангенциальные скорости во всех вариантах имеют аналогичные профили с небольшими отличиями максимальных и минимальных значений скоростей (рис. 2).

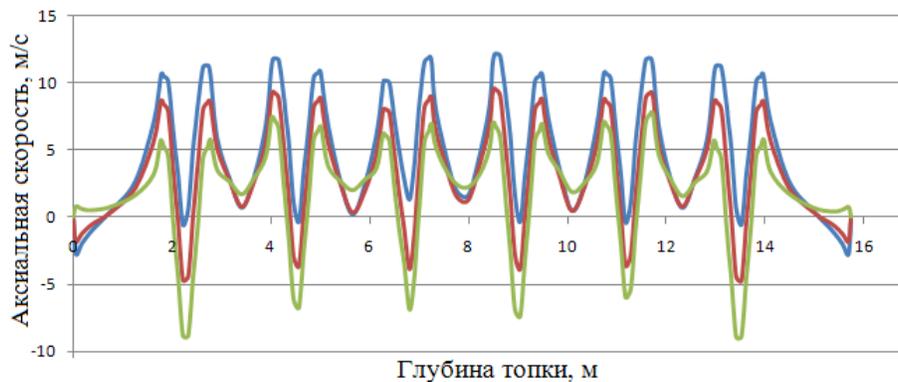


Рис. 1 Распределение аксиальной скорости в горизонтальном сечении по оси горелок, — при $n_1 = 0,8$, $n_2 = 1,5$, — при $n_1 = 1,2$, $n_2 = 2,2$, — при $n_1 = 1,5$, $n_2 = 3,4$

Наибольшие значения скоростей наблюдаются при $n_1 = 1,5$ и $n_2 = 3,4$ поскольку увеличена турбулизация потоков, происходит активное перемешивание угольных частиц с окислителем и эжекция потока дымовых газов увеличена по отношению к другим вариантам (рис. 3).

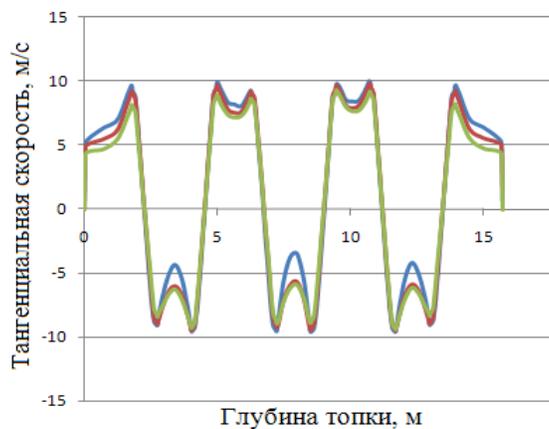


Рис. 2 Распределение тангенциальной скорости в горизонтальном сечении по оси горелок, — при $n_1 = 0,8$, $n_2 = 1,5$, — при $n_1 = 1,2$, $n_2 = 2,2$, — при $n_1 = 1,5$, $n_2 = 3,4$

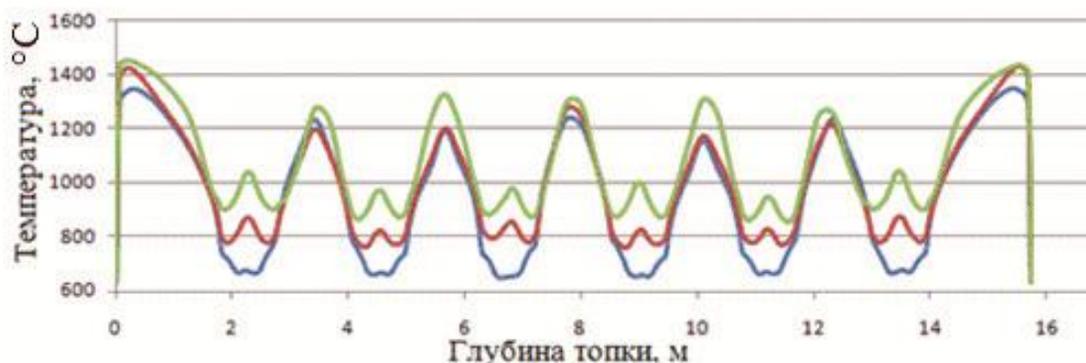


Рис. 3 Распределение температуры в горизонтальном сечении по оси горелок,
 — при $n_1 = 0,8, n_2 = 1,5$, — при $n_1 = 1,2, n_2 = 2,2$, — при $n_1 = 1,5, n_2 = 3,4$

На основании проведенного исследования можно отметить, что при увеличении параметра крутки средний температурный уровень в районе горелок увеличивается за счет более раннего раскрытия факела, улучшения процессов воспламенения и выгорания. Но при этом снижается дальность горелочных струй, что негативно может отразиться на формировании ядра горения и неравномерности тепловых потоков.

Список литературы:

1. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки: Пер. с англ. // М.: Мир, 1987. - С. 19-20.
2. Старченко А.В., Заворин А.С., Красильников С.В. Применение пакета FIRE 3D к анализу процессов шлакования // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 2. – С. 152–157.
3. Сполдинг Д.Б. Основы теории горения. – М; Л.: Госэнергоиздат. – 1959. – 319 с.

УДК 662.311.5

НЕТРАДИЦИОННЫЕ ТОПЛИВА ИЗ УТИЛИЗИРУЕМЫХ ПОРОХОВ

Ногачев А.Г., аспирант, Епифанов В.Б., д.т.н.

Самарский государственный технический университет, г. Самара

E-mail: fctpm@samgtu.ru, Nogachov@gmail.com

Проблема переработки вторичного сырья и отходов жизнедеятельности человека, в том числе промышленных производств, не имеет решений

без крупных капиталовложений. Еще более остро эта проблема встает при утилизации продукции оборонной промышленности с истекшим сроком гарантированного хранения.

Анализ данных по утилизации обычных видов боеприпасов в США, Англии, Германии, Франции и Израиле позволил сделать следующие выводы:

- размер капиталовложений и эксплуатационных расходов, в основном, зависит от вида уничтожаемых боеприпасов и методов расщепления;

- выручка от реализации извлеченных порохов не возмещает расходы на утилизацию боеприпасов.

Однако нельзя ставить в прямую зависимость проведение мероприятий по утилизации от получаемой прибыли, хотя бы по той причине, что уничтожение порохов методом сжигания или захоронения, бесспорно, нанесет огромный ущерб окружающей среде за счет выброса в атмосферу (или в водный бассейн) огромного количества вредных и токсичных веществ.

Например, при самом простом и дешевом способе уничтожения старых порохов – сжигания, в атмосферу – с 1 кг пороха - выбрасывается около 230 л вредных отходов в пересчете на угарный газ. Таким образом, недооценка технической проблемы, материальные затраты на решение которой, возможно, никогда не окупятся, повлечет за собой проблемы экологии, здравоохранения и ряд других не менее важных.

О масштабах проблемы можно судить по статистике аварий с трагическими последствиями за последние два года, которые произошли при ведении работ по утилизации устаревших боеприпасов на базах и арсеналах Минобороны России: 23 ноября 2009 г. Ульяновск, 23 июня 2010 г. Рязанская область, 6 апреля 2011 г. Липецкая область, 2 июня 2011 г. Удмуртия.

При решении проблемы утилизации порохов были предложены различные решения. В данной статье авторами рассматриваются способы получения из устаревших порохов следующих материалов: пороховой крошки – промежуточной композиции для охотничьих порохов, нетрадиционных твердых топлив (НТТ), огнепроводной ленты (ОГЛ), пиротехнических и газогенерирующих составов и изделий [1 - 3].

Цель получить при измельчении утилизируемого трубчатого пороха однородную массу, в составе которой преобладает в необходимых количествах нужная фракция, на существующем для этих целей оборудовании,

недостижима. В связи с чем нами были разработаны многовалковые дробилки, в которых трубчатый порох проходит от двух до четырех зон измельчения, соответственно 2-4 межвалковых зазора. При этом достигается высокая однородность дробленки, а также решаются вопросы безопасности. Полученная таким образом пороховая крошка может быть использована в качестве охотничьего пороха, а также в составе НТТ. В качестве второго компонента в НТТ использовались: торф, агломераты угольной пыли, опилки, лузга, измельченная солома. Наличие третьего компонента - кристаллического окислителя (NH_4NO_3 ; KNO_3 , NH_4ClO_4) - продиктовано соображениями баланса реакции горения НТТ. Вопросы безопасности производства НТТ, а также обращения с изделиями решались путем оптимизации рецептуры. Выбранные соотношения компонентов в НТТ обеспечивают низкую чувствительность к различным видам механических воздействий.

Следующее направление утилизации порохов связано с производством ОГЛ и пиротехнических составов специального назначения. Достоинство предлагаемого способа утилизации трубчатых пироксилиновых порохов в ОГЛ состоит в возможности производства погонажных изделий по непрерывной технологии, основу которой составляет валково-каландровое оборудование. При разработке технологии производства ОГЛ был решен комплекс задач, в том числе: обоснование формы и размера полотна ОГЛ; оптимизация огнепроводящего состава на основе измельченного пороха; проектно-конструкторские, состоящие в разработке специального оборудования; технологические, заключающиеся в поиске и обосновании параметров эксплуатации оборудования.

Вопросы безопасности производства и экологичности также решены. Разработанные технологии позволяют получать изделия – ОГЛ – длиной до нескольких сот метров, шириной до 350 мм. Толщина порохового слоя на тканевой основе может составлять от 0,5 до 3,0 мм. Прочное закрепление огнепроводящего слоя на основе обеспечивается за счет введения в пороховую массу клеевого компонента, а также добавления в рецептуру около 1 % (сверх 100 %) спирто-эфирного растворителя.

Безопасность технологии решается путем экспериментально-теоретического обоснования конструктивных и технологических параметров: распорных усилий (P) возникающих в зазоре между валками при промазке тканевой основы пороховой массой, прогиба валков (h), скорости прохода ленты (v). Найдена зависимость температуры поверхности пороховой массы от P , v , h , которая для нормальных технологических условий

не превышает (30÷37) °С, в то время как для большинства утилизируемых порохов температура вспышки составляет (170 ... 190) °С.

Рецептура состава огнепроводной смеси включает пороховую массу – 98÷99 %, клеевую составляющую (1,0 ... 1,5) %, окислитель (2,5...3,0) %, спирто-эфирный растворитель (1,0...1,5) % (сверх 100 %).

На основе утилизируемого пироксилинового измельченного пороха были получены газогенерирующие элементы пористой структуры. Такая структура обеспечивает прогрессивность горения, высокую скорость, и, что особенно важно для изделия подобного типа, высокую газопроизводительность. Газогенерирующий элемент состоит из измельченного пироксилинового пороха (70÷90) % и окислителя (NH_4NO_3 ; NH_4ClO_4) (10÷30) %. Введение в рецептуру пиротехнических составов окислителя обеспечивает более высокую полноту сгорания и удовлетворительное значение кислородного баланса.

В отдельных случаях требуются изделия типа термошнуров, снаряженных пиротехническими составами, обладающих устойчивостью горения и малопламенностью. Для этих целей отработаны рецептуры и сформированы термошнуры, состоящие из KNO_3 , S, C, CaCO_3 и Na-KMg (клей 0,6 % сверх 100 %).

Испытаниям подвергались термошнуры диаметром около 4 мм, оболочку которых составляют хлопчатобумажные нити (внутренние) и нити из полиэстера (внешние). Для различного сочетания компонентов скорость горения составляет (0,08...0,5) см/с. Термошнур, в котором пороховая крошка введена в количестве (5...10)%, имеет скорость горения до 1,3 см/с. Варьирование содержания в изделии пороховой крошки удобно для регулирования скорости горения.

Наличие устаревших порохов, хранящихся на базах и арсеналах, подлежащих утилизации многократно превышает потребность в изделиях типа НТТ, ОГЛ, пиросоставов для термошнуров, составов для газогенераторов и установок пожаротушения. В связи с чем описываемые в статье способы утилизации следует рассматривать как частичное решение проблемы в совокупности с другими предложениями, например, производством промышленных взрывчатых веществ.

Список литературы:

1. Епифанов В.Б., Вологин М.Ф., Кирьяков Г.Е., Медведев А.В. Оборудование для измельчения утилизируемых трубчатых порохов // Горный журнал. – М.: Изд-й дом "Руда и Металлы", "Горный журнал", 2006. - №5. - С. 48-50.
2. Епифанов В.Б., Вологин М.Ф., Кирьяков Г.Е., Зиборов А.Б. Утилизация баллиститных ракетных твердых топлив переработкой во взрывчатые материалы промышленного назначения // Горный журнал. – М.: Изд-й дом "Руда и Металлы", "Горный журнал", 2006. - №5. - С. 43-45.
3. Епифанов В.Б., Салько А.Е. Утилизация порохов и твердых ракетных топлив: монография. - Самара: СамГТУ, 2007. - 267 с.

УДК621.187.7

РАССМОТРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СЖИГАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК УГЛЕЙ НА КОТЛЕ БКЗ-190-100 Ф (М)

Плевако А.П., магистр
Инновационный Евразийский университет, Павлодар
E-mail: plada78@mail.ru

Работа электрической станции во многом определяется организацией основных технологических процессов, к которым относится и процесс сжигания топлива в топке парового котла. От того, насколько полно и правильно будет происходить данный процесс, будет зависеть выработка пара, и, следовательно, выработка тепловой и электрической энергии. В электрическую энергию превращается не вся теплота, полученная при сжигании топлива, потому что при работе установки неизбежны потери энергии [1]. Часть энергии топлива, которая полезно не использована, не превращена в нужный вид энергии, бесполезно уходит из установки. Осуществить работу установки без потерь нельзя, но нужно всячески стремиться к их уменьшению. Задача персонала, обслуживающего электрическую станцию и, в частности, парогенератор и турбинную установку, заключается в том, чтобы не только поддерживать постоянным том максимальный КПД, который имеется, но и стараться улучшить его своими действиями: снижая имеющиеся потери путем грамотного обслуживания и рационализаторских предложений. В связи с поставленными целями, были проведены опыты по возможности опытного сжигания топлива: угля КСНР на котле БКЗ-190-100 Ф (М).

Основные характеристики (A^p – зольность, W^p – влажность, Q_n^p – теплотворная способность топлива) заявленные в сертификате соответствия

на уголь КСНР разреза практически не отличались от этих же характеристик поставленного для опытного сжигания на котле.

По сравнению с постоянно сжигаемым экибастузским углем, опытный уголь имеет несколько повышенную теплотворную способность 4000-4100 ккал/кг (опытные данные) против 3750-3900 ккал/кг. Топливо, поступившее на ЭС, имело значительное количество крупных кусков 250x350, 400x600 мм состоящих из твердой породы с очень большим удельным весом.

Во время проведения предварительных испытаний было проведено 30 опытов на составах смеси [2]: 25% экибастузского и 75% опытного углей в одно и двухмелничном режиме – 5 опытов; 50% экибастузского и 50% опытного углей в двухмелничном режиме – 4 опыта и 100% подачи опытного угля в одно и двухмелничном режиме.

Практически все опыты проводились на низкой приведенной нагрузке $\approx 118-122$ т/ч и только опыты № 18-21 удалось провести на приведенной нагрузке $\approx 131-134$ т/ч в двухмелничном режиме.

Ступенчатое сжигание смеси в разной пропорции проводилось для уменьшения вероятности зашлаковки котла.

После проведения опытов можно сделать следующие выводы:

1. Котел устойчиво работает в диапазоне нагрузок 120-134 т/ч на экспериментальном угле.

2. Интенсивность факела при сжигании 100% угля КСНР составляет 13-14 мА (фронт- тыл-топки), что выше чем для экибастузского угля 10-12 мА, и это говорит о более интенсивном горении, обусловленном повышенной калорийностью.

3. Два раза срабатывал подхват факела из-за падения шлака в шлаковую ванну. В обоих случаях шлак, удаляемый шнековым транспортером, имел размер 250-350 мм. Шлаковые отложения имеют достаточно рыхлую структуру серого цвета (похожие на шлаковые отложения экибастузского угля). На поперечных разломах видно, что отложения имеют слоистую структуру, т.е. шлакование происходило в течение длительного времени. В первом случае шлаковые массы были сформированы в зоне горелок, т.к. на кусках шлака остались следы экранных труб. Во втором случае, предположительно, шлаковые массы были сформированы в зоне аэродинамического выступа под ширмовым пароперегревателем.

4. Удельный расход электрической энергии на пылеприготовление составил 30,33-34,6 квтч/тнт (при 100% сжигании опытного угля), что

несколько выше для экибастузского угля 25-32 квтч/тнт возможно из-за твердой минеральной части топлива.

5. Для более тщательного выявления шлаковых свойств опытного угля необходимо проведение 3-4 серий опытов на нагрузках 160-180 т/ч в одно и двухмельничных режимах.

Полученные данные показали [2], что опытный уголь можно использовать для горения в топке парогенератора БКЗ-190-100 в том случае, если станция работает на низкой приведенной нагрузке $\approx 118-122$ т/ч, при более высоких значениях высока вероятность шлакования труб, что может привести к ухудшению теплопередачи от дымовых газов к поверхностям нагрева, расположенных в топке. Отложения шлака возникают в том случае, если температура газов на выходе из топки более высокая, чем температура размягчения золы, а так же в высокотемпературных зонах топки при неудовлетворительной организации аэродинамического топочного процесса. Принято решение использовать данный вид топлива только в смеси с существующим Экибастузским углем, что позволит исключить выше указанные недостатки.

Список литературы:

1. Дукенбаев К. Энергетика Казахстана. Условия и механизмы ее устойчивого развития. – Алматы. 2002. – 447 с.
2. Заключение по теплотехническим испытаниям котла БКЗ-190-100 Ф (М) ПК.

УДК 662.737

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ПРИГОТОВЛЕНИЯ ОРГАНОВОДОУГОЛЬНЫХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ НА ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИХ ГОРЕНИЯ

Сидор А.М.*, Сурков В.Г., к.т.н.** , Головки А.К., д.х.н.**

*Томский государственный университет, г. Томск

** Учреждение Российской академии наук Институт химии нефти СО РАН, Томск

E-mail: sur@ipc.tsc.ru

Традиционное использование жидких углеводородных продуктов нефтяного или угольного происхождения в качестве топлива в теплоэнер-

гетических установках сопряжено со значительными трудностями в случае их обводненности. Целесообразно превращать обводненные жидкие топлива в тонкодисперсные устойчивые водоуглеводородные системы, эффективность сжигания которых подтверждена многочисленными исследованиями и промышленным применением [1]. Для приготовления однородных композиционных топлив используются современные высокоэффективные устройства, такие как дезинтеграторы и кавитационные аппараты.

Большинство тепловых и теплоэнергетических комплексов, как в России, так и за рубежом, используют в качестве энергетического источника уголь в порошкообразном состоянии. Его производство считается очень энергозатратным, в нем к тому же используется дорогостоящее оборудование. Эффективность сжигания угля можно повысить, используя его в виде водоугольного топлива. Водоугольное топливо обладает всеми свойствами жидкого топлива и вполне может заменить на небольших котельных мазут [2]. Для приготовления водоугольного топлива могут быть использованы мельницы механоактиваторы позволяющие получать частицы угля микронного размера. Введение в состав водоугольных суспензий не кондиционных нефтепродуктов позволит существенно увеличить теплотворную способность таких топлив. Для получения устойчивых и пригодных для сжигания органоводоугольных топлив необходимо совместить стадию диспергирования смеси и измельчения угля.

Цель данной работы сравнительная оценка влияния механоактивационного и кавитационного способа приготовления органоводоугольных топлив на характер их горения.

В работе использовался флюид, вытекающий в виде естественного поверхностного проявления рудника «Интернациональный» (г. Мирный), представляющий собой стойкую водонефтяную эмульсию (ВНЭ) содержащую 10 - 12 мас. % минерализованной воды и бурый уголь Барандатского месторождения Кемеровской области. Обработку и приготовление смесей проводили на кавитационной установке, ООО «Технокомплекс» и механоактивационной установке дискретного типа АГО – 2. Для определения характеристик горения чашечки из танталовой фольги с навеской смеси (1 ± 0.05 грамм) помещались в муфельную печь с температурой 800 °С. С помощью секундомера измерялось время горения, и визуально оценивался характер горения. Эксперименты проводились 3^хкратно и результаты усреднялись.

В результате кавитационной и обработки (10 минут) смесей ВНЭ – уголь – вода, содержащих от 20 до 40% угля и до 20% воды, получается

устойчивая однородная суспензия. Внешний вид смесей подвергнутых механоактивационной (МА) обработке аналогичен. Через две недели, после помещения обработанных смесей в мерные цилиндры, появляется с трудом определяемая граница, разделяющая более темную нижнюю и верхнюю части смеси. Отслоения воды не обнаруживается. После небольшого перемешивания первоначальная консистенция смесей восстанавливается.

В таблице 1 представлены экспериментальные результаты по сжиганию МА смесей ВНЭ - уголь содержащих 20% воды (Время механоактивационной обработки 10 минут).

Таблица 1. – Характеристики горения МА смесей, содержащих 20% воды.

Смесь ВНЭ/уголь + 20% H ₂ O	Зольность, %	Задержка воспл., сек	Время выгорания угля, сек	Полное время горения, сек
80/20	8.3	1	13	32.7
70/30	12.6	1.3	13.3	37.7
60/40	19.6	1.3	Нет	46
50/50	23.9	2	Нет	93

При температуре 800 °С помещенные в печь смеси через 1 – 2 секунды воспламеняются, наблюдается интенсивное кипение смесей, в факеле пламени при содержании угля в исходной смеси 20 и 30 % визуально наблюдаются интенсивные сгорающие частицы угля. Кипение прекращается через ~ 13 секунд, одновременно прекращается вынос частиц угля в факел пламени, далее смесь сгорает равномерным пламенем.

В таблице 2 представлены экспериментальные данные по сжиганию смесей ВНЭ – уголь содержащих 20 % воды (вода добавлялась с учетом имеющейся в нефти воды), подвергнутых кавитационной обработке, в течение 10 минут.

Таблица 2. – Характеристики горения кавитационно обработанных смесей, содержащих 20% воды.

Смесь ВНЭ/уголь + 20% H ₂ O	Зольность, %	Задержка воспл., сек	Время выгорания угля, сек	Полное время горения, сек
80/20	5.1	1	19.3	29.3
70/30	7.17	1	18.7	30.7
60/40	9.5	1	22.7	37.3

При температуре печи 800 °С смеси воспламеняются практически мгновенно (таблица 2). У всех смесей наблюдается интенсивное кипение, сопровождающееся выносом частиц угля и их сгоранием в факеле пламени. С увеличением доли угля в смеси увеличивается время горения угля, и время горения всей смеси.

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы.

1. При кавитационной и механоактивационной обработке возможно получение устойчивых суспензий содержащих жидкий углеводород, уголь и воду.
2. Наличие воды в суспензии интенсифицирует сгорание угля содержащегося в смеси.
3. Существенное увеличение полноты сгорания суспензий содержащих жидкий углеводород, уголь и воду, полученных кавитационной и МА обработкой может быть достигнуто при введении в смесь ~ 20% воды.

Список литературы:

1. Кормилицын В.И., Лысков М.Г., Румынский А.А. Подготовка мазута к сжиганию для улучшения технико-экономических и экологических характеристик котельных установок. // Новости теплоснабжения, 2000, №4, С.19-21.
2. Зайденварг В.Е., Трубецкой К.Н., Мурко В.И., Нехороший И.Х. Производство и использование водоугольного топлива. М.: Издательство Академии горных наук, 2001. С. 173.

УДК 662.6:621.3.029.62

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ЗАКОНОМЕРНОСТЯМ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ СУХОГО И ВЛАГОНАСЫЩЕННОГО УГЛЯ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЛЯ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Сладков С.О.¹, аспирант, Саломатов Вл.В.^{2,3}, д.т.н,
Пащенко С.Э.³, к.ф-м.н., Саломатов Вас.В.², к.ф-м.н

¹ Томский национальный исследовательский политехнический
университет, г. Томск,

²Институт теплофизики СО РАН г. Новосибирск

³ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск
E-mail: slaSO@yandex.ru

Изучение процесса горения угля постоянно находится в поле зрения исследователей. На современном этапе прослеживается тенденция существенной детализации этого сложного явления. Несколько раньше обширные исследования А. С. Предводителя и группы его сотрудников были посвящены раскрытию физико-химического механизма горения углерода в условиях, близких к технологии его промышленного применения [1]. Они заняли промежуточное положение между изучением всего комплекса процесса сжигания натуральных углей (школа Г. Ф. Кнорре) и направлением, включающим элементарные акты взаимодействия углерода с газовой фазой. Результаты этих работ получены, главным образом, с применением классической теории горения. Однако, даже более поздние теоретические построения, такие как тепловая теория горения и теория цепных химических реакций, созданные трудами выдающихся ученых Я.Б. Зельдовича, Н.Н. Семёнова, Д.А. Франк-Каменецкого и др., хорошо описывающие свойства пламени, в то же время не учитывают ряда факторов, способных во многом определять ход процесса горения. К числу таких факторов можно отнести электрические свойства племён, которые, как показало их экспериментальное изучение, можно эффективно использовать для контроля и управления процессом горения. О полезных электрофизических свойствах пламени в свое время указал Томсон. Им утверждается: во-первых, при горении в пламёнах рождаются не только ионы, но и свободные электроны; во-вторых, электрическое поле можно использовать для интенсификации процесса горения [2].

Основными механизмами влияния электрического поля сверхвысокой частоты на процессы горения угля являются: электрогидродинамический, тепловой, кинетический. В допробойных электрических полях при электрогидродинамическом воздействии, возникающие пондеромоторные силы могут эффективно изменять гидродинамические характеристики течения в зоне горения и вблизи нее, изменяя форму, площадь поверхности пламени, скорость его распространения в каналах, отклоняя и расщепляя факел пламени и т.д., не изменяя при этом нормальной скорости горения. В количественном отношении этот механизм должен быть наиболее существенен при горении дисперсных систем (пылеугольная смесь), так как величина массовых электрических сил при прочих равных условиях тем больше, чем больше масса носителей заряда. И если таким носителем яв-

ляется частичка, масса которой на много порядков превышает массу самого тяжелого иона, то, естественно, и эффект воздействия будет намного выше.

Тепловой и кинетический механизмы могут играть существенную роль только в двух ситуациях. Во-первых, когда внешнее поле является высокочастотным или сверхвысокочастотным. Только в этом случае непосредственно в зоне горения можно создать напряженность поля, достаточную для эффективной джоулевой диссипации энергии. Во-вторых, в режиме электрического разряда (тлеющего, дугового, коронного), когда источником плазмы служат не только химические реакции горения, но ионизация происходит во всем разрядном промежутке. В этом случае воспламенение в условиях электрического разряда определяется не только тепловой энергией, рассеиваемой в разряде, но и высокоэнергетическими электронами, которые могут служить “искрами” (или промоторами) – инициаторами разветвленных цепных реакций. Подобные процессы могут происходить также при воспламенении твердых взрывчатых веществ, в случае возникновения поверхностного заряда и, как его следствие, искрового разряда. Существенную роль такие процессы могут играть при переходе горения в детонацию в аэродисперсных средах (например, пылеугольновоздушная смесь).

Кроме теоретических предпосылок использования СВЧ-поля для процессов горения угля существуют и чисто практические выгоды. Традиционной технологией использования топлив в энергетике является прямое сжигание углей в факеле. При этом для розжига и стабилизации процесса горения, прежде всего, высокозольных и низкорекреационных углей применяют значительные добавки (до 20% и более) высококачественного топлива (природный газ или топочный мазут, стоимость которых постоянно растет). Применение СВЧ-плазменных технологий даст возможность отказаться от дополнительного использования мазута или природного газа, снизить неполноту сгорания угля и уменьшить уровни выбросов токсичных и канцерогенных веществ с дымовыми газами.

Вышеперечисленные характеристики влияния СВЧ-поля на горение угля дают возможность актуального применения их для создания опытных установок (СВЧ-плазмотронов, СВЧ-горелок).

В закрытом акционерном обществе "СибКОТЭС" (г. Новосибирск) [3] разработан СВЧ-плазмотрон для зажигания угольной пыли.

Принципиальная схема установки изображена на рис.1

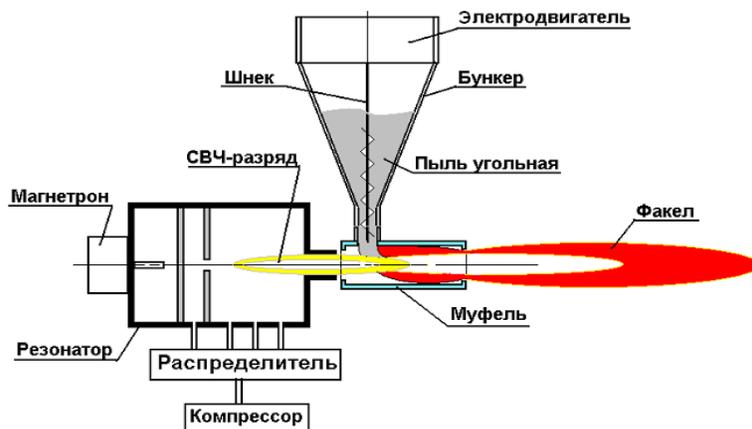


Рис.1 СВЧ-плазмотрон

Результаты экспериментов свидетельствуют о существенном повышении интенсивности горения угля при СВЧ воздействии. СВЧ-плазма инициирует глубокое выгорание угля даже при относительно коротких взаимодействиях угольных частиц с плазменным факелом (~ 0.05 с). Показано, что пыль бурого угля горит более ровным пламенем по сравнению с горением каменноугольной пыли. Это объясняется большим количеством летучих веществ, выделяемых из бурого угля при термическом воздействии.

Исследования, проведенные совместно учеными из Украины и Германии [4] по СВЧ-плазменному сжиганию угля, позволили создать лабораторный стенд, схема которого изображена на рис.2.

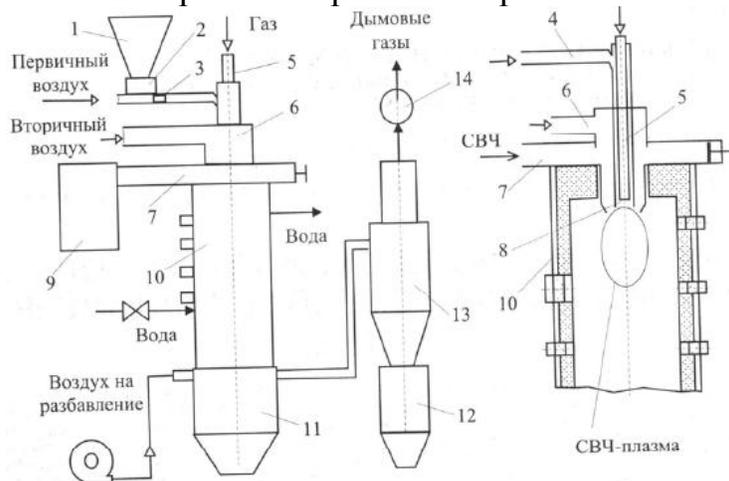


Рис. 2 Принципиальная схема экспериментального стенда

1-бункер, 2-питатель пыли, 3-смеситель, 4-канал пылевоздушной смеси, 5-канал природного газа, 6-канал вторичного воздуха, 7-призматический волновод, 8-

коаксиальный волновод, 9-СВЧ-генератор, 10-реактор, 11-охладитель газов, 12-бункер золы, 13-золоуловитель, 14-дымосос.

В итоге проведенной работы авторами отмечается одинаковое воспламенение угля при подаче «холодного» воздуха с температурой $t=10-15^{\circ}\text{C}$ и при подаче предварительно нагретого воздуха с температурой $t=100^{\circ}\text{C}$. Удельный расход электроэнергии на воспламенение угля достигает $0,09\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$. Однако и он не является предельным из-за ограниченной производительности питателя на стенде. Делается вывод, что в основе СВЧ-плазменной технологии повышения реакционной способности и эффективности сжигания пылеугольно-воздушной смеси лежат физико-химические превращения угольной пыли и окислителя. Они представляют суперпозицию следующих процессов: нагрев аэросмеси (угольной пыли) до температуры деструкции; деструкцию угольных частиц с выделением летучих; газофазные реакции летучих и окислителя; нагрев коксового остатка с газовой фазой. Подчеркиваются, основные преимущества СВЧ-плазменного сжигания перед традиционным факельным сжиганием. Они заключаются в следующем: дробление угольной пыли в зоне СВЧ-плазмы; увеличение скоростей реакции окисления и газификации угольной пыли; снижение механического недожога; снижение уровней выбросов с дымовыми газами оксидов серы и азота, тяжелых металлов и канцерогенных углеводородов при безмазутной растопке и подсветке пылеугольного факела в котлах ТЭС.

Применение электрических полей сверхвысоких частот для горения угля позволяет добиться следующих важных для теплоэнергетики эффектов: экономический эффект (снижение затрат на подсветку и растопку котла); топливный эффект (использование низкорреакционных и высоковлажных бурых углей и снижение механического недожога); экологический эффект (снижение выбросов оксида азота и серы, тяжелых металлов и канцерогенных углеводородов).

Список литературы:

1. Хитрин Л.Н., Цуханова О.А. Горение углерода, Успехи физических наук Т.XLI, вып.3, июль 1950г. - с.311-330.
2. Кнорре Г.Ф., Арефьев К.М., Блох А.Г., Нахапетян Е.А., Палеев И.И., Штейнберг В.П. Теория топочных процессов, Изд. "Энергия". Москва. 1966. – 476с.

3. Буров В. Ф., Стрижко Ю. В. СВЧ-плазмотрон со свободно парящим плазмодом // Горение твердого топлива. – Новосибирск: Изд-во Ин-т теплофизики СО РАН. – 2006.С.103-109.
4. Варвив Д.М., Канило П.М., Расюк Н.И., Тымчик А.В., Бермотов В.Н., Костенко К.В., Шевченко А.В., Соловьев Г.В., Шевцова Л.В., Ермак С.А., Шунеман К. Исследование процесса сжигания угольной пыли в экспериментальной СВЧ-плазменной горелке. Промышленная теплотехника, 2007, т.29, №2. с47-54.

УДК 662.61+532.546.6

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛООБМЕНА С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Мазаник А.С., аспирантка, Субботин А.Н., д.ф.– м.н.
Томский политехнический университет, г. Томск
E-mail: nucleariya@pochta.ru, subbot@vtomske.ru

Переход к рыночной экономике с особой остротой обнаружил отставание угольной отрасли как по технико-технологическому уровню, так и в области экономического и организационного управления. Интенсивная эксплуатация недр ставит проблему развития направления комплексного их освоения и разработку ресурсосберегающих технологий, позволяющих экономить минеральные ресурсы при одновременном снижении трудовых, энергетических и экономических затрат. Этим требованиям полностью удовлетворяет технология подземной газификации угля

Но, несмотря на перспективность рассматриваемой технологии ПГУ, известны немногочисленные примеры её практической реализации. Это обусловлено в первую очередь отсутствием теории процессов тепломассопереноса в угле при его газификации под землей. Поэтому необходимо создание теории процесса ПГУ на базе математической модели, учитывающей комплекс основных процессов тепломассопереноса, протекающих при подземной газификации.

Рассмотрим угольный пласт глубиной H , в котором пробурена скважина и введена труба. Предположим, что внутри этой трубы находится вторая труба, меньшего диаметра рис. 1.

По внутренней трубе к нижнему основанию угольного пласта подается паровоздушная смесь. По истечении некоторого времени угольный

пласт прогреется до такой температуры, что в нем начнутся химические процессы. Исследуем состав газа, образующегося при газификации угольного пласта в зависимости от условий и свойств, вдуваемой паровоздушной смеси.

С учетом испарения влаги, разложения угля, гетерогенных и гомогенных реакций [2, 3] уравнения, моделирующие рассматриваемые процессы будет иметь вид [1]. При проведении численных расчетов система дифференциальных уравнений [1] решалась с применением итерационно-интерполяционного метода [4].

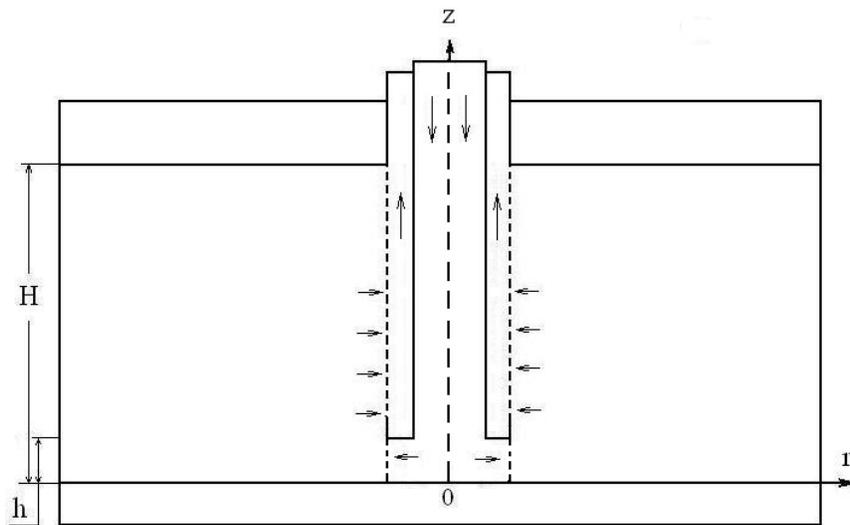


Рис. 1. Схема подачи паровоздушной смеси и отвода образующегося газа при ПГУ

Результаты проведенных численных исследований показывают, что анализируемый комплекс взаимосвязанных физико-химических процессов, протекающих в условиях подземной газификации углей, характеризуется высокой интенсивностью, как физико-химических превращений, так и тепломассопереноса. При этом область основных химических реакций не сосредоточена в малой по размерам зоне, а растянута в некотором диапазоне температуры и пространстве, т.е. условия подвода энергии и окислителя в зону газификации влияют на скорость физико-химических превращений не только в малой окрестности этой зоны.

Установлено, что меняя концентрацию кислорода в подаваемой в угольный пласт паровоздушной смеси можно менять режим протекания процесса подземной газификации. При сравнительно небольшой массовой концентрации кислорода равной 0.1 – 0.15 газификация протекает при

температуре не превышающей 800 К (рис. 2), а массовая концентрация горючего газа (СО) в образующихся газообразных продуктах не превышает 27%. Концентрации водорода и метана при этом малы: концентрация водорода не превышает 0.27%, а метана менее 1.2%.

Увеличение массовой концентрации кислорода до 0.2, в закачиваемой в угольный пласт паровоздушной смеси, приводит к смене режима протекания процесса (рис. 3).

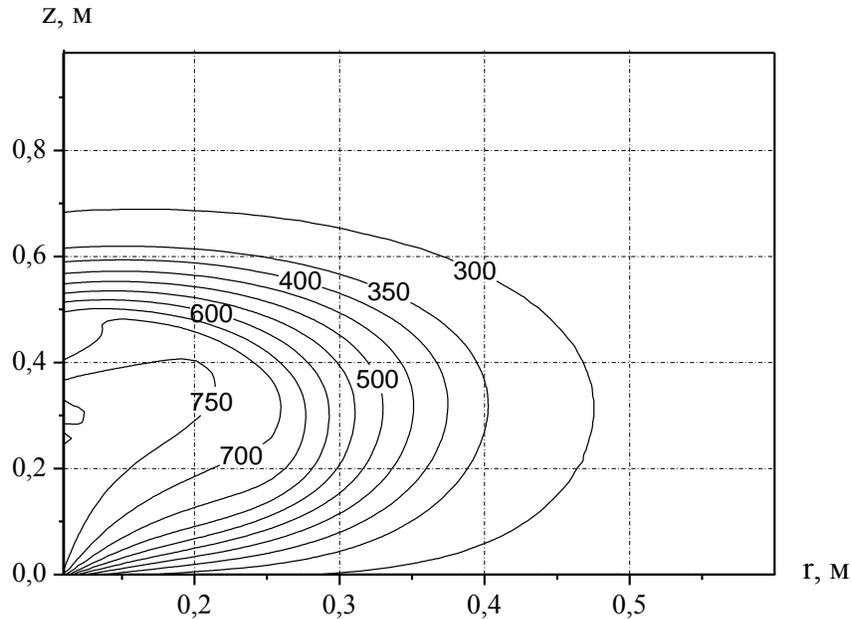


Рис. 2. Типичное распределение температуры в угольном пласте при массовой концентрации кислорода равной 0,1 ... 0,15

Температура газификации для данного режима возрастает до 1300 К даже при условии подачи холодной паровоздушной смеси. Массовая концентрация горючего газа (СО) в образующихся газообразных продуктах возрастает до 45%. Концентрации водорода и метана также возрастают, но незначительно: концентрация водорода повышается до 1.8%, а метана до 1.3%.

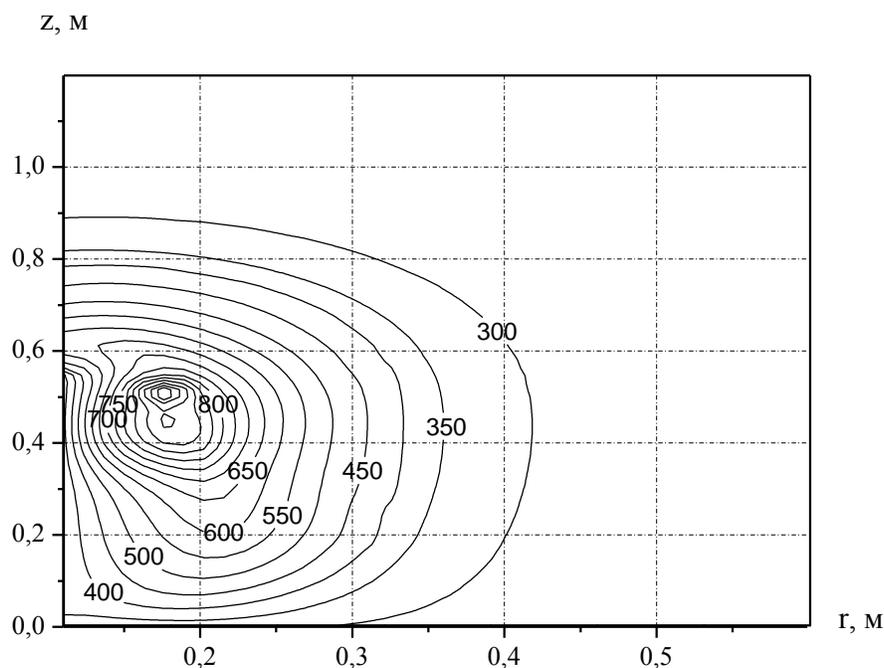


Рис. 3. Типичное распределение температуры в угольном пласте при массовой концентрации кислорода равной 0.2.

Таким образом, рассмотренный подход анализа процессов подземной газификации угля на базе математического моделирования тепломассопереноса и физико-химических превращений [1], протекающих при локальном нагреве угольных пластов и подводе окислителя, позволяет делать оценку состава образующейся газообразной смеси и прогнозировать режимы протекания данных процессов в условиях ПГУ.

Список литературы:

1. Кузнецов Г.В., Субботин А.Н. Тепломассоперенос в условиях подземной газификации угля // Тепловые процессы в технике. – 2010. – Т. 2, № 9. – С. 422–426.
2. Гришин А.М., Зинченко В.И., Ефимов К.Н., Субботин А.Н., Якимов А.С. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. – Томск: Изд-во ТГУ, 2004. – 319 с.
3. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. и др. Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов; 2-е издание переработанное и дополненное. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
4. Щетинков Е.С. Физика горения газов. – М.: Наука, 1965. – 739 с.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГАЗИФИКАЦИИ КОКСА В СРЕДЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОДЯНОГО ПАРА И АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ГАЗИФИКАТОРА

Субботин А.Н., д.ф.– м.н.

Томский политехнический университет, г. Томск

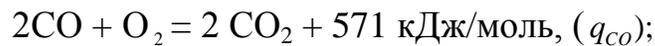
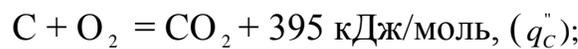
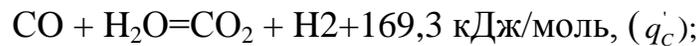
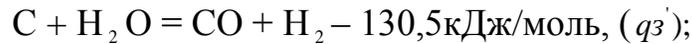
E-mail: subbot@vtomske.ru

Шевырёв С.А., аспирант

Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово

E-mail:ssa.pmahp@kuzstu.ru

В основе математической модели [1], исходя из экспериментальных исследований, проведенных на кафедре Кузбасского государственного технического университета, положены следующие химические реакции:



Ставится задача найти: выход газов, их состав, расходы, нестационарное температурное поле с оценками тепловых потерь, теплофизических и кинетических характеристик.

Запишем систему уравнений для нестационарного режима используя модель [1]:

- сохранение массы кокса

$$\rho_1 \cdot \frac{\partial \varphi_1}{\partial \tau} = -R_c, \quad R_c = R_{c1} + R_{c2}, \quad (1)$$

где $R_{c1} = s \cdot \rho_4 \cdot \varphi_4 \cdot c_1 \cdot k_{s1} \cdot \varphi_1 \cdot \exp(-E_{c1}/(R \cdot T_s))$,

$$R_{c2} = s \cdot \rho_4 \cdot \varphi_4 \cdot c_4 \cdot k_{s2} \cdot \varphi_1 \cdot \exp(-E_{c2}/(R \cdot T_s));$$

Принимаем, что в процессе конверсии масса конденсированной воды равна нулю, тогда объемная доля $\varphi_2 = 0$.

- неразрывности газовой фазы

$$\frac{\partial \rho_4 \varphi_4}{\partial \tau} + v \cdot \frac{\partial \rho_4 \varphi_4}{\partial z} = R_c + R_4, \quad (2)$$

Здесь $R_4 = R_{CO}^1 + R_{CO}^2$, $R_{CO}^1 = k_{CO}^1 \cdot c_2 \cdot c_5 \cdot \exp(-E_{CO}^1/(R \cdot T_4))$,

$$R_{CO}^2 = k_{CO}^2 (c_1 M / M_{51})^{0.25} (c_2 M / M_{52}) \cdot T_4^{-2.25} \cdot \exp(-E_{CO}/RT_4),$$

- неразрывности α – компоненты газовой фазы

$$\frac{\partial(\rho_4 \varphi_4 \cdot c_\alpha)}{\partial \tau} + v \cdot \frac{\partial(\rho_4 \varphi_4 \cdot c_\alpha)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (\rho_4 \varphi_4 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial z}) + R_\alpha, \quad \alpha = \overline{1,5}; \quad (3)$$

- сохранение энергии газовой фазы и кокса

$$\rho_4 \cdot \varphi_4 \cdot c_\alpha \cdot \left(\frac{\partial T_4}{\partial \tau} + v \cdot \frac{\partial T_4}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left((\lambda_4 \cdot \varphi_4 + \lambda_R) \frac{\partial T_4}{\partial z} \right) - A_s \cdot (T_4 - T_s) + q_{CO}^1 \cdot R_{CO}^1 + q_{CO}^2 \cdot R_{CO}^2 - \frac{2}{r_o} \cdot \alpha_1 \cdot \varphi_4 \cdot (T_4 - T_s), \quad (4)$$

где $\lambda_R = \frac{16 \cdot \sigma \cdot T_4^3}{s}$;

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i \cdot \varphi_i \cdot c_{p_i} \cdot \frac{\partial T_s}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_s \cdot \frac{\partial T_s}{\partial z}) + q_{c1} \cdot R_{c1} + q_{c2} \cdot R_{c2} + A_s \cdot (T_4 - T_s) + \frac{2 \cdot r_1}{r_o^2} \cdot \alpha_3 \cdot (T_s - T_E) + q_R, \quad (5)$$

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^2 \lambda_i \cdot \varphi_i, \quad c_{p4} = \sum_{\alpha=1}^4 c_{p\alpha} \cdot c_\alpha,$$

- движение газа в порах (в форме квадратичного закона фильтрации) и уравнение состояния

$$v = \frac{k}{\mu + k \cdot \beta \cdot \rho_4 \cdot |V|} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right), \quad p = \frac{\rho_4 \cdot R \cdot T}{M_4}, \quad M_4 = 1 / \sum_{\alpha=1}^4 \frac{c_\alpha}{M_{4\alpha}}. \quad (6)$$

Система уравнений (1) – (6) решается при краевых условиях:

$$\tau = 0: \quad \varphi_i = \varphi_{iH}, \quad i = \overline{1,4}; \quad c_\alpha = c_{\alpha H}, \quad \alpha = \overline{1,5}, \quad T = T_s = T_H, \quad p = p_H; \quad (7)$$

$$z=0: \quad T_4 = T_{pw}, \quad (pv)_w = const, \quad \lambda_s \cdot \frac{\partial T_s}{\partial z} = \alpha_1 \cdot (T_s - T_{pw}), \quad c_\alpha = c_{\alpha w},$$

$$z=h: \quad \partial c_\alpha / \partial z = \partial T_4 / \partial z = 0, \quad p = p_H, \quad \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} = 0. \quad (8)$$

В уравнениях (3) – (5) введены краткие обозначения скоростей химических реакций. Здесь v – скорость фильтрации; M_4 – молекулярная масса газовой фазы; индекс 4 приписывается величинам, характеризующим газовую, а s – конденсированную фазу; k – коэффициент проницаемости пористого слоя; $(\rho v)_H$ – расход газа во входном сечении; T_s, T_4, T_E – соответственно температуры конденсированной фазы, газа в порах и внешней среды; $E_{L1}, E_{c1}, E_{c2}, k_{L1}, k_{c1}, k_{c2}$ – энергия активации и предэкспоненциаль-

ные множители реакций испарения воды, гетерогенных реакций окисления кокса; R – универсальная газовая постоянная; $\lambda_{4\alpha}, c_{4\alpha}, M_{4\alpha}$ – коэффициент теплопроводности, массовая концентрация и молекулярная масса α – компоненты, параметр с индексом $\alpha=1$ соответствует кислороду (O_2), $\alpha=2$ – CO , $\alpha=3$ – CO_2 , $\alpha=4$ – H_2 , $\alpha=5$ – H_2O ; p – давление газообразных продуктов в порах; $A_s = \alpha_1 \cdot s$ – объемный коэффициент теплоотдачи; s – удельная поверхность пор; $q_R = \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4$ – радиационный поток от внешней стенки трубы в окружающую среду; ε_s – степень черноты; τ – время; z – размерная пространственная координата, направленная по оси трубы; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – коэффициенты теплоотдачи во входном, выходном сечении и на внешней стенке трубы; r_1, r_0 – наружный и внутренний радиусы трубы; $\rho_0, c\rho_0, \lambda_0, \varphi_i$ – плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности и объемная доля : кокса ($i=1$), воды ($i=2$), золы ($i=3$) и газовой фазы ($i=4$); $\lambda_4, \lambda_R, \lambda_s$ – коэффициенты молекулярной и лучистой теплопроводности газовой фазы и коэффициент теплопроводности конденсированной фазы; σ – постоянная Стефана – Больцмана; μ – коэффициент динамической вязкости; β – константа в квадратичном законе фильтрации.

За основу численных расчетов был взят эксперимент с образцом шахты «Березовская» при температуре в слое материала около $1000^\circ C$ (рис. 1.).

Численные расчеты проводились при значениях параметров: $\rho_1 = 1500$ кг/м³, $\rho_2 = 1000$ кг/м³, $\rho_3 = 1560$ кг/м³, $\rho_4 = 1,25$ кг/м³, $c_1 = 1630$ Дж/(кг·К), $c_2 = 4190$ Дж/(кг·К), $c_3 = 800$ Дж/(кг·К), $\lambda_1 = 0,4$ Вт/(м·К), $\lambda_2 = 0,61$ Вт/(м·К), $\lambda_3 = 0,8$ Вт/(м·К), $\lambda_4 = 0,0268$ Вт/(м·К), $\lambda_{O_2} = 0,0268$ Вт/(м·К), $\lambda_{CO} = 0,025$ Вт/(м·К), $\lambda_{CO_2} = 0,038$ Вт/(м·К), $\lambda_{H_2} = 0,307$ Вт/(м·К), $\lambda_{H_2O} = 0,029$ Вт/(м·К), $\lambda_{N_2} = 0,025$ Вт/(м·К), $E_{S1} = 140$ кДж/моль, $E_{S2} = 207$ кДж/моль, $E_{CO} = 106,5$ кДж/моль, $q_{S1} = -1,0875 \cdot 10^7$ Дж/кг, $q_{CO} = -1,08 \cdot 10^6$ Дж/кг, $q_{S2} = 9,64 \cdot 10^5$ Дж/кг, $k_{S1} = 2,08 \cdot 10^4$ м/с, $k_{S2} = 306$ м/с, $k_{S1} = 35,1$ 1/с, $S = 6 \cdot 10^5$ 1/м, $T_H = T_S = 293$ К, $p_H = 1,01 \cdot 10^5$ Па, $\varphi_{1H} = 0,352$, $\varphi_{2H} = 0$, $\varphi_{3H} = 0$, $\varphi_{4H} = 0,648$.

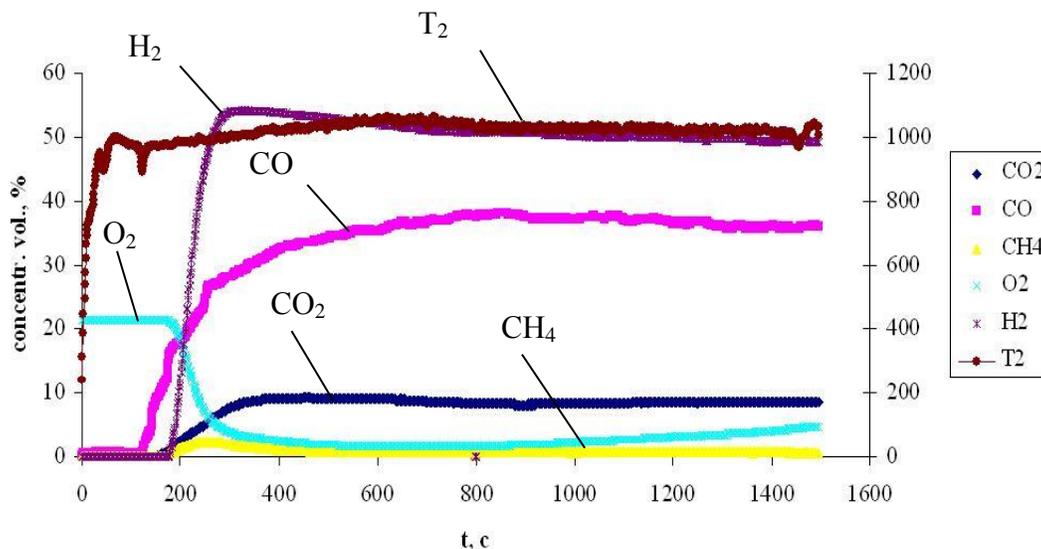


Рис. 1. Зависимость выхода газообразных продуктов из образца «Березовская» от времени процесса. Температура в слое материала около 1000°C

На рис. 2. приведены зависимости, полученные при численном решении математической модели (1) – (8) исследуемого процесса конверсии с образцом «Березовская».

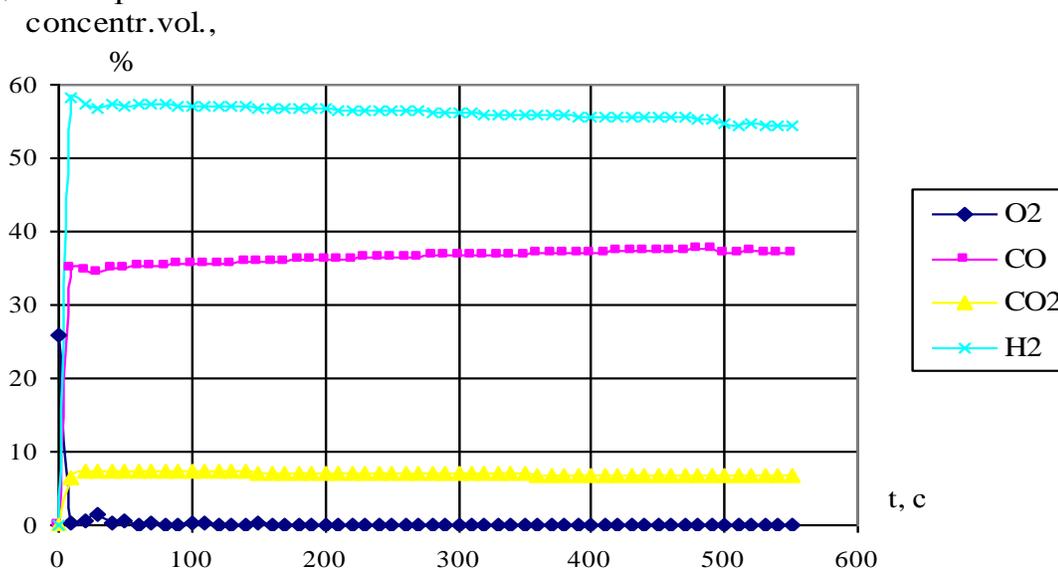


Рис. 2. Зависимость выхода газообразных продуктов из образца «Березовская» от времени процесса.

Анализируя приведенные зависимости (рис. 1 и рис. 2) приходим к выводу, что наблюдается хорошее согласование по процентному содержа-

нию продуктов газификации после прогрева образца. Температура в слое образца, найденная численно, также согласуется с результатами лабораторных исследований. Таким образом, предложенная математическая модель может использоваться для анализа состава газа при исследовании процессов конверсии органического сырья.

Литература:

1. Кузнецов Г.В., Субботин А.Н. Тепломассоперенос в условиях подземной газификации угля // Тепловые процессы в технике. – 2010. – № 9. – С. 422–426.

ГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ БЕСПЛАМЕННОГО СЖИГАНИЯ ВЫСОКОКАЛОРИЙНЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

А.В. Субботин, С.В. Долгов, А.Ю. Долгих
Томский политехнический университет, г. Томск
ShuraD@tpu.ru
Sergeydolgov555@rambler.ru

Актуальность альтернативной энергетики неоспорима и в связи с обострением энергетических проблем и удорожанием топлив в мире – неуклонно повышается. Мировое сообщество стало осознавать, что запасы ископаемых энергоносителей не безграничны. Проведённые исследования могут в значительной мере способствовать развитию энергетики на базе использования в ней таких перспективных веществ как ацетилен и водород. Сейчас значение этих веществ в качестве высокоэффективного, недорогого и доступного топлива возрастает лавинообразно. Получение ацетилена и водорода, а также исследования их потенциальных свойств и особенностей на сегодня достигли достаточно высокого уровня. Однако развитие этих ветвей энергетики как одного из способов повышения жизненного уровня общества сдерживается тем фактором, что ацетилен и водород очень взрывоопасны. Так во всех странах, где имели дело с ацетиленом, были приняты законы, полностью запрещающие применение жидкого ацетилена и допускающие применение газообразного ацетилена при избыточном давлении не выше 0,25 атмосфер[1]. В случае же утечки водорода он образует с кислородом воздуха самовоспламеняющуюся гремучую смесь. Исследования проводились как раз с целью решения данной проблемы. Предполагается использовать пористые неметаллические материалы в качестве накопителя (аккумулятора) – рабочей зоны окисления возду-

хом для таких веществ как ацетилен и водород. Это в первую очередь обеспечит взрывобезопасность, т.к. пористая структура не даёт развиваться критическому объёму для взрыва и предотвращает от проскока пламени. Также, при применении пористого материала внутри сосудов для хранения взрывоопасных сжиженных газов, становится возможным увеличения объёма заполнения до 70% (баллоны пропана, к примеру, заполняются всего лишь до 45%). Всё это позволит в перспективе использовать данный вид энергии в газотурбинных установках и газогенераторах, а также в различных котлах и двигателях в качестве топлива [2].

В условиях вышеизложенного в настоящий момент ведется разработка новой экспериментальной модели горелочного устройства для безопасного и эффективного сжигания жидких и газообразных топлив (рис. 1).

Задачей разрабатываемой модели является создание универсального горелочного устройства инфракрасного излучения, позволяющего безопасно и эффективно сжигать как низкокалорийные, так и высококалорийные жидкие и газообразные топлива.

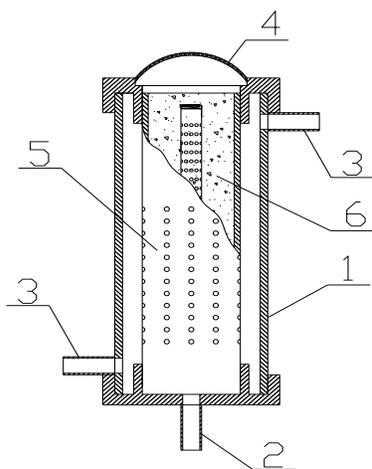


Рис 1. Горелочное устройство для сжигания жидких и газообразных топлив

Горелочное устройство состоит из корпуса 1, топливного инжектора 2, воздухоподающих патрубков 3, сетчатого – излучателя 4 размещенного сверху горелки на выходе дымовых газов. Внутри корпуса 1 размещен перфорированный цилиндр 5 рабочей зоны горения, пространство между топливным инжектором 2 и перфорированным цилиндром 5 заполняется

пористым не металлическим материалом 6 (материал выбирается в зависимости от физико-химических свойств сжигаемого топлива).

Пуск горелочного устройства в работу осуществляют с помощью топливного инжектора 2, по которому поступает топливо (жидкое или газообразное). Через перфорации инжектора 2, топливо проникает вовнутрь засыпки пористого неметаллического материала 6. Одновременно, через патрубки 3 осуществляется подвод воздуха в зону горения через перфорации цилиндра 5 рабочей зоны горения. Воздух попадает вовнутрь засыпки пористого неметаллического материала 6. Тем самым процесс подготовки топливо-воздушной смеси происходит непосредственно внутри пористого материала. С помощью запального элемента (на рис.1 не указан) осуществляется розжиг горелочного устройства. Процесс горения протекает в режиме беспламенного, т.к. происходит внутри пористого материала. Сетчатый насадок-излучатель, удерживаемый каркасом, выполняет функцию вторичного излучателя лучистого тепла, приспособления для дожигания горючих газов, барьера от возможного уноса частиц засыпки пористого неметаллического материала за счет относительно высоких скоростей воздушных, топливовоздушных потоков.

Представленная модель относится к горелкам для сжигания жидкого и газообразного топлива и может быть использована в различных областях химической, нефтеперерабатывающей, металлургической промышленности, переработке материалов, строительстве и коммунальном хозяйстве.

В предложенной конструкции горелочного устройства подготовка топливовоздушной смеси и дальнейшее ее сжигание происходит непосредственно в рабочей зоне горения – внутри пористого материала, что исключает возможность развития критического объема для взрыва и способствует предотвращению проскока пламени, тем самым обеспечивая эффективность и безопасность при сжигании как низкокалорийных, так и высококалорийных жидких и газообразных топлив. Взаимное расположение топливного инжектора и наличие перфораций по периметру цилиндра обеспечивает качественную подготовку топливовоздушной смеси и полноту процесса горения, к.п.д. такого горелочного устройства может достигать, по предварительным расчетам, 95-97%. Использование или жидкого, или газообразного топлива делает данное конструктивное решение универсальным.

Литература

1. Миллер С. А. Ацетилен, его свойства, получение и применение. - Л.: Химия, Т. 1.- 1969. -879с.
2. Голяндин А.Н. Эра водородной энергетики все ближе // Знание - сила. - 2004. - № 2. - С. 44-45.
3. Комаров С. М. Шаги к сверхлёгкой энергетике // Химия и жизнь. - 2004. - № 1. - С. 9-15.
4. Богомоллов А.И. Газовые горелки инфракрасного излучения и их применение. -М.: Издательство литературы по строительству,1977.-252с.
5. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. Учеб. пособие для студентов вузов. – М.,: “Энергия”, 1976.- 488с., ил.
6. Липов Ю.М., Третьяков Ю.М. Котельные установки и парогенераторы.
7. - Москва – Ижевск: НИЦ «Динамика», 2003, -592с.
8. Найденов Г.Ф. Горелочные устройства и защита атмосферы от окислов азота. - Киев.: Техника, 1979,- 96с., ил.
9. Теплофизические свойства газов и жидкостей: Справочник, - М.: изд. “Химия”,1967-, 1046с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА, СОПУТСТВУЮЩИХ СУШКЕ УГОЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ

Сыродой С.В.

Томский политехнический университет, г. Томск

Email: ssyrodoy@yandex.ru

Введение

Положительная динамика роста мировых цен на энергоносители заставляет мировую энергетику отказываться от использования такого дорогого топлива как газ в пользу более дешевого угля. В связи с этим возникает необходимость разработки новых способов подготовки и сжигания угля – энергоэффективных и экологоперспективных [1]. Одним из таких способов является технология производства и сжигания водоугольного топлива. Водоугольное топливо (ВУТ) представляет собой гетерогенную структуру, состоящую из равномерно распределенного и мелко измельченного угля и воды [2].

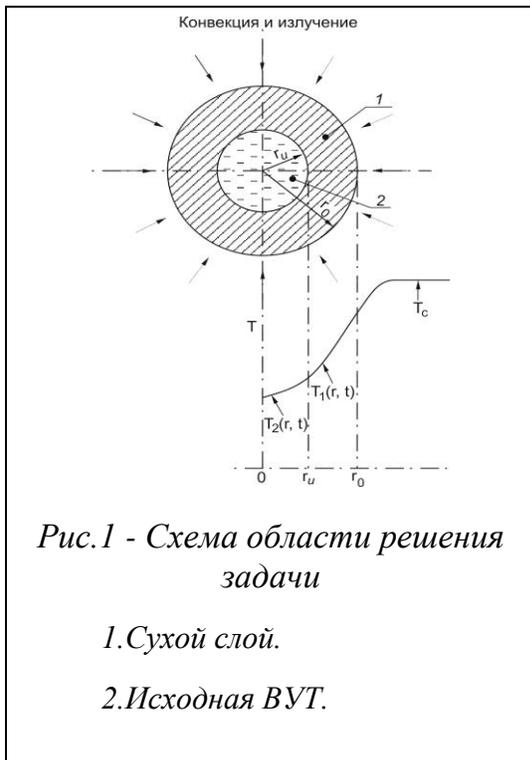
Несмотря на то, что использование водоугольного топлива имеет более чем 40-летнюю историю [3], сегодня по-прежнему актуальны многие нерешенные исследовательские задачи, связанные с поиском физических и режимных характеристик сжигания ВУТ как многостадийного процесса.

Одной из малоизученных стадий является сушка. Теоретические модели, созданные для описания сушки, содержат ряд существенных упрощений. В частности, принимаются равновесные параметры двухфазной системы «жидкость-пар», температура фазового перехода на границе фронта испарения считается «замороженной» и др.

Постановка задачи

Процесс испарения одиночной сферической частицы ВУТ рассматривается по следующей схеме: частица ВУТ, попадая в высокотемпературный поток, начинает подсыхать с поверхности. В результате образуются две характерные зоны (рис.1).

В рамках рассматриваемой математической модели были приняты следующие предположения:



- теплофизические свойства топлива постоянны;
- перенос тепла внутри частицы одномерен;
- реакция воды с углеродом не учитывается.

Система нестационарных дифференциальных уравнений при $0 < t < t_c$ включает:

–уравнение энергии для сухой части (1)

$$\frac{\partial T_1(r,t)}{\partial t} = a_1 \left[\frac{\partial^2 T_1(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_1(r,t)}{\partial r} \right]$$

$$t > 0. r_{и} < r < r_1 \quad T > T_u$$

Где $r_{и}$ – пространственная координата границы испарения, м.

- уравнение энергии для исходной части топлива

$$(2) \quad \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial t} = a_2 \left[\frac{\partial^2 T_2(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial r} \right]$$

$t > 0. r_0 < r < r_{и} \quad T \leq T_u$;
с начальными: $(T(r,0)=T_0)$;
и граничными условиями:

$$(3) \quad -\lambda_1 \frac{\partial T_1(r_0,t)}{\partial r} = \alpha \cdot [T_c - T_1(r_0,t)] + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_c^4 - T_1^4(r_0,t)]$$

–граничные условия четвертого рода на границе испарения:

$$(4) \lambda_1 \frac{\partial T_1(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_u+0} - \lambda_2 \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_u-0} = Q_{исп} \cdot W_{исп};$$

$$(5) T_1(r_u, t) = T_2(r_u, t) = T_u$$

–условие симметрии

$$(6) \frac{\partial T_1(0,t)}{\partial r} = 0$$

1 – зона сухой части топлива.

2 – зона исходного топлива.

Поглощение, подводимой к частице, энергии учитывалось за счет введения в граничное условие (4) произведения $Q_{исп} \cdot W_{исп}$. Координата границы испарения находилась из решения системы уравнений (1)-(6) из выражения:

$$\xi = L - \int v_{ж} \cdot d\tau$$

$$\text{Где: } v_{ж} = \frac{W_{исп}}{\rho_{ж}};$$

Скорость испарения находилась по формуле [5]:

$$W_{исп} = V_0 \cdot \exp\left(\frac{Q_{исп} \cdot \mu \cdot (T_1 - T_0)}{R \cdot T_0 \cdot T_1}\right)$$

Где:

T_1 – Температура на границе испарения; T_0 – Температура замерзания; V_0 –

Скорость испарения при температуре замерзания; μ – Молярная масса водяного пара; R – Универсальная газовая постоянная.

Результаты

Численное моделирование сушки проводилось для частицы ВУТ радиусом $r = 10^{-3} \text{ м}$. Начальная температура частицы $T_0 = 300 \text{ К}$. Теплофизические свойства материала соответствовали Донецкому углю марки «Д» [6]:

$$\lambda = 2.750 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; \quad C_p = 662,5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad \rho = 2260 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

При численном моделировании сушки исследовалось влияние интенсивности теплообмена на скорость сушки частицы водоугольного топлива. Температура окружающей среды варьировалась в широком диапазоне $T = (800 \div 1200)^\circ \text{C}$.

На (рис.2) приведены результаты численного моделирования сушки частицы ВУТ. Как очевидный результат: рост температуры окружающей среды приводит к уменьшению времени полного сушки частицы ВУТ. Но

была выделена следующая особенность: каждое последующее приращение температуры окружающей среды приводит к меньшему эффекту прироста скорости сушки. Например, увеличение температуры окружающей среды T_c с 800°C до 900°C дает прирост скорости сушки на 17%, а при дальнейшем увеличении температуры окружающей среды прирост скорости сушки уменьшается. Так при изменении температуры с 1100°C до 1200°C скорость сушки увеличивается только лишь на 11%.

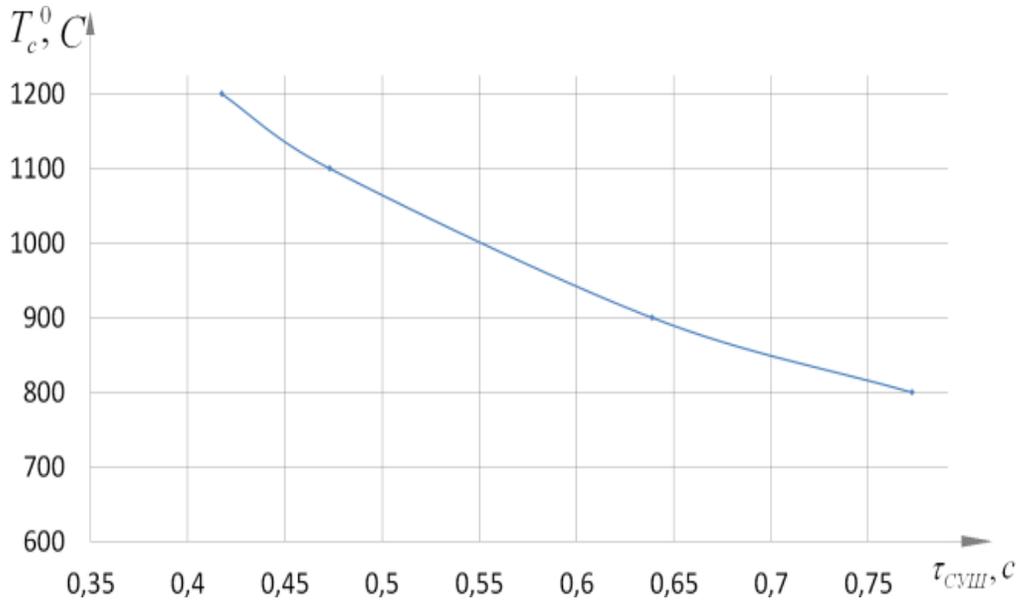


Рис. 2. Зависимость времени сушки от температуры окружающей среды

Заключение

Динамика испарения влаги в частице ВУТ исследуется как нелинейная задача с движущейся границей раздела фаз «вода – пар».

Важным результатом моделирования сушки частицы водоугольного топлива является выделение нелинейного характера зависимостей времени сушки от интенсивности теплообмена.

Впервые используется модель сушки частицы водоугольного топлива, учитывающая связь температуры на границе раздела фаз и скоростью испарения, в условиях радиационно-конвективного теплообмена.

Список литературы

1. Саломатов В.В. Состояние и перспективы угольной и ядерной энергетик России // Теплофизика и аэромеханика. – 2009. – Т.16, №4. – С. 531-544.

2. А.Г. Морозов. Н.В. Коренюгина–Гидроударные технологии для получения водоугольного топлива//Новости теплоснабжения.-2010.-№7-С.18-21.
3. Иванов В.М. Канторович Б.В. Топливные эмульсии и суспензии // Металлургия, Москва, 1963.
4. Huang Z. et all. Theoretical analysis on CWM drop combustion history // Proc. 8-th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. USA, Orlando. Part 1.1986. p. 343-358.
5. Matthews K.J., Jones A.R. The effect of coal composition on coal-water slurry combustion and ash deposition characteristics // Proc. 8-th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. USA, Orlando. Part 1. 1986. p. 388-407.
6. Делягин Г.А. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха // Сб. Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. – М.: изд-во АН СССР, 1967. С. 45-55.
7. Френкель Я.И Кинетическая теория жидкости, Л,. 1975.
8. Ильченко К.Д. Ревенко М.Б. Теплофизические свойства углей Украины,- Харьков. 2009.

УДК 662.62

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТХОДОВ ЛЕСОПЕРЕРАБОТКИ ДЛЯ СЖИГАНИЯ

Тагабайкызы Ж., магистрант
Томский политехнический университет, г. Томск
E-mail: t.j.t_89@mail.ru

Значительное место в лесообрабатывающей промышленности занимают процессы сушки. При этом, для достижения необходимых качеств древесины, процесс сушки должен проходить в таком темпе, который обеспечивал бы удаление излишков влаги без нарушения целостности структуры (без появления трещин). Во всех случаях целью сушки является превращение древесины из природного сырья в промышленный материал с коренным улучшением ее физико-технических, технологических и потребительских свойств.

К ограничениям известных исследований по математическому моделированию тепломассопереноса в древесине, в частности, [1], можно отнести подход к древесине как к гомогенной среде, одномерный характер изучаемых процессов и недостаточный учет термодинамических особенно-

стей поверхностно капиллярных явлений. Методологической основой для изучения тепло- и массопереноса в древесине, имеющей нерегулярную структуру, может служить математического моделирования явлений в рамках механики многофазных систем [2].

По результатам анализа литературной источников сформирована математическая модель теплофизических процессов в древесине, как в трехфазной системе, с учетом различных механизмов переноса массы воды и теплоты с учетом анизотропии структурных свойств системы древесина-вода. Модель записан в декартовой системе координат и включает в себе уравнение сохранения массы, количества движения и энергии в виде уравнения теплопроводности для всех фаз, а также уравнения сохранения на межфазных поверхностях.

Список литературы

1. А.В. Лыков. Теория сушки. - М.: Энергия, 1968. 472с.
2. Дорняк О.Р. Тепломассоперенос в ненасыщенных коллоидных капиллярно-пористых анизотропных материалах //автореф. дис. .д-ра техн. наук : 01.04.14 / Воронеж, 2007. - 32 с.

УДК 662.62

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИЯ КОКСА В СРЕДЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОДЯНОГО ПАРА В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Шевырёв С.А. , аспирант

Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово

E-mail:ssa.pmahp@kuzstu.ru

Экспериментальные исследования по газификации полукокса органических веществ в среде высокотемпературного водяного пара проводились на лабораторном стенде, схема которого представлена на рисунке 1.

Основным элементом стенда является рабочий участок, разделенный на две зоны: зона смешения (3) низкотемпературного водяного пара, поступающего из парогенератора, и высокотемпературного пара, образованного горением горючей смеси, поступающей из электролизной установки (2); зона непосредственной газификации (4), в которой располагался исходный материал. В качестве исходного материала использовали карбонизированный шлам и штыб углей Кузбасса, характеристики которых представлены в таблице 1.

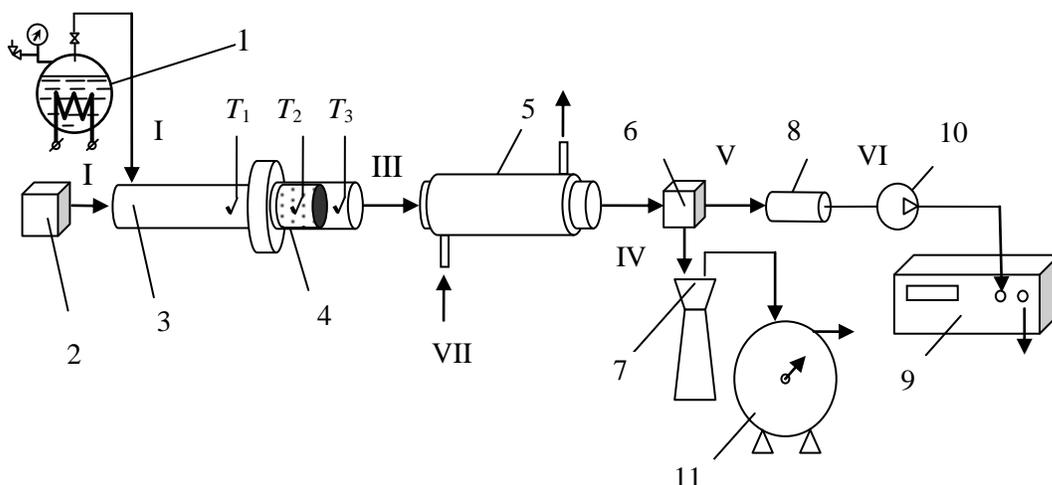


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

I – вход низкотемпературного пара; II – вход высокотемпературного пара; III – выход паро-газовой смеси; IV – выход конденсата; V – выход влажного газа; VI – выход сухого газа; VII – охлаждающая вода 1 – парогенератор; 2 – генератор горючей смеси; 3 – зона смешения рабочего участка; 4 – реакционная зона рабочего участка; 5 – конденсатор; 6 – емкость разделения; 7 – емкость сбора конденсата; 8 – емкость осушения газа; 9 – газоанализатор; 10 – перистальтический насос; 11 – газовый барабанный счетчик T_1, T_2, T_3 – соответственно измерение температуры перед реакционной зоной, в реакционной зоне и после нее

Представленный экспериментальный стенд позволял получать следующие расходные и температурные параметры процесса: расход низкотемпературного водяного пара от 5 до 10 л/мин, расход горючей смеси из электролизера до 5 л/мин, температура пара, поступающего из парогенератора 120-135°C, температура высокотемпературного водяного пара до 1200°C.

Таблица 1

Образец	Элементный состав, %			Результаты технического анализа		
	N	C	H	Влагосодержание W^a , %	Выход летучих веществ V^d , %	Зольность A^d , %
Штыб угля шахты «Березовская»	1,51	77,27	3,94	1,08	19,27	9,59
Штыб угля разреза «Междуреченский»	1,89	80,04	3,94	1,07	19,76	7,96
Шлам ЦОФ «Березовская»	-	83,8	4,84	1,92	30,61	46

Для экспериментального стенда был организован автоматизированный сбор данных [1]. Основные параметры, контролируемые в процессе исследований: расход низкотемпературного пара, температура до, в слое, и после слоя исходного материала, расход горючей смеси, количество и состав получаемого газа и количество образующегося конденсата. Измерение состава газа проводили с помощью поточного газоанализатора, позволяющего измерять объемные доли следующих компонентов: H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , O_2 .

На рис. 2 приведены экспериментальные данные по выходу горючего газа (CO) из шлама образца «Березовская». Анализируя данный рисунок, приходим к выводу, что с ростом температуры водяного пара доля горючего газа (CO) в продуктах газификации существенно возрастает.

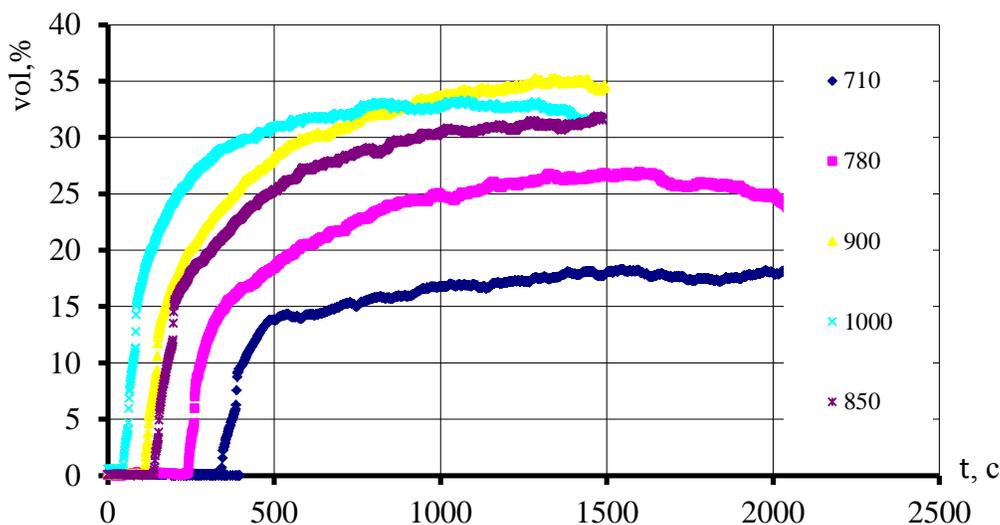


Рис.2. Выход оксида углерода из шлама в зависимости от температуры водяного пара

На рис. 3 представлен газовый состав продуктов газификации образца шлама Березовского месторождения перегретым водяным паром. Как следует из рисунка при конверсии органического сырья на примере шлама образца «Березовская» при температуре газификации порядка $1000^{\circ}C$ в продуктах газификации более 90 % составляют горючие газы H_2 и CO .

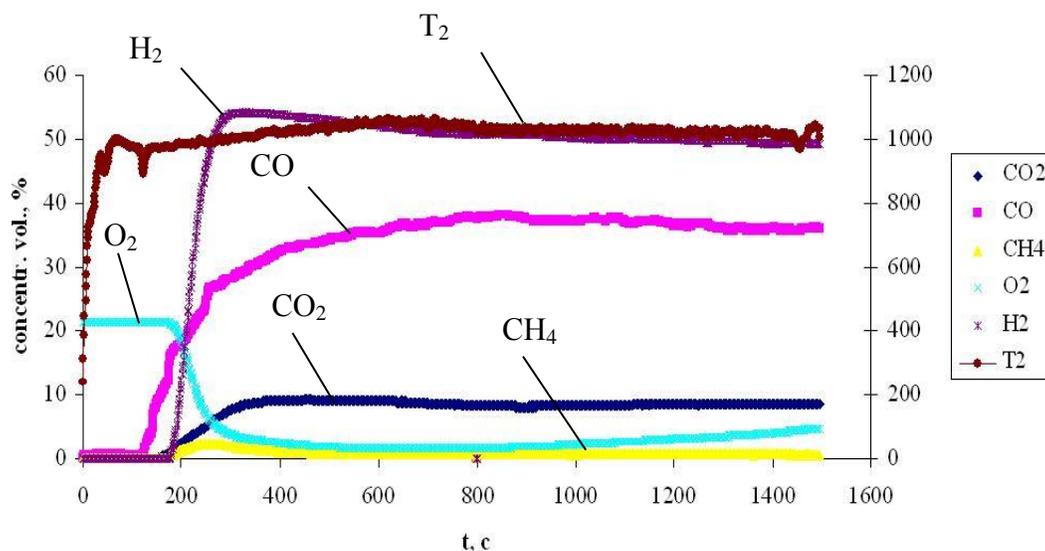


Рис. 3. Зависимость выхода газообразных продуктов из образца «Березовская» от времени процесса. Температура в слое материала около 1000°C

Литература:

1. Шевырёв, С. А. Высокотемпературная газификация на примере конверсии угля и шламов / С.А. Шевырёв, Е.И. Кагакин, А.Р. Богомолов, Н.А. Прибатурин // VII Всероссийский семинар вузов по теплофизике и энергетике: сб. докладов, Кемерово, 14-16 сентября 2011 г. / Кузбас. гос. техн. ун-т., Ин-т теплофизики СО РАН им С.С. Кутателадзе. Кемерово, 2011. – С. 98-101.

УДК 662.764: 662.659

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ УГОЛЬНЫХ ОТХОДОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

Шевырёв С.А., аспирант, Кривоносова М.А., студент
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово
E-mail: ssa.pmahp@kuzstu.ru

В последнее время в мире заметно возрос интерес к проблемам энергосбережения и ресурсосбережения. Среди перспективных направлений решения этой проблемы можно выделить способ газификации углеродсодержащих материалов в потоке водяного пара. Несмотря на известность

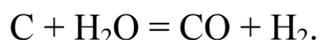
самого способа, остается много не решенных вопросов связанных, прежде всего, с кинетикой протекания химических реакций. Поэтому оценка кинетики газовыделения и протекания процесса газификации является важным направлением исследований.

Нами проведены исследования на угольных отходах углей и шлама, характеристики которых представлены в таблице 1.

Таблица 1

Образец	Элементный состав, %			Результаты технического анализа		
	N	C	H	Влагосодержание W ^a , %	Выход летучих веществ V ^d , %	Зольность A ^d , %
Штыб угля шахты «Березовская»	1,51	77,27	3,94	1,08	19,27	9,59
Штыб угля разреза «Междуреченский»	1,89	80,04	3,94	1,07	19,76	7,96
Шлам ЦОФ «Березовская»	-	83,8	4,84	1,92	30,61	46

Проведена оценка констант скорости и энергии активации процессов, протекающих при взаимодействии водяного пара с углем. Учитывая то, что уголь перед помещением в реактор подвергался карбонизации, можно считать его углеродом с минеральными примесями. Тогда вполне правоммерным представить как основной, процесс взаимодействия углерода с водяным паром:



Для оценки констант скоростей и, следовательно, энергии активации процесса необходимо определиться с порядком реакции. Мы приняли, что эта реакция может рассматриваться как реакция первого порядка и описываться соответствующим кинетическим уравнением. Причиной такого допущения является то, что избыток водяного пара (по сравнению со стехиометрическим) составляет от 70 до 150 раз (конструктивные особенности используемой установки). В этом случае можно считать его концентрацию (или количество) константой и рассматривать кинетическое уравнение второго порядка как кинетическое уравнение первого порядка [1]. Константы скорости и энергия активации рассчитывались по экспериментальным данным, приведенным в таблице 2, по методике, изложенной в [2].

Таблица 2

Уголь	T, К	τ , с	m_0 , г	m , г
Уголь разреза «Междуреченский»	973	900	1,0128	0,9138
	1213	900	1,0390	0,8595
Уголь шахты «Березовская»	1033	900	1,0156	0,9324
	1273	900	1,0551	0,8444
Шлам ЦОФ «Березовская»	1073	900	1,0915	0,9852
	1273	900	1,348	0,7774

Уравнение скорости реакции первого порядка:

$$\frac{dx}{d\tau} = k(a - x)$$

Расчеты констант скорости осуществлялись по уравнению:

$$k = \frac{2.303}{\tau} \lg \frac{m_0}{m}$$

Расчеты энергии активации выполнялись согласно уравнению:

$$\frac{\lg k_2}{k_1} = \frac{E_a}{2.303R} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_2 \cdot T_1} \right)$$

Величины констант скорости и энергии активации химической реакции представлены в таблице 3.

Таблица 3

Материал	T, К	k_1 , с ⁻¹	k_2 , с ⁻¹	E_a , кДж/моль
«Междуреченский»	1213	-	$2,11 \cdot 10^{-4}$	26,9
	973	$1,14 \cdot 10^{-4}$	-	
«Березовская»	1273	-	$2,5 \cdot 10^{-4}$	43,6
	1033	$0,958 \cdot 10^{-4}$	-	
Шлам ЦОФ «Березовская»	1273	-	$3 \cdot 10^{-4}$	62,4
	1073	$1 \cdot 10^{-4}$	-	

Анализ рассчитанных значений констант скоростей и энергий активации показывает, что при практически одинаковых значениях констант скоростей для всех образцов, энергии активации значительно различаются. Учитывая то, что газификации подвергались карбонизированные образцы, близость значений констант становится понятной – определялись константы для одной реакции, не осложненной протеканием параллельных. Различия в значениях энергии активации могут объясняться разным содержанием

ем минеральной части. Действительно, сопоставление зольности исходных материалов (таблица 1) и энергий активации для соответствующих образцов указывает на прямые корреляции этих величин. Это предполагает, что часть энергии расходуемой в процессе идет на поддержание температуры минеральной части, не участвующей в образовании продуктов реакции. И чем больше доля этого компонента в составе образца, тем больше энергии затрачивается на его нагрев.

Список литературы:

1. Физическая химия. Теоретическое и практическое руководство /под ред. акад. Б.П. Никольского. – Л.: Химия, 1987. – 880 с.
2. Эвери Г. Основы кинетики и механизмы химических реакций / Г. Эвери. – М.: Мир, 1978. – 214 с.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ
ПЕРЕВОДА КОТЛА БКЗ-75-ГМА НА СЖИГАНИЕ ТВЕРДОГО
ТОПЛИВА**

Яковлев М.И., Бактыбаева Д.К., Гиль А.В.
Томский политехнический университет, г. Томск
E-mail: Andgil@tpu.ru

Одним из направлений повышения энергоэффективности энергетических объектов оснащенных котлами БКЗ-75-39 ГМА является реконструкция котлов для организации сжигания твердого топлива.

Целью проекта является сокращение стоимости тепловой энергии путем перевода котельного агрегата на более дешевое топливо – уголь (Кузнецкий Т). Необходимость такого перехода на сегодняшний день очевидна. Природный газ является основным энергетическим топливом, но при этом динамика роста цен на уголь значительно ниже, чем на газ.

При переводе котла на твердое топливо необходимо проработать систему топливо подачи и топливо приготовления, выбрать горелочные устройства и их компоновку, провести поверочный тепловой расчет котла и аэродинамический, а также оценить движущий напор в контуре циркуляции.

Для подготовки топлива к сжиганию рассчитана система пылеприготовления – индивидуальная с промежуточным бункером под надувом.

Компоновка горелочных устройств на боковых стенах топочной камеры в один ярус встречно. Горелки выбраны вихревых лопаточно-лопаточных.

В результате реконструкции изменениям подверглись: воздухоподогреватель первой и второй ступени, экономайзер второй ступени и конвективный пароперегреватель, вследствие нехватки температурного напора в особенности в воздухоподогревателе.

При переводе котла на сжигание твердого топлива наблюдается увеличение сопротивления газового тракта, что приведет к установке более мощных и энергоемких дымососов.

Так же при работе на твердом топливе повысятся выбросы оксидов азота по мимо наличия выбросов твердых частиц.

Исходя из технико-экономических расчетов котла и перспективах развития угольной промышленности, можно сделать вывод, о целесообразности перевода котлоагрегатов работающих на газе и мазуте на сжигание твердых топлив.

УДК 662.62

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПОДЗЕМНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ В УСЛОВИЯХ ЛОКАЛЬНОГО ПОДВОДА ЭНЕРГИИ

Яманбекова А.К., магистрант.

E-mail: aiau_talgar@mail.ru

Томский политехнический университет, г. Томск

Фундаментальные изменения, происходящие в энергетике, непрерывающийся рост цен на нефть и природный газ диктуют необходимость применения нетрадиционных технологий использования твердых топлив. Одним из перспективных направлений является подземная газификация твердого топлива.

Значимость подземной газификации твердого топлива обусловлено в том числе и тем, что газифицировать можно практически любое органическое твердое топлива, независимо от их свойств, при этом получать горючие газы различного состава, начиная от чистого водорода, оксида углерода, метана и их смесей в разных пропорциях [1].

Особое привлекательное преимущество метода ПГУ заключается в его экологических достоинствах – так, при подземной газификации почти

не нарушается земная поверхность, а производимый газ является экологически приемлемым видом топлива.

Несмотря на перспективность данной технологии, известны не столь многочисленные примеры ее реализации. Это объясняется тем, что технология подземной газификации угля (ПГУ) имеет и недостатки. Эти недостатки определяют пути дальнейших исследований, направленные на повышения эффективности ПГУ, связанных с необходимостью совершенствования как теории процессов ПГУ на базе новых моделей, так и методам численной реализации этих подходов.

Целью работы является исследование и моделирование процессов подземной газификации угля.

По результатам анализа литературных источников была сформулирована математическая модель описывающая процессы подземной газификации угля [2].

Математическая модель использует двухмерную цилиндрическую систему координат.

Рассматривается угольный пласт глубиной H , в котором пробурена скважина и введена двойная труба. По внутренней трубке к нижнему основанию угольного пласта ($z < h$) подается подогретый до температуры T_0 сухой или влажный воздух. Благодаря чему по истечении некоторого времени угольный пласт прогревается до температуры начала пиролиза. Через отверстия на боковой поверхности наружной трубы ($z > h$) образовавшиеся газы проникают в наружную трубу и выводятся из угольного пласта на поверхность.

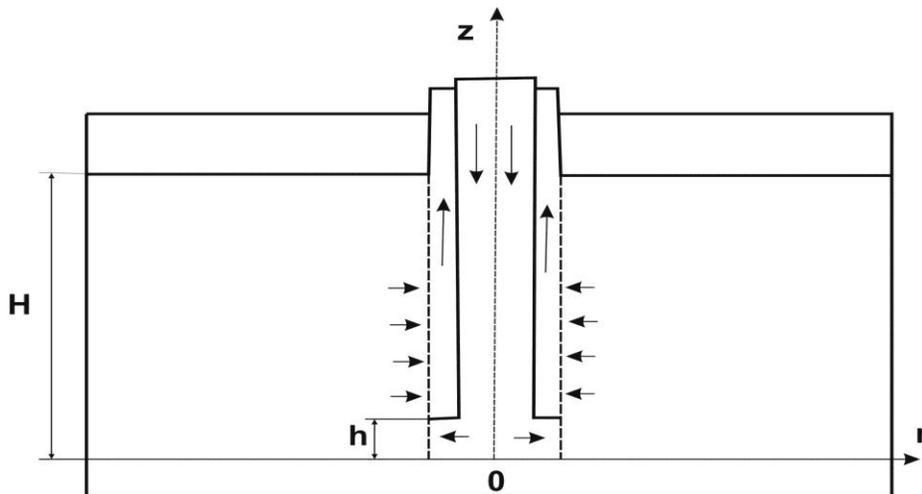
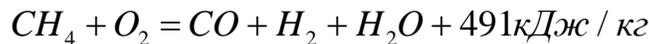
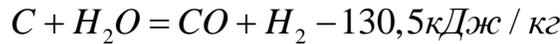
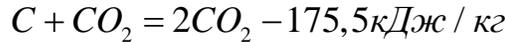
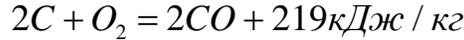
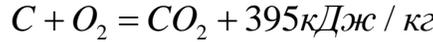
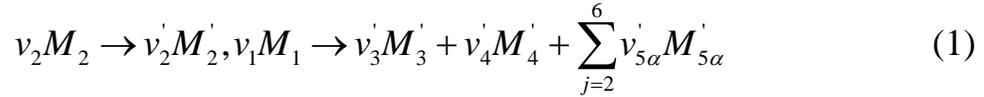


Рис 1. Схема подачи воздуха и отвод образовавшегося газа при ПГУ

Рассматривается процесс газификации, сопровождающийся следующими реакциями:



Первое выражение (1) описывает процесс испарения воды, второе – процесс пиролиза твердого топлива, которое разлагается на конденсированные $v_3' M_3'$ (кокс), $v_4' M_4'$ (шлак) и газообразные $v_{5\alpha}' M_{5\alpha}'$ продукты пиролиза.

При математическом моделировании ПГУ предполагается, что в угольном пласте отсутствуют неоднородности, а условия теплообмена вдоль верхней и нижней поверхности пласта не изменяются.

Математическая модель включает в себя учет влияния испарения влаги, термического разложения угля, гетерогенные и гомогенные реакции и состоит из уравнения сохранения массы (1-3), энергии (4) и движения (5).

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_p, \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_s, \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \phi_c R_p - R_{sc}, \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \phi_s R_p \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_5 \varphi_5) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\bar{r} \rho_5 \varphi_5 \omega_r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_5 \varphi_5 \omega_z) = \phi_g R_p + R_s + R_{sc}, \sum_{j=1}^5 \varphi_j = 1 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_5 \varphi_5 \chi_\alpha) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_5 \varphi_5 \omega_r \chi_\alpha) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_5 \varphi_5 \omega_z \chi_\alpha) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial \chi_\alpha}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (r \rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial \chi_\alpha}{\partial z}) + R_{5\alpha} + R_{5s\alpha}, \alpha = 1..6, \sum_{\alpha=1}^7 \chi_\alpha = 1 \quad (4)$$

Уравнение (2) определяет динамику изменения массы при 1- термической разложения угля (индекс «1»), испарения влаги (индекс «2»), образование кокса (индекс «3»), выходе золы (индекс «4»). В уравнении (1)

Уравнения (3) определяет динамику изменения массы при химических превращениях и конвективном переносе в газовой фазе.

Уравнения (4) определяет динамику изменения массы отдельных компонентов газовой фазы при диффузии и разложении ($\alpha=1$ – кислород, $\alpha=2$ – оксида углерода, $\alpha=3$ – диоксида углерода, $\alpha=4$ – водорода, $\alpha=5$ – метана, $\alpha=6$ – водяного пара). Последнее уравнение алгебраическое отношения необходимое для замыкания системы уравнения (4).

R_p, R_s, R_{sc} – соответственно, массовые скорости разложения угля, испарения влаги, окисления кокса;

$\varphi_j (j=1..5)$ – объемные доли, соответственно, угля, воды, кокса, шлака и газовой фаз, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

$\rho_j (j=1..5)$ – истинная плотность, соответственно, угля, воды, кокса, шлака и газовой фазы, $\text{кг}/\text{м}^3$;

s – удельная поверхность пор, $1/\text{м}$;

ϕ_c, ϕ_s, ϕ_g – массовые доли, соответственно, кокса, шлака и газовой фазы образующегося при пиролизе угля;

r, z – безразмерные цилиндрические координаты;

χ_α – массовая концентрация α - компоненты газовой фазы, $\text{кг}/\text{кг}$;

ω_z, ω_r – компоненты скорости фильтрации газообразных продуктов в направлении цилиндрических осей координат \bar{z}, \bar{r} , $\text{м}/\text{с}$;

D_α – эффективный коэффициент диффузии α – компоненты газовой фазы, $\text{м}^2/\text{с}$;

$R_{5\alpha}, R_{5s\alpha}$ – массовые скорости, соответственно, «исчезновения» кислорода, изменения масс оксида углерода, диоксида углерода, водорода, метана, паров воды, $\text{кг}/(\text{м}^3\text{с})$;

$$\sum_{j=1}^5 \rho_j \varphi_j c_{pj} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_s \varphi_s c_{ps} (\omega_r \frac{\partial T}{\partial r} + \omega_z \frac{\partial T}{\partial z}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + q_p R_p - \quad (5)$$

$$- q_{s2} R_{s2} + q_{CO} R_{CO} + q_{CH_4} R_{CH_4} + q_{H_2} R_{H_2} + q_{sc} \bar{R}_{sc}$$

Уравнение энергии (5) моделирует процессы теплопроводности с учетом тепловых эффектов реакций.

$q_p, q_{s2}, q_{CO}, q_{CH_4}, q_{H_2}, q_{sc}$ – соответственно тепловые эффекты реакции пиролиза, испарения влаги, окисления оксида углерода, водорода и метана, $\text{Дж}/\text{кг}$;

$c_{pj} (j=1..5)$ – удельные теплоемкости, соответственно, угля, воды, кокса, золы и газовой фазы соответственно, $\text{Дж}/(\text{кг К})$;

λ – эффективная теплопроводность угля, состоящего из «лучистой теплопроводности» и теплопроводности многофазной среды, Вт/(мК);

$$\omega_r = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}, \omega_z = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial r} - \rho_5 g \right), p = \frac{\rho_5 RT}{M} \quad (6)$$

Уравнение (6) описывает сохранения движения, которое опирается на закон Дарси. в проекциях на цилиндрические оси координат r, z .

Системы уравнений решаются при следующих краевых условиях:

$$t = 0: \varphi_j = \varphi_{jH}, j = 1..4, \chi_\alpha = \chi_{\alpha H}, \alpha = 1..6, \rho_5 = \rho_{5H}, T_{z \leq h} = T_0, \quad (7)$$

$$T_{z > h} = T_H, T_{r > R_0} = T_H;$$

$$r = R_0, z > h: \frac{\partial^2 \chi_\alpha}{\partial r^2} = 0, \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} = 0, \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = 0;$$

$$r = R_0, z \leq h: \chi_\alpha = \chi_{\alpha 0}, \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_0 (T - T_0), p = p_0; \quad (8)$$

$$r = L: \chi_\alpha = \chi_{\alpha H}, T = T_H, p = p_H;$$

$$z = 0: \frac{\partial p}{\partial z} = \rho_5 g, \frac{\partial \chi_\alpha}{\partial z} = 0, \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_1 (T - T_1); \quad (9)$$

$$z = H: \frac{\partial p}{\partial z} = \rho_5 g, \frac{\partial \chi_\alpha}{\partial z} = 0, \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_2 (T - T_2)$$

Уравнение (7) это начальные условия, которые заданы в первом роде;

Уравнение (8) и (9) это граничные условия вдоль координатной оси r, z , которые заданы третьем роде.

H и L – высота и радиус исследуемого угольного пласта (рис. 1), м;

$T_H, p_H, \rho_H, \chi_{\alpha H}$ – температура, давление, плотность и массовая концентрация α - компонента газовой фазы в начальный момент времени в угольном пласте, К, Па, кг/м³;

T_0, T_1, T_2 – соответственно температуры вдуваемой паровоздушной смеси, внешней среды на верхней и нижней границе угольного пласта, К;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_0$ – коэффициенты теплоотдачи, характеризующие теплообмен угольного пласта с верхней и нижней поверхностью и конвективный теплообмен паровоздушной смеси с угольным пластом Вт/(м²К);

Индексы: 0 – параметры источника зажигания; H – начальное значение параметра; S – конденсированная фаза; * – характерная величина; 5 – газовая фаза.

Система уравнений (2)-(9) решается численно. В настоящее время ведется верификация программы.

Список литературы

1. С.Н. Лазаренко, П.В. Кравцов. Новый этап развития подземной газификации угля в России и в мире // Горный информационно – аналитический бюллетень. 2007. №5. С 104-110.
2. Кузнецов Г.В., Субботин А.Н. Тепломассоперенос в условиях подземной газификации угля//Тепловые процессы в технике. – 2010. - №9. – С. 422 – 426.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Архипов В.А., Пестерев А.В., Савельева Л.А. Влияние состава металлического горючего на горение перспективных высокоэнергетических материалов	3
Барсуков В.Д., Басалаев С.А., Голдаев С.В. Физико-математическое моделирование процесса всплытия подъемного устройства на основе твердотопливного открытого газогенератора	4
Басалаев С.А., Барсуков В.Д., Голдаев С.В. Об использовании унитарных твердых топлив при тепловом и силовом воздействии на объекты в жидких средах	7
Бондарчук И.С., Жуков А.С. Оценка эффективности экологической защиты окружающей среды при открытом сжигании зарядов ракетных двигателей на твердом топливе	9
Бондарчук И.С., Борисов Б.В., Жуков А.С. Теоретический анализ возможности использования порошкообразного алюминия в газогенераторе на обедненном двухкомпонентном топливе в рамках теории реактора идеального смешения	13
Булутбаева Ж.С. Перспективные технологии сжигания древесных отходов для получения тепловой энергии	19
Глушков Д.О. Численное моделирование зажигания смесового топлива источником ограниченного теплосодержания при учете зависимости теплофизических характеристик материалов и веществ от температуры	23
Глушков Д.О., Захаревич А.В., Стрижак П.А. предельные условия возгорания в гетерогенной системе при локальном нагреве	24
Глушков Д.О. Зажигание структурно-неоднородного твердого конденсированного вещества локальным источником энергии	25
Глушков Д.О., Захаревич А.В., Стрижак П.А. Исследование процесса зажигания жидкого конденсированного вещества погружающимся источником ограниченного теплосодержания	26

Гринкруг М.С., Казаков М.Ю.	
Математическая модель процесса горения твердого топлива в котлах малой производительности с периодической загрузкой топлива	27
Даирбекова С.М.	
Моделирование процесса получения тепловой энергии из твердых отходов животноводства с непрерывной подачей сырья в топочную камеру	32
Дементьев В.Ю., Ткачев А.И.	
Об одном из возможных подходов к моделированию процесса диспергирования при горении твердых топлив	33
Жданова М.В., Мостовщиков А.В.	
Влияние добавок нанопорошков оксида марганца и железа на основные характеристики процесса горения древесных опилок	36
Жуйков А.В.	
Один из способов уменьшения экологических проблем при сжигании твердых топлив	40
Захаревич А.В., Мошков А.Г.	
Экспериментальные исследования условий зажигания диспергированной древесины при локальном нагреве	41
Захаревич А.В., Огородников В.Н.	
Экспериментальные исследования условий зажигания измельченных углей при локальном нагреве	44
Звягинцева Е.С., Роот Л.О.	
Экспериментальное исследование флуктуационного механизма горения нанопорошка алюминия в воздухе при умеренных давлениях	48
Иримбетова Н.Р.	
Об одном из возможных вариантов математического моделирования процесса получения теплоты из твердых отходов животноводства (птицеводства) и лесопереработки	52
Коновчук Т.В., Роот Л.О., Сморгина К.С.	
Влияние добавки нанопорошка молибдена на синтез нитрида алюминия при сжигании нанопорошка Al в воздухе	55
Корецкий Д.А., Фомичев А.С., Заворин А.С.	
Применение программного комплекса fluent для моделирования основных топочных процессов в типичном диапазоне изменения основных характеристик процесса	60
Кулеш Р.Н., Субботин А.Н.	
Экспериментальное исследование условий зажигания торфа раз-	64

личной влажности внешним источником тепла ограниченных размеров	
Леушина А.А., Лубяная С.В.	
Перспективы использования и переработки золошлаковых отходов тепловых электрических станций	69
Логинов В.С., Парпиев А.Т.	
Экономия расхода топлива при стационарном режиме работы котла бкз-75-39 и расчет остаточного ресурса металла конвективного пароперегревателя	72
Мелешкин Д.С., Бульба Е.Е.	
Анализ экспериментальных данных по современному состоянию сушки древесной биомассы в реальном диапазоне изменения температур	81
Мищенко А.Ю., Юнусов А.А.	
Инженерная математическая модель пиролиза древесных отходов на основе системы алгебраических уравнений	83
Мурзина А.С., Гиль А.В.	
Численное исследование процессов сжигания кузнецкого угля при различных параметрах крутки потока смеси горючего и окислителя	86
Ногачев А.Г., Елифанов В.Б.	
Нетрадиционные топлива из утилизируемых порохов	89
Плевако А.П.	
Рассмотрение возможности сжигания различных марок углей на котле бкз-190-100 ф (м)	93
Сидор А.М., Сурков В.Г., Головки А.К.	
Экспериментальное исследование влияния способа приготовления органоводоугольных жидких топлив на основные характеристики их горения	95
Сладков С.О., Саломатов Вл.В., Пашенко С.Э., Саломатов Вас.В.	
Анализ экспериментальных данных по закономерностям зажигания и горения частиц сухого и влагонасыщенного угля в условиях интенсивного воздействия поля сверхвысоких частот	98
Мазаник А.С., Субботин А.Н.	
Математическое моделирование процессов тепломассопереноса, протекающих при подземной газификации угля в условиях теплообмена с окружающей средой	103

Субботин А.Н., Шевырёв С.А. Математическая модель газификации кокса в среде высокотемпературного водяного пара и анализ технологической схемы газификатора	107
Субботин А.В., Долгов С.В., Долгих А.Ю. Горелочное устройство для беспламенного сжигания высококалорийных твердых топлив	111
Сыродой С.В. Математическое моделирование комплекса процессов теплопереноса, сопутствующих сушке угольной частицы	114
Тагабайкызы Ж. Моделирование основных процессов теплопереноса при подготовке отходов лесопереработки для сжигания	118
Шевырёв С.А. Экспериментальное изучение процесса газификация кокса в среде высокотемпературного водяного пара в лабораторных условиях	119
Шевырёв С.А., Кривоносова М.А. Экспериментальное определение кинетики процесса газификации угольных отходов в широком диапазоне температур	122
Яковлев М.И., Бактыбаева Д.К., Гиль А.В. Научно-техническое обоснование технологий перевода котла бкз-75-гма на сжигание твердого топлива	125
Яманбекова А.К. Математическая модель процесса подземной газификации угля в условиях локального подвода энергии	126

ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

СБОРНИК ТЕЗИСОВ И СТАТЕЙ Всероссийской молодежной конференции

Компьютерная верстка *А.В. Захаревич, В.И. Максимов, Т.А. Нагорнова*

Подписано к печати 21.10.2011. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл.печ.л. 19. Уч.-изд.л 11.5. .

Заказ 1283-11. Тираж 150 экз.



Национальный исследовательский
Томский политехнический университет
Система менеджмента качества

Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru