XII Всероссийская конференция с международным участием

ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА: ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ, ПРИЛОЖЕНИЯ

11–14 ноября 2024г.
Новосибирск, Россия

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Министерство науки
и высшего образования Российской Федерации

Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет

Сибирское отделение Российской академии наук

Отделение энергетики, машиностроения, механики
и процессов управления РАН

Национальный комитет РАН по тепломассообмену

СПОНСОР: ООО "ЭНЭР Инжиниринг"

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Сибирское отделение Российской академии наук

Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН

Национальный комитет РАН по тепломассообмену

XII Всероссийская конференция с международным участием

ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА: ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ, ПРИЛОЖЕНИЯ

11–14 ноября 2024 года Новосибирск

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Спонсор ООО «ЭНЭР Инжиниринг»

Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: Сб. тезисов докладов XII Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 11–14 ноября 2024 г. – Новосибирск: ИТ СО РАН, 2024. – 140 с.

ISBN 978-5-89017-089-7

Сборник содержит тезисы докладов XII Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения». Научная тематика конференции охватывает широкий спектр направлений фундаментальных и прикладных исследований, связанных с изучением процессов горения различных видов топлива, применительно к современным и перспективным технологиям производства энергии и двигателестроения.

Оргкомитет

Председатель:
Маркович Д.М., академик РАН, ИТ СО РАН

Заместители председателя:
Терехов В.В., профессор РАН, ИТ СО РАН
Шарыпов О.В., д.ф.-м.н., ИТ СО РАН

Ученые секретари:
Бутаков Е.Б., к.т.н., ИТ СО РАН
Копьев Е.П., к.т.н., ИТ СО РАН

Члены оргкомитета:
Васильев А.А., д.ф.-м.н., ИГиЛ СО РАН
Дулин В.М., профессор РАН, ИТ СО РАН
Козлов В.В., д.ф.-м.н., ИТПМ СО РАН
Лукашов В.В., к.т.н., ИТ СО РАН
Перепечко Л.Н., д.э.н., ИТ СО РАН
Тупикин А.В., д.ф.-м.н., ИТ СО РАН
Цепенок А.И., к.т.н., ЭНЭР Инжиниринг
Шмаков А.Г., д.х.н., ИХКГ СО РАН
Шторк С.И., д.ф.-м.н., ИТ СО РАН

Программный комитет
Председатель:
Алексеенко С.В., академик РАН, ИТ СО РАН

Члены Программного комитета:
Батаев А.А., д.т.н., НГТУ, Новосибирск
Batmunkh S., academician of Mong.Acad. of Sci., Mongolian University of Sci. and Technol., Ulaanbaatar, Mongolia
Георгиевский П.Ю., к.ф.-м.н., МГУ, Москва
Дектерев А.А., к.т.н., ИТ СО РАН, Красноярск
Ждан С.А., д.ф.-м.н., ИГиЛ СО РАН, Новосибирск

Научная тематика XII Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (ГТТЭП-2024), 11–14 ноября 2024 г., http://www.itp.nsc.ru/conferences/gt2024/ охватывает широкий спектр направлений фундаментальных и прикладных исследований, связанных с изучением процессов горения и детонации различных видов топлива, применительно к современным и перспективным технологиям производства энергии и двигателестроения:

- Теория и численное моделирование горения;
- Тепломассообмен в системах с горением;
- Кинетика горения, катализ;
- Горение в газожидкостных средах;
- Горение твердого топлива;
- Горение в около- и сверхзвуковых потоках, детонация;
- Термоакустическая неустойчивость и виброгорение;
- Управление процессами горения;
- Новые технологии сжигания топлива;
- Глубокая переработка угля, включая газификацию;
- Сжигание нетрадиционных видов топлива, включая отходы;
- Методы и приборы для диагностики горения;
- Проблемы создания двигателей нового поколения;
- Экологические проблемы сжигания топлива;
- Распространение пожаров;
- Экономические проблемы топливной энергетики.

Начало этой Конференции было положено в советское время при активном содействии академиков С.С. Кутателадзе, Я.Б. Зельдовича и других выдающихся отечественных ученых, создавших основы современных направлений развития мировой науки в ряде областей, в которых российская фундаментальная и прикладная наука сохраняет лидирующие позиции и которым посвящена Конференция. В последние десятилетия Конференция проводится один раз в три года и является уникальным специализированным научным мероприятием в России, привлекающим большое внимание отечественных и зарубежных ученых и специалистов в области энергетики, химии и механики реагирующих сред.

Одной из основных целей Конференции традиционно является укрепление взаимодействия науки и производства, направленного на повышение энергетической и экономической эффективности, экологической безопасности технологий производства энергии, постановку новых научных задач, имеющих практическую значимость, инновации на основе передовых научных достижений, расширение использования нетрадиционных видов топлива и новых источников энергии. Участие в Конференции принимают представители известных российских и зарубежных научных, образовательных и производственных организаций, в том числе разработчики научно-технической продукции, отличающейся высокой конкурентоспособностью – от современных научных приборов, измерительных систем и специализированного программного обеспечения до передового наукоемкого технологического оборудования. Тем самым, Конференция «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» предоставляет как для ученых, так и для представителей предприятий различного профиля уникальные возможности для развития плодотворного сотрудничества, объединения потенциала и достижения значимых для каждого участника результатов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗИФИКАЦИИ БИОМАССЫ В ПОТОЧНОМ РЕЖИМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПИЛОТНОЙ И ПРОМЫШЛЕНОЙ УСТАНОВКАХ

Абаимов Н.А.[1)], Никитин А.Д.[1)], Ершов М.И.[1)], Симбирятин Л.В.[2)], Рыжков А.Ф.[1)]
[1)] Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия
[2)] ООО "Промышленный Перлит", г. Екатеринбург, Россия

Проблема использования биомассы в качестве топлива в энергетике и сырья в химической промышленности становится всё острее из-за ужесточающихся экологических требований. Эксплуатационные и термохимические свойства биомассы существенно отличают её от природного газа, мазута и даже твёрдого топлива (угля и торфа). Для вовлечения биомассы в существующие технологические процессы требуется серьёзная модернизация или замена всего ключевого оборудования. Существующий научно-технический задел в вопросе использования биомассы не позволяет преодолеть все возникающие трудности.

Цель работы – исследование газификации биомассы в поточном режиме с использованием численного моделирования в пилотной и опытно-промышленной установках с производительностью по топливу 8–20 кг/ч (0,192–0,48 т/сут) и 150–320 кг/ч (3,6–7,68 т/сут), соответственно. Помимо моделирования каждой установки в отдельности перед работой стоит задача проанализировать процесс масштабирования технических решений и CFD-моделей при повышении производительности по топливу почти в 20 раз.

Реакционное пространство пилотного газификатора имеет высоту 1,5 м, а диаметр в самой широкой части составляет 0,3 м. Подача первичного воздуха с температурой (400°C) осуществляется снизу (по оси газификатора), подача вторичного воздуха – в нижний цилиндрический участок через четыре сопла, расположенных перпендикулярно вертикальной оси газификатора. Топливо подается шнеком с регулируемой частотой вращения из бункера на высоте 0,55 м. В качестве топлива используется сосновый опил со средним размером 90–2000 мкм.

На лето 2024 года запланировано проведение серии экспериментов на опытно-промышленной установке поточной газификации биомассы производительностью по топливу 150–320 кг/ч (3,6–7,68 т/сут). Рабочее пространство газификатора представляет собой цилиндрическую камеру высотой 5,58 м с внутренним диаметром 0,586 м, в низу которой расположен конический участок выстой 0,8 м с диаметром в нижней части 0,2 м через которую подаётся воздух с температурой 250°C. Подача топлива осуществляется через патрубок, расположенный на высоте 2 м.

Проведено CFD-моделирование работы обоих газификаторов с использованием программного комплекса OpenFOAM. Нестационарный режим газификации рассчитывается с помощью решателя coalChemistryFoam, а стационарный с использованием simpleCoalParcelFoam. Оба решателя были модифицированы, путём добавления в их подмодели гетерогенной конверсии реакций газификации. Используемые CFD-модели валидированы по собственным (пилотный газификатор) и литературным данным [1]. Исследован процесс поточной газификации биомассы в опытно-промышленной установке, на основе чего подготовлены режимные карты для запланированных испытаний.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства "Приоритет-2030".

Список литературы

Gabraa M., Petterssona E., Backmanb R., Kjellstrom B. Evalua-tion of cyclone gasifier performance for gasification of sugar cane residue—Part 1: gasification of bagasse // Biomass and Bioenergy. – 2001. – V. 21. – P. 351–369.

УДК 544.452.1, 520.843.054

ЗАЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ В ПСЕВДОСЖИЖЕННОМ СЛОЕ

Адуев Б.П., Белокуров Г.М., Лисков И.Ю., Нурмухаметов Д.Р.
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

Уголь является одним из наиболее перспективных и применяемых энергоносителей для теплоэнергетики. Изучение зажигания угольных частиц физическими методами является актуальной задачей.

В настоящей работе исследован способ зажигания частиц твердого топлива размером 0,1 – 3 мм с помощью излучения полупроводниковых лазеров непрерывного действия с длиной волны 450 ÷ 808 нм мощностью 10 – 200 Вт с временем экспозиции, достаточным для зажигания и распространения пламени по поверхности топлива до установления стационарного горения. Данный способ заключается в нагреве частиц в зоне облучения до температуры выхода и воспламенения летучих соединений. Пламя от горящих частиц нагревает соседние незажжённые частицы. Это приводит к их воспламенению, дальнейшему распространению пламени по всей поверхности топлива, дополнительному энерговыделению и установлению стационарного горения. Процесс распространения пламени из зоны лазерного луча осуществляется при условии, если частицы находятся на некотором расстоянии друг от друга для исключения теплоотвода в объём топлива, но это расстояние должно быть меньше размера горящего факела летучих соединений в газовой фазе для воспламенения соседних частиц, дальнейшего распространения пламени вне зоны лазерного облучения до установления стационарного горения. Такие условия можно создать в топках с псевдосжиженным (кипящим) слоем.

На рис. 1 представлена зависимость времени выхода на стационарное горение частиц угля марки Б размером 0,2 – 3 мм в кипящем слое в зависимости от мощности излучения лазера непрерывного действия (808 нм, 25 – 200 Вт). Время зажигания топлива зависит от мощности лазерного излучения W и изменяется от 40 с при W = 25 Вт до 10 с при W = 200 Вт.

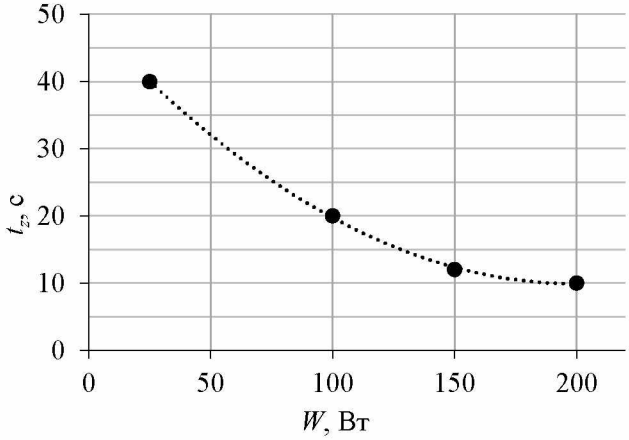


Рис. 1. Зависимость времени выхода на стационарное горение частиц угля марки Б.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ УУХ СО РАН (проект № 124041100056-6).

УДК 544.452.14, 543.429.23

ПИРОЛИЗ УГЛЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПЕРВОЙ И ВТОРОЙ ГАРМОНИК НЕОДИМОВОГО ЛАЗЕРА

Адуев Б.П., Волков В.Д., Митрофанов А.Ю., Нелюбина Н.В.
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

Метод лазерного пиролиза может быть использован для получения ценных газообразных продуктов из угля, например для получения синтез-газа (смеси газов H_2 и CO). Синтез-газ в настоящее время широко используется в химической промышленности и для получения тепло- и электроэнергии [1].

В работе проведен анализ выхода газообразных продуктов пиролиза таблетированных образцов микрочастиц углей марок Б, Г, Ж при воздействии лазерных импульсов наносекундной длительности первой (λ_1 = 1064 нм, τ_1 = 12 нс) и второй (λ_2 = 532 нм, τ_2 = 10 нс) гармоник неодимового лазера в интервале плотностей энергии излучения H = 0.2 – 0.5 Дж/см^2.

Измерения по исследованию пиролиза углей проводилось на установке, подробно описанной в работе [2]. В газообразных продуктах лазерного пиролиза образцов исследуемых марок углей обнаружены молекулы H_2, CH_4, C_2H_2, CO и CO_2.

Предложена модель, объясняющая нелинейную зависимость концентрации газообразных продуктов пиролиза таблетированных микрочастиц углей от плотности энергии лазерных импульсов наносекундной длительности. При воздействии на угли лазерного излучения с интенсивностью I > 20 МВт/см^2 происходит процесс ионизации угольного вещества, развития электронной лавины в поле электронной волны и приповерхностный оптический пробой. В каналах пробоя создаются первичные радикальные центры, концентрация которых коррелирует с концентрацией электронов, вышедших из угольного вещества в результате развития электронной лавины [3]. В условиях высокой температуры из этих первичных центров инициируются термохимические реакции, приводящие к наблюдаемым зависимостям концентрации продуктов лазерного пиролиза углей от плотности энергии лазерных импульсов:

$$n_i(H) = C_i[exp(\alpha_i H) - 1] \qquad (1)$$

где $n_i(H)$ – концентрация газа i-го сорта, пропорциональная концентрации центров инициирования термохимических реакций, образующихся в результате развития электронной лавины; a_i – энергетическая постоянная термохимической реакции, приводящей к образованию газообразного продукта пиролиза i-го сорта; C_i – константы, не зависящие от H.

Концентрации газообразных продуктов лазерного пиролиза углей марок Б, Г, Ж при воздействии одинаковых плотностей энергии лазерных импульсов первой и второй гармоник лазера выше для лазерного излучения второй гармоники. Этот эффект связан с различием интенсивности лазерных импульсов первой и второй гармоник при одинаковых значениях плотности энергии излучения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-20041, https://rscf.ru/project/22-13-20041/ и за счет гранта Кемеровской области – Кузбасса (соглашение с № 2 от 22.03.2022)

Список литературы

1. Жуйков А.В., Матюшенко А.И. Способы получения и практического применения синтез-газа (обзор) // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. – 2020. – Т.13, № 4. – С. 383 – 405.
2. Крафт Я.В., Адуев Б.П., Нелюбина Н.В., Волков В.Д., Исмагилов З.Р. Пиролиз бурого угля под воздействием частотно-импульсного наносекундного лазерного излучения // Химия в интересах устойчивого развития. – 2022. – № 5. – С. 517 – 525.
3. Адуев Б.П., Волков В.Д. Пиролиз микрочастиц бурого угля, инициируемый воздействием импульсов наносекундной длительности первой гармоники неодимового лазера // Квантовая электроника. – 2023. – Т. 53, № 9. – С. 731 – 737

УДК 544.452.1, 520.843.054

ОСОБЕННОСТИ ЗАЖИГАНИЯ МИКРОЧАСТИЦ УГЛЕЙ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Адуев Б.П., Лисков И.Ю., Митрофанов А.Ю., Нурмухаметов Д.Р.
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

Рассмотрены различия в зажигании микрочастиц углей лазерными импульсами в режимах модуляции добротности, свободной генерации и квазинепрерывном режиме.

Рассмотрение проведено на примере зажигания микрочастиц бурого угля. Диапазон размеров частиц 0,5 ÷ 60 мкм с максимумом в распределении 20 – 30 мкм. Использовались образцы в виде прессованных таблеток с плотностью 1 г/см^3.

Поглощение лазерного излучения видимого и ближнего ИК диапазона проходит в поверхностном слое микрочастиц углей $d \leq 1$ мкм. Равномерный прогрев частиц указанного диапазона размеров происходит за время $\Delta t \sim 0{,}02 \div 4$ мс.

1. Режим модуляции добротности ($YAG:Nd^{3+}$ лазер, 1064 нм, 14 нс, до 1,2 Дж – режим гигантского импульса). При достижении плотности энергии $H^1_{cr} = 0{,}2$ Дж/см^2 происходит приповерхностный оптический пробой образца и образование плазменного факела с временем жизни ~ 1 мкс. При увеличении плотности энергии до $H^2_{cr} = 3{,}2$ Дж/см^2 наряду с образованием плазмы происходит инициирование термохимических реакций, зажигание и горение микрочастиц во временном интервале до 500 мкс. В этом интервале успевают полностью прогреться и сгореть только частицы с размером $D \leq 25$ мкм.

2. Режим свободной генерации ($YAG:Nd^{3+}$ лазер, 1064 нм, 120 мкс, до 1,2 Дж – пичковый режим). При достижении плотности энергии, усредненной по импульсу величины $H^1_{cr} = 0{,}2$ Дж/см^2 во время импульса происходит зажигание выступов микронных размеров на поверхности частиц. Кинетика свечения повторяет пичковую структуру импульса. При увеличении плотности энергии до $H^2_{cr} = 1{,}7$ Дж/см^2, происходит выход и зажигание летучих соединений из объема частиц во временном интервале до 10 мс. За это время происходит объемный прогрев практически всех частиц в распределении. При $H^3_{cr} \geq 2{,}6$ Дж/см^2 происходит зажигание и горение нелетучего остатка во временном интервале до 100 мс. Характерная особенность этого режима работы лазера – термохимические реакции на каждом рассмотренном выше этапе зажигания инициируются пичками в структуре лазерного импульса, энергия которых превышает усредненную энергию, измеряемую пироприемником.

3. Квазинепрерывный режим (волоконный иттербиевый лазер, 1070 нм, 0,2 ÷ 10 мс, 1500 Вт). Характерная особенность – отсутствие пичкового режима. После включения лазера всегда наблюдается индукционный период $\tau \geq 100$ мкс, увеличивающийся при уменьшении мощности излучения при заданной длительности импульса. За время τ происходит нагрев образца до температуры вспышки. Измерения показали, что плотность энергии излучения, подводимая к образцу, необходимая для зажигания определяется как $H_{cr} = \tau_i \cdot I_i$ не зависит от плотности мощности излучения I_i (τ_i – время задержки зажигания при заданной I_i). Экспериментально определенная величина $H_{cr} = 7$ Дж/см^2.

В докладе сделан общий анализ особенностей режимов работы для лазерных излучателей применительно к зажиганию углей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-20041, https://rscf.ru/project/22-13-20041/ и за счет гранта Кемеровской области – Кузбасса (соглашение с №2 от 22.03.2022)

УДК 004.94, 536.46

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФРОНТА ПЛАМЕНИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Алексеев М.М.[1)], Семенов О.Ю.[1)], Рашковский С.А.[2,3)], Якуш С.Е.[2)]

[1)] Сургутский государственный университет, г. Сургут, Россия

[2)] Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия

[3)] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Численное моделирование и экспериментальное исследование механизмов неустойчивости фронта горения важны для понимания процессов, происходящих при распространении пламени в зазорах между пластинами и в малогабаритных камерах сгорания [1–3].

В работе представлены результаты экспериментов и численных расчетов возникновения и развития неустойчивости фронта пламени при горении газовых смесей в расширяющемся и прямоугольном канале. Для изучения формы и структуры пламени применялась цифровая видеосъемка с высоким разрешением и скоростью записи 120 кадров в секунду. Канал из прозрачного стекла заполнялся пропановоздушной смесью, которая воспламенялась высоковольтным разрядом. Моделирование химических реакций, процессов горения проводили, используя расчетный модуль reactingFoam из пакета программ OpenFOAM. Использовались ортогональные расчетные сетки, окисление пропана описывалось одностадийной глобальной реакцией $C_3H_8+5O_2 \rightarrow 3CO_2+4H_2O$. Рисунки 1 и 2 иллюстрируют результаты моделирования и экспериментов распространения фронта пламени в диффузоре с открытой широкой границей и в прямом плоском канале (штрихпунктирная линия показывает границы канала).

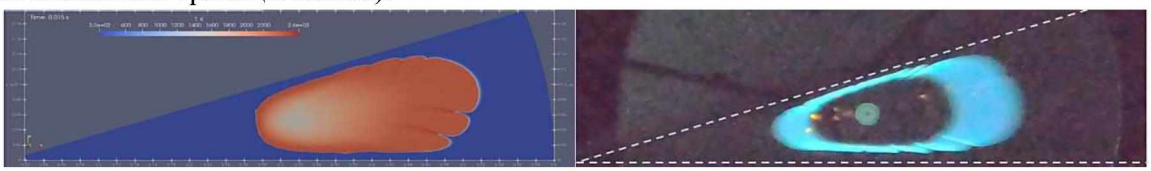


Рис. 1. Моделирование распространения пламени (слева) и фотография фронта пламени (справа) при горении пропановоздушной смеси в диффузоре

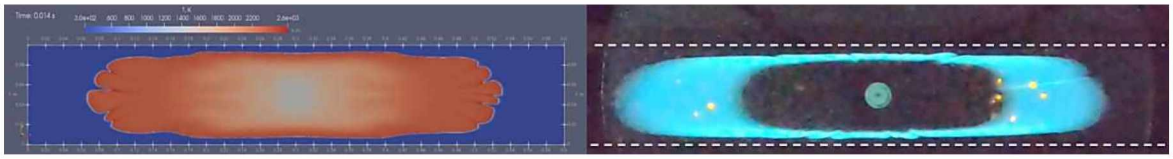


Рис. 2. Граница пламени при горении пропановоздушной смеси в прямом канале шириной 10 см: расчет в OpenFOAM (слева), фотокадр эксперимента (справа)

Изучено развитие неустойчивости и возникновение ячеек на поверхности пламени, расходящегося от точки зажигания в центре канала, исследовано влияние состава смеси и геометрических размеров канала на скорость распространения пламени, изменение формы и структуры фронта пламени по мере движения в расширяющемся канале. Установлено, что при движении к закрытому краю диффузора происходит уменьшение видимой скорости пламени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543.

Список литературы

1. Alexeev, M.M., Semenov, O.Yu., Yakush, S.E. Experimental study on cellular premixed propane flames in a narrow gap between parallel plates, Combust. Sci. Technol. – 2019. – Vol. 191(7). – pp. 1256–1275.
2. Bychkov, V.V., Liberman, M.A. Dynamics and stability of premixed flames // Physics Reports. – 2000. – V. 325. № 4–5. – pp. 115–237.
3. Ju, Y. and Maruta, K. Microscale combustion: Technology development and fundamental research // Prog. Energy Combust. Sci. – 2011. – Vol.37. – pp. 669–715.

УДК 631.95+62-665.9+544.43

ОКИСЛЕНИЕ ОТХОДОВ БИОМАССЫ В СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ВОДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАНА В КАЧЕСТВЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

Алехин С.А.[1)], Морозов С.В.[1),2)], Востриков А.А.[1)], Федяева О.Н.[1)]
[1)] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2)] Новосибирский институт органической химии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Согласно [1], ежедневное производство свиного навоза и куриного помета (отходы III класса опасности) в РФ составляет 165,4 и 104,0 тыс. тонн соответственно. Неквалифицированное хранение этих отходов сопровождается эмиссией токсичных веществ и парниковых газов в атмосферу, а также приводит к загрязнению поверхностных и грунтовых вод. Сверхкритическое водное окисление (СКВО) рассматривается в качестве одного из перспективных методов переработки отходов биомассы. В отличие от традиционных методов пиролиза и прямого сжигания, СКВО не требует предварительного обезвоживания отходов, а благодаря использованию закрытых реакционных систем отсутствует эмиссия токсичных веществ в окружающую среду.

Цель данной работы – исследовать влияние метана на скорость и полноту сверхкритического водного окисления отходов биомассы (свиного навоза и куриного помета). Низкая теплотворная способность исходного топлива (≈20 МДж/кг) в сочетании с высокой степенью обводненности и сложным составом, включающим органические и минеральные компоненты, обуславливает применение вспомогательного топлива. Основными преимуществами данного подхода являются снижение тепловых потерь, увеличение температуры и образование активных частиц в реакционном объеме, что приводит к повышению скорости и полноты окисления органического вещества. В качестве вспомогательного топлива в данной работе был выбран метан ввиду его большей удельной теплотворной способности, доступности и меньшей стоимости по сравнению с наиболее часто используемыми низшими спиртами [2]. Установка для проведения экспериментов подробно описана в [3]. Эксперименты проведены при давлении 25 МПа и градиенте температуры вдоль вертикальной оси реактора сверху вниз: 390-600 °C. Метан подавался в реакционный объем через несколько отверстий в капилляре, расположенном вдоль вертикальной оси реактора. В экспериментах варьировали расход реагентов, коэффициент избытка кислорода (OR) и наличие добавки NaOH.

Исходя из полученных результатов, можно заключить, что добавление метана способствует ускорению окисления отходов биомассы в сверхкритической воде. Добавление метана сокращает суммарное энергопотребление в ≈1,5 раза и способствует снижению содержания фенолов и полиароматических углеводородов в эффлюенте ниже уровня максимально допустимой концентрации в сточных водах. Эффективность удаления органического азота при СКВО повышается с увеличением OR. В то же время, большой избыток O_2 приводит к образованию нитрофенолов и увеличению содержания нитрат-ионов. Последнее, в свою очередь, усиливает коррозию конструкционных материалов. Результаты исследования показывают хорошие перспективы использования природного газа для одностадийной автотермической переработки отходов биомассы посредством СКВО.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-20003) и Правительства Новосибирской области (грант № р-10).

Список литературы

1. Федяева О.Н., Востриков А.А. Переработка обводненных токсичных отходов свиноводства и птицеводства в суб- и сверхкритической воде // Сверхкритические флюиды: Теория и практика. 2022. Т. 17. С. 3–23.
2. Zhang J., Wang S., Ren M., Lu J., Chen S., Zhang H. Effect mechanism of auxiliary fuel in supercritical water: A review // Ind. Eng. Chem. Res. 2019. V. 58. P. 1480–1494.
3. Fedyaeva O.N., Vostrikov A.A., Artamonov D.O., Shishkin A.V., Sokol M.Y. Incineration of pulp and paper mill waste in supercritical water using methane as a co-fuel // J. Eng. Thermophys. 2021. V. 30. P. 350–364.

УДК 662.2

АНК ТЕХНОЛОГИЯ

Антишин Д.В.[1], Костылев С.С.[2]
[1] СибГУ им. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия
[2] ООО «НТ Саяны», г. Красноярск, Россия

Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества (ПВВ) состоящие из обратной эмульсионной матрицы, являющейся дисперсной системой, в которой дисперсной фазой выступает сверх концентрированный раствор окислителя, а дисперсионной средой жидкое топливо с эмульгатором, по агрегатному состоянию такая система представляет собой жидкое в жидком (Ж/Ж). Из-за наличия воды в составе такие системы низкочувствительные, работающие в затухающем режиме, поэтому требуется сенсибилизация газовыми полостями, пористыми материалами, микросферами. Принципиально новый метод сенсибилизации заключается в технологии механической активации невзрывчатых компонентов (АНК технология) с целью увеличения поверхностной энергии.

АНК технология основана на предположении, что чувствительность обратной эмульсии к детонационному импульсу можно повысить следующими действиями:

1) повышением общей поверхностной энергии дисперсной системы жидкое в жидком (Ж/Ж) путем увеличения гетерогенности системы, а именно, введением дисперсной фазы в твердом агрегатном состоянии с большой удельной поверхностью;

2) созданием очагов концентрации поверхностной энергии на радиусах большой кривизны.

а б в

Рис. 1. Разделка негабарита; а – базальтовый негабарит, б – расположение заряда, в – осколки негабарита.

Данная технология была продемонстрирована широкой публике на всероссийской конференции «Промышленные взрывные технологии» в ноябре 2023 г. проводимой под эгидой Сибирского федерального университета (СФУ). Демонстрация технологии была осуществлена на территории базальтового карьера «Золотой ручей», вблизи г. Красноярска, были проведены испытания составов изготовленных на основе эмульсионной матрицы, и сенсибилизированных 3% механо-активированного древесного угля, состав показал эффективную сенсибилизацию при разделке базальтового негабарита. Результат испытания представлен на рис. 1 негабарит высотой 1,2 м и диаметром 1,4 м был расколот ПВВ массой заряда 2 кг, к тому же, чувствительность состава сенсибилизированного по АНК технологии оказалась достаточной для инициирования заряда от капсюля детонатора.

УДК 621.43.057.3

КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОГРЕВА ДВУХЖИДКОСТНЫХ КАПЕЛЬ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ УСЛОВИЙ ИХ МИКРОВЗРЫВНОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ

Антонов Д.В., Стрижак П.А.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

На основе результатов экспериментальных исследований определены времена задержки микровзрывного распада двухжидкостных капель и длительности их фрагментации. Установлены зависимости этих временных характеристик от температуры внешней газовоздушной среды и подведенной тепловой энергии при различных способах нагрева. Исследования выполнены с каплями на основе воды и горючей жидкости (керосин, дизельное топливо, рапсовое масло). Рассмотрены способы нагрева исходных двухжидкостных капель: на твердой подложке, в газовоздушном потоке, трубчатой муфельной печи, пламенной зоне горения. При математической обработке экспериментальных данных обоснован экспоненциальный вид зависимостей времени задержки микровзрывного распада капель от температуры и теплового потока [1, 2]. Определены кинетические характеристики прогрева до условий микровзрывной фрагментации (рис. 1): предэкспоненциальный множитель и энергия активации в уравнении Аррениуса. Учтено влияние коэффициента теплообмена, размера и площади поверхности исходной капли, температуры и физико-химических свойств внешней газовоздушной среды, компонентного состава топливной оболочки и ее размера, условий смешанного теплообмена, объема, плотности и теплоемкости дисперсной фазы на предэкспоненциальный множитель. Обосновано возможное применение эффектов микровзрыва капель в газопарокапельных системах с исключением нерегламентных возгораний на основе установленных принципиальных различий в значениях энергии активации микровзрывного распада и окислительных реакций при зажигании формирующейся парогазовой смеси вокруг них.

Рис. 1. Графическая аннотация работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ 23-69-10006, https://rscf.ru/project/ 23-69-10006/).

Список литературы

1. Kumar H., Kumar V. Ultrasonication assisted formation and stability of water-in-oil nanoemulsions: Optimization and ternary diagram analysis // Ultrason. Sonochem. – 2018. – V. 49. – P. 79–88.
2. Antonov D.V., Kuzhetsov G.V., Strizhak P.A., Rybdylova O., Sazhin S.S. Micro-explosion and autoignition of composite fuel/water droplets // Combust. Flame. – 2019. – V. 210. – P. 479–489.

УДК 621.43.057.3

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЖИДКИХ ТОПЛИВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТЫ МАЛОГАБАРИТНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Антонов Д.В., Стрижак П.А.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Приведены результаты испытаний по сжиганию модельных образцов жидких топлив и их смесей на примере модельных образцов керосина, полученных по разным химическим технологиям (прямогонный и гидроочищенный керосин), в малоразмерных газотурбинных установках (МГТУ). Получены следующие ключевые характеристики при работе на разных видах топлив: тяга установки, статическое давления во впускном канале, статическое давление в компрессоре, полное давление в компрессоре, камере сгорания и турбине, скорости вращения турбины, температуры входящего воздуха, внутри компрессора, на выходе турбины и на срезе сопла. Проведены термогазодинамические расчеты рабочего процесса в камерах сгорания МГТУ в режиме, для которого достигаются установленные значения по потребной тяге на разных видах топлив. При помощи анализатора шума и вибраций выполнены измерения шумовых и вибрационных характеристик при работе МГТУ на прямогонном и гидроочищенном керосине, а также их смесях. Зарегистрированы концентрации антропогенных выбросов CO, CO_2, NO, NO_2, N_2O, SO_2, CH_4, C_3H_8 с использованием комплекта сенсоров при сжигании различных керосинов. Установлены закономерности изменения дроссельных характеристик, газового состава, шума и вибраций на разных режимах работы двигателей при сжигании керосинов по разным химическим технологиям. Выполнена математическая обработка результатов испытаний с целью получения зависимостей основных характеристик МГТУ при сжигании различных топлив. Выявлено, что наилучшие технические и эксплуатационные характеристик достигаются при сжигании гидроочищенного керосина. Тенденции по тягово-экономическим характеристикам качественно согласуются с данными других авторов [1,2].

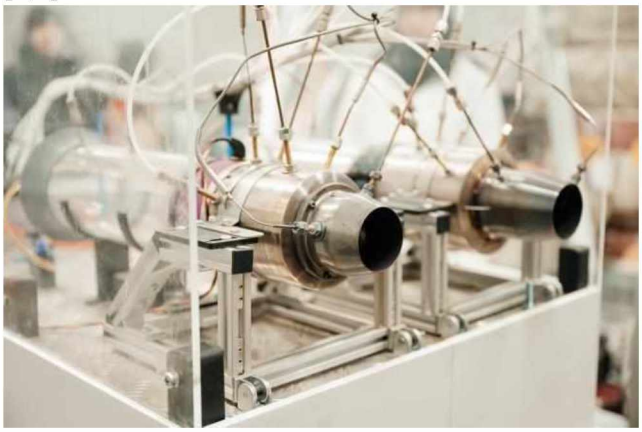


Рис. 1. Внешний вид экспериментального стенда.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ 23-69-10006, https://rscf.ru/project/ 23-69-10006/).

Список литературы

1. Ramraj H., Sundararaj T., Chandra S., Arora R., Kushari A. Effect of nozzle exit area on the performance of a turbojet engine // Aerosp. Sci. Technol. – 2021. – V. 116. – P. 106844.
2. Gürbüz H., Akçay H., Aldemir M., Akçay İ.H., Topalcı Ü. The effect of euro diesel-hydrogen dual fuel combustion on performance and environmental-economic indicators in a small UAV turbojet engine // Fuel. – 2021. – V. 306. – P. 121735.

УДК 621.43.057.3

МИКРО-ВЗРЫВНАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ ТРЕХЖИДКОСТНЫХ КАПЕЛЬ ДЛЯ ТОПЛИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ЖИДКОСТЕЙ

Антонов Д.В., Федоренко Р.М., Стрижак П.А.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Явления паффинг и микровзрыв капель жидкостей реализуются при их вторичном измельчении в нескольких приложениях. Эти процессы позволяют в кратное число раз (до 100-200 раз) уменьшить размер вторичных капель относительно размеров родительских капель [1, 2]. В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований фрагментации двухжидкостных и трехжидкостных капель при варьировании температуры (530–640 К) и скорости движения воздушного потока (3.1–3.8 м/с). Исследованы характеристики микровзрывного распада двухжидкостных и трехжидкостных капель, содержащих в своем составе воду, керосин и рапсовое масло. Исследованы процессы фрагментации капель с содержанием горючего компонента в диапазоне от 10 до 90 об.%. Получены аппроксимационные выражения в виде зависимостей времени задержки микро-взрывного распада исследованных капель от температуры и скорости движения потока газа, а также теплового потока. Установлено, что времена задержки распада трехжидкостных капель во всем исследуемом температурном диапазоне ниже, чем для двухжидкостных капель. Показано, что интенсивность фрагментации трехжидкостных капель выше, чем для двухжидкостных капель на основе керосина, но ниже, чем для двухжидкостых капель на основе рапсового масла. Выделены отличия значений времени существования двухжидкостных и трехжидкостных капель относительно однородных капель воды и керосина. Продемонстрировано, что за счет эффектов микро-взрывного распада времена испарения капель жидкостей могут быть снижены более чем в 3 раза. Полученные результаты создают объективные предпосылки для развития технологий вторичного измельчения многокомпонентных капель, в которых каждая жидкость добавляется для управления экономическими, экологическими, энергетическими, технологическими и иными параметрами.

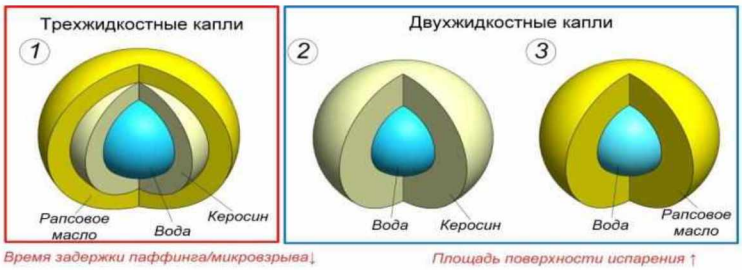


Рис. 1. Графическая аннотация работы.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант 075-15-2024-620).

Список литературы

1. Kumar H., Kumar V. Ultrasonication assisted formation and stability of water-in-oil nanoemulsions: Optimization and ternary diagram analysis // Ultrason. Sonochem. – 2018. – V. 49. – P. 79–88.
2. Antonov D.V., Kuzhetsov G.V., Strizhak P.A., Rybdylova O., Sazhin S.S. Micro-explosion and autoignition of composite fuel/water droplets // Combust. Flame. – 2019. – V. 210. – P. 479–489.

УДК 62-663.6

СОВМЕСТНОЕ СЖИГАНИЕ НИЗКОРЕАКЦИОННЫХ ТОПЛИВ С КОНДЕНСИРОВАННЫМИ ПРОДУКТАМИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ

Асильбеков А.К.[1)], Слюсарский К.В. [1, 2)] Ларионов К.Б. [1, 2)]
[1)] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
[2)] Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово, Россия

Одним из современных и экологически безопасных способов переработки резинотехнических изделия является термическая деструкция (пиролиз). В результате образуются три составляющие: углеродный остаток, конденсируемые и неконденсируемые пиролизные газы. Конденсируемые пиролизные газы в предыдущих работах мы упоминали как – пиролизной жидкостью, маслом, конденсатом. [1]. Сжигание пиролизного конденсата с низкореакционым топливом в традиционной энергетике позволит снизить экологический вред от мазута используемого для подсветки, содержащего ванадий и серу, стабилизировать температуру устойчивого горения, в результате чего будет проще удовлетворять требования экологически чистых тепловых электростанций. Актуальность и цель работы заключается в необходимости разработки технологических решений для вовлечения пиролизной жидкости переработки резинотехнических изделий и других углеродсодержащих отходов в традиционную энергетику. Для исследований использовался тощий уголь Кузнецкого угольного бассейна, в качестве подсветки пиролизный конденсат, полученный из резинотехнических изделий (шин). Состав и теплотехнические характеристики использованных образцов представлен в таблице 1. Более подробные характеристики пиролизного конденсата можно ознакомится [2].

Таблица 1. Состав и теплотехнические характеристики

Образец	Состав, масс.%					W^a, масс. %	A^d, масс. %	V^{daf}, масс. %	Q_r^r, масс, %
	C	H	N	S	O				
Уголь Т	20,23	3,35	1,83	0,431	3,26	2,58	9,37	11,69	31,7
Исходная шина	–	–	–	–	–	0,9	5,8	65,1	38,4
Пир. конденсат	86,0	11,0	0,6	0,8	1,4	–	–	–	43,3

Для достижения целей работы необходимо было отработать методику получения пиролизного конденсата, что было сделано и был получен авторами данной работы патент [RU 2817493 C1, МПК F23G 5/027 (2024.01), F23G 7/00 (2024.01) опубл. 16.04.2024]. Исследование закономерностей зажигания и окисления угля марки с пиролизным конденсатом проводились на экспериментальном стенде зажигания и горения, описание установки представлено [3]. Апробация методики представлена в работе [4]. Также было исследовано влияние способа приготовления смеси (пиролизного конденсата с углём) на характеристики зажигания и горения данной смеси.

Список литературы

1. Краткая химическая энциклопедия / Кнунянц И. Л. Том 4. – Рипол Классик, 2013.
2. Kaltaev A. Z., Slyusarsky K. V., Gorshkov A. S., Asilbekov A. K., Gubin A. V., Larionov K. B. Composition, Combustion and Emission Characteristics of Distillation Fractions of Pyrolysis Oil of Waste Heavy-Duty Tires // Waste and Biomass Valorization. – 2024. – С. 1-15.
3. Слюсарский К. В., Ларионов К.Б., Асильбеков А., Шуатаев М.К. Исследование закономерностей окисления и зажигания смесей пиролизной жидкости с низкореакционным углем //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – №. 12. – С. 140-150.
4. Слюсарский К.В., Асильбеков А.К. Закономерности зажигания и горения смесей низкосортного угля с пиролизной жидкостью // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 151-164.

УДК 534.222.2+536.46+661.215.1

СКОРОСТИ ДИФРАГИРУЮЩИХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В 2-МЕРНОМ КАНАЛЕ

Борискин А.А.[1], Васильев А.А.[1]
[1)] Институт гидродинамики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

При переходе детонационной волны (ДВ) из канала постоянного сечения в расширяющийся канал возникает сложное нестационарное течение с трансформацией квазиплоской ДВ в расширяющуюся волну. Основной особенностью такого течения является непостоянство скорости элементов фронта дифрагирующей волны по различным направлениям распространения. Эта особенность и является целью данного исследования. Эксперименты проводились в плоском канале Р-типа (два совмещённых канала различной ширины, имеющие одну общую границу) толщиной 1,5 мм со стехиометрической смесью ацетилена с кислородом. Процесс дифракции регистрировался методом покадровой высокоскоростной съемки фронта свечения с помощью электронно-оптической камеры «НАНОГЕЙТ-22/16». Измерения скорости было проведено для двух характерных режимов дифракции: распал (срыв ДВ) с последующим турбулентным догоранием смеси (рис.1) и реинициирование детонационного сжигания смеси (рис.2).

Базовые направления измерений отмечены пунктирными линиями, которые соответствуют верхней и нижней границе узкой части канала, а так же середине не распавшегося участка ДВ (его нижняя граница отмечена сплошной линией на этой же фотографии).

По результатам исследования установлен и изучен пульсационный характер движения дифрагирующих волн. Полученные результаты позволяют, например, судить о влиянии эффекта трения на параметры ДВ: в идеализированной модели ДВ с плоским фронтом скорость ДВ (например на рисунке 1) равна 2200 м/с, экспериментальное значение усредненной ДВ 2100 м/с (средняя пунктирная линия), что обусловлено потерями энергии в двумерном канале.

Рисунок 1. Пример срыва детонационной волны при дифракции.

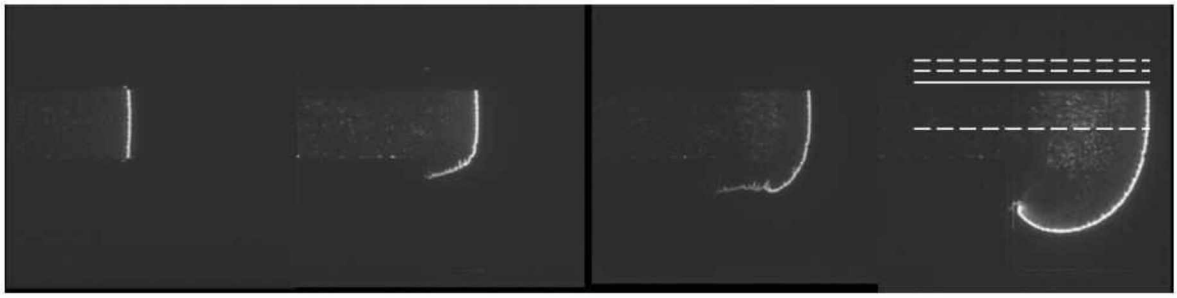


Рисунок 2. Пример восстановления детонационной волны при дифракции.

Данные исследования выполнены за счет бюджета ИГиЛ СО РАН (номер госрегистрации - № 121121600293-2) в рамках государственного задания.

УДК 534.2, 546.2

ДЕТОНАЦИОННОЕ ГОРЕНИЕ СМЕСИ КЕРОСИН–ВОЗДУХ В ВИХРЕВОЙ РАДИАЛЬНОЙ КАМЕРЕ И ЕГО ИНИЦИИРОВАНИЕ

Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф.
Институт гидродинамики им. М.А Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Реализованы и исследованы режимы детонационного сжигания двухфазной смеси авиационный керосин ТС-1 – воздух в вихревой радиальной камере диаметром 500 мм с истечением к центру с соплом и осевыми перегородками, выравнивающими поток продуктов в осевом направлении (рис.1).

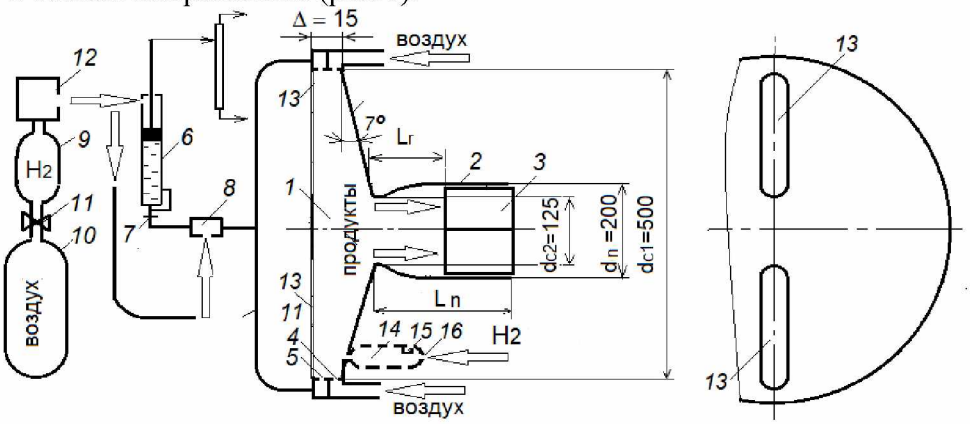


Рис.1. Схема вихревой радиальной камеры диаметром 500 мм

Режимы непрерывной спиновой и пульсирующей вдоль радиуса детонацией осуществлены при жёстком инициировании - выходе детонационной волны из объёма *14* в камеру сгорания. Разработан мягкий способ инициирования с плавным переходом горения в детонацию водородо-воздушной смеси (водород истекает из объёма *9*) в керосино-воздушную смесь, при котором всегда реализовывалась непрерывная спиновая детонация с одной поперечной детонационной волной при расходах воздуха, вдвое превышающих его расходы при жёстком инициировании (рис. 2).

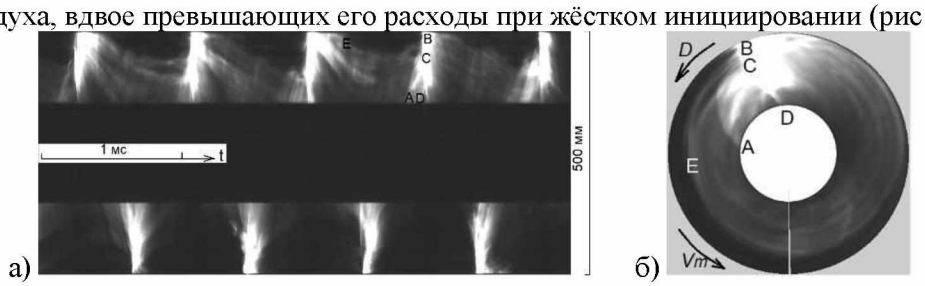


Рис.2. Линейная фоторегистрограмма непрерывной спиновой детонации через два окна (фрагмент) (а); реконструкция волн в плоскости камеры сгорания (б); расход воздуха G_a = 20 кг/с, коэффициент избытка горючего φ = 1.03, скорость детонации D = 1.92 км/с, число волн n = 1.

Проведено сравнение удельных импульсов данной радиальной камеры сгорания и камер кольцевой цилиндрической геометрии, в которых керосин сжигался в режимах непрерывной многофронтовой детонации. При расходах воздуха меньше 10 кг/с для радиальной камеры сгорания реализованы максимальные удельные импульсы - до 2513 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований № 2.3.1.2.4.

УДК 534.222.2

НЕПРЕРЫВНАЯ СПИНОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ БЕЗУГЛЕРОДНОЙ СМЕСИ АММИАК – ВОЗДУХ С ДОБАВКОЙ ВОДОРОДА

Быковский Ф.А.[1)], Ждан С.А.[1)], Ведерников Е.Ф.[1)]

[1)] Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Обзор современного состояния экспериментальных исследований непрерывной спиновой детонации (НСД) в проточных кольцевых камерах сгорания (вариант воздушно-реактивного двигателя) для ряда топливовоздушных смесей (ТВС): ацетилен-воздух, водород-воздух, синтез-газ-воздух, представлен в [1], а в смеси метан/водород-воздух в [2]. В настоящее время экологически чистая энергия и ресурсосберегающие энерготехнологии все чаще используются для решения некоторых из ключевых проблем современного общества. Аммиак является альтернативным безуглеродным топливом. Цель данной работы – реализация и исследование непрерывной детонации с поперечными детонационными волнами (ПДВ) в проточной кольцевой цилиндрической камере сгорания диаметром 503 мм (ДК-503) безуглеродной смеси аммиак/водород – воздух с массовыми долями H_2 в бинарном горючем m_H = 0.485 и 0.32. Эксперименты проведены в ДК-503 (кольцевая щель для подачи воздуха δ = 3,5 мм, кольцевой зазор между стенками камеры Δ = 31.5 мм, длина L_c = 600 мм) в диапазоне удельных расходов смеси g_Σ = 26 ÷ 539 кг/(с·м^2) при коэффициенте избытка бинарного горючего ϕ = 0.42 ÷ 2.24. Истечение продуктов происходило в окружающую среду с давлением $p_a = 10^5$ Па.

Результаты экспериментов. В безуглеродных смесях $NH_3 + 8H_2$ – воздух в диапазонах g_Σ = 55 ÷ 539 кг/(с·м^2) и ϕ = 0.78 ÷ 2.24 впервые осуществлены одноволновые и двухволновые режимы НСД с частотой вращения ПДВ f = 0.79 ÷ 1.0 кГц (скоростью детонации D = 1.24÷1.59 км/с) и f = 1.54 ÷ 1.81 кГц (D = 1.22÷1.43 км/с), соответственно. Фрагмент фоторегистрограммы НСД приведён на рис. 1.

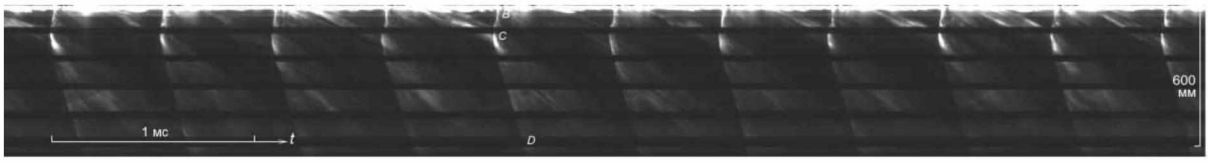


Рис. 1. Фрагмент фоторегистрограммы режима НСД безуглеродной смеси $NH_3 + 8H_2$ – воздух: g_Σ = 347 /(с·м^2), ϕ = 1.04, n = 2, f = 1.81 кГц, D = 1.43 км/с.

В смеси $NH_3 + 4H_2$ – воздух в диапазонах g_Σ = 78 ÷ 195 кг/(с·м^2) и ϕ = 1.0 ÷ 1.96 реализован одноволновый режим НСД с f = 0.87 ÷ 0.97 кГц и D = 1.38÷1.54 км/с. Установлено, что при одинаковых значениях удельных расходов безуглеродных смесей NH_3/H_2 – воздух для одноволновых режимов НСД уменьшение доли водорода в составе бинарного горючего вдвое практически не приводит к уменьшению скорости ПДВ. Получены нижние пределы непрерывной детонации по удельному расходу смеси 55 и 78 кг/(с·м^2) для горючего составов $NH_3 + 8H_2$, $NH_3 + 4H_2$ соответственно. Определены и проанализированы удельные импульсы при НСД.

Итак, в проточной кольцевой цилиндрической камере ДК-503 для безуглеродной смеси аммиак – воздух с добавками водорода впервые реализованы режимы НСД.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2024-543 от 24.04.2024.

Список литературы

1. Быковский Ф.А., Ждан С.А. Современное состояние исследований непрерывной детонации топливовоздушных смесей (обзор). ФГВ. 2015. Т. 51, № 1. С. 31 - 46.
2. Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф. Непрерывная детонация смесей метан/водород-воздух в кольцевой цилиндрической камере сгорания. ФГВ. 2018. Т. 54, № 4. С. 96-106.

УДК 544.4

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОКИСЛЕНИЯ ФУРАНА ЗА УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Быстров Н. С., Емельянов А. В., Еремин А.В., Яценко П. И.
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

В работе представлена новая информация о взаимодействии перспективного биотоплива - фурана и продуктов его разложения с молекулярным кислородом в условиях, моделирующих процессы горения. Исследования проводились прецизионным методом атомно-резонансной абсорбционной спектроскопии на высокочистой ударной трубе за отраженными ударными волнами в смеси 10 ppm C_4H_4O + 10 ppm O_2 в Ar в диапазоне температур 1600-4000 ± 50 K при давлениях 1.5-3 бар. Были получены время-разрешенные концентрационные профили образования и потребления одного из важнейших радикалов горения – атомарного кислорода в процессе окисления исследуемой топливной смеси. Полученные экспериментальные данные дали возможность провести анализ предсказательной эффективности современной кинетической модели горения биотоплив, разработанной «CRECK Modeling Group», применяемой для анализа ключевых реакционных путей, определяющих динамику окисления фурана и соответствующие теплофизические процессы в исследуемых химических и термодинамических условиях. На основе сопоставления экспериментальных и численных данных был проведен детальный анализ путей образования продуктов и чувствительности констант скоростей протекающих элементарных реакций. В результате были предложены модификации кинетических параметров ключевых реакционных путей, позволившие значительно повысить предсказательные способности тестируемой модели. Полученные новые экспериментальные данные представляют ценный инструмент верификации будущих кинетических и теплофизических моделей горения многокомпонентных топливных смесей углеводородов с участием перспективных биотоплив.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2024-543 от 24.04.2024.

УДК 534.222.2+536.46+661.215.1

СКОРОСТЬ ЗВУКА В ПРОДУКТАХ МНОГОФРОНТОВОЙ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

Васильев А.А.[1,2], Борискин А.А.[1]
[1)] Институт гидродинамики СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2)] Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Классическое определение скорости звука в газовой среде как производной от приращения давления при приращении плотности (при постоянной энтропии и неизменном числе частиц) достаточно точно определяет эту скорость для нереагирующих газовых сред. Однако для реагирующих сред скорость звука определяется неоднозначно и меняется в диапазоне от высокочастотной замороженной скорости звука до низкочастотной равновесной скорости. Подобная дисперсия звука наблюдается и в системах с конечными временами релаксации, в гетерогенных газокапельных и газо-пылевых системах, а также в пузырьковых системах… Поскольку скорости звука определяют законы распространения волн сжатия и разрежения, а также входят в инварианты Римана, то корректное определение этого параметра становится одной из важнейших задач, особенно при анализе неоднородных течений продуктов горения и детонации.

В данной работе для экспериментального определения скорости звука использован известный результат о возникновении и распространении волны разрежения при внезапном расширении границы канала. При этом от границы заряда к оси будет распространяться волна разрежения, срывающая химическую реакцию за фронтом детонационной волны, распространяющейся вдоль заряда. Голова этой волны разрежения будет распространяться со скоростью звука в данной среде, т.е в неоднородном потоке продуктов детонации. Траекторию радиально сходящейся волны разрежения можно зафиксироваить с помощью мгновенных фотографий свечения невозмущенного участка фронта ДВ, тогда наклон этой траектории позволит определить скорость звука из соотношения $c = D \cdot tg\alpha$. Величина скорости ДВ определяется $D = \Delta x / \Delta t$, здесь Δt - временной интервал между кадрами.

Ниже представлены покадровые снимки свечения невозмущенного фронта ДВ, распространяющейся в смеси C2H2+2.5O2, по мере движения волны разрежения к оси заряда, а также свечения расширяющихся продуктов детонации. Точки излома фронта ДВ являются точками срыва химической реакции под воздействием головной части волны разрежения. Фотографии получены с помощью высокоскоростной камеры НАНОГЕЙТ-16 при исследовании перехода многофронтовой ДВ из узкого канала в широкий (цилиндрическая симметрия). Волна разрежения возникает в сечении, где происходит скачкообразное изменение сечения канала.

Данные исследования выполнены в рамках выполнения бюджетной тематики при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Проект 2.3.1.2.4, №121121600293-2).

Список литературы:

Борискин А.А., Васильев А.А. Возбуждение цилиндрической детонации ослабевающей ударной волной// Физика горения и взрыва, 2023, 59, 6. С.123-135. DOI 10.15372/FGV2022.9248

УДК 534.222.2+536.46+661.215.1

О ВЗРЫВООПАСНОСТИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И НИЗКОУГЛЕРОДНЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ И ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

Васильев А.А.[1,2], Васильев В.А.[1]
[1)] Институт гидродинамики СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2)] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В последние годы в ведущих странах (Китай, Япония, США, Индия, Франция, Россия,…) требования экологии и существенного удешевления космических запусков привели к буму исследований, касающихся поиска новых топлив (как замену традиционным жидким компонентам типа керосина). Наряду с повышенным интересом к криогенной водородно-кислородной системе с экологическим водяным паром в продуктах сгорания, практический интерес при создании работающих на газообразных топливах двигателей нового поколения (а также для энергетики) вызывают метан с минимальным «углеродным следом» и безуглеродный аммиак. Например, Китай уже заявил об успешном испытании ракетного двигателя на сжиженных компонентах метан-кислород. Основное преимущество газообразных компонент - почти вдвое меньшая стоимость запуска и значительное упрощение конструкции двигателя.

К сожалению, в литературе имеются лишь отрывочные данные о параметрах горения и детонации подобных систем, особенно об их пожаро- и взрывоопасности, где мерой опасности выступает критическая энергия инициирования E*: чем меньше E*, тем более опасна горючая смесь. Параметры горения и детонации водородных смесей вместе с данными о критической энергии инициирования подробно представлены и обсуждены в журнале ФГВ, 2024, №3, а для метановых – в ФГВ, 2009, №6. В данном докладе кратко представлены данные для этих систем, а также данные для смесей аммиак–кислород. Наряду с положительными аспектами обсуждены и отрицательные моменты при их использовании (обычно не афишируемые).

На Рис.1 для сравнения представлены графики изменения критической энергии инициирования сферической детонации в зависимости от мольной концентрации топливного компонента (аммиака, водорода и метана) в их смесях с кислородом. Из рассмотренных топлив наиболее опасным являются водород, а аммиак - наименее опасным.

На рис.2 для этих же топливных компонент представлены зависимости удельного энерговыделения смесей в зависимости от мольной концентрации топливного компонента в смеси.

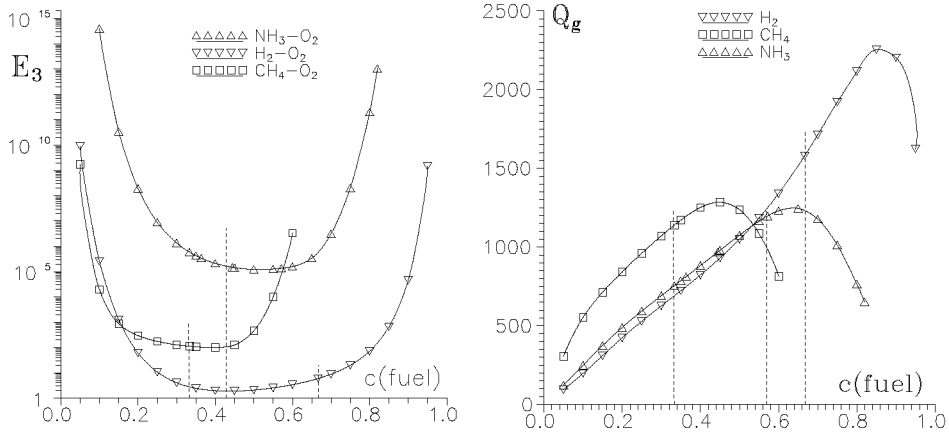


Рис. 1-2.

Данные по аммиачным смесям получены в рамках выполнения КНП при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543).

УДК 534.222.2+536.46+661.215.1

ВЗРЫВООПАСНОСТЬ НОВЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

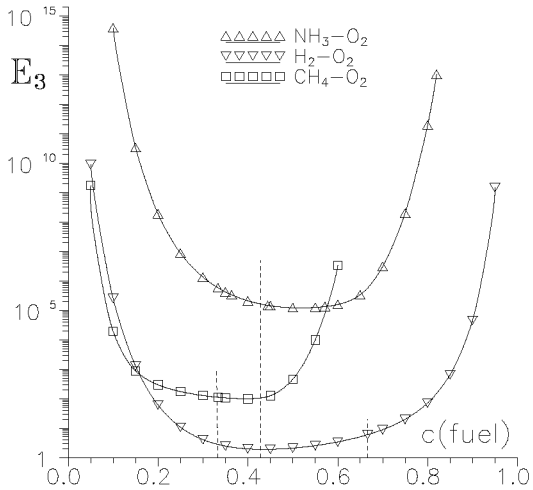
Васильев А.А.[1,2], Васильев В.А.[1], Борискин А.А.[1]
[1)] Институт гидродинамики СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2)] Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

В последние годы наблюдается бум исследований космических держав (Китай, Япония, США, Индия, Франция, Россия,…) по поиску новых топлив (наряду с традиционными жидкими компонентами типа керосина) с целью существенного удешевления космических запусков. Наряду с повышенным интересом к криогенному водородно-кислородному двигателю с экологическим водяным паром в продуктах сгорания практический интерес при разработке двигателей нового поколения, работающих на газообразных топливах, вызывают метан с минимальным «углеродным следом» и безуглеродный аммиак. Например, Китай заявил об успешном испытании ракетного двигателя на сжиженных компонентах метан-кислород, сжигаемых в детонационном режиме. Основное преимущество газообразных компонент - почти вдвое меньшая стоимость запуска и значительное упрощение конструкции двигателя.

К сожалению, в литературе имеются лишь отрывочные данные о параметрах горения и детонации подобных систем, особенно об их пожаро- и взрывоопасности, где мерой опасности выступает критическая энергия инициирования E*: чем меньше E*, тем более опасна горючая смесь. Параметры горения и детонации водородных смесей вместе с данными о критической энергии инициирования подробно представлены и обсуждены в журнале ФГВ, 2024, №3, а для метановых – в ФГВ, 2009, №6. В данном докладе представлены данные для смесей аммиака.

На Рис.1 для сравнения представлены графики изменения критической энергии инициирования сферической детонации в зависимости от мольной концентрации топливного компонента (аммиака, водорода и метана) в их смесях с кислородом. Из рассмотренных топлив наиболее опасным являются водород, а аммиак - наименее опасным.

На рис.2 для этих же топливных компонент представлены зависимости удельного энерговыделения смесей в зависимости от мольной концентрации топливного компонента в смеси.



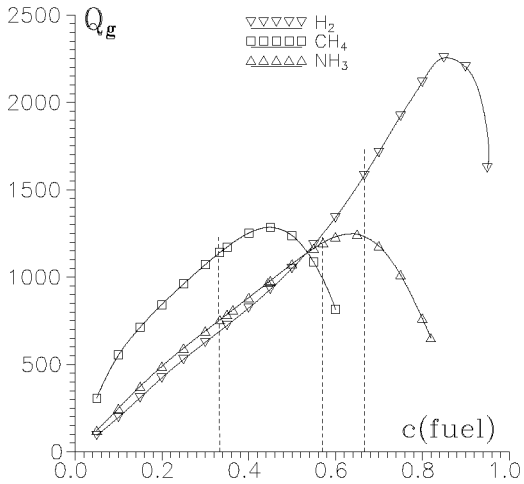


Рис. 1-2.

Данные по аммиачным смесям получены в рамках выполнения КНП при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543).

УДК 536.46

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПРОТИВОТОЧНОГО ВИХРЕВОГО ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА НА ЕГО АКУСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Веретенников С.В., Евдокимов О.А., Благушин И.А.
Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева, г. Рыбинск, Россия

Выполнены экспериментально-расчетные исследования процесса горения и акустики противоточного вихревого горелочного устройства, геометрия которого выполненная по рекомендациям [1, 2]. В ходе эксперимента выполнены визуализация положения фронта пламени высокоскоростной камерой с частотой 1000 к/с и измерение акустического излучения при размещении горелочного устройства в акустическом боксе. Исследованная модель горелки состоит из трехзаходного закручивающего устройства, цилиндрического участка, выполненного из кварцевого стекла, протяженностью 3..10 d и диаметром d, кроме того имеет конический участок длиной d и углом 23°, который соединяется с профилированной торцевой частью диаметром 4..5d и длиной 1..1.5d. Подача газообразного топлива осуществляется по центру торцевой стенки, а выход потока осуществляется с противоположной стороны, через спрофилированное сопло.

При увеличении длины цилиндрической части горелки происходит расширение границы бедного срыва фронта пламени. На бедных режимах горение преимущественно происходит внутри цилиндрического участка, а на богатых – снаружи (рис. 1). При длине цилиндрического участка горелки l=4d на бедных режимах наблюдается существенная нестационарность положения фронта пламени, которая генерирует локальные максимумы акустического излучение в области частот 180 Гц и 1200-2500 Гц. В целом бедные режимы горения, по сравнению с богатыми, характеризуются наличием нескольких выраженных локальных максимумов излучения. Среднеинтегральный уровень шума снижается с увеличением длины горелки, особенно в области высоких частот (более 5000 Гц)

а)

б)

Рис. 1. Визуализация фронта пламени: а) α=1,5, б) α=0,75

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002).

Список литературы

1. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / Ш. А. Пиралишвили, В. М. Поляев, М. Н. Сергеев; под ред. Леонтьева А. И. – М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. – 412 с.
2. Гурьянов, А. И. Эмиссионные характеристики горения в закрученном течении с газодинамическим противотоком // Тепловые процессы в технике. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 5 – 12.

УДК 621.182+504.06

ОПЫТ ВТИ ПО ВНЕДРЕНИЮ МЕРОПРИЯТИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА НА ГАЗОМАЗУТНЫХ КОТЛАХ

Верещетин В.А.[1)], Тугов А.Н. [1)]

[1)] ОАО «Всероссийский теплотехнический институт», г. Москва, Россия

Текущие наработки ВТИ позволяют добиться снижения выбросов оксидов азота на существующих газовых котлах до значений 125 мг/нм^3 (при O_2 6%), только за счет организации топочного процесса. Создание котла «с нуля» позволит удовлетворить и более жесткие европейские требования (100 мг/нм^3 при O_2 3%).

На основании теоретических, лабораторных и промышленных исследований, выполненных в ВТИ, были разработаны и успешно внедрены следующие основные технологические методы снижения выбросов оксидов азота:

1. Низкоэмиссионные горелочные устройства с пониженным выходом оксидов азота. Их внедрение на котлах Среднеуральской ГРЭС, Шатурской ГРЭС, ТЭЦ-23 АО Мосэнерго и др. позволило уменьшить выбросы оксидов азота при сжигании природного газа — в 2,5 – 3,5 раза, а при сжигании мазутов – в 2 – 2,5 раза.

2. Организация схемы двухступенчатого сжигания топлива. Использование разработанных схем двухступенчатого сжигания на котлах ТЭЦ-8, ТЭЦ-9, ТЭЦ-21 и ТЭЦ-26 Мосэнерго, Курской ТЭЦ-4, Астраханской ТЭЦ-2, Среднеуральской ГРЭС и других снизило выбросы оксидов азота в 2 – 3 раза при сжигании газа и примерно в 2 раза - при сжигании мазута.

3. Применение схемы трёхступенчатого сжигания топлива. За счет трехступенчатого сжигания топлива на котлах ПК-33 Щекинской ГРЭС, ТГМ-96Б ТЭЦ-8 Мосэнерго и других удалось уменьшить выбросы оксидов азота при сжигании газа в 2,5 – 3 раза, а при сжигании мазута примерно в 2 раза.

4. Ввод рециркулирующих дымовых газов в топку в смеси с дутьевым воздухом, по отдельным каналам горелок и/или на всас дутьевых вентиляторов. Правильно организованный ввод рециркулирующих дымовых газов в топочную камеру на котлах Ново-Рязанской ТЭЦ, Краснодарской ТЭЦ, ТЭЦ-8 Мосэнерго, Среднеуральской ГРЭС и др. позволяет в зависимости от их доли снизить выбросы оксидов азота в 2 – 4 раза.

Вместе с тем, необходимо отметить, что технические решения, реализующие один и тот же метод, на различных котлах не одинаковы вследствие конструктивных отличий топочных камер, компоновки горелочных устройств и котельного оборудования. Внедрение природоохранных мероприятий также может повлиять на тепловую работу котла. Поэтому решать экологическую проблему необходимо комплексно, разрабатывая методы индивидуально для каждого конкретного объекта.

Выполненные во ВТИ научные исследования и проектно-конструкторские проработки, позволили разработать методологию по внедрению технологических мероприятий при реконструкции целого парка наиболее распространенных типов котлов большой и средней мощности, эксплуатирующихся в настоящее время на российских ТЭС.

При создании новых котлов для достижения сверхнизких концентраций оксидов азота также можно руководствоваться предложенной методологией к организации процесса внедрения технологических мероприятий.

Примером такой практической реализации может служить котел Е-135-4,2-420ДГ, созданный для сжигания газообразных продуктов сланцепереработки – полукоксового газа. За счет заложенных в конструкцию топки решений, специальной конструкции горелочных устройств и ввода газов рециркуляции удалось достичь выбросов NO_x ниже 50 мг/нм^3 (при O_2 6%). При этом необходимо отметить, что полукоксовый газ является более сложным топливом, чем газ природный.

УДК 537.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ АКТУАТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Воеводин В.В.[1,2], Жарков Я.Е. [1], Кириллов А.С.[1], Коржова О.И.[1], Хомич В.Ю. [1], Ямщиков В.А. [1]
[1] Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Россия
[2] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В последние годы проявляется повышенный интерес к изучению и применению электрогидродинамических (ЭГД) потоков [1], образуемых в ходе взаимодействий заряженных частиц с нейтральным газом в области дрейфа газоразрядного промежутка. Электродные системы для создания ЭГД потоков при отсутствии подвижных частей и при своей компактности способны формировать скоростные газовые течения, и могут быть использованы для охлаждения теплонагруженных элементов как в качестве самостоятельного устройства, так и в дополнение к традиционным системам газового охлаждения, усиливая теплообмен за счет воздействия на пограничный слой вблизи поверхности радиатора [2].

Приведены экспериментальные результаты по комбинированному продольно-поперечному охлаждению радиатора с гладкой поверхностью с размерами 10x7 см. Продольная составляющая течения создавалась посредством осевого вентилятора с регулировкой оборотов. Поперечная составляющая генерировалась с помощью коронного разряда при варьируемом постоянном напряжении. На рис. 1 приведена тепловая карта эффективности комбинированного охлаждения dT/P, где эффективность оценивалась как изменение температуры dT на 1 Вт затрачиваемой полной мощности. Тепловая карта совмещена с изолиниями снижения температуры dT для визуализации областей значимого падения температуры.

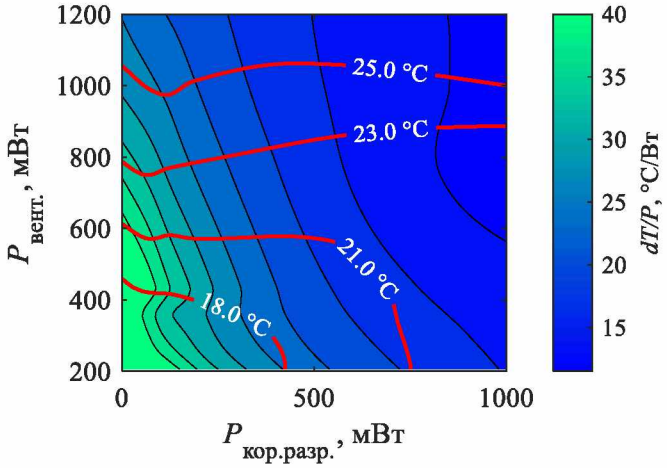


Рис. 1. Изолинии снижения температуры dT и тепловая карта эффективности работы комбинированной системы охлаждения.

Таким образом показано, что использование комбинированного охлаждения с использованием ЭГД позволяет интенсифицировать теплообмен с поверхностью охлаждающего элемента без существенного увеличения энергозатрат охлаждающей системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2024-543 от 24.04.2024

Список литературы

1. Iranshahi K. и др. Electrohydrodynamics and its applications: Recent advances and future perspectives // Int. J. Heat Mass Transf. 2024. – Т. 232. December 2023. С. 125895.
2. Khomich V. Y., Yamshchikov V. A. Electrohydrodynamic flow for the active control of gas flows // Uspekhi Fiz. Nauk. 2017. Т. 187. № 06. С. 653–666.

УДК 533.6.01, 534.222.2

ОСОБЕННОСТИ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ТЕЛ ПРИ ВЗРЫВЕ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЯ В НАБЕГАЮЩЕМ ПОТОКЕ

Георгиевский П.Ю. [1)], Левин В.А. [1,2)], Сутырин О.Г. [1)]

[1)] Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

[2)] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Ранее в [1] отмечен кумулятивный эффект возникновения аномальных всплесков давления при столкновении движущегося со сверхзвуковой скоростью тела с газовым пузырем пониженной плотности. Эффект был подтвержден в экспериментальных и численных исследованиях (в том числе с учетом реальных физических процессов) для взаимодействия тел с высокотемпературными плазменными образованиями, сформированными в сверхзвуковом набегающем потоке одиночным импульсом лазерного энерговклада [2–4]. В [5] проведено численное исследование взаимодействия обтекаемых сверхзвуковым потоком затупленных тел с газовым пузырем пониженной или повышенной плотности. Показано, что причиной возникновения аномальных всплесков давления в критической точке тела является предшествующая фокусировка поперечных ударных волн в малом объеме на оси симметрии течения, сопровождающаяся в отдельных случаях формированием тонких кумулятивных струй.

В настоящей работе рассматривается воздействие мгновенного выделения энергии (распределенного взрыва) в области газового пузыря на сверхзвуковое обтекание затупленных тел (сферы) и заостренных тел (тело оживальной формы и комбинация конус-цилиндр) для случая, когда взрыв происходит в невозмущенном набегающем потоке в непосредственной близости от головной ударной волны. Очевидным результатом является непосредственное воздействие взрывной ударной волны на поверхность тела. Кроме того, при взаимодействии головной ударной волны с динамически изменяющейся областью взрыва (ударно сжатым слоем и каверной), а также с учетом фокусировки и дефокусировки вторичной ударной волны происходят существенные нестационарные изменения газодинамических режимов обтекания тел, которые, в частности, зависят от расстояния от центра взрыва до тела. Так для сферы отмечены случаи формирования «ударного клюва», взаимодействие которого с осью симметрии приводит к возникновению кумулятивных струй. При этом в критической точке на поверхности сферы происходят множественные всплески давления, первый пик соответствует приходу взрывной волны, а последующие (аномальные) обусловлены эффектами фокусировки и кумуляции. При этом импульсное воздействие при кумуляции может превышать непосредственное воздействие взрывной волны. Для заостренных хорошо обтекаемых тел воздействие взрыва сказывается значительно слабее, чем для затупленных. Кумулятивных эффектов зафиксировать не удалось, однако воздействие дефокусирующейся вторичной ударной волны также приводит к возникновению вторичных всплесков давления.

Работа выполнена в НИИ механики МГУ при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-543 от 24.04.2024).

Список литературы

1. Georgievskii P.Yu., Levin V. A. Unsteady Interaction of a Sphere with Atmospheric Temperature Inhomogeneity at Supersonic Speed // Fluid Dynamics. – 1993. – V. 28, No. 4. – P. 568 – 574. https://doi.org/10.1007/BF01342694
2. Yan H., Adelgren R., Bogushko M., Elliott G., Knight D. Laser Energy Deposition in Quiescent Air // AIAA J. – 2003. – V. 41, No. 10. P. 1988 – 1995. https://doi.org/10.2514/2.1888
3. Schülein A., Zheltovodov A., Pimonov E., Loginov M. Experimental and Numerical Modeling of the Bow Shock Interaction with Pulse-Heated Air Bubbles // Int. J. of Aerospace Innovations. – 2010. – V. 2, No. 3. P. 165 – 187.
4. Ohnishi N., Tate M., Ogino Y. Computational Study of Shock Wave Control by Pulse Energy Deposition // Shock Waves. – 2012. – V. 22, No. 6. – P. 521 – 531. https://doi.org/10.1007/s00193-012-0407-6
5. Georgievskiy P., Levin V., Sutyrin O. Shock Focusing Effect for The Interaction of Blunt Bodies with Gas Bubbles in a Supersonic Flow // In: Ben-Dor, G., Sadot, O., Igra, O. (eds) 30th International Symposium on Shock Waves 2. – Springer, Cham. – 2017. – P. 1023 – 1027. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44866-4_42

УДК 536.46

СОЗДАНИЕ АЭРОЗОЛЯ ДИОКСИДА ТИТАНА В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ

Глотов О. Г.[1, 2], Сорокин И. В.[1], Белоусова Н. С.[1, 2], Суродин Г. С.[1]
[1] Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск
[2] Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Известно, что диоксид титана в форме аэрозоля, состоящего из частиц нанометрового диапазона размеров, в результате фотокаталитического процесса на поверхности частиц способен разлагать органические вещества [1] [2]. Процесс фотокаталитического разложения или окисления может протекать в воздушной или водной среде [3]. «Органика» может быть самой разнообразной – от вирусов и бактерий до сельскохозяйственных пестицидов и боевых отравляющих веществ. Типичными продуктами являются H_2O, CO, CO_2 и «минеральный остаток». Факторы, влияющие на фотокаталитическую активность, исчерпывающим образом не изучены. Однако, как правило, активность катализатора спадает с течением времени, что делает предпочтительным использование свежеобразованного катализатора. Титан относится к высококалорийным металлическим горючим, что с учетом вышеупомянутых предпосылок привело к идее получения TiO_2 «на месте по требованию» (on demand) [4] посредством сжигания порошка титана в воздухе. Для этого требуется создать специальное техническое устройство – «пиротехнический генератор TiO_2». Цель данной работы – проработка научных основ организации процесса горения в таком устройстве. Учитывая опыт разработчиков ракетных двигателей и газогенераторов [5], предполагаемый облик устройства представляется в виде камеры с соплом. Внутри камеры происходит горение титансодержащего топлива, собственно горение титана осуществляется в основном в воздухе после выхода струи продуктов горения топлива из сопла. Первые эксперименты с титансодержащим топливом выявили агломерацию титана в волне горения [6]. Поэтому для достижения цели требуется решить следующие задачи: (1) Оптимизировать состав топлива и условия горения в камере для снижения агломерации при достаточно высоком содержании титана в топливе. (2) Исследовать механизмы горения частиц титана в воздухе и образования их конденсированных продуктов горения для максимизации выхода целевого продукта – высокодисперсного TiO_2. (3) Изучить фотокаталитическую активность полученного TiO_2 и его эффективность по отношению к модельным загрязнителям. Исследование проводится при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект РНФ № 24-29-00474). Итогом выполнения проекта должен быть вывод о том, возможна ли реализация идеи уничтожения загрязнений воздуха с помощью пиротехнического генератора TiO_2.

Список литературы

1. Glotov O.G., Zarko V.E. Formation of Nanosized Products in Combustion of Metal Particles // In: Energetic Nanomaterials: Synthesis, Characterization, and Application. Elsevier, 2016. pp. 285-321.
2. Глотов О.Г. Воспламенение и горение частиц титана. Экспериментальные методы исследования и результаты // Успехи физических наук, Т. 189, № 2, 2019. С. 135-171.
3. Морозов А.Н., Михайличенко А.И. Фотокаталитическое окисление органических веществ в водных растворах // Успехи в химии и химической технологии, Т. 137, № 8, 2012. С. 38-43.
4. Weiser V., Neutz J., Eisenreich N., Roth E., Schneider H., Kelzenberg S. Development and characterization of pyrotechnic compositions as counter measures against toxic clouds // Energetic Materials: Performance and Safety. 36th Int. Annual Conf. of ICT & 32nd Int. Pyrotechnics Seminar, June 28 - July 1. Karlsruhe, Germany. 2005. pp. 102-1–102-12.
5. Гаенко О.И., Конюхов И.Е., Муравлев Е.В., Кудряшова О. Б., Титов С.С. Распыление дезактивирующих аэрозолей с помощью энергии ВЭМ // Всерос. конф. «Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения»: тезисы докладов. Новосибирск: Сиб. отд-ние РАН, Ин-т гидродинамики. 2023. С. 221. DOI 10.53954/9785604990025_221.
6. Захаров Р.С., Глотов О.Г. Характеристики горения пиротехнических композиций с порошкообразным титаном // Вестник НГУ. Серия: Физика, Т. 2, № 3, 2007. С. 32-40.

УДК 536.468

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ЖИДКИЕ ТОПЛИВА ДЛЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Глушков Д.О., Паушкина К.К., Кузнеченкова Д.А., Моор Е.Н., Белоногов М.В., Нигай А.Г.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия

Выполнен цикл широкомасштабных лабораторных исследований, в результате которых научно обоснована возможность практического применения композиционных топлив из промышленных и коммунальных отходов на объектах промышленной теплоэнергетики. Экспериментальные и теоретические исследования позволил установить основные закономерности и характеристики процессов (времена задержки зажигания; времена выгорания; минимальные температуры окружающей среды, необходимые для зажигания; изменение температуры капли в процессе горения; концентрации газообразных антропогенных выбросов в окружающую среду), протекающих при горении большой группы (более 80) разных составов композиционных топлив на основе смеси угля с водой (или влажного отхода углеобогащения) и маслом, причем максимальная концентрация последнего, как правило, не превышала 20 %. Многокомпонентный состав таких топлив является причиной реализации достаточно сложного механизма горения капель суспензионных топлив, когда процессы газофазного и гетерогенного выгорания компонентов достаточно существенно распределены во времени, а длительность горения в целом составляет несколько десятков секунд (30–90 с). Установлено, что диспергирование капель суспензионных топлив достаточно существенно (в 8–12 раз) интенсифицирует выгорание горючих компонентов, причем интенсивность диспергирования возрастает при увеличении концентрации горючей жидкости в составе топлива. На основании результатов выполненных анализов свойств отдельных топливных компонентов установлено, что эффект диспергирования обусловлен возникновением в объеме капли суспензионного топлива центров парообразования, зарождение которых зависит от соотношения дисперсионных и полярных составляющих свободной поверхностной энергии компонентов, входящих в состав топлив.

Рис. 1. Модель установки приготовления и сжигания композиционных жидких топлив.

Исследование выполнено при поддержке программы развития НИ ТПУ «Приоритет-2030» (проект № Приоритет-2030-ЭБ-018-202-2024).

УДК 536.46

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ВЕРСИИ CFD ПРОГРАММЫ SIGMAFLOW ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ ГОРЕНИЯ

Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Литвинцев К.Ю.
Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Программный продукт SigmaFlow развивается в ИТ СО РАН ужу более 20 лет. На базе 1 релиза программы в 2000 годы были разработаны специализированные коммерческие версии для моделирования динамики пожаров – SigmaFire [1] и для расчета процессов в пылеугольных котлах - SigmaFlame [2]. Эти продукты достаточно широко распространялись и до настоящего времени используются рядом организациями, однако уже достаточно давно развитие и поддержка этих продуктов разработчиками прекращена. Это было связано в первую очередь с переходом практически всех пользователей на зарубежное коммерческое ПО. В то же время базовый продукт SigmaFlow развивался в направлении совершенствования как математического аппарата: использование геометрических моделей построенных во внешних CAD программах; переход на неструктурированные расчетные сетки; использование решателя на основе многосеточного метода; распараллеливание на базе MPI, так и физических моделей: LES и гибридные модели турбулентности; сопряженный теплообмен; модели двухфазных течений; течений неньютоновских жидкостей; течений в пористых средах; конечно-объемный метод для решения задачи теплового излучения с учетом рассеивающей и селективно-поглощающей средой; и др. [3-5]. Однако промышленные Заказчики (энергетика, металлургия, нефтепереработка, двигателестроение) для задач горения «обязывали» использовать Star-CCM+, Fluent или CFX. В связи с этим совершенствование моделей горения в отечественных кодах (FlowVision, CADFlow, Логос) практически отсутствовало. В настоящее время в части наиболее сложных, актуальных задач горения для которых необходимо использовать многоступенчатые механизмы реагирования в турбулентных потоках альтернативы зарубежному ПО нет.

В связи с этим в ИТ СО РАН встала задача развить современную версию программного продукта SigmaFlow для задач горения. На настоящем этапе проводится тестирование SigmaFlow на подзадачах процесса горения – расчета течения в элементах горелочных устройств – прямоточные струйные, закрученные и сильно закрученные потоки; расчета сложного и сопряженного теплообмена; расчета движения дисперсной фазы – частиц/капель. В части горения ведется подготовка модулей для работы с базами данных веществ и химических реакций, проводится апробация моделей турбулентного горения.

Список литературы

1. Литвинцев К.Ю., Амельчугов С.П., Гаврилов А.А., Дектерев А.А., Негин В.А.,Харламов Е.Б. Программный комплекс для численного моделирования динамики пожаров (σFire)., Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2010613073
2. А.А. Дектерев, А.А. Гаврилов, М.Ю. Чернецкий, Н.С. Суржикова Математическая модель процессов аэродинамики и теплообмена в пылеугольных топочных устройствах. Тепловые процессы в технике. – 2011. – Т.3. – №3. – С.140-144
3. К.Ю. Литвинцев, С.А. Филимонов Использование схемы “бегущего счета” для решения СЛАУ, полученных на основе метода конечных объемов для уравнения теплового переноса излучения. Вычислительные технологии Том 22, № 4, 2017, -С.- 69-79.
4. А.А. Гаврилов, В.Я. Рудяк Прямое численное моделирование баланса турбулентной энергии и сдвиго-вых напряжений в течениях степенных жидкостей в трубе. Известия РАН. Механика жидкости и газа, 2017, № 3, с. 31–43
5. Gavrilov, A. A, Dekterev, A.A. Application of the PANS turbulence model to calculate the flow in the Francis model radial-axial hydroturbine. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(6), 726–738. DOI: 10.17516/1999-494X-0430

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543

УДК 536.46

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОДАЧИ ВУТ В ТОПОЧНУЮ КАМЕРУ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ NO_X

Дектерев А.А.[1,2], Кузнецов В.А. [1,2], Божеева Д.М.[1,2]
[1] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Согласно данным представленным в работе [1], в России в последние десятилетия выбросы в атмосферу оксидов азота постепенно увеличиваются, с 70,9 млн тонн CO_2-эквивалента, выброшенных в 2005 году и до 87,1 млн тонн в 2021 году. В основном выбросы NOx генерируются на энергетических пылеугольных котлах. По-видимому, этот рост в первую очередь вызван увеличением выработки тепловой и электрической энергии на существующих тепловых электростанциях, связанный с увеличением потребления энергии промышленностью. Перестройка структуру генерирующих мощностей, переход на возобновляемые источники энергии, использование «чистой» атомной энергии и даже реализация перспективных «экологически чистых» технологий использования углеводородного топлива потребует не одно десятилетие и привлечение колоссальных организационных и финансовых ресурсов. Параллельно необходимо внедрение отработанных и опробованных технологий снижения NOx [2] - способы ступенчатого сжигания, каталитические и некаталитические системы очистки от NOx.

В данной работе рассматривается мало затратный способ организации ступенчатого сжигания, позволяющий без значительных изменений существующего топочно-горелочного оборудования получить значительное, до 50% снижение выбросов NOx. Предлагается использовать ВУТ в качестве топлива в восстановительной зоне при организации ступенчатого сжигания на пылеугольных котлах.

В ИТ СО РАН длительное время продвигается технология сжигания (ВУТ), отработаны способы получения с использованием кавитационной обработки ВУТ, разработаны конструкции малоэрозионной форсунки для распыла ВУТ, апробированы различные схемы сжигания ВУТ на котлах малой мощности.

В работе [3] на основе моделирования пылеугольного котла Е-500, показано превосходство трехступенчатой схемы сжигания использующей ВУТ в сравнении с применением рядового угля, это обусловлено более интенсивным перемешиванием топочной среды, т.к. скорость подачи ВУТ через форсунки в несколько раз выше скорости ввода угольной пыли через горелки и снижением температуры в ядре горения за счет испарения влаги ВУТ. Дальнейший анализ полей температуры, концентраций компонент топочных газов, степени выгорания угля, показал, что при формировании ступенчатости с использованием ВУТ нет необходимости увеличения высоты топки, а можно все процессы организовать в существующих размерах. При этом организация ввода ВУТ требует относительно небольшой реконструкции топки.

В настоящей работе на основе численного моделирования рассмотрены различные варианты организации ступенчатой подачи ВУТ в топку котла Е-500, проанализированы энергетические и экологические характеристики вариантов реконструкции.

Список литературы

1. Jolibois N. Oscillating Combustion of Different Fuel Types for NOX Reduction in Grate Furnaces and Coal Burners / N. Jolibois // Fuel. — 2023. — vol. 340. — p. 56-62.

2. Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А.Бойков Д.В.,Саломасов Ю.М., Ходаков Ю.С. Разработка комплексной технологии глубокой очистки дымовых газов от оксидов азота котла П-39-IIM Аксусской ГРЭС. Электрические станции, 2012. №11, С. 21-24.

3.Alekseenko S.V., Dekterev A.A., Maltsev L.I., Kuznetsov V.A. Implementation of a three-stage scheme for the co-combustion of pulverized coal and coal-water slurry in an industrial boiler to reduce NOx emissions Process Safety and Environmental Protection., 2023, 169, p. 313–327.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 121031800229-1).

УДК 536.46

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ ГОРЕНИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗООБРАЗНЫХ И ЖИДКИХ ТОПЛИВ

Дектерев Ар.А.[1)], Дектерев А.А.[1)]
[1)] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Экологические требования к камерам сгорания ГТД самолетов и энергетическим ГТУ постоянно повышаются. Развитие и усовершенствование новых камер сгорания в настоящее время не обходится без численного моделирования процессов (турбулентной аэродинамики, сложного теплообмена, химического реагирования, и др.), происходящих в них. Особую сложность при этом составляет моделирование горения жидкого топлива, когда необходимо учитывать процессы распыла и испарения капель.

Данная работа посвящена опыту численного моделирования процессов горения газового и жидкого топлива в условиях камер сгорания. При разработке численной методики были рассмотрены различные подходы к моделированию турбулентности (RANS, LES и гибридные модели), применялись разные модели горения с механизмами реагирования различной детализации от одностадийных реакций до детальных многокомпонентных многоступенчатых схем.

Методика расчета верифицирована на широком классе задач аэродинамики, горения струйных и закрученных газовых пламен, горения газового и жидкого топлив в камерах сгорания (рис. 1). Результаты моделирования хорошо соответствуют экспериментальным данным [1-3].

Для задач с горением жидкого топлива предложена методика упрощенного расчета процесса распыла, позволяющая значительно снизить требования к вычислительным ресурсам. В работе показано, что, применяя гибридный метод VOF to DPM за приемлемое расчетное время можно определить основные параметры распыла, а затем использовать их в полном расчете камеры сгорания в качестве начальных условий для моделирования дальнейшего движения распыленного жидкого топлива методом дискретных частиц. Представлены результаты моделирования горения керосина в модельной камере сгорания.

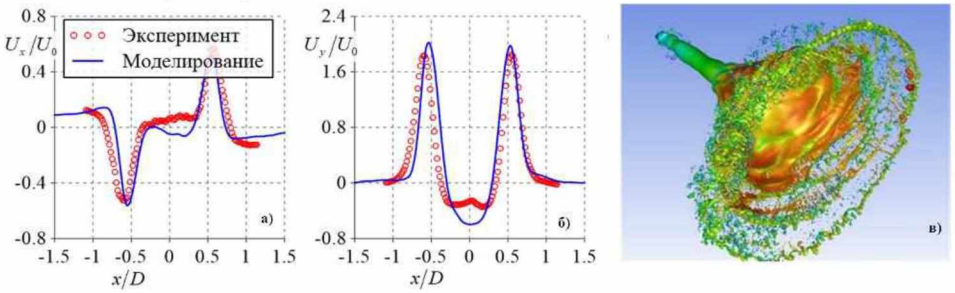


Рис. 1. Радиальная (а) и осевая (б) компоненты скорости в модельной камере сгорания, характер распыла керосина центробежной форсункой (в).

Список литературы

1. Lobasov, A.S., Dulin, V.M., Dekterev, A.A., Minakov, A.V. Turbulent transport in a swirling jet with vortex core breakdown. PIV/PLIF-measurement and numerical simulation // Thermophysics and Aeromechanics – 2019 - 26(3) - P. 351–359
2. Dekterev A.A., Dekterev Ar. A., Minakov A.V. Comparative study of different combustion models for turbulent gas flames. // Journal of Physics: Conference Series, 754 //2016 // 062002, 6p.
3. Dekterev, A.A., Lobasov, A.S., Dekterev, A.A. Numerical simulation of unsteady combustion at elevated pressure and initial temperature of the mixture for the model combustion chamber // Journal of Physics: Conference Series //2020 // 1677(1), 012036

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543

УДК 662.7

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ СОВМЕСТНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ И БИОМАССЫ В СТУПЕНЧАТОМ ПОТОЧНОМ РЕАКТОРЕ

Донской И.Г.[1)]

[1)] Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

Одним из способов снижения энергетического использования ископаемых топлив является их замещение, полное или частичное, возобновляемыми энергоресурсами, среди которых – биотопливо. Переход на совместную конверсию угля и биомассы может быть оправдан с точки зрения экологической эффективности (как показано в работах [Bhuiyan A.A. 2018, 2], сжигание смесей угля с биотопливами позволяет снизить выбросы вредных веществ) и экономической эффективности, например, при штрафовании углеродных выбросов [3].

В работе предлагается ступенчатая схема газификации угля и биомассы, в которой сжигание угля служит для получения высокотемпературного газифицирующего агента, который используется для газификации биомассы (модификация известной ступенчатой схемы из работ [4]). При этом можно снизить термодинамические потери в процессе газификации за счет снижения температуры генераторного газа (благодаря высокой реакционной способности биотоплив по сравнению с углем).

С помощью стационарной одномерной кинетико-термодинамической модели двухступенчатого реактора [5] проводятся численные расчеты с варьированием соотношения уголь:биотопливо и расхода окислителя. Особенностью модели является учет рециркуляции недожога. Результаты расчетов позволяют определить оптимальную степень замещения угля растительной биомассой по технологическим критериям (химический КПД, выход водорода).

Список литературы

1. A review on thermo-chemical characteristics of coal/biomass co-firing in industrial furnace / A.A. Bhuiyan, A.S. Blicblau, A.K.M. Sadrul Islam, J. Naser // Journal of the Energy Institute. 2018. V. 91. No. 1. P. 1-18.
2. 2. Relative Environmental, Economic, and Energy Performance Indicators of Fuel Compositions with Biomass / D. Glushkov, G. Nyashina, V. Medvedev, K. Vershinina // Applied Science. 2020. V. 10. P. 2092.
3. Guo J.-X. Retrofitting strategy for biomass co-fired power plant // Clean Technologies and Environmental Policy. 2022. V. 24. P. 2531-2545.
4. Critical assessment of oxy-fuel integrated coal gasification combined cycles / H. Ishi, T. Hayashi, H. Tada, K. Yokohama, R. Takashima, J. Hayashi // Applied Energy. 2019. V. 233-234. P. 156-169.
5. Donskoy I. A Numerical Study of the Influence of Process Parameters on the Efficiency of Staged Coal Gasification Using Mixtures of Oxygen and Carbon Dioxide // Energy Systems Research. 2021. V. 4. No. 2. P. 27-34.

УДК 62-665.9

КИНЕТИКА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ И ОКИСЛЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ И ИХ ГРУПП

Дорохов В.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия

На сегодняшний день большое внимание уделяется технологиям термохимической конверсии, позволяющим повысить энергетическую ценность низкосортных углей, таким как пиролиз, газификация, сжижение. По сравнению с другими методами, технология пиролиза характеризуется высокая тепловая эффективность и низкая стоимость. При термическом разложении твердое топливо помещается в высокотемпературную газовую среду, летучие выделяются, и кокс или полукокс формируется. Продукты термического разложения возобновляемого растительного сырья и отходов деревоперерабатывающей промышленности принято считать альтернативными источниками энергии. Пиролизные технологии применяются для снижения концентраций наиболее опасных газовых выбросов (оксидов серы, азота, углерода). На характеристики процесса термического разложения различного сырья влияет совокупность факторов, таких как газифицирующая среда, тепловые условия протекания процесса, а также размеры частиц сырья, его тип и состав. Основываясь на проанализированных выше известных результатах выполненных исследований, сформулировано заключение о том, что технологии, основанные на термическом разложении низкосортных углей, являются востребованными при решении задач повышения ресурсоэффективности и энергосбережения. Но пока опубликовано мало результатов работ, посвященных совместному пиролизу низкосортных углей с другими потенциально эффективными компонентами, особенно в составе жидких топливных смесей. Данный аспект послужил мотивацией настоящего исследования. Целью настоящей работы является определение стадий и кинетических характеристик термического разложения компонентов топлив, а также перспективных твердых и жидких смесей на их основе с применением термогравиметрического анализа и дифференциальная сканирующая калориметрия (TGA-DSC) методики.

В качестве основного сырья выбран бурый уголь, являющийся перспективным компонентом для термохимической конверсии с целью повышения его энергетической ценности. Также исследованы каменные угли наиболее широко используемых марок. В качестве дополнительных компонентов, перспективных, с точки зрения термохимической конверсии, выбраны сосновые опилки и отработанное моторное масло (WMO).

Определены характеристики термического разложения композиционных топлив на основе бурого угля, диспергированной древесины и отработанного моторного масла в инертной среде. Установлено влияние размера частиц, скорости нагрева, зольности, влажности и доли летучих угольных компонентов на процесс их термического разложения. Наименьшая энергия активации термического разложения зарегистрирована при использовании частиц бурого угля наибольшего размера (500–1000 мкм). Установлены значения энергии активации углей и композиционных топлив на их основе при различной степени конверсии. Проведенные эксперименты показали, что использование в составе композиционного топлива высокореакционных добавок (диспергированной древесины и отработанного моторного масла) позволяет увеличить скорость термического разложения на несколько порядков по сравнению с исходным углем, а также снизить температуру начала пиролиза топливной смеси по сравнению с исходным бурым углем. Определен эффект взаимного влияния используемых компонентов, возникающий на стадии испарения влаги из состава композиционных топлив, и достигающий практически 30%. Получены прогностические выражения для определения значений энергии активации при термическом разложении в зависимости от свойств используемых угольных компонентов, которые могут быть использованы для первичной оценки кинетических характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543.

УДК 62-662.5

ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ПЕЛЛЕТИРОВАННОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ БИОМАССЫ И КАРТОНА

Дорохов В.В., Няшина Г.С., Стрижак П.А., Шведов Д.К.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия

В последние годы активно развиваются исследования, направленные на создание композиционных топливных пеллет на основе различных групп отходов. Такое топливо, в перспективе, позволяет утилизировать накопленные объемы отходов с получением дешевой тепловой энергии. В связи с этим целесообразно провести исследование, направленное на определение характеристик термического разложения композиционных пеллетированных топлив на основе биомассы и картона.

В качестве компонентов топливных пеллет выбраны сосновые опилки и картон. Сосновые опилки являются типичным отходом лесопромышленной отрасли. Картон, в свою очередь, составляет до 30% от общего объемы формирующихся бытовых отходов. Для определения характеристик термического разложения использовался термогравиметрический анализатор METTLER-TOLEDO TGA/DSC 3+. Образец топлива массой 40 мг помещался в тигель из окиси алюминия и нагревался от 25 до 1000 °C со скоростью нагрева 20 °C/мин. В качестве окислительной среды использовался воздух при постоянном расходе 60 мл/мин.

На рис. 1 представлены термогравиметрические кривые исследуемых композиционных пеллетированных топлив на основе смеси опилок с картоном. Процесс термического разложения топливных пеллет включает в себя три стадии: 1 – сушка образца от внутренней влаги; 2 – выход и горение летучих; 3 – горение твердого коксового остатка. Интенсивная потеря массы в ходе 2 стадии обусловлена, главным образом, разложением наименее термически стабильных фракций биомассы (гемицеллюлозы и целлюлозы). Начало термического разложения гемицеллюлозы соответствует температуре около 230 °C, а термическое разложение целлюлозы происходит при температурах выше 280 °C. Лигнин, в свою очередь, наиболее интенсивно разлагается при температурах более 400 °C. Это обуславливает меньшую величину кривой DTG пеллет с добавками картона 30% и 50% в ходе 3 стадии, поскольку содержание лигнина в составе картона меньше, чем в опилках. Помимо этого, в составе картона также содержатся карбонаты кальция, приводящие к увеличению температуры окончания термического разложения исследуемых образцов по сравнению с пеллетами без добавок. По сравнению с пеллетами без добавок, при увеличении доли картона в составе топливных пеллет в диапазоне от 10% до 50% температура окончания термического разложения увеличивается на 2–23%.

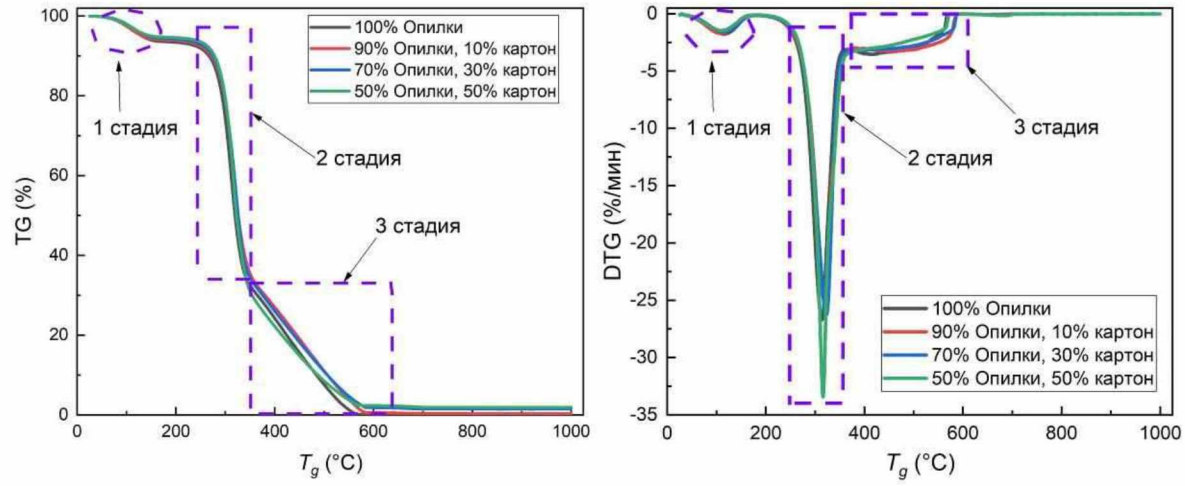


Рис. 1. Термогравиметрические кривые исследуемых топлив.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант №23-79-10098).

УДК 62-665.9

ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ БУРОГО УГЛЯ

Дорохов В.В. [1,2], Романов Д.С. [1,2], Стрижак П.А. [1,2], Шведов Д.К. [1]
[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Использование низкосортных компонентов и различных групп отходов в составе композиционных топлив позволяет решить несколько значимых проблем: уменьшить потребление ископаемых видов топлива, снизить стоимость получаемой тепловой энергии, а также утилизировать уже накопленные и вновь образующиеся объемы отходов различных отраслей. В связи с этим целесообразно провести исследование характеристик термического разложения композиционных топлив, приготовленных с использованием типичных отходов и низкосортных видов топлив.

В качестве компонентов композиционного топлива выбраны бурый уголь, отработанное моторное масло и вода. Для определения характеристик термического разложения использовался термогравиметрический анализатор METTLER-TOLEDO TGA/DSC 3+. Образец топлива массой 40 мг помещался в тигель из окиси алюминия и нагревался от 25 до 1100 °C со скоростью нагрева 20 °C/мин. В качестве окислительной среды использовался воздух при постоянном расходе 60 мл/мин.

На рис. 1 представлены термогравиметрические кривые исследуемых композиционных топлив. В ходе термического разложения наблюдается три стадии: испарение влаги (1 стадия), выход и горение летучих (2 стадия), горение твердого углеродного остатка (3 стадия). В ходе второй стадии термического разложения топлива с добавкой отработанного моторного масла наблюдается два выраженных пика на кривой скорости потери массы. Первый пик, соответствующий температуре 304 °C, характеризует горение паров отработанного масла, в то время как второй пик (T_g=398 °C) соответствует горению летучих в составе бурого угля. По сравнению с моносжиганием бурого угля и сжиганием суспензионного топлива «60% бурый уголь, 40% вода», температура достижения второго пика скорости потери массы снизилась на 10 и 17 °C соответственно. Минимальной температурой окончания термического разложения характеризуется суспензионное топливо с добавкой отработанного моторного масла. По сравнению с сухим бурым углем, температура окончания термического разложения суспензионного топлива «50% бурый уголь, 40% вода, 10% отработанное моторное масло» снизилась на 18%.

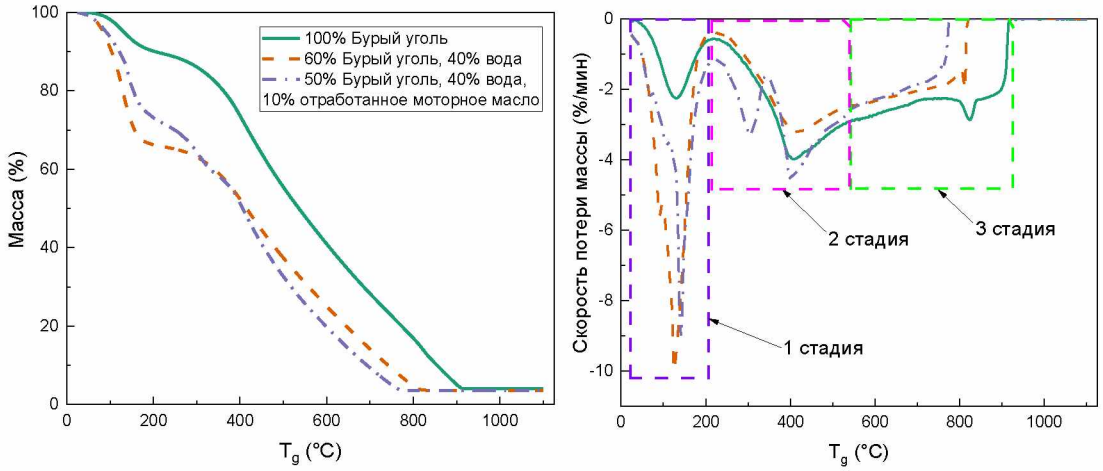


Рис. 1. Термогравиметрические кривые исследуемых топлив.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543.

УДК 544.45

О ВЛИЯНИИ ГАЛОГЕНСОДЕРЖАЩИХ ПОЖАРОТУШАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ НА ПРОЦЕСС САМОРАЗЛОЖЕНИЯ АЦЕТИЛЕНА

Дракон А.В., Еремин А.В.
Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

Широко применяющийся в промышленности ацетилен C_2H_2 обладает уникальной в ряду углеводородов способностью к саморазложению с выделением большого количества тепла. Высказывалась идея использования ацетилена как основы нового энергетического цикла, использующего энергию конденсационной детонации углерода [1]. Совершенствование существующих и в особенности развитие новых технологий использования ацетилена поднимает вопрос об эффективности имеющихся средств обеспечения пожаро- и взрывобезопасности.

В качестве пожаротушащих агентов широко применяются галогензамещенные углеводороды (хладоны/фреоны), обладающие химической активностью, подавляющей развитие цепных реакций горения. Вместе с тем отмечалось, что в определенных условиях они могут приводить к ускорению самовоспламенения метано-кислородных смесей [2]. Настоящая работа была посвящена экспериментальному исследованию влияния галогенсодержащих ингибиторов горения на процесс саморазложения и последующего сажеобразования при ударно-волновом пиролизе ацетилена. Эксперименты проводились за отраженными ударными волнами при давлениях 10–15 бар и температурах 1150–1950 К в смесях 10%C_2H_2+Ar, содержащих добавку 1% исследуемых галоген-углеродных соединений — CCl_4, $C_2F_4Br_2$ и CF_3I.

На рис. 1 представлены экспериментально полученные значения времен индукции сажеобразования, нормированные на концентрацию углерода. В присутствии всех исследованных добавок наблюдалось значительное ускорение саморазложения ацетилена и изменение характерного наклона температурной зависимости.

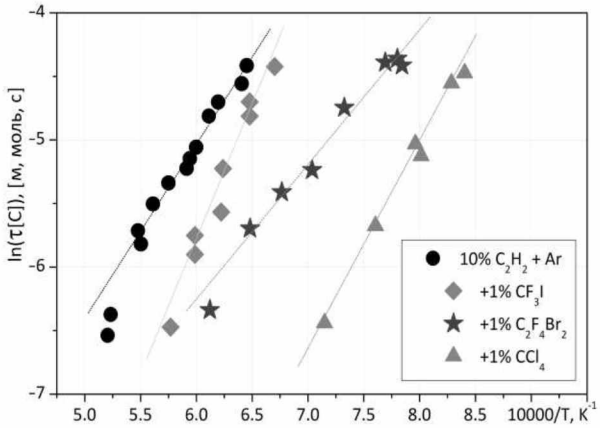


Рис. 1. Экспериментальные значения времен индукции сажеобразования в смеси 10%C_2H_2+Ar в присутствии добавок ингибиторов горения CCl_4, $C_2F_4Br_2$ и CF_3I (линии — интерполяция данных).

Предложен кинетический механизм, связывающий наблюдаемые эффекты с инициацией цепного механизма разложения ацетилена в реакциях вида $C_2H_2 + X \rightarrow C_2H + HX$, где X — образующийся при пиролизе атомарный галоген. Проведенное численное моделирование позволило описать основные закономерности наблюдаемых явлений. Отмечена необходимость дальнейшего развития высокотемпературной кинетики сажеобразования в ацетилене.

Список литературы

1. Голуб В.В., Гуренцов Е.В., Емельянов А.В., Еремин А.В., Фортов В.Е. Энергетика детонационного пиролиза ацетилена // ТВТ. – 2015. – Т. 53, № 3. – С. 383–389.
2. A. Drakon, A. Eremin, N. Matveeva, E. Mikheyeva The opposite influences of flame suppressants on the ignition of combustible mixtures behind shock waves // Combustion Flame. – 2017. – V.176. – P.592–598.

УДК 544.45

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОСТА САЖИ В ПЛАМЕНИ МЕТОДОМ 2D-LII

Дракон А.В., Еремин А.В., Колотушкин Р.Н., Ходыко Е.С.

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, г. Москва, Россия

Знания о механизмах образования и свойствах полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) и ультрамалых (≤ 5 нм) углеродных наночастиц или предшественников частиц сажи размером 10-50 нм, содержащихся в выхлопных газах двигателей внутреннего сгорания и реактивных двигателей, необходимы для снижения вредных выбросов в процессе горения. Учет поглощения и испускания излучения такими частицами позволяет определить их вклад в тепловой баланс атмосферы, который влияет на изменение климата [1]. Мониторинг объемной концентрации таких соединений в воздухе позволяет оценить опасность для здоровья человека ввиду их канцерогенных свойств [2]. Кроме того, для прогнозирования свойств "зрелых" частиц сажи как полезного в производстве материала необходимо понимать процесс их образования и, в частности, исследовать ранние стадии их роста.

Одним из наиболее информативных методов в этой области является широко применяемый метод лазерно-индуцированной инкандесценции (LII) [3]. Его вариации, методы двумерной [4] и время-разрешенной [5] лазерно-индуцированной инкандесценции (2D-LII, TiRe-LII) являются перспективными лазерно-оптическими методами для изучения предшественников сажи, образующихся в предсажевой области пламени. В данной работе представлены результаты применения методов 2D-LII и TiRE-LII для исследования ранних стадий образования и роста частиц сажи при сжигании простейших углеводородов.

Ламинарное плоское пламя предварительного смешения стабилизировалось с помощью кинетической горелки типа МакКенна, позволяющей формировать поток с равномерными по горизонтали параметрами. Для проверки этого факта и дальнейшего моделирования были проведены температурные измерения в исследуемых пламенах по вертикали и горизонтали с использованием ультратонких термопар типа B. Исследовалось горение смесей этилен (C_2H_4) – воздух (φ = 2.1, C/O = 0.7), ацетилен (C_2H_2) – воздух (φ = 1.8, C/O = 0.72), и тех же составов с разбавлением диметиловым эфиром (ДМЭ) в соотношениях 15 % и 30 %.

Используя комбинацию цилиндрических линз (схема представлена на рис. 1), луч наносекундного Nd:YAG лазера на первой гармонике (1064 нм) был развернут в плоскость по высоте горелки для облучения всего центрального сечения пламени и получения на ICCD-камере K008UV (ВНИИОФИ) распределенного по высоте и ширине сигнала инкандесценции от лазерно-нагретых углеродных частиц. Размер лазерного луча составлял 0.62 мм x 10.7 мм, плотность энергии поддерживалась на уровне ~ 0,15 – 0,2 Дж/см^2. С использованием узкополосных фильтров на 450 нм и 670 нм были получены снимки интенсивности инкандесценции частиц пламени с пространственным и временным разрешением при помощи методов 2D-LII и TiRe-LII.

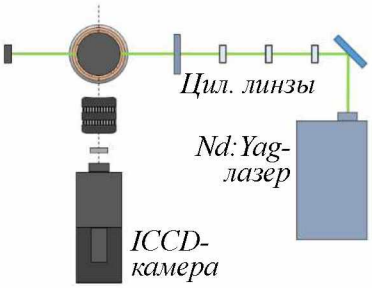


Рис.1. Схема установки

По полученным экспериментальным данным были проведены расчеты объемной доли сажевых частиц и их размеров в зависимости от высоты пламени для всех исследованных топливных смесей. Результаты были сопоставлены с полученными на просвечивающем электронном микроскопе ранее снимками, а также с результатами кинетического моделирования. Исследовано влияние добавок ДМЭ к пламенам C_2H_4 и C_2H_2 на выход сажи.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ №23-19-00407.

Список литературы

1. T.C. Bond, S.J. Doherty, D.W. Fahey, et al // J. Geo-Phys. Res. Atmos 118 (2013) 5380–5552
2. G. De Falco, C. Colarusso, M. Terlizzi, et al // Front. Immunol. 8 (2017) 1415
3. C. Schulz, B.F. Kock, M. Hofmann, H.A. Michelsen, et al // Appl. Phys. B 83 (3) (2006) 333-354; H.A. Michelsen, F. Liu, B.F. Kock, et al // Appl. Phys. B 87 (3) (2007) 503-521
4. S. Maffi, S. De Iuliis, F. Cignoli, G. Zizak // Appl. Phys. B 104 (2) (2011) 357-366 R. Hadef, K.P. Geigle, J. Zerbs, et al // Appl. Phys. B 112 (3) (2013) 395-408

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТД/ГТУ

Дулин В.М.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

Последовательное ужесточение норм на эмиссию вредных веществ газотурбинных двигателей гражданской авиации стимулирует разработку и создание более экологичных и эффективных изделий. При этом особое внимание необходимо уделять камере сгорания, которая представляет собой один из наиболее сложных элементов конструкции двигателя, где происходит распыл, смешение и горение топлива. Совокупные условия протекания этих физико-химических процессов принципиально влияют на полноту сгорания топлива и особенно на образование вредных веществ, включая окислы азота и сажу. При этом математическое моделирование работы камеры сгорания является сложной задачей, поскольку необходимо разрешать процессы в широком диапазоне пространственных и временных масштабов. В докладе будут представлены современные методы и подходы, используемые при численном и натурном моделировании процессов в камерах сгорания газотурбинных двигателей, а также примеры результатов, полученных с использованием передовых оптических методов.

Работы выполнена при поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2024-543)

УДК 532.2

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРОТИВОТОЧНЫХ СТРУЙ С ЗАКРУТКОЙ И ГОРЕНИЕМ В ЛИНЕЙНЫХ И ПЛОСКИХ МАССИВАХ

Евдокимов О.А., Гурьянов А.И., Веретенников С.В.
Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева, г. Рыбинск, Россия

Перспективным подходом организации горения является применение массивов струй различной размерности с частичным предварительным смешением компонентов. Отмеченный процесс эффективно протекает в противоточных закрученных течениях. Сжигание топлива в условиях закрученного противоточного течения характеризуется возможностью организации процесса в широком диапазоне по коэффициенту избытка воздуха, пониженными значениями эмиссии оксидов азота и монооксида углерода, эффективной тепловой защитой стенок вихревой камеры и существенным потенциалом в области многотопливного горения.

Несмотря на перечисленные достоинства и возможности противоточных закрученных струй, все известные о них научные результаты получены для индивидуальных горелочных устройств. Организация горения массивов таких течений позволит добиться дополнительной интенсификации процесса горения, однако требует проведения соответствующих экспериментальных исследований, обобщения полученных результатов с разработкой подходов к интенсификации процессов горения за счёт организации газодинамического взаимодействия пространственно-разделённых комбинированных и противоточных закрученных течений и струй.

В работе выполнены оптические PIV исследования, а также скоростная фото и видеорегистрация для линейных и плоских массивов противоточных струй с закруткой и горением (рис. 1). Эффекты взаимодействия, обнаруженные в массивах меньшего масштаба, усиливаются по мере увеличения масштаба. Выявлено образование дополнительных областей отрицательной осевой скорости, расположенных между выходными соплами, многократное образование которых оказывает положительное влияние на стабилизацию пламени в реагирующих потоках.

Получены новые данные о механизме воспламенения в массивах противоточных струй с горением. На первой стадии процесса воспламенения реализуется заброс реагирующих масс в область возвратного течения нереагирующей струи. Этот процесс продолжается порядка 5 мс. Далее происходит процесс переноса пламени в составе возвратного течения внутрь противоточной камеры с последующим разворотом и радиальным перемещением в сторону периферийного течения. Этот процесс происходит в диапазоне от 5 до 15 мс. После этого происходит активный перенос волны реакции в составе периферийного течения, что приводит к быстрому формированию реагирующего факела, подобного тому, что имеет место для остальных струй массива. Длительность третьей стадии не превышает 5 мс, а сам процесс воспламенения длится порядка 20 мс.

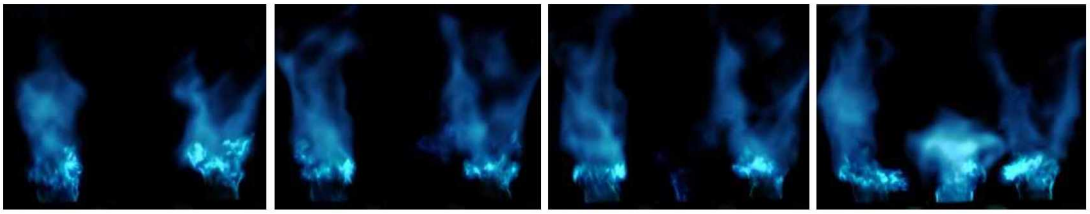


Рис. 1. Высокоскоростная визуализация воспламенения струи в линейном массиве 3x1.

Список литературы

1. An experimental study of the flow structure in arrays of cold bidirectional swirling jets / O.A. Evdokimov, A.I. Gutyanov, S.V. Veretennikov // Physics of Fluids, 2024. Vol. 36(4). P. 045115.
2. Guryanov A.I. et al. Criterion analysis and experimental study of combustion mechanisms in a bidirectional swirling flow and their relationship with pollutants emission // Int J Energy Res. 2021. Vol. 45, № 4. P. 5500–5516.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002)

УДК 662.612.12:533.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТИ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА УДАРНОЙ ТРУБЕ

Ежов В.М.[1@], Ильина М.А.[1], Новаковский Д.В., Червонная Н.А.[1], Яновский Л.С.[1,2]

[1] ФГБУН «ФИЦ ПХФ и МХ РАН», г. Черноголовка, Россия

[2] ФГБУ «РАРАН», г. Москва, Россия

[@]anathema40000@gmail.com

Обеспечение высокой энергетической эффективности и экологичности применения ГТД и ГТУ гражданской авиации и энергетики невозможно без создания и применения кинетических моделей воспламенения топлива.

С целью разработки новых, а также валидации и дополнения существующих кинетических механизмов воспламенения необходимы данные по влияния состава на воспламеняемость альтернативных топлив в рабочем диапазоне температуры и давления.

Ударные трубы применяются для изучения периода индукции воспламенения топлив в широком диапазоне температуры, давления и соотношения с воздухом. Принцип действия ударной трубы позволяет практически полностью исключить влияние диффузионных процессов на получаемые значения ПИВ топлива.

Оценка достоверности результатов определения ПИВ топлив на ударной трубе ФИЦ ПХФ и МХ РАН выполнялась по опубликованным данным изооктана и н-декана в диапазоне давления 14-16 бар и температуры 900-1700 К [1,2]. Показана удовлетворительная сходимость результатов.

В работе определены значения ПИВ природного газа (содержание метана от 100% до 80% по массе) и синтез-газа (соотношения CO и H2 составляли от 1:1 до 1:3), а также бензина и керосина с добавлением биокомпонентов в диапазоне температуры 900-1700 К и давления 14-16 бар. Изучено влияние компонентного состава топлива на значения его ПИВ. Расширена база данных ПИВ альтернативных топлив.

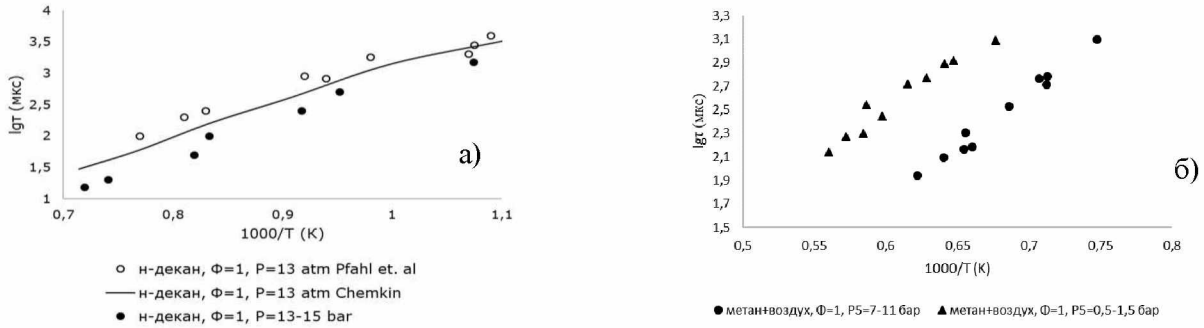


Рисунок – Оценка сходимости результатов определения ПИВ – а), результаты определения ПИВ метана – б)

Проведен анализ полученных и опубликованных данных по ПИВ альтернативных топлив, а также анализ использованной методики измерений с оценкой диапазона ошибок полученных результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543.

1. Pfahl U, Fieweger K, Adomeit G, Self-ignition of diesel-relevant hydrocarbon-air mixtures under engine conditions. Proc. Combust. Inst., 26, 781–789

Vermeer DJ, Meyer JW, Oppenheim AK. Auto-ignition of hydrocarbons behind reflected shock waves. Combust Flame 1972;18:327–36.

УДК 662.612.12:533.6

ИССЛЕДОВНАИЕ ВЛИЯНИЯ ФРАГМЕНТИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТИ ТОПЛИВ ДЛЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА УДАРНОЙ ТРУБЕ

Ежов В.М.[1@], Ильина М.А.[1], Новаковский Д.В., Червонная Н.А.[1], Яновский Л.С.[1,2]

[1] ФГБУН «ФИЦ ПХФ и МХ РАН», г. Черноголовка, Россия

[2] ФГБУ «РАРАН», г. Москва, Россия

[@]anathema40000@gmail.com

Эффективное применение топлив с добавлением фрагментирующих добавок, таких как вода и этанол, требует изучение их воспламеняемости с целью дальнейшего дополнения кинетических механизмов.

Продолжительность кинетики воспламенения может быть изучена с помощью ударных труб, позволяющих определять задержку воспламенения в широком диапазоне температуры и давления, а также отличающихся от другого испытательного оборудования возможностью исключения влияния диффузионных процессов на период индукции воспламенения (ПИВ) топлива.

Работа выполнялась на ударной трубе ФИЦ ПХФ и МХ РАН. Достоверность определения ПИВ подтверждена сравнением полученных и опубликованных данных [1,2] по ПИВ изооктана и н-декана в диапазоне давления 14-16 бар и температуры 900-1700 К.

В работе определены значения ПИВ топлива для ГТД с добавлением воды и этанола в количестве 10% по объёму в диапазоне температуры 900-1700 К и давления 14-16 бар. Значения ПИВ топлива с добавлением воды снизились на 5-8 % в интервале температур 900-1400 К в сравнении с топливом без добавки, ПИВ топлива с добавлением этанола повышается на 30-50 %.

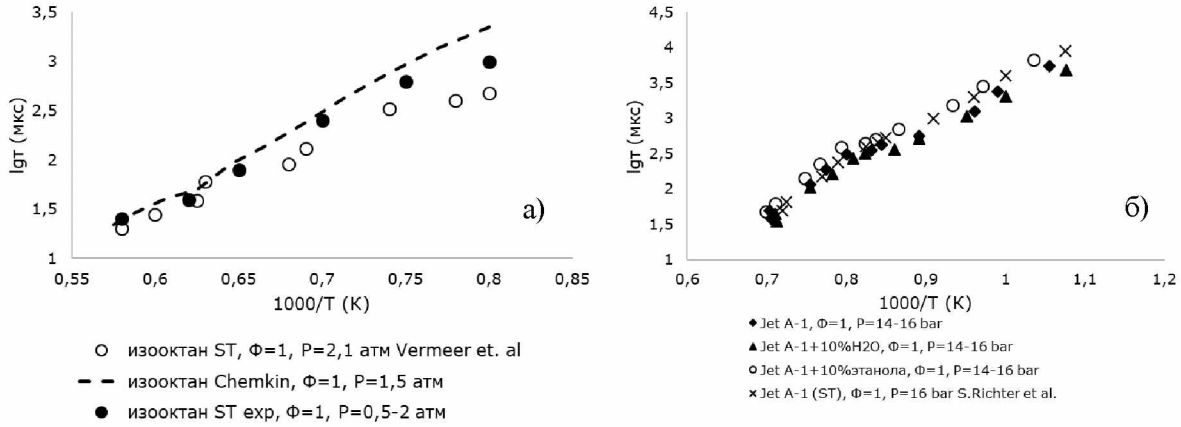


Рисунок – Оценка сходимости результатов определения ПИВ – а); результаты определения ПИВ топлива с добавлением воды и этанола – б)

Проведен анализ полученных и опубликованных [3] данных по ПИВ альтернативных топлив, а также анализ использованной методики измерений с оценкой диапазона ошибок полученных результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-69-10006).

1. Pfahl U, Fieweger K, Adomeit G, Self-ignition of diesel-relevant hydrocarbon-air mixtures under engine conditions. Proc. Combust. Inst., 26, 781–789

2. Vermeer DJ, Meyer JW, Oppenheim AK. Auto-ignition of hydrocarbons behind reflected shock waves. Combust Flame 1972;18:327–36.

3. Sandra Richter, Clemens Naumann, Uwe Riedel Experimental study on the combustion properties of an Alcohol-to-Jet fuel // Proceedings of the 2nd World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer (MHMT'17) Barcelona, Spain – April 7 – 8, 2017 Paper No. CSP 107

УДК 532.2

СЖИГАНИЕ НИЗКОСОРТНЫХ УГЛЕЙ В КОТЛАХ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Жуков Е.Б.[1) 2)], Капишников А.В. [1)] Тиханов М.В. [2)]

[1)] ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова» (АлтГТУ)», г. Барнаул Россия

[2)] ООО «Барнаулэнергомаш», г. Барнаул, Россия

Применяемые в коммунальной энергетике твёрдые топлива обычно имеют очень плохие теплотехнические показатели, - высокая влажность и разрозненный фракционный состав не позволяют эффективно организовать топочный процесс в слоевых котельных агрегатах.

Одна из главных проблем, с которой сталкиваются разработчики котельного оборудования малой и средней мощности, непрогнозируемый фракционный состав топлива, который по факту привозиться на котельную. Распространённые, на сегодняшний день, традиционные слоевые топочные устройства вполне успешно справляются с задачей эффективного сжигания фракционированного топлива, например класса орех. Но как только Заказчик прописывает в ТЗ содержание мелочи в исходном топливе 35–40 %, котлы с традиционными топками с шурующей планкой или подвижной колосниковой решеткой не в состоянии справиться с этой задачей. Доля горючих в шлаке после таких топок (при норме 12%) может достигать 30…42%.

В работе представлены специально разработанные топочные устройства к водогрейным и паровым котлам для сжигания бурых и каменных углей с большой долей содержания мелочи (в том числе углей класса Р). Конструктивной особенностью этих топок является специальный профиль (рис.1), в котором самые мелкие частицы полифракционного топлива, обладающие при этом низкой плотностью, что, например характерно для некоторых бурых углей, после выхода летучих, удерживаются внутри камеры сгорания за счет инерционного принципа сепарации.

Рис. 1. Топочная камера котла с многократной циркуляцией полифракционного топлива.

Авторами спроектировано, изготовлено и испытанно более 30 котлов тепловой мощностью от 2,5 до 3,8МВт специально изготовленных для ГОКов ориентированных на сжигание подобного топлива. Объединение слоевого сжигания топлива в противоточном слое при параллельном сжигании мелочи в объеме топки позволило добиться полного выгорания всех горючих компонентов в топливе.

Список литературы

1. Фурсов И.Д., Жуков Е.Б.,.Гаврин Н.С, Меняев К.В. ТЕХНОЛОГИЯ СЖИГАНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ В КОТЛАХ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ /. Сборник статей I Международной заочной научно-практической конференции "Проблемы техносферной безопасности -2015" (10 февраля 2015г.); Алт.гос.техн.ун-т им. И.И.Ползунова. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2015 - с.206-209.

УДК 534.222.2

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Журавская Т.А.[1], Левин В.А.[1, 2]

[1] Научно- исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Численно исследовано влияние активных добавок (пероксида водорода/ озона) и инертных разбавителей (аргона/ гелия) в стехиометрическую водородно-воздушную смесь на параметры распространяющейся в ней самоподдерживающейся волны детонации с целью снижения температуры продуктов горения без существенного увеличения размера детонационной ячейки. Численное моделирование выполнено в рамках модели невязкой многокомпонентной реагирующей газовой смеси с использованием детального кинетического механизма химического взаимодействия [1]. Расчеты проведены на оборудовании Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [2].

Установлено, что мольные доли вносимых добавок озона и аргона/ пероксида водорода и гелия могут быть подобраны так, что температура продуктов детонации будет существенно снижена, при этом размер ячейки детонационной волны в полученной смеси будет близок к среднему размеру ячейки в чистой смеси (рис. 1). Показано, что внесение пероксида водорода и гелия не приводит к падению скорости самоподдерживающейся детонации в отличие от использования добавок озона и аргона [3-4].

Исследовано влияние вносимых добавок в подобранных концентрациях на устойчивость волны детонации к сильным возмущениям, вызванным, в частности, расположенными на внутренней поверхности канала множественными барьерами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543).

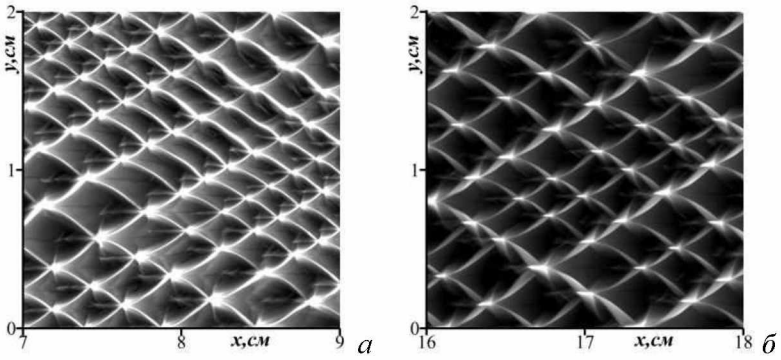


Рис.1. Численный аналог следа самоподдерживающейся детонационной волны, распространяющейся в покоящейся смеси при нормальных условиях (p_0=1атм, T_0=298K):
а – H_2 – воздух;
б – H_2 – воздух–70%He–5%H_2O_2

Список литературы

1. Bezgin L.V., Kopchenov V.I., Sharipov A.S., Titova N.S., Starik A.M. Evaluation of Prediction Ability of Detailed Reaction Mechanisms in the Combustion Performance in Hydrogen/Air Supersonic Flows // Combustion Science and Technology. – 2013. – V. 185, no. 1. – P. 62-94.
2. Voevodin Vl., Antonov A., Nikitenko D., Shvets P., Sobolev S., Sidorov I., Stefanov K., Voevodin Vad., Zhumatiy S. Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community // Supercomputing Frontiers and Innovations. – 2019. – V. 6, no. 2. – P. 4–11.
3. Левин В.А., Журавская Т.А. Управление детонационным горением водородно-воздушной смеси посредством внесения аргона и озона // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2021. – Т. 501, № 1. – С. 48–53.
4. Левин В. А., Журавская Т. А. Детонационное горение водородно-воздушной смеси с добавками аргона и озона // Инженерно-физический журнал. – 2023. – Т. 96, № 7. – С. 1792–1802.

УДК 532.2

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ЭФФЕКТИВНОГО СЖИГАНИЯ ДИСПЕРГИРОВАННОЙ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ В ТОПКАХ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Заворин А.С.[1)], Костарева Ж.А.[1)], Кузнецов Г.В.[1)], Пурин М.В.[1)], Сыродой С.В.[1)], Тайлашева Т.С.[1)], Швайбович М.И.[1)]

[1)] Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Биомасса (в первую очередь древесная) многие годы считается эффективным энергоносителем в связи с ее очевидным преимуществом перед другими энергоносителями (жидкими, твердыми, газообразными) по экологическим критериям [1]. Но использование биомассы как основного топлива или добавки к углю пока сдерживается крупными проблемами, возникающими при факельном сжигании даже измельченной до характерных размеров единицы миллиметров древесины. Основная причина – интенсивное загрязнение поверхностей нагрева. Одной из возможных причин такого загрязнения является неполная пиролизация частиц древесины в процессе движения от форсунки до поверхности нагрева. Цель работы – оценка по результатам математического моделирования характерных времен завершения пиролиза частиц семи пород древесины при их интенсивном нагреве в условиях, соответствующих условиям теплового воздействия топочной среде. Решена задача теплопереноса в частице древесины в одномерном приближении с целью получения верхних оценок характерных времен полного завершения пиролиза. Математическая модель прогрева и пиролиза древесины представляла собой уравнение энергии с краевыми условиями, в которых учитывались конвективные и радиационный теплообмен с внешней средой. Численные исследования проведены для частиц сосны, березы, осины, ели, кедра, пихты, лиственницы. При численном анализе за время завершения процесса пиролиза принято время достижения в центре частицы температуры конца пиролиза.

По результатам численного моделирования установлено, что при достаточно больших температурах (1200-1400К) времена полного пиролиза частиц размерами 0,5мм составляют от 1с до 2,5с. При меньших температурах (даже такие малые по размерам частицы) за время нагрева 5-7с не успевают полностью пиролизоваться. Также установлено, что процесс пиролиза «тормозит» прогрев частицы, а увеличение размеров частиц приводит к почти адекватному росту времен завершения пиролиза. Наиболее перспективными в качестве добавки к углю или сжигания в качестве основного топлива является, как показали результаты моделирования, древесина сосны. При размерах частиц сосны даже 1мм и температуре среды 1200К времена ее полного пиролиза не превышает 2,3с. Необходимо отметить, что сосна в качестве деловой древесины используется в объемах, превышающих объемы использования всех остальных шести рассмотренных пород древесины вместе взятых. Поэтому полученные результаты являются объективными предпосылками для использования древесины сосны в качестве добавки к углю, снижающему по данным многих исследователей (например, [2]) выход оксидов серы и азота. Результаты выполненных численных исследований дают основания и для объяснения неудачных достаточно многочисленных попыток сжигания диспергированной древесины совместно с углем. Отходы лесопиления (опилки) использовались в качестве добавки к углю без предварительного разделения по фракциям. Характерные же размеры сосновых опилок, например, могут составлять 2мм и более. При таких размерах частиц их пиролиз не может быть завершен за время пролета частицы в топочной среде до ее выпадения на поверхность нагрева.

Список литературы

1. Xiuchao Y, Jiaxun L, Guoqing C, Zining Z, Xinyu Z, Jianguo L, Xiumin J. Novel ultra-low NOx coal combustion technologies based on local microenvironment targeted regulation. Part 1. Selective oxygenation//Combustion and Flame. – 2024. – 265. – p.113486

Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Gutareva N.Yu., Nigay (Ivanova) N.A. Mathematical modeling of the thermochemical processes of sequestration of SOx when burning the particles of the coal and wood mixture//Renewable Energy. – 2022. – 185. – p.1392 – 1409.

УДК 532.2

ФАКТОР ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ПРИ СЖИГАНИИ ДИСПЕРГИРОВАННОЙ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ

Заворин А.С.[1)], Костарева Ж.А.[1)], Кузнецов Г.В.[1)], Пурин М.В.[1)], Сыродой С.В.[1)], Тайлашева Т.С.[1)], Швайбович М.И.[1)]

[1)] Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Биомасса (в первую очередь древесная) многие годы считается эффективным энергоносителем в связи с ее очевидным преимуществом перед другими энергоносителями (жидкими, твердыми, газообразными) по экологическим критериям [1]. Но использование биомассы как основного топлива или добавки к углю пока сдерживается проблемами, возникающими при факельном сжигании измельченной до характерных размеров единицы миллиметров древесины. Одна из них – высокая вероятность интенсивного загрязнения поверхностей нагрева. Возможной причиной такого загрязнения является неполная пиролизация частиц древесины в процессе движения в объеме топки до поверхности нагрева. Цель работы – оценка по результатам математического моделирования характерных перепадов времен завершения пиролиза частиц для семи пород древесины при их интенсивном нагреве в условиях, соответствующих условиям теплового воздействия в топочной среде.

Решена задача теплопереноса в частице древесины в одномерном приближении с целью получения верхних оценок характерной длительности полного завершения пиролиза. Математическая модель прогрева и пиролиза древесины представляла собой уравнение энергии с краевыми условиями, в которых учитывались конвективный и радиационный теплообмен с внешней средой. Краевая задача, сформулированная в декартовой системе координат, решена методом конечных разностей. Численные исследования проведены для частиц сосны, березы, осины, ели, кедра, пихты, лиственницы. За время завершения процесса пиролиза принято время достижения в центре частицы температуры конца пиролиза.

По результатам численного моделирования установлено, что при достаточно больших температурах (1200-1400К) продолжительности полного пиролиза частиц размерами 0,5мм составляет от 1с до 2,5с. При меньших температурах (даже такие малые по размерам частицы) за время нагрева 5-7с не успевают полностью пиролизоваться. Также установлено, что процесс пиролиза «тормозит» прогрев частицы, а увеличение размеров частиц приводит к почти адекватному росту периода завершения пиролиза. Наиболее перспективными в качестве добавки к углю или в качестве основного топлива является, как показали результаты моделирования, древесина сосны: при размерах частиц даже 1мм и температуре среды 1200К период ее полного пиролиза не превышает 2,3с. Необходимо отметить, что сосна в качестве деловой древесины используется в объемах, превышающих объемы использования всех остальных шести рассмотренных пород древесины вместе взятых. Поэтому полученные результаты являются предпосылками для использования древесины сосны в качестве добавки к углю, снижающей, по данным многих исследователей (например, [2]), выход оксидов серы и азота.

Результаты выполненных численных исследований дают основания и для объяснения неудачных достаточно многочисленных попыток сжигания диспергированной древесины совместно с углем. Отходы лесопиления (опилки) использовались в качестве добавки к углю без предварительного разделения по фракциям. Характерные же размеры сосновых опилок, например, могут составлять 2мм и более. При таких размерах частиц их пиролиз не может быть завершен за время пролета частицы в топочной среде до ее выпадения на поверхность нагрева. Поэтому вероятность интенсивного загрязнения этих поверхностей очень высока.

Список литературы

1. Xiuchao Y, Jiaxun L, Guoqing C, Zining Z, Xinyu Z, Jianguo L, Xiumin J. Novel ultra-low NOx coal combustion technologies based on local microenvironment targeted regulation. Part 1. Selective oxygenation//Combustion and Flame. – 2024. – 265. – p.113486
2. Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Gutareva N.Yu., Nigay (Ivanova) N.A. Mathematical modeling of the thermochemical processes of sequestration of SOx when burning the particles of the coal and wood mixture//Renewable Energy. – 2022. – 185. – p.1392 – 1409.

УДК 66.047.75

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОМАССООБМЕНА ПРИ СУШКЕ ТВЕРДЫХ ДИСКРЕТНЫХ УВЛАЖНЕННЫХ ЧАСТИЦ ПУЛЬСИРУЮЩИМ ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ

Зайнутдинова Д.А.[1)], Павлов Г.И. [1)], Теляшов Д.А. [1,2)], Накоряков П.В. [1)]

[1)] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ, г. Казань, Россия

[2)] Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Актуальность. Многие авторы отмечают, что наложение на стационарный поток пульсационных составляющих при определенных условиях, позволяет интенсифицировать тепломассообменные процессы в несколько раз [1]. В данной работе рассмотрены вопросы интенсификации тепломассообмена при сушке твердых дискретных увлажненных частиц пульсирующим газовым потоком. В качестве дискретных частиц был выбран горох с средним диаметром 8 мм и влагосодержанием около 27%. Исследования сушки гороха пульсирующим газовым потоком проводились на экспериментальной установке, описание которой дано в работе [2]. Проводился двухфакторный эксперимент, планирование которого проводилось по методике, изложенной в [3] в диапазоне частот от 90 до 210 Гц и амплитуд от 100 до 600 мВ.

Результаты исследований и их анализ. В результате проведения эксперимента и обработки результатов было получено уравнение регрессии $y=1{,}85875+0{,}16125x_1-0{,}24375x_2+0{,}12875x_1x_2$, по которому была построена графическая зависимость, представленная на рис. 1. По горизонтальным осям отложены частота f [Гц] и амплитуда A [мВ], по вертикальной – убыль массы влаги из материала Δm [г].

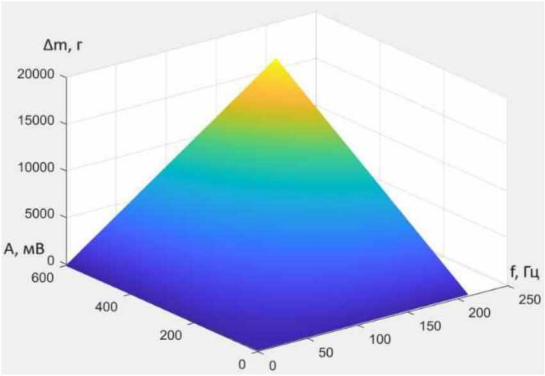


Рис. 1. График зависимости убыли массы влаги от частоты и амплитуды пульсаций

Анализ уравнения показывает, что в заданном диапазоне частот и амплитуд с увеличением их значений интенсивность сушки гороха увеличивается в 1,5 раза по сравнению со стационарным режимом течения.

Список литературы

1. Каримов А.А., Мукольянц А.А., Сотникова И.В. Влияние пульсирующего потока на интенсификацию тепло - и массообмена // 4-я МНТК "Современные инновации в науке и технике". – 2014. – Т. 2. – С. 223-226.

2. Зайнутдинова Д.А., Горбунова О.А., Теляшов Д.А. Экспериментальное исследование влияния пульсаций инертных газов на интенсивность разложения резины // Акустика среды обитания : IX Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (Москва, 23-24 мая 2024 г.) : материалы конференции. – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2024. – С. 152-161.

3. Теория планирования эксперимента: учебное пособие / Е.А. Задорожная. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018. – 92 с.

УДК 662.739

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ТОРРЕФИКАЦИИ С УЧЕТОМ ИСПАРЯЮЩИХСЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ

Зайченко В.М.[1)], Корценштейн Н.М.[1)], Шевченко А.Л.[1)]

[1)] Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

Для получения качественного твердого биотоплива из биомассы, включая отходы, применяется технология торрефикации - нагрев в бескислородной среде до температуры 250-300°C [1]. Для эффективного процесса торрефикации используется энергия управляемой экзотермической реакцией. Для поддержания оптимального температурного режима и предотвращение перегрева сырья экспериментальная установка снабжена системой заслонок, обеспечивающих быструю выгрузку порций торрефицированных пеллет с ядром экзотермического разогрева в секцию охлаждения. Однако эксперименты и расчеты показали, что такой способ управления реакцией с характерным временем до десятков секунд может вызывать колебания температуры и перегрев биомассы [2]. Управление экзотермической реакцией путем впрыска мелкодисперсных капель воды в реакционный объем позволяет более четко управлять процессом, что обусловлено соотношением тепловых эффектов парообразования и экзотермическим разогревом, а также, характерным временем охлаждения газа испаряющимися каплями ~десятки миллисекунд [3,4]. На рис. 1 представлены расчетные кривые изменения температуры биомассы в различных сечениях по высоте реактора торрефикации, где на 100 минуте за счет экзотермики температура в нижних слоях реактора превысила температуру греющего теплоносителя (280°C), а 110 минуте за счет кратковременного впрыска мелких водяных капель процесс разогрева гасится.

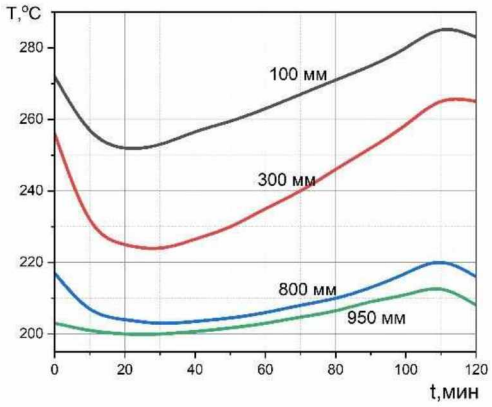


Рис. 1. Зависимость от времени температуры в различных по высоте реактора сечениях.

Полученные результаты численного моделирования подтверждают возможность эффективного управления экзотермической реакцией за счет кратковременных впрысков мелкодисперсных водяных капель. Имеет место качественное соответствие результатов численного моделирования в двух постановках – упрощенной – в непродуваемом объеме, и приближенной к условиям работы экспериментальной установки.

Список литературы

1. Shevchenko A.L., Sytchev G.A., Zaichenko V.M. Energy efficient technology for torrefied biofuel production // В сборнике: 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. 2020. С. 9271198.
2. Shevchenko A.L., Sytchev G.A., Zaichenko V.M. The transition to energy efficient biomass torrefaction technology. Journal of Physics: Conference Series. 2096 (2021) 012082.
3. Корценштейн Н.М. Охлаждение газа в облаке испаряющихся капель // Коллоид. журн. 2021. V. 83. P. 548.
4. Корценштейн Н.М. Охлаждение парогазовой смеси испаряющимися каплями воды // Письма в ЖТФ. 2022. V. 48. P. 41.

УДК 621.437

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СТЕПЕНИ СЖАТИЯ НА РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ЦИКЛОИДАЛЬНОГО ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Замбалов С.Д.[1)], Касаев Д.В. [1)]

[1)] Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, Россия

Характерной чертой циклоидального поршневого двигателя (ЦПД) внутреннего сгорания является отсутсвие возвратно-поступательного движения: энергия сгорания топлива напрямую переходит во вращение коленчатого вала [1]. ЦПД относится к семейству роторно-поршневых двигателей (РПД) [2]. Однако, в отличии от распространенной схемы РПД Ф. Ванкеля, в ЦПД исправлен ряд технологических недостатков. В частности, радиальные уплотнения камеры сгорания ЦПД неподвижны, что позволяет увеличить их размер и обеспечить активное охлаждение. Тепловая нагрузка в корпусе ЦПД распределена равномерно. ЦПД может иметь высокую степень сжатия, недоступную для РПД. В ЦПД возможно реализовать термодинамические циклы Отто, Дизеля и Аткинсона. В работе был исследован рабочий процесс в ЦПД с циклом Аткинсона. Основной характеристикой цикла Аткинсона является степень перерасширения (over-expansion ratio OER), представляющей собой отношение объемов камеры сгорания в момент открытия выпускного окна (V_{EO}) и закрытия впускного окна (V_{IC}) [1].

$$\mathrm{OER} = \frac{\text{effective ER}}{\text{effective CR}} = \frac{V_{EO}/V_{TDC}}{V_{IC}/V_{TDC}} = \frac{V_{EO}}{V_{IC}} \qquad (1)$$

На рис. 1 приведена диаграмма изменения степени перерасширения в ЦПД в зависимости от фаз открытия выпускного окна и закрытия впускного окна. Использование более позднего угла закрытия впускного окна (>180 УПКВ) приводит к снижению степени сжатия. В работе было изучено влияние увеличения геометрической степени сжатия за счет уменьшения объема выемки в корпусе двигателя на рабочий процесс ЦПД. Было установлено, что увеличение степени сжатия приводит к увеличению теплового КПД двигателя. Установлены индикаторные показатели двигателя и эмиссионные характеристики. Проведена оценка насосных потерь.

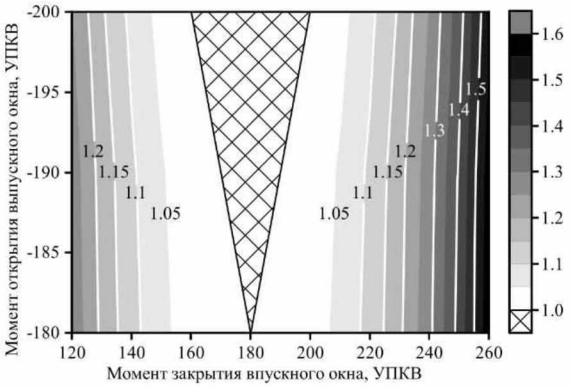


Рис. 1. Изменение степени перерасширения циклоидального поршневого двигателя в зависимости от фаз выпуска и впуска, выраженных в угол поворота коленчатого вала (УПКВ)

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-79-01325, https://rscf.ru/project/23-79-01325/.

Список литературы

1. Бениович В.С. Ротопоршневые двигатели / В.С. Бениович, Г.Д. Апазиди, А.М. Бойко. – Машиностроение. – Москва, 1968.

2. Kenichi Yamamoto. Rotary engine / Kenichi Yamamoto. – 5-5-18, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan: Sankaido Co. ltd, 1981.

УДК 621.454.2

О МЕТОДЕ ПОДАВЛЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВОГО ГОРЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Зарипов Ф.А., Павлов Г.И., Накоряков П.В.
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, г. Казань

Динамические процессы в жидкостных ракетных двигателях являются сложными. О характере внутрикамерных процессов судят по их внешним проявлениям. Основным источником информации является осциллограмма, на которой отражено изменение во времени многих параметров, в том числе тяги, расхода компонентов топлива, давления [1,2]. При анализе осциллограмм в первую очередь обращает на себя внимание наличие трех периодов работы двигателя: выход на марш, марш, выключение. Результаты анализа осциллограмм показывают, что на всех режимах обнаруживаются разнообразные изменения их мгновенных значений. Характер изменения параметров во времени в камере ЖРД исключительно сложен. Несмотря на достаточное количество работ, посвященных изучению этого явления, научные исследования в этой области до сих пор остаются актуальными.

Исследование колебаний в ЖРД начинают с изучения осциллограмм, на которых давление, температура, скорость газа и другие параметры записывают малоинерционными датчиками. По результатам записи в камере ЖРД можно выделить отдельно характерные виды колебаний. Часто встречаются низкочастотные колебания, которые бывают нескольких типов. К одному из таких типов можно отнести колебания, обусловленные связью камеры и системы питания. Простейший случай связи камеры с системой питания: под действием случайно появившегося внешнего воздействия давление в камере увеличилось от номинального до некоторого значения. При этом расход газа из сопла становится больше притока топлива в камеру, давление в камере начнет уменьшаться. После воздействия возмущающего фактора изменение давления в камере во времени может быть экспоненциальным или колебательным. Колебания давления в камере, в свою очередь, могут вызвать в системе питания низкочастотные колебания [3]. Такие колебания нарушают расчетный режим работы двигателя. Их необходимо погасить.

В данной работе авторами предложен оригинальный метод подавления таких колебания, суть которого заключается во впрыскивании в гидравлический тракт компонента топлива в паровой фазе, подготавливаемой в отдельном модуле. Предложенная идея проверена на экспериментальном стенде, где в качестве жидкой фазы использована дистиллированная вода, паровой фазы – газообразный азот. Колебания в гидравлической магистрали создавалась принудительно цилиндрическим поршнем, прикрепленным к вибростолу. Энергия колебания поршня была такой, которая была достаточной для генерации в акустическом контуре упругих волн на основной и более высоких гармониках. При подаче газа в колеблющуюся среду амплитуда колебания на всех резонансных частотах сильно падает (от 20 до 8 дБ). Время реагирования колебательных процессов на подачу газа составляет тысячные доли сек. Предложенный метод наиболее эффективен при подводе газа в пучность давления – надпоршневое пространство. Развитие дальнейших исследований видится в модернизации испытательного стенда с целью проверки идеи на керосине и его паров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей. Москва: Изд-во «Машиностроение», 1969. 547 с.
2. Мошкин Е.К.. Динамические процессы в ЖРД. Москва: Изд-во «Машинострпоение». 1964. 254 с.
3. Дорофеев А.А.. Основы теории тепловых ракетных двигателей. Москва: Изд-во МГТУ. 2010. 464 с.

УДК 621.311.22+628.477.8

МЕРОПРИЯТИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СТРОЯЩИХСЯ В МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ ТЭС НА ТКО

Зелинский А.Э.[1)], Тугов А.Н.[2)]

[1)] ООО «Специальная энергия», г. Москва, Россия

[2)] ОАО «Всероссийский теплотехнический институт», г. Москва, Россия

В настоящее время в Воскресенском, Наро-Фоминском, Солнечногорском и Ногинском районах Московской области ведется строительство заводов для термической переработки ТКО производительностью 700 тыс. т/год и установленной электрической мощностью 70 МВт.

В составе каждого завода входят три паровых котла типа Е-95-7,0-430 (П-152) производства АО «ЗиО-Подольск», паровая турбина Кп-77-6.8 с тремя нерегулируемыми производственными отборами производства АО «УТЗ», турбогенератор с воздушным охлаждением ТФ-80-2У3 (НПО «ЭЛСИБ») и воздушно-конденсационная установка.

В соответствие с принятой в мировой практике иерархией обращения с отходами, крайне важно и экономически целесообразно, чтобы на этих московских предприятиях процесс термической переработки ТКО квалифицировался не как огневое обезвреживание, а как энергетическая утилизация. Под энергетической утилизацией обычно понимают такую термическую переработку ТКО, в результате которой энергопотенциал отходов преобразуется в тепловую и/или электроэнергию с последующим отпуском этой энергии потребителю. При этом энергоэффективность предприятия, рассчитанная по методике [1], в ЕС должна быть не менее 0,65; в России в соответствие со справочником ИТС 9-2020 [2] – не менее 0,45. Только в этом случае это предприятие уже по существу является ТЭС, основным топливом которого является ТКО, – ТЭС на ТКО (за рубежом – Waste-to-Energy Plant (WTE)).

Анализ факторов, влияющих на энергоэффективность предприятий, сжигающих ТКО, приводится в [3]. На московских заводах для повышения их энергоэффективности реализованы следующие мероприятия:

- Технология слоевого сжигания на механической наклонно-переталкивающей колосниковой решетке.
- Применение низкозатратного полусухого метода очистки дымовых газов, основу которого составляет процесс ввода в дымовые газы увлажнённого сорбента.
- Использование в тепловой схеме завода после рукавных фильтров перед дымососом подогревателя конденсата для снижения температуры уходящих дымовых газов.
- Экранирование испарительными поверхностями практически всех ограждающих стен котла (кроме опускного газохода).
- Комбинированная система подогрева дутьевого воздуха с использованием насыщенного пара из барабана котла и пара из отборов паровой турбины.

Прогнозируется, что за счет этих и некоторых других мероприятий строящиеся в Московской области ТЭС на ТКО по энергоэффективности будут соответствовать требованиям не только российского справочника [2], но и европейского [1].

Список литературы

1. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives [Text with EEA relevance] / Official J. European Union, 2008.
2. Справочник НДТ ИТС 9-2020 «Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами». Утв. приказом Росстандарта от 23.12.2020 № 2181) // Фед. агентство по техническому регулированию и метрологии. М.: Бюро НДТ, 2020. https:// docs.cntd.ru/document/573338441
3. Тугов А. Н. Энергетическая утилизация ТКО: мировой и отечественный опыт : обзор // Теплоэнергетика. – 2022. – № 12. – С. 5–22.

УДК 662.221.11

УТИЛИЗАЦИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПУТЕМ СЖИГАНИЯ

Золоторёв Н.Н., Козлов Е.А., Кузнецов В.Т.
Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Широкое использование полимерных композиционных материалов (ПКМ), отличающихся разнообразием физико-химических свойств, неизбежно ставит перед специалистами достаточно сложную задачу их утилизации. Особую сложность представляет собой утилизация ПКМ, армированных непрерывными волокнистыми наполнителями, такими как стекловолокно и некоторые марки углеродных волокон. Как правило, для таких ПКМ используют термические методы утилизации – сжигание, газификация, пиролиз.

Для утилизации элементов космических объектов, содержащих ПКМ, на траектории спуска с орбиты необходимо определить значение оптимальной величины тепловой энергии, достаточной для их разрушения термическим методом [1, 2]. Наиболее достоверные данные для таких условий утилизации можно получить при исследовании пиролиза ПКМ с помощью теплового излучения [3]. В данной работе исследован пиролиз лучистой энергией следующих полимеров: органопластик на основе пара-арамидной ткани с эпоксидным связующим ЭДТ-10 (ПКМ ОП) и поликарбонат марки PC-022 с углеродными добавками (ПКМ ПК).

В процессе пиролиза образцов ПКМ при воздействии излучения ксеноновой лампы варьировалась плотность теплового потока q=(42÷105) Вт/см^2 и время воздействия теплового излучения t=(3,1÷15,2) с. Масса исследуемого образца ПКМ измерялась до облучения и после воздействия светового потока. С учетом суммарной потери массы Δm, времени экспозиции t, величины поглощенной энергии излучения были рассчитаны значения энергии абляции E, величина которой характеризует необходимое количество теплоты для газификации единицы массы в установившемся режиме разрушения ПКМ [3]. Результаты оценки E для ПКМ ОП и ПКМ ПК приведены в таблице.

Значения теплоты абляции ПКМ при воздействии лучистой энергии в среде воздуха

Тепловой поток q, Вт/см^2	Значение E, кДж/г	
	ПКМ ОП	ПКМ ПК
42	5,8±0,5	5,2±0,2
70	5,4±0,6	5,1±0,2
105	3,6±0,6	5,1±0,2

Значения E, полученные для ПКМ ОП, достаточно хорошо совпадают с данными по лазерной абляции эпоксидной смолы ЭД-22 [3]. Для ПКМ ПК величина E почти вдвое отличается от значений, полученных при лазерной абляции поликарбоната, что связано, по-видимому, с особенностями углеродных наполнителей в составе композита и дополнительного притока энергии от воспламенения образца.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Список литературы

1. Лемперт Д.Б., Трушляков В.И., Зарко В.Е. Оценка массы пиротехнической смеси для сжигания головного обтекателя космической ракеты // ФГВ. – 2015. – Т. 51, № 5. – С. 121 – 125.
2. Архипов В.А., Глазунов А.А., Золоторёв Н.Н., Козлов Е.А., Коротких А.Г., Кузнецов В.Т., Трушляков В.И. Анализ возможности сжигания элементов головного обтекателя ракеты-носителя // ФГВ. – 2023. – Т. 59, № 5. – С. 22 – 32.
3. Саид-Галиев Э.Е., Никитин Л.Н. Абляция полимеров и композитов под действием излучения CO_2-лазера // Механика композитных материалов. – 1992. – Т. 28, № 2. – С. 158 – 171.

УДК 536.46

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПОТОКЕ

Зудов В.Н., Шмагунов О.А.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,

г. Новосибирск, Россия

В некоторых горелочных устройствах рассматриваются конфигурации без предварительного смешивания топлива и окислителя. В них для воспламенения используются спутные высокотемпературные струи окислителя и различного типа стабилизаторы (плохо обтекаемые тела). В большинстве таких условий струя топлива смешивается с быстрым потоком горячего окислителя, который в определенных ситуациях также может содержать небольшие фракции предварительно сгоревших продуктов и/или несгоревших реагентов. Струя топлива затем самовоспламеняется, образуя пламя, или стабилизируется рядом с зонами рециркуляции, содержащими продукты сгорания.

Рассмотрена задача о самовоспламенении ламинарных струй водорода, разбавленных азотом, используя двумерное численное моделирование в сочетании с подробной химической кинетикой. Уравнения сохранения для реагирующей газовой смеси решаются вместе с необходимыми определяющими соотношениями, такими как уравнение состояния, уравнения для вязкости, коэффициента диффузии и теплопроводности. Для аппроксимации по пространственным переменным используется явная центрально разностная схема шестого порядка, а схема РунгеКутты третьего порядка (RK3-N2) используется для интегрирования по времени [1]. Неотражающие характеристические граничные условия Навье-Стокса, полученные Poinsot и Lele, применяются для описания входных и выходных граничных условий в продольном направлении. В поперечных направлениях задаются периодические граничные условия. Была использована равномерная сетка. Шаг по времени был постоянным. Для расчетов, связанных с горением, использовался подробный кинетический механизм водород-воздух, состоящий из 9 компонент и 19 элементарных стадий реакции, предложенных Li

Рассмотрено самовоспламенение ламинарной струи водорода, разбавленных азотом, в спутном потоке нагретого воздуха. Проведено исследование нестационарного реагирующего слоя смешения между двумя потоками воздуха и топлива с различной скоростью и температурой с использованием шестиступенчатого кинетического механизма воспламенения водорода в воздухе. Обсуждается локализация пятен воспламенения и зависимость их от начальных условий.

Представленные результаты двумерного ламинарного моделирования иллюстрируют важные особенности, связанные с самовоспламенением водорода в нагретых сдвиговых потоках.

Настоящее исследование также демонстрирует, что изменения характеристик поля потока за счет изменения соотношений скоростей топливных струй (Uj/Uc) влияют на задержку самовоспламенения, так что самовоспламенение начинается раньше при более высоких скоростях струи. Также с увеличением скорости струи увеличивается скорость нарастания максимальной температуры, свидетельствующей о процессе воспламенения. Он также обеспечивает критическое значение разбавления водорода в окислителе, что является важным аспектом безопасности в конструкциях высокоскоростных систем сгорания. Замечено, что процесс самовоспламенения водорода в нагретых сдвиговых потоках определяется генерацией, ростом и последующим истощением радикалов HO2 на стадиях индукции в местах, характеризующихся более низкими скоростями скалярной диссипации, близкими к стехиометрическим значениям смеси.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543.

Список литературы

1. Зудов В.Н., Шмагунов О.А. Инициирование локальным энергоподводом воспламенения горючей смеси в потоке // Сибирский физический журнал. 2020. Том 15, № 1. –С.80-89.

УДК 536.46

ИНИЦИИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМИ ИМПУЛЬСАМИ ГОРЕНИЯ В ПСЕВДОСКАЧКЕ ПРИ ПОДАЧЕ ТОПЛИВА СО СТЕНКИ КАНАЛА.

Зудов В.Н.
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
г. Новосибирск, Россия

Воспламенению и стабилизации пламени в канале переменного сечения является одной из фундаментальных задач в организации горения в рабочих процессах некоторых технологических устройств. В них требуется реализация рабочего процесса с высокой полнотой сгорания и малыми гидравлическими потерями по тракту канала.

В [1] был предложен новый эффективный способ организации рабочего процесса в канале, в котором должно сохраняться сверхзвуковое либо трансзвуковое течение среды по всему тракту, т.е. на выходе из канала число Маха всегда $M \geq 1$. В первой секции (канал постоянного сечения) горение осуществляется в волновых структурах (псевдоскачковое горение), а во второй секции (расширяющейся части канала) необходимо согласование степени расширения и энергоподвода за счет дополнительной подачи топлива. В [1] представлены результаты, свидетельствующие о реализации интенсивного горения керосина в псевдоскачке под действием газодинамических импульсов. В таком режиме реализуется высокая полнота сгорания при малой протяжённости зоны горения. При этом было показано, что интенсивное горение в секции постоянного сечения сохраняется при отключении воздействия воздушными импульсами после организации горения в расширяющейся части канала.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований инициирования горения водорода и керосина в сверхзвуковом потоке при подаче со стенки канала. Получены данные о динамике развития возмущения от газодинамических импульсов и переходу к режиму горения в псевдоскачке, когда подача топлива идет со стенок 1 секции канала, а не по оси потока.

Результаты изучения псевдоскачка с горением в каналах постоянного сечения показывают, что не всегда при наличии в топливно-воздушном потоке псевдоскачка происходит тепловыделение в волновых структурах и возможна реализация преддетанационного режима горения. Определены условия, при которых реализуется подвод тепла от горения в псевдоскачке в квазистационарном режиме.

Получены результаты экспериментальных исследований инициирования горения керосина и водорода в сверхзвуковом потоке при подаче со стенки канала. Для этой схемы подачи топлива получены данные о динамике развития возмущения от газодинамического импульса и переходе к режиму горения в псевдоскачке. Выявлены особенности инициирования преддетонационного горения для такой схемы подачи топлива в сверхзвуковой поток. Показано, что установившиеся режимы преддетонационного горения несколько отличаются в зависимости от способа подачи топлива (по оси или с периферии потока), в то время как динамика распространения волновых структур от газодинамических импульсов практически идентична в обеих случаях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543.

Список литературы

1. Третьяков П.К. Организация эффективного горения керосина в канале при больших скоростях потока // Физика горения и взрыва. – 2020. –Т.56, №.1. –С.42-47.

УДК 544.454

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ ЖИДКОЕ ТОПЛИВО – ГАЗООБРАЗНЫЙ ОКИСЛИТЕЛЬ

Иванов В.С.[1)], Фролов С.М. [1)]

[1)] Федеральный исследовательский центр химической физики
им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, г. Москва, Россия

В настоящее время активно разрабатываются новые системы реактивного движения, в том числе с импульсно-детонационными [1,2] и непрерывно-детонационными двигателями [3,4]. Наиболее актуальная задача, требующая решения при разработке таких двигателей – создание условий для распространения детонационной волны в гетерогенной смеси газообразный окислитель – капли жидкого горючего. В отличие от газовой детонации, в гетерогенной детонации энерговыделение за фронтом волны может лимитироваться процессами смесеобразования. Горючая смесь образуется вследствие аэродинамического дробления и испарения капель или пленки и их фрагментов. Энерговыделение начинается в локальных очагах самовоспламенения и распространяется в пространстве в зависимости от локальных распределений температуры и концентрации паров горючего. Фронт реакции за ударной волной может распространяться в режимах ламинарного или турбулентного гомогенного или диффузионного пламени, пламени в частично перемешанном газе, пламени вокруг одиночных капель или ансамблей капель, а также в режиме волны самовоспламенения. Многомерное нестационарное численное моделирование таких процессов – очень сложная задача.

В данной работе приведены результаты численных исследований условий распространения и структуры детонационных волн в системах типа газообразный окислитель – капли жидкого топлива или пленка жидкого топлива. Получены новые данные о структуре фронта установившейся гетерогенной детонации: пространственной неравномерности распределения капель горючего и зон энерговыделения в зоне реакции, обширных зон энерговыделения на большом удалении от лидирующего фронта детонации (вторичных взрывов) и др. Например, на рис. 1 показаны распределения температуры в детонационной волне, бегущей в системе газообразный кислород – пленка жидкого гептана и декана. Показано, что режим энерговыделения в зоне реакции детонационной волны, бегущей в гетерогенной системе, зависит от предыстории формирования двухфазной смеси и количества паров жидкого топлива в газообразной фазе.

Работа выполнена при поддержке Российским научным фондом (проект № 23-23-00364).

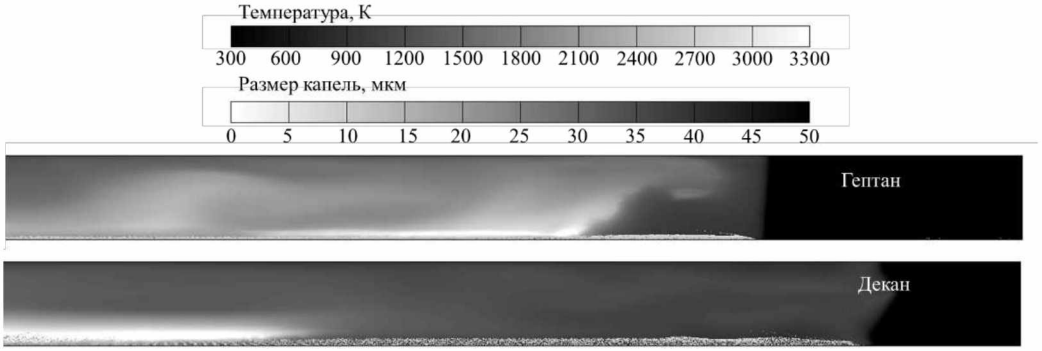


Рис. 1. Распределения температуры и размера капель в детонационной волне, бегущей в системе газообразный кислород – пленка жидкого гептана (сверху) и декана (внизу).

Список литературы

1. Roy G. D., Frolov S. M., Borisov A. A., Netzer D. W. // Progr. Energy Combust. Sci., 2004, Vol. 30, Issue 6, pp. 545-672.
2. Фролов С.М., Аксёнов В.С., Иванов В.С., Шамшин И.О., Набатников С.А. // Горение и взрыв, 2019. Т. 12, №1, С. 63–72.
3. Быковский Ф. А., Ждан С.А. Непрерывная спиновая детонация. Новосибирск: ИГиЛ СО РАН, 2013.
4. Фролов С. М., Иванов В. С., Шамшин И. О., и др. // Горение и взрыв, 2022, Т. 15, №1, С.67–71.

УДК 536.46

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ АММИАКА И ВОДОРОДА

Кабардин П.А., Лукашов В.В., Тупикин А.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Одним из способов решения вопросов экологической безопасности является изучение процесса сжигания топливных смесей на основе аммиака и метана, в том числе при разбавлении их водородом. Такого рода топлива выглядят достаточно перспективными при поиске и разработке новых эффективных решений в энергетике, так как в продуктах сгорания уровень вредных веществ будет ниже. При исследовании процессов тепло-массопереноса при горении необходимо знать физико-химические свойства топливно-воздушных смесей. Одним из таких параметров является критический градиент при проскоке пламени в канал, обратная величина которого соответствует характерному времени пребывания смеси во фронте ламинарного пламени (характерному времени горения) [1]. Исследуя предельные режимы стабилизации пламени на горелке Бунзена достаточно просто получить сведения о характерных временах горения, связь которых со скоростью распространения ламинарного фронта пламени известна [2]. Для определения условий проскока была использована горелка Бунзена, представляющая собой кварцевую трубку длиной L=770 мм с внутренним диаметром d=13 мм, достаточной для формирования на срезе течения Пуазейля, в которую подводилась заранее перемешанная смесь воздуха, аммиака (либо метана) и водорода. Контроль подачи воздуха осуществлялся с помощью цифрового расходомера. Расход и состав бинарной смеси газов горючих контролировался генератором поверочных газовых смесей УФПГС-2. Для нахождения границы устойчивого горения пламени в топливной смеси фиксировалась отношение концентраций H2 к, NH3 (или CH4), и для данного соотношения с шагом 0.1 менялся коэффициент избытка воздуха. После каждого опыта трубка охлаждалась до 30°C, тем самым в экспериментах всегда при проскоке пламени сохранялись идентичные по температуре условия течения в трубке. Для заданного состава смеси находимые гидродинамические параметры при проскоке (расходы газов, скорость течения). Контроль температуры осуществляли термопарой типа K, размещённой на кромке трубы. Регистрация интенсивности свечения радикалов в пламени проводилась цифровой электронно-оптической камерой НАНОГЕЙТ-38 в одноимённой программе. Для выделения необходимого диапазона длин волн радикала OH* был использован интерференционный фильтр LaVision VZ10-0474.

Определены критические градиенты при проскоке и характерные времена горения для смесей на основе метана или аммиака с разбавлением водородом в зависимости от коэффициента избытка топлива (φ). Добавление водорода в аммиак и метан приводит к смещению минимума характерного времени горения в область бедных смесей (φ<1). Термодинамический анализ показывает незначительное снижение относительного теплоподвода в режимах проскока в сравнении с метаном и водородом.

Полученные данные свидетельствуют о возможности организация схем горения при избытке окислителя, что позволяет снизить выброс CO и NO_X.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543.

Список литературы

1. В.К. Баев, П.К. Третьяков. Характерные времена горения топливовоздушных смесей. // Физика горения и взрыва. –1968. –Т.4, №3. –С. 367-376
2. Е.С. Щетинков Физика горения газов М.: Наука, 1965

УДК 662.7

УТИЛИЗАЦИЯ ВОДНОЙ ФАЗЫ ПИРОЛИЗНОГО КОНДЕНСАТА В СОСТАВЕ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Калтаев А.Ж.[1)], Ларионов К.Б. [1,2)] , Губин В.Е.[1,3)],

[1)] Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30

[2)] Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, 650000, Кемеровская область – Кузбасс, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

[3)] Севастопольский государственный университет, Россия, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Мировой спрос на уголь за 2022 год вырос на 4% и достиг 8,42 млрд тонн [1]. По прогнозам международного энергетического агентства, падение спроса к 2026 году составит 2% относительно 2023 года. На основе этих данных можно сделать вывод, что потребление угля в ближайшие несколько лет останется на высоком уровне. В процессе обогащения угля образуются высоковлажный и высокозольный остаток – фильтр-кек. Ввиду своих особенностей фильтр-кек подходит для использования его в водоугольном топливе (ВУТ). Помимо этого сжигание угля или фильтр-кека в составе ВУТ позволяет снизить выбросы оксидов азота и серы [2]. С другой стороны, активно развивается использование биомассы как альтернативы углю. Однако прямое сжигание биомассы нецелесообразно, поэтому применяют термические методы конверсии такие как пиролиз, газификация, торрефикация и т.п. [3]. В процессе пиролиза образуются водная фаза с низкой энергетической ценностью и большим содержанием воды. Водная фаза содержит кислоты с короткой цепью, фураны, фенолы, спирты и N-гетероциклические соединения [4]. Учитывая состав водной фазы, прямой сброс в водоем или грунт недопустимы и требует дополнительного обращения. Водная фаза имеет небольшую теплоту сгорания, которая составляет от 1 до 4 МДж/кг [5] и может использоваться в качестве полной или частичной замены воды в водоугольном топливе. ВУТ является многокомпонентным топливом, что позволяет варьировать состав для улучшения необходимых параметров. Наличие спиртов в водной фазе позволяет использовать его как поверхностно активное вещество (ПАВ) для лучшей смачиваемости и стабильности ВУТ.

В настоящей работе были проведены экспериментальные исследования для получения характеристик зажигания и горения одиночных капель водоугольного топлива на основе водной фазы пиролизного конденсата. Также изучены характеристики распыления на лабораторном стенде с помощью метода цифровой трассерной визуализации. Распыление осуществлялось с помощью форсунки с внутренним смешением.

Благодарность: работа выполнена при поддержке гранта FSWW-2022-0018, реализуемого в рамках проекта создания новых молодежных лабораторий.

Список литературы

1. IEA. Coal 2023 - Analysis and forcast to 2026 // Int. Energy Agency. – 2023. – P. 1–170.
2. Dmitrienko M.A., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Environmental indicators of the combustion of prospective coal water slurry containing petrochemicals // J. Hazard. Mater.– 2017. – Vol. 338. – P. 148–159.
3. Ramos A., Monteiro E., Rouboa A. Biomass pre-treatment techniques for the production of biofuels using thermal conversion methods – A review // Energy Convers. Manag. – 2022. – Vol. 270. – P. 116271.
4. Silva R.V.S., Pereira V.B., Stelzer K.T., Almeida T.A., Romeiro G.A., Azevedo D.A. Comprehensive study of the liquid products from slow pyrolysis of crambe seeds: Bio-oil and organic compounds of the aqueous phase // Biomass and Bioenergy. – 2019. – Vol. 123. – P. 78–88.
5. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Kaltaev A.Z. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste // Energy. – 2022. – Vol. 257. – P. 124813.

УДК 536.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГОРЯЩИХ ЧАСТИЦ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

Касымов Д.П.[1)], Матвиенко О.В. [1,2)], Агафонцев М.В.[1)], Лобода Ю.А.[1)], Луценко А.В.[1)]
[1)] Томский государственный университет, г. Томск, Россия
[2)] Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

Лесные пожары генерируют переносимые по воздуху фрагменты, известные как горящие и тлеющие частицы природного происхождения, которые являются одним из основных источников пожара, как в лесных, так и в городских условиях. Такие частицы способны перемещаться при помощи потоков воздуха, и в дальнейшем оседать на новых территориях, подобное оседание имеет риск возгорания новых участков, без какого-либо контакта с пламенем. Сам же механизм воспламенения строительных конструкций или растительного слоя происходит за счет лучистого нагрева или прямого контакта с пламенем [1].

Горящие и тлеющие частицы природного происхождения – частицы, которые были сгенерированы в результате таких действий как нагрев и деформация легко воспламеняемых природных материалов, таких как кустарники, деревья (или любое другое горючее) или стройматериалы, на более мелкие пламенные фрагменты во время пожара, как естественного (самовозгорание торфа), так и искусственного (сжигание мусора, непотушенные сигареты, сельскохозяйственные палы) происхождения.

В настоящее время отсутствуют математические модели, которые бы учитывали генерацию горящих частиц, их влияние на распространение фронта пожара и воспламенение строений. В связи с этим представляет интерес математическое моделирование процесса аккумуляции частиц и теплового воздействия на различные типы РГМ, в частности, на древесину [2].

В докладе представлены результаты численного исследования влияния различного состава, пористости и влажности слоя древесины на переход от низкотемпературного режима к зажиганию в результате воздействия частиц разной геометрии. Принципиальная физическая модель представлена на рисунке 1.

Рис. 1. Фотография эксперимента по взаимодействию группы горящих частиц с образцом древесины сосны

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-71-10029).

Список литературы

1. S. L. Manzello, T. G. Cleary, J. R. Shields, A. Maranghides, W. Mell, and J. C. Yang Experimental investigation of firebrands: Generation and ignition of fuel beds / Fire Safety Journal. 2008. Vol. 43. Pp. 226-233. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.06.010
2. O. V. Matvienko, D. P. Kasymov, E. L. Loboda [et al.] Modeling of wood surface ignition by wildland firebrands / Fire. 2022. Vol. 5, № 2. Pp. 1-24. https://doi.org/10.3390/fire5020038

УДК 544.4

САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ СТРУЙ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ ПРИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ

Киверин А.Д.[1,2], Володин В.В.[1], Голуб В.В.[1], Смыгалина А.Е.[1], Яковенко И.С.[1], Ярков А.В.[1]
[1]Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия
[2]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

В докладе обсуждаются вопросы, связанные с оценкой рисков взрывоопасности при работе с газообразными топливами, их хранении под высоким давлением и перекачке из системы хранения в камеру сгорания. На примере водорода и водород-метановых смесей методами численного моделирования продемонстрированы механизмы спонтанного самовоспламенения при истечении газа под давлением (до 700 атм) в воздух и определены критические условия самовоспламенения по давлению, составу топлива, геометрии сечения истечения. Отдельно изучено влияние состава топливной смеси и атмосферы на самовоспламенение, а также влияние скорости раскрытия сечения истечения и препятствий, размещенных в окружающем пространстве. Сформулированы рекомендации к математическому моделированию и экспериментальному исследованию взрывоопасных сценариев, связанных с разгерметизацией баллонов высокого давления и спонтанным самовоспламенением при перекачке газа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2024-543 от 24.04.2024.

УДК 536.46

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНТЕЗА КОМПОЗИТОВ ИЗ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ, СПОСОБНЫХ К ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИМ ПРЕВРАЩЕНИЯМ

Князева А.Г., Крюкова О.Н.
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

Синтез композитных покрытий и изделий возможен в едином цикле, сочетающем особенности разных технологий – селективного лазерного плавления и СВС. При этом химические реакции могут протекать как в режиме самостоятельного горения, так и при условии управления лазерным лучом. Свойства получаемых при этом материалов в значительной степени зависят от структуры и фазового состава формируемого материала, которые, в свою очередь, определяются условиями локального нагрева и протекающих при этом реакций. Известны примеры успешного применения подобных технологий с использованием порошков традиционных термитных смесей (используемых как самостоятельно, так и в составе твердых топлив), разбавленных металлической составляющей. Комплекс протекающих при синтезе композитов реакций включает как металлотермические стадии (замещение одного металла в оксиде другим металлом), так и реакции, приводящие к образованию интерметаллидных соединений. Большая часть реакций – экзотермические, что обусловливает возможность режимов типа горения.

Поскольку в условиях лазерного спекания/плавления поде температуры крайне неоднородно и характеризуется сложными термическими циклами, химические реакции также протекают неоднородно, что может приводить к неоднородному составу композитов [1-3].

В настоящей работе для систем типа Ti-Al-Fe_2O_3, Ti-Al-CuO и др. описаны модели разной степени детальности. Первые представляют процесс в виде двух основных стадий, одна из которых приводит к образованию упрочняющих частиц, другая – дает состав матрицы.

Вторая группа моделей учитывает достаточно детальную кинетику фазообразования в макроскопическом приближении. Например, во второй системе принципиально возможно образование упрочняющих частиц двух типов – Al_2O_3 и TiO_2.

Третий вариант моделей относится к типу двухуровневых [4]. Разделение уровней описания основано на различии характерных физических масштабов тепловых и диффузионно-кинетических процессов. На мезоуровне а простейшем приближении анализируется последовательность химических стадий, контролируемых диффузией. На макроуровне рассчитывается поле температуры с учетом изменяющегося состава. Мезо- и макрозадачи оказываются связанными.

В каждом из вариантов при некоторых условиях можно выделить квазистационарную стадию, которая характеризуется набором неизменных величин – например, размером ванны расплава, максимальной долей жидкой фазы, максимальной температурой, составом продуктов. Однако вследствие сложной траектории движения лазерного луча процесс синтеза композита в целом оказывается существенно нестационарным.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда No 22-11-00100, https://rscf.ru/project/22-11-00100/

Список литературы

1. Bakinovskii A. A., Knyazeva A. G., Krinitcyn., M. G., Kryukova O.N., Pobol I. L., Fedorov V. V. and Rajczyk J. Electron Beam Assisted Deposition of Ni–Al Coatings onto Steel Substrate // Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2019. - V. 28, No. 4. - P. 245–255.
2. Knyazeva A.G., Kryukova O.N. The synthesis of composites with reinforcing particles on a thin substrate // Materials Physics and Mechanics. – 2021. - V. 47, P. 254-265.
3. Князева А.Г. Нестационарная термокинетическая модель лазерного сканирования поверхности // ПМТФ. – 2021. – V.62, № 6. - С. 130-137.
4. Kryukova O. N. and Knyazeva A. G. Two-Level Model Controlled Synthesis of a Composite on a Substrate // Multiscale Science and Engineering. – 2023. – V.5. – P. 10-22.

УДК 536.46

РЕЖИМЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА РЕАКЦИИ В ЩЕЛИ, ЗАПОЛНЕННОЙ СРЕДОЙ С ДВОЙНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ

Князева А.Г.
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

Горение пористых материалов и/или распространение зоны реакции в объеме пористого каркаса привлекает внимание не одно десятилетие в связи с обширными приложениями: это и сжигание газов в пористых средах, и внутрипластовое горение, и горение нетрадиционных видов топлива и синтез новых материалов из смесей порошков. Структура пористого пространства может быть весьма сложной, характеризуется извилистостью, размером пор, открытой и закрытой пористостью; имеет разные системы пор, сообщающиеся между собой и т.д.

В настоящей работе предложена новая модель пористой среды, содержащей поры и капилляры. Модель, основана на термодинамическом подходе к построению определяющих соотношений [1-3] и учитывает как конвективный, так и диффузионный перенос, а также перекрестные эффекты, которые могут быть важными для медленных процессов. Одно из таких явлений – бародиффузия, которая оказывает влияние на перераспределение концентраций. Несмотря на то, что в стационарных процессах давление в разных поровых системах выравнивается [4], распределение концентраций в них при наличии бародиффузии может быть различным [5].

В качестве примера рассмотрена модель распространения зоны горения в пористой среде между двумя плоскими пластинами с разными теплофизическими свойствами. Подобная ситуация может реализоваться в технологиях синтеза слоевых композитов с приложением подвижной нагрузки [6,7]. Предполагается, что проницаемость пор и капилляров различна; в текучей среде комплекс химических реакций описывается суммарной схемой. Роль внешней нагрузки учитывается через размер движущегося пятна нагрева и температуру в этой области. Теплообмен между материалами осуществляется теплопроводностью, что приводит к сопряженной постановке задачи с граничными условиями четвертого рода. Режимы распространения реакции зависят как от технологических параметров и геометрии образца, так и от параметров, характеризующих структуру пористого пространства. Процесс в целом протекает неоднородно и характеризуется широкой зоной реакции, что связано с дополнительным прогревом материалов теплопроводностью перед и за движущимся источником тепла.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2022-0003.

Список литературы

1. Knyazeva, A.G. One-dimensional models of filtration with regard to thermal expansion and volume viscosity // Proceedings of XXXVII International Summer School–Conference APM. - 2009. - P. 330-337.
2. Knyazeva, A.G. Pressure diffusion and chemical viscosity in the filtration models with state equation in differential form // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. - Vl. **1128**, paper 012036.
3. Knyazeva A.G. and Nazarenko N.N. Coupled Model of a Biological Fluid Filtration Through a Flat Layer with Due Account for Barodiffusion // Transport in Porous Media. – 2022. – V. **141**. - P. 331–358.
4. Баренблатт Г. И., Желтов Ю. П. Об основных уравнениях фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах // Докл. АН СССР. -1960. – Т. 132, № 3. – С. 545–548.
5. Knyazeva A.G. Filtration equations for pore and capillary system taking into account pressure diffusion //
6. Travitzky N., Bonet A., Dermeik B., FeyT., Filbert-Demut I., Lorenz S., Schlordt T., and Grei, P., Additive Manufacturing of Ceramic-Based Materials // Adv. Eng. Mater. – 2014. – V. 16, № 6, P. 729–754.
7. Knyazeva A.,Travitzky N. Modes of adhesive bonding layer formation during roll motion in the process of sheet lamination // High Temperature Material Processes. – 2023. - V. 27. № 1. – P. 67-96.

УДК 536.46

КАТИОННАЯ ХИМИЯ ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Князьков Д.А., Черепанов А.В., Киселев В.Г., Дмитриев А.М., Шмаков А.Г.
Институт химической кинетики и горения им. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Хемоионизация инициирует образование многочисленных заряженных частиц в процессе горения. Хотя концентрация ионов в пламени невелика (10^8–10^{12} см$^{-3}$), при приложении внешнего электрического поля в пламени возникает так называемый «ионный ветер». Он может оказывать существенное влияние (в зависимости от напряженности поля) на процесс горения за счет передачи импульса от заряженных частиц к нейтральным. Это явление лежит в основе технологии управления процессами горения с применением электрического поля, которая имеет большие перспективы для улучшения стабилизации пламени, интенсификации горения (за счет образования возбужденных молекул в результате столкновений с ионами), снижения образования сажи и т. д. Мониторинг тока ионов, образующихся при горении, позволяет контролировать и анализировать процессы в топочных устройствах. Таким образом, разработка моделей для прогнозирования ионных токов и поведения пламени во внешнем электрическом поле имеет большое практическое значение. Такие модели должны учитывать химические взаимодействия между ионами и нейтральными соединениями, чтобы обеспечить надежное описание соответствующих процессов.

В этой работе представлены недавние результаты, полученные в лаборатории кинетики процессов горения ИКХГ СО РАН, по разработке кинетической модели для ионной химии в пламенах углеводородов. Методом зондовой молекулярно-пучковой масс-спектрометрии измерены пространственные распределения катионов в предварительно перемешанных ламинарных пламенах различных C_1-C_7 углеводородов. Помимо основных катионов пламени (H_3O^+, $C_2H_3O^+$, $C_3H_3^+$), в реакционной зоне богатых пламен экспериментально обнаружено множество катионов $C_xH_y^+$, тогда как в стехиометрических и бедных пламенах доминируют только гидроксоний и ацетил-катион. Полученные экспериментальные данные об относительной мольной моле катионов использованы для проверки обновленного механизма ион-молекулярных реакций, разработанного в лаборатории. Помимо реакций между катионами (HCO^+, H_3O^+, $C_2H_3O^+$, CH_5O^+, CH_3^+), электронами и 6 анионами (O_2^-, OH^-, O^-, CHO_2^-, CHO_3^-, CO_3^-), механизм включает обновленный подблок реакций с участием $C_3H_3^+$ и нескольких доминирующих катионов с общей формулой $C_xH_y^+$ ($C_4H_5^+$, $C_5H_3^+$, $C_5H_5^+$, и $C_5H_7^+$). Используя квантово-химические методы (W2-F12), рассчитаны энтальпии образования катионов. Разработанный механизм ион-молекулярных реакций объединен с детальным механизмом реакций для нейтральных частиц и использован для описания пламен метана, этилена, этана, пропана, н-бутана, н-гептана, изооктана и толуола. Катионная структура этих пламен рассчитана с помощью программного обеспечения Cantera. Показано, что разработанный механизм ионной химии вполне адекватно воспроизводит экспериментальные данные. В работе обсуждаются основные реакции образования различных катионов в пламени и дальнейшие пути совершенствования механизма.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-23-00521, https://rscf.ru/project/23-23-00521/.

РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ МИКРОСТРУЙ ВОДОРОДА (ОБЗОР)

Козлов В.В., Литвиненко Ю.А.

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск, Россия

Данный доклад посвящён обзору экспериментальных работ по исследовании диффузионного горения микроструй водорода, истекающей из круглого и щелевого микросопла на до- и сверхзвуковой скорости [1]. Как показали исследования в результате экспериментальнов, установлено существование четырёх характерных сценариев диффузионного горения плоской микроструи водорода. Найдено, что стабилизация факела при дозвуковой скорости истечения микроструи водорода связана с наличием области «перетяжки» пламени, а при сверхзвуковом истечении струи – с наличием сверхзвуковых ячеек. Обнаружен гистерезис процесса диффузионного горения плоской микроструи водорода в зависимости от области поджига микроструи (у среза сопла или выше по течению) и направления изменения скорости ее истечения (увеличение или уменьшение).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543

1. Процессы горения и детонации в перспективных энерготехнологиях / под ред. Д. М. Марковича и О. В. Шарыпова; Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. — Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2023. — 536 с.

УДК 536-46

СЖИГАНИЕ НИЗКОКАЛОРИЙНЫХ ГАЗОВ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ С ДИАМЕТРОМ КАНАЛА ВЫШЕ И НИЖЕ КРИТИЧЕСКОГО

Козлов Я.В., Коржавин А.А.

Институт кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Существуют несколько подходов к сжиганию низкокалорийных газов. Один из них подразумевает использование фильтрационного горения газов в пористых средах (ФГГ).

Важным параметром ФГГ является критический диаметр канала пористой среды для данной смеси, определяемый по критерию Пекле. При диаметре канала ниже критического волна горения способна распространяться по пористой среде только в условиях рекуперативного теплообмена между продуктами горения, пористой средой и свежим газом.

В конусном горелочном устройстве на основе Al_2O_3 шаров d=15мм, образующих пористую среду с диаметром канала выше критического, обнаружена возможность двойной стабилизации волны горения бедных топливно-воздушных смесей. Первая газодинамическая стабилизация происходит в момент проскока сразу после зажигания (рис.1, сечение $S_{рвс.}$). Вторая, устойчивая стабилизация, обусловлена рекуперативным теплообменом (рис.1, $S_{рнс.}$).

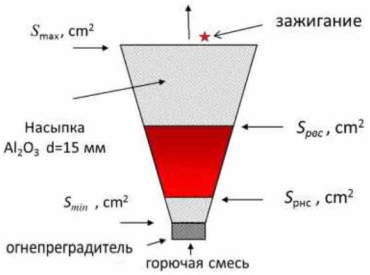


Рис.1. Схема конусной горелки. Воздух+8% CH_4

В горелочном устройстве постоянного сечения с реверсированием волны горения отработано сжигание выше и ниже предельных топливно-воздушных смесей. Использована мелкодисперсная пористая среда на основе колец Рашига с диаметром канала ниже критического. Сжигание бедной смеси осуществлялось при движении волны горения встречно потоку реагентов. При достижении нижней границы, контролируемой термопарой T1 (рис.2), располагаемой внизу, происходит переключение на смесь с концентрацией топливного компонента ниже предельной, что приводит к смене направления движения волны горения.

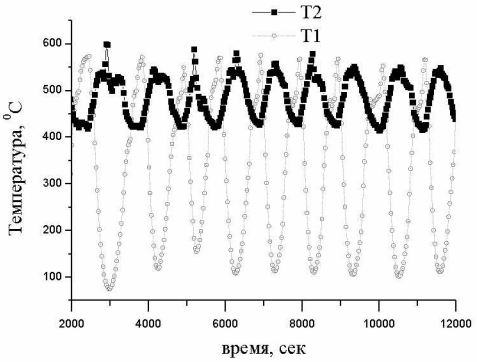


Рис.2. Реверс-процесс. T1 – нижняя термопара, T2 - верхняя термопара.
Встречный поток: воздух+7.5% CH_4. Спутный поток: воздух+3.5% CH_4

Волна горения начинает двигаться вверх спутно потоку по предварительно прогретой пористой среде. При достижении волной верхней термопары T2 происходит обратное переключение на бедную смесь и цикл повторяется. Прогрев пористой среды в первом цикле необходим для существования волны горения во втором цикле, когда подается запредельная смесь.

УДК 621.45.022.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОЙ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕЙ ТОПЛИВНОЙ СМЕСИ В ВИХРЕВОЙ ПРОТИВОТОЧНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Комова О.В., Гурьянов А.И.

ФГБОУ ВО Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва, Пушкина 53, Рыбинск, 152934, Россия

При проектировании камер сгорания (КС) энергетических установок важным обстоятельством является обеспечение устойчивой работы и снижения эмиссии загрязняющих веществ.

Для достижения низких значений эмиссии применяются технологии горения, основанные на реализации сжигания бедных предварительно перемешанных топливовоздушных смесей [1] и использование синтетического многокомпонентного водородосодержащего топлива [2].

В работе представлено исследование влияния добавок многокомпонентного водородсодержащего топлива (МВТ) к метану и организация бедного горения их смесей в вихревой противоточной камере сгорания (ВПКС).

Влияние добавок МВТ к метану на эмиссионные характеристики горения в противоточном закрученном течении показано на рисунке 1. Горение МВТ сопровождается двукратным снижением выбросов оксидов азота по сравнению с горением метана, а горение 15% добавки МВТ к метану сопровождается снижением выбросов NOx в 1,5 раза. Переход с метана на МВТ сопровождается значительным снижением выбросов CxHy и CO в диапазоне α от 0,15 до 1. С увеличением α наблюдается значительный рост выбросов CxHy и CO.

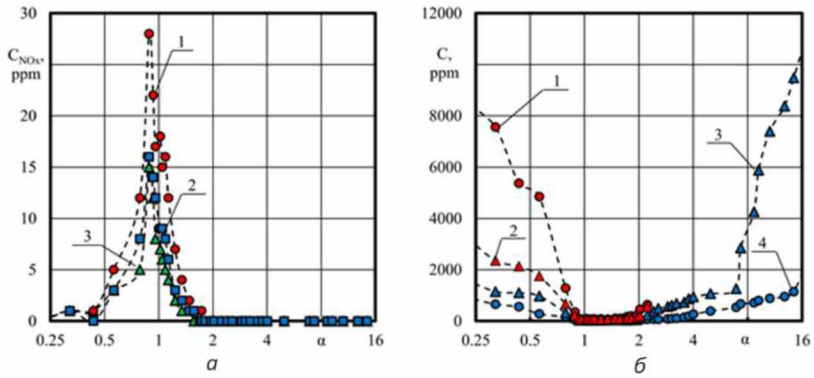


Рис. 1 Зависимость концентрации загрязняющих веществ в продуктах сгорания от коэффициента избытка воздуха: а - 1 – концентрация NOx при горении метана CH4; 2 концентрация NOx при горении смеси (CH4 и МВТ) с объёмной долей добавки МВТ равной 15%; 3 – концентрация NOx при горении МВТ; б - 1 – концентрация CxHy при сжигании метана; 2 – концентрация CO при сжигании метана; 3 – концентрация CO при сжигании МВТ; 4 – концентрация CxHy при сжигании МВТ

Исследования горения синтетического многокомпонентного водородсодержащего топлива в противоточном закрученном течении подтвердили целесообразность использования топливных смесей метана с МВТ для перспективных камер сгорания.

Список литературы

1. Nemitallah MA, Rashwan SS, Mansir IB, Abdelhafez AA,Habib MA. Review of novel combustion techniques for clean power production in gas turbines. Energy Fuels 2018;32:979-1004. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03607.
2. Guryanov AI et al., An experimental study of syngas combustion in a bidirectional swirling flow, Interntional Journal of Hydrogen Energy, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.004.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002).

УДК 536.54, 536.68

ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ УСТОЙЧИВОГО ГОРЕНИЯ И ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОБУЧАЮЩИХ ДАННЫХ

Копьев Е.П., Кузнецов А.В., Шадрин Е.Ю., Садкин И.С., Бутаков Е.Б.

Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В последние десятилетия взято направление на развитие чистой и возобновляемой энергетики [1]. Однако возобновляемая энергетика не может полностью обеспечить человечество энергией. Доля солнечной и ветровой энергии в мировом балансе составляет всего 10.8 % [2]. Таким образом, энергоэффективное использование органического топлива является актуальной экономической и экологической проблемой мирового значения. Одним из путей решения данной задачи является развитие методов управления и оптимизации процессами сжигания топлива, например путем внедрения алгоритмов машинного обучения [3,4]. Так, применение нейросетевых моделей на основе горелочных устройств и тепловых стендов позволит подойти к созданию автоматизированных систем, способных поддерживать энергоэффективные и экологичные режимы сжигания. Однако, не смотря на активное развитие методов машинного обучения в области прогнозирования и управления энергетическим оборудованиям, не было показано моделей, позволяющих автоматизировать процесс работы горелочных устройств.

В рамках настоящей работы проведена модернизация крупномасштабного жидкотопливного огневого стенда ИТ СО РАН тепловой мощность до 1 МВт (см. рис. 1) с целью применения методов машинного обучения на установке. Так, на жидком углеводородном топливе проведен комплекс тестовых экспериментальных исследований факельного сжигания топлива, получены экспериментальные данные по условиям устойчивого горения и рабочих параметров пограничных режимов работы горелочного устройства для формирования корпуса обучающих данных.

Рис. 1. Фотография крупномасштабного жидкотопливного огневого стенда ИТ СО РАН тепловой мощностью до 1 МВт.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543

Список литературы

[1] World Energy Outlook 2024 – Analysis - IEA n.d. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024.

[2] Pathways to Net Zero: The Impact of Clean Energy Research n.d. https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050.

[3] Abdurakipov S, Butakov E. Application of computer vision and deep learning for flame monitoring and combustion anomaly detection. J Phys Conf Ser 2019;1421:012005. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1421/1/012005.

[4] Butakov E, Abdurakipov S. The application of machine learning techniques to detect combustion modes in a pulverised coal boiler. E3S Web Conf 2023;459:07012. https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202345907012.

УДК 62-642

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ТОПЛИВ В ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Копьев Е.П. [1)], Перепечко Л.Н. [1)], Шарина И.А. [1)]
[1)] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Накопленные огромные количества невостребованных жидких углеводородных отходов (отходы нефтедобычи и нефтепереработки, углепереработки, отработанные масла и др.) обуславливают перспективы их вовлечения для производства энергии. Однако, эффективное использование такого рода энергоносителей для производства энергии требует создания новых технологий с топливной универсальностью, высокой энергоэффективностью и низкими выбросами в окружающую среду. Одной из перспективных технологий для сжигания отходов при производстве энергии является подход предложенный в ИТ СО РАН по применению перегретого водяного пара, который имеет ряд преимуществ: генерация пара осуществляется за счет тепловыделения от сжигания; пар взаимодействует с топливом, расщепляя сложные органические соединения, интенсифицируя процессы окисления; воздействие струи пара на каплю топлива обеспечивает мелкодисперсную атомизацию; подача пара в зону горения снижает температуру пламени за счет разбавления горючей смеси более теплоемкой средой, тем самым сокращая образование термических оксидов азота и СО [1].

Развитие этой технологии зависит от политической и экономической ситуации, в том числе стоимости газа и нефти. Динамика патентования в мире новых решений в этой технологии, рис. 1, показывает два пика интереса к исследованию и разработке паровых горелок:

1 - 1918-1926 гг.; за 8 лет – 123 патента;

2 – 1985 - 2022 гг. за 37 лет - 692 патента.

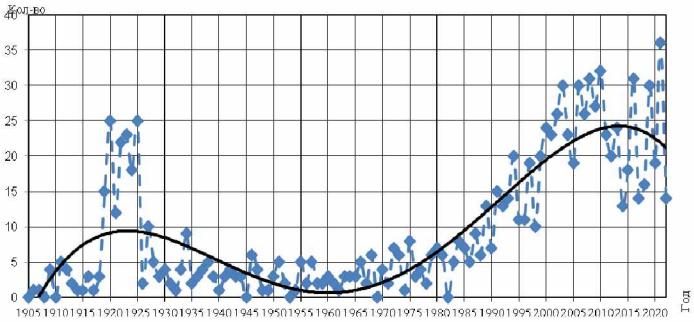


Рис. 1. Динамика патентования за период 1905-2022 гг.

В данных патентах защищались решения:по конструктивным усовершенствованиям горелок; по усовершенствованию процесса подачи и сжигания жидкого топлива или суспензий и пара; по контролю процесса и регулированию подачи пара и топлива.

В настоящий момент основными конкурентами жидкотопливных горелочных устройств (ЖГУ) являются газовые горелки. С другой стороны, если будет организована система сбора отработанных масел и государственный надзор за их обязательной переработкой, то ЖГУ будут востребованы рынком, тем более это касается паровых горелочных устройств. На российском рынке присутствуют либо иностранные горелки, либо российские, собранные частично из импортных комплектующих. Полностью российских ГУ на рынке нет.

Список литературы

1. Anufriev, I. S.; Kopyev, E. P. Diesel Fuel Combustion by Spraying in a Superheated Steam Jet. Fuel Process. Technol. 2019, 192, 154–169. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.04.027.

УДК 662.74

ЗАЖИГАНИЕ ЧАСТИЦ ВЛАЖНОГО УГЛЯ СОВМЕСТНО С ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССОЙ

Косторева Ж.А., Сыродой С.В.

Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Ранее доказано [1-2], что добавление древесной биомассы к угольному топливу, приводит к существенному сокращению времен задержек воспламенение последних и к снижению антропогенных оксидов в их продуктах сгорания. Целью настоящей работы является исследование условий и характеристик совместного зажигания частиц увлажненного угля с древесной биомассой.

На рисунке 1 приведены температурные поля и изолинии функции тока в момент воспламенения частицы угля. Соответственно можно сказать, что применение метода приведённой пленки (по аналогии с [3]) при моделировании процесса зажигания частиц древесно-угольной смеси необоснованно. Анализ приведенных на рисунках 1 изолиний функции тока показывают, что в малой окрестности частиц древесно-угольной смеси образуется сложная структура течений с нисходящими (у поверхности частиц) и восходящими (на некотором расстоянии от поверхности) потоками смеси паров, газов и окислителя. При этом можно отметить, что в нижней полусфере частиц топлива температура внешней среды существенно снижается. Но в то же время воспламенение происходит именно в этой зоне. Это, скорее всего, обусловлено тем, что в процессе термической подготовки летучие, выходящие из частицы древесины «увлекаются» нисходящим относительно холодным потоком воздуха и аккумулируются под частицами топлива. В результате при достижении необходимых (по условиям воспламенения) концентраций и температур происходит зажигание парогазовой смеси.

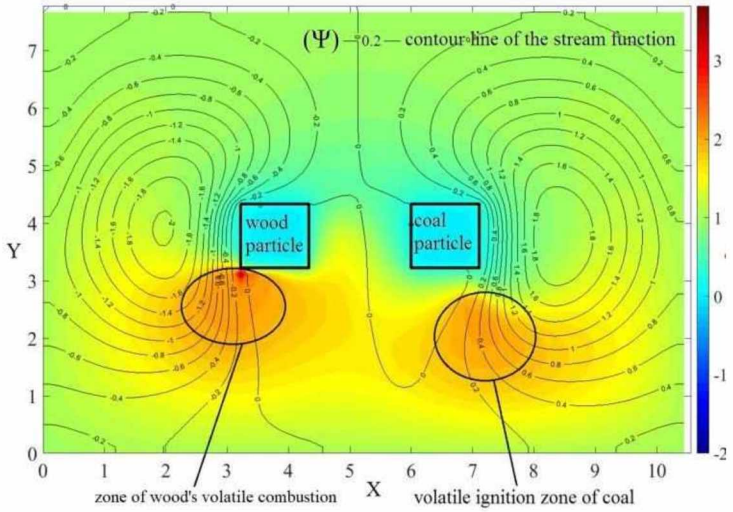


Рис. 1. Безразмерное температурное поле (θ) и значения функций тока (Ψ) в момент воспламенения газообразных продуктов пиролиза угля.

Список литературы

1. Особенности физико-химических превращений смесевых топлив на основе типичных каменных углей и древесины при нагреве / Янковский С.А., Кузнецов Г. В. // Химия твердого топлива. – 2019. – V.1. – С. 26-33.
2. Ignition of wood and coal particle mixtures in conditions of steam and water boiler furnaces / S.V. Syrodoy, J.A. Kostoreva, A.A. Kostoreva, L.I .Asadullina // Journal of the Energy Institute. – 2020. – V. 93(2). – P. 443-449.
3. Вилюнов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ – Новосибирск.: Наука, 1984.– 190 с.

Исследование выполнено за счет грантов РНФ (проект № 23-79-01067)

УДК 62-61

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПЕРИОДА ИНДУКЦИИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВУТ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА В ПОТОКЕ

Кузнецов В.А.
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Обзор литературы показал, что технология капельно-факельного сжигания водоугольного топлива (ВУТ) или суспензионного топлива является одной из самых экологически чистых, экономически выгодных и перспективных [1-3]. Из достоинств данной технологии можно выделить возможность транспорта по трубопроводу, взрыво-пожаробезопасность, возможность сжигания широкой гаммы углей, высокая степень выгорания углерода, низкий уровень вредных выбросов (пыль, NO_x, CO), возможность использования для приготовления ВУТ низкокалорийные (тощие угли) и отходы углеобогащения.

Однако, не смотря на определенные достижения, технологию сжигания ВУТ на данный момент нельзя назвать завершенной. Одной из основных проблем при использовании водоугольного топлива является его трудно воспламеняемость. Известно, что наличие высокой доли воды в составе ВУТ приводит к его низкой реакционной способности при зажигании. Этот эффект является сдерживающим фактором при внедрении на станциях и влечет за собой применения особых конструкторских и технологических решений.

Одним из таких решений может стать технология кислородного сжигания или сжигание в среде с повышенной концентрацией кислорода. Из литературных данных известно, что повышение объемной концентрации кислорода в дутье способствует снижению периода индукции воспламенения углеводородных топлив (газовых, жидких и твердых), а также отмечается более интенсивное выгорание и снижение NO_x. Установлено, что повышение концентрации кислорода в дутье позволяет избежать ингибирующих эффектов. Таким образом изучение физико-химических процессов воспламенения и горения водоугольного топлива в среде с повышенной концентрацией кислорода является актуальным направлением и имеет новизну.

На лабораторном стенде были проведены систематические экспериментальные исследования зависимости периода индукции воспламенения водоугольного топлива в трубчатом реакторе от концентрации кислорода в потоке (21 - 30 об.%) и от состава образцов топлива. Расход окислителя в опытах менялся в пределах 1.11-2.37 $м^3$/ч, что соответствует скорости в камере 0.47-1.05 м/с. Расход ВУТ изменялся от 0.52 до 1.45 кг/ч. При этом концентрация топлива в опытах находилась в диапазоне 0.46-0.82 кг/$м^3$. Были получены данные периода индукции воспламенения водоугольного топлива для различных условий в реакционной камере и разного состава исследуемого топлива. Установлена зависимость времени воспламенения от концентрации кислорода в потоке и от содержания воды в топливе.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01267, https://rscf.ru/project/23-79-01267/»

Список литературы

1. Alekseenko S, Kuznetsov V, Mal'tsev L, Dekterev A, Chernetskii M. Analysis of Combustion of Coal-Water Fuel in Low-Power Hot-Water Boiler via Numerical Modeling and Experiments. J Eng Thermophys 2019;28:177–89. https://doi.org/10.1134/S1810232819020024.
2. Akhmetshin MR, Nyashina GS, Strizhak PA. Comparative analysis of factors affecting differences in the concentrations of gaseous anthropogenic emissions from coal and slurry fuel combustion. Fuel 2020;270:117581. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117581.
3. Алексеенко С.В., Мальцев Л.И., Богомолов А.Р. и др. Результаты опытно-эксплуатационного сжигания водоугольного топлива в водогрейном котле малой мощности. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 12. стр. 16-28.

УДК 62-611

МЕХАНИЗМЫ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЕЙ И ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ

Кузнецов Г.В.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия

Сжигание ископаемых видов топлив сопровождается формированием больших объемов опасных веществ и парниковых газов, выбрасываемых в атмосферу. К числу таких загрязняющих веществ относятся углекислый (CO_2) и угарный (CO) газы, а также оксиды азота (NO_x) и серы (SO_2). Учитывая, что на долю ископаемых энергоресурсов приходится более 80% от общего объема энергогенерации, снижение концентраций загрязняющих веществ в составе дымовых газов является одной из приоритетных задач в области энергетики. Для ее решения необходимо исследовать механизмы формирования антропогенных выбросов, которые обеспечат понимание потенциальных способов и масштабов снижения эмиссии за счет химических реакций, подбора условий, внесения добавок.

На сегодняшний день детально изучены механизмы и процессы, протекающие при горении традиционных твердых топлив: угля и биомассы. Необходимо обобщить имеющиеся данные и полученные в рамках данной работы результаты о возможных механизмах, влияющих на процессы образования антропогенных выбросов при горении влажных угольных топлив из отходов. Экспериментально установлено, что недостаток кислорода (вызванный высокой долей содержания летучих и вытеснением ими молекул кислорода) в зоне горения на этапе выделения летучих веществ из топлива, может значительным образом снизить образование оксидов серы и азота при сжигании многокомпонентных топлив. Варьирование температурного режима перспективно с точки зрения разделения протекающих реакций при сжигании топлива по этапам. Диапазон температур, в котором достигается значительное снижение концентраций вредных выбросов при сжигании суспензий разных составов, составил 800–900 °C. Сжигание суспензионных топлив с добавками растительных компонентов при таких температурах позволит уменьшить выбросы оксидов серы и азота от 37 до 79% в сравнении с углем.

Вода, являясь основным компонентом суспензионного топлива, может существенным образом влиять на формирование рассматриваемых оксидов. В присутствии воды повышается восстановительная активность NO. Экспериментально установлено, что при сжигании суспензии, в составе которой содержится 40% воды концентрации NO снижаются более чем на 60%, в сравнении с тем же топливом, но без воды. При этом молекулы воды напрямую влияют на избыток или недостаток молекул водорода и кислорода в газообразных компонентах и, таким образом, участвуют в реакциях образование серной кислоты и сероводорода, а также окислении серы.

Наличие в составе топлива примесей амфотерных и активных металлов увеличивает степень захвата и удержания оксидов серы и создает благоприятные условия для восстановления оксидов азота до свободного N_2. Данные металлы при взаимодействии с молекулами воды образуют гидроксиды, которые в реакциях с оксидами серы формируют сульфаты, выпадающие в золу. Гидроксиды амфотерных металлов позволяют получать кислород при температурном разложении, который окисляет низшие оксиды до высших. Высокая концентрация воды в суспензионном топливе и нагрев также повышает активность Fe_2O_3, который может выступать в качестве катализатора для снижения концентраций NO. Пористая структура капель суспензионных топлив с примесями биомассы способствует диффузии газов внутрь угольных частиц, что может приводить к дополнительным реакциям восстановления оксидов азота и серы. Для подобных топлив зафиксировано снижение выбросов SO_2 и NO на 12–14% и 35–49% соответственно относительно суспензии на основе угольного шлама без добавок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543.

УДК 533.6.011.5, 534.222.2

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОГОЛОВОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ДЕТОНАЦИИ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Левин В.А.[1,2], Мануйлович И.С.[1], Марков В.В.[1,3]
[1] Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
[2] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[3] Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, г. Москва, Россия

Сформулирована задача, моделирующая процесс инициирования и высокоскоростного сгорания смеси в трёхмерных детонационных волнах, вращающихся в кольцевом зазоре между плоскими диском и кольцом, параллельными друг другу и ортогональными оси симметрии камеры сгорания. Предполагается, что однородная горючая смесь поступает в зазор из резервуара с заданными параметрами торможения через внешнее цилиндрическое кольцо в направлении к оси симметрии. Продукты детонации выходят в окружающее пространство через коническое сопло с углом полураствора 45 градусов. Сформулирована модель инициирования детонации подводом энергии, и в численных экспериментах определены значения параметров инициаторов, оптимальные для формирования заданного количества волн вращающейся детонации и позволяющие задавать направление вращения. Система подачи смеси реализована с учётом соотношения давления в резервуаре и статического давления на входе в зазор.

С учетом разработанной модели инициирования изучен процесс одновременного инициирования и распространения нескольких волн вращающейся детонации пропановоздушной смеси в камере сгорания с кольцевым зазором при различных значениях диаметра камеры, а также различных значениях ширины зазора. Получены минимальные значения диаметра, необходимые для формирования заданного количества одновременно вращающихся волн (от одной до восьми). Найдено критическое значение диаметра, необходимое для формирования одной волны вращающейся детонации. Изучены ударно-волновые картины течения при одноголовой и многоголовой вращающейся детонации в зависимости от ширины зазора между пластинами. Найдены значения ширины зазора, при которых параметры течения начинают зависеть от координаты в направлении, перпендикулярном пластинам. Изучены процессы затухания одной или нескольких волн вращающейся детонации с последующим изменением взаимного расположения детонационных волн. Исследовано влияние диаметра и ширины зазора на устойчивость вращения многоголовой детонации и на тяговые характеристики установки – реактивную силу тяги, массовый расход и удельный импульс.

Исследование проводится в рамках одностадийной кинетики горения численным методом, основанным на схеме С.К. Годунова [1], в оригинальном программном комплексе, разработанном для проведения многопараметрических расчетов и визуализации течений. Программный комплекс позволяет моделировать вращающуюся детонацию в кольцевом сопле для широких диапазонов определяющих параметров. Расчеты проведены на суперкомпьютере МГУ «Ломоносов – 2» [2].

Работа выполнена в НИИ механики МГУ при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-543 от 24.04.2024).

Список литературы

1. Годунов С.К., Забродин А.В. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики – М: Наука, 1976 – 400 с.
2. Voevodin Vl., Antonov A., Nikitenko D., Shvets P., Sobolev S., Sidorov I., Stefanov K., Voevodin Vad., Zhumatiy S. Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2019. V. 6. No. 2. P. 4–11. https://doi.org/10.14529/jsfi190201

УДК 532.525.2

ДИФФУЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ МИКРОСТРУИ ВОДОРОДА ИСТЕКАЮЩЕЙ ИЗ КРИВОЛИНЕЙНОГО КАНАЛА

Литвиненко М.В., Козлов В.В., Довгаль А.В., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г.
Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В представленной работе исследуется диффузионное горение микроструи водорода, истекающей из криволинейного микроканала круглого сечения. Струйные течения, формирующиеся с использованием прямолинейных и криволинейных каналов, различаются тем, что во втором случае развитие струи происходит с образованием вторичного течения, возникающего под действием центробежных сил. В результате внутри канала развиваются два продольных вихря противоположной направленности. Взаимодействие этих вихрей с вихрями Кельвина – Гельмгольца, образование которых характерно для течений с градиентом скорости, вызывает изменение гидродинамических характеристик струйного течения. При диффузионном горении таких струй возникают значительные пространственные искажения факела. Результаты настоящих исследований показывают, как меняются характерные области водородного факела при наличии гидродинамической неустойчивости в виде указанных вихрей. На ри.1 представлены теневые картины диффузионного горения водорода, истекающего из криволинейного микроканала диаметром $d = 0.4$ мм, при различной скорости струи.

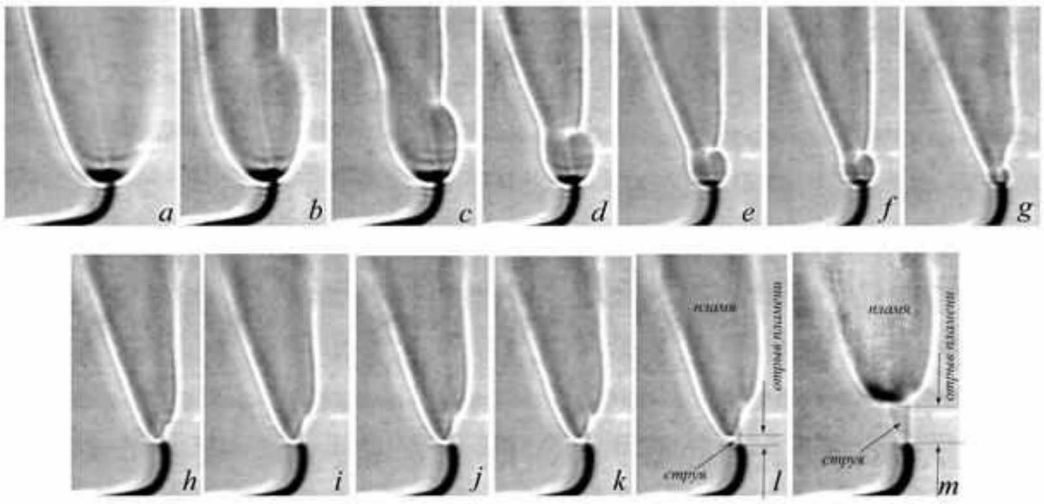


Рис. 1. Теневые картины диффузионного горения водорода, истекающего из сопла диаметром $d = 0.4$ мм, при различной скорости струи (м/с): *a* – 484; *b* – 548; *c* – 587; *d* – 635; *e* – 873; *f* – 921; *g* – 952; *h* – 1032; *i* – 1040; *j* – 1111; *k* – 1151; *l* – 1190; *m* – 1309

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543

Список литературы

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 742 с.
2. Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Козлов Г.В., Вихорев В.В. Экспериментальное исследование затопленной круглой струи с вихрями Дина // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2014. Т. 9, вып. 2. С. 128–135.
3. Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Вихорев В.В., Козлов Г.В. Влияние акустических колебаний на круглые струи, сформированные в криволинейном канале // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 67–72.
4. Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeynichev O. P., Litvinenko Yu. A., and Shmakov A. G., Features of diffusion combustion of hydrogen in the round and plane high-speed microjets (part II) // Int. J. Hydrogen Energy, 2016, Vol. 41, Issue 44, Pages 20240-2024

УДК 536.46

ИНИЦИИРОВАНИЕ ВОЛНЫ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗА ПЛАМЕНЕМ ФИЛЬТРУЮЩЕГОСЯ ГАЗА

Манжос Е.В.[1)], Коржавин А.А.[1)]
[1)]Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск

Проведено исследование нестационарного процесса фильтрационного горения газов (ФГГ) – инициирования волн ФГГ открытым пламенем газа, фильтрующегося через инертную пористую среду. Выяснение параметров и закономерностей, влияющих на характер течения подобного процесса важно с практической точки зрения, поскольку ФГГ имеет широкий спектр применений и нестационарные процессы ФГГ, включающие в себя формирование и гашение волн ФГГ наблюдаются при работе любого устройства на основе ФГГ. При проведении исследования выполнены математическое моделирование процесса и эксперимент. Полученные зависимости времени формирования волны ФГГ (времени зажигания волны ФГГ t_{ign}, с) от скорости подачи газовой смеси v, см/с, имеют U – образную форму (см. рис. 1).

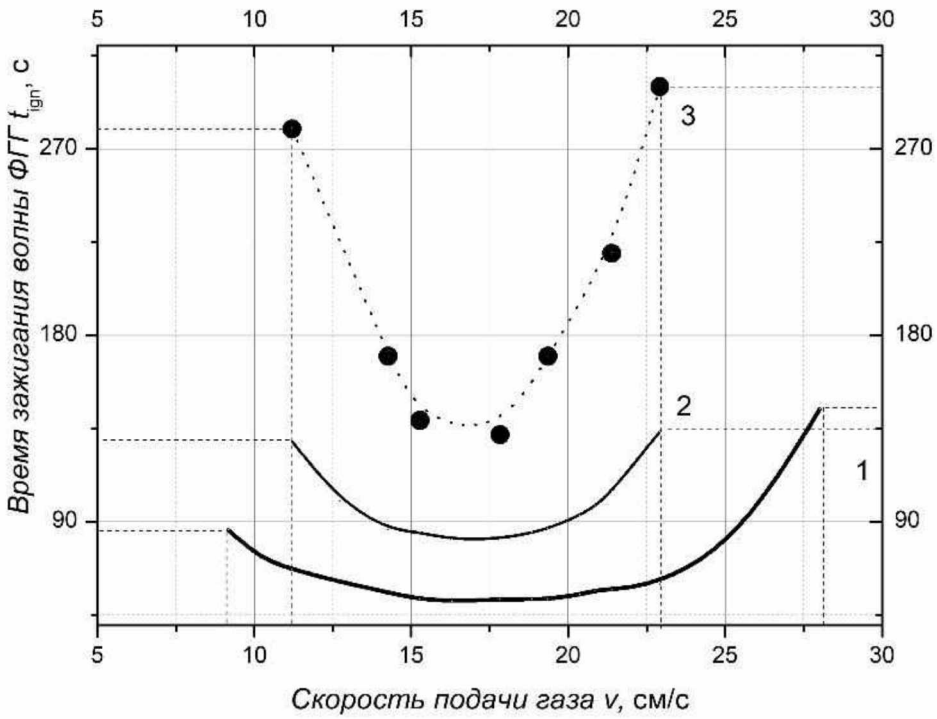


Рис. 1. Зависимости времени зажигания волны ФГГ от скорости подачи газа

1 – Коэффициент внешней теплоотдачи $\alpha_w = 0\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ (данные расчета, адиабатический случай);

2 – Коэффициент внешней теплоотдачи $\alpha_w = 250\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ (данные расчета, с тепловой изоляцией);

3 – Данные эксперимента.

Установлено качественное соответствие результатов численного моделирования и эксперимента. Для конкретных параметров пористой среды и газовой смеси установлено наличие предельного времени зажигания волны ФГГ t_{ign} по скорости подачи газовой смеси v. Также установлено наличие оптимального (минимального) времени зажигания волны ФГГ. Исследовано влияние различных условий внешней теплоотдачи и диаметра зерна пористой среды на процесс формирования волны ФГГ.

УДК 532.2

ГОРЕНИЕ ГИДРАТА МЕТАНА СИНТЕЗИРОВАННОГО В ВОДНОМ РАСТВОРЕ С ПАВ

Мисюра С.Я.[1)], Стрижак П.А.[2)], Морозов В.С.[1)],
[1)] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2)] Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
E-mail: misura@itp.nsc.ru

Газовые гидраты – это кристаллические соединения, образованные при определенных термобарических условиях из молекулы воды и газа [1]. Запасы природного газа в гидратированном состоянии составляют более $1.5 \cdot 10^{16}$ м^3 [2]. Добыча всего 15% природного газа из месторождений газовых гидратов позволит обеспечить человечество экологически чистой энергией на 200 лет [2].

Рассмотрим влияние ПАВ SLS (лаурилсульфат натрия) на диссоциацию гидрата метана при горении (рис. 1). Минимальная скорость диссоциации j ($j = \Delta m/\Delta t$, где m – масса, t – время) при горении соответствует максимальной концентрации SLS. Наличие SLS вызывает пенообразование.

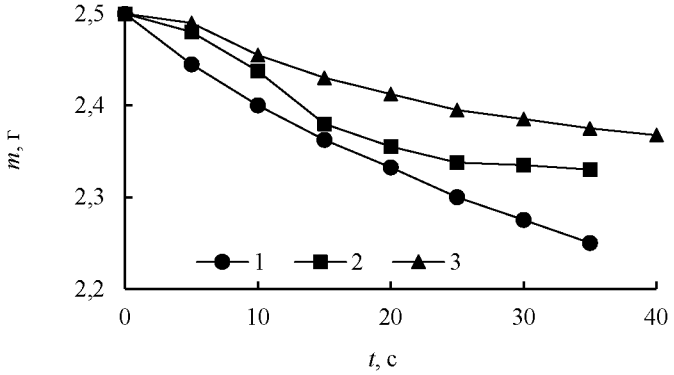


Рис. 1. Диссоциация гидрата метана при горении: 1 – чистая вода, 2 – вода с концентрацией SLS 0.1%, 3 – вода с концентрацией SLS 1%.

С увеличением толщины пены скорость диссоциации уменьшается (ур. (1)),

$$j \sim \left(\frac{1}{R}\right)^{0.58} \sim \left(\frac{\lambda_v}{\delta_v}\right)^{0.58}, \quad (1)$$

где R – термическое сопротивление, λ_v и δ_v – теплопроводность пара и поперечная толщина паровой пленки.

Увеличение толщины пены с течением времени приводит к снижению скорости диссоциации гидрата метана. Максимальная скорость диссоциации соответствует чистой воде. Термическое сопротивление тонкой пленки воды не имеет существенного значения. Тепловой поток и скорость диссоциации управляется коэффициентом теплоотдачи в газовой фазе за счет организации свободного конвективного движения воздуха по поверхности слоя порошка.

Таким образом, механизм диссоциации гидрата метана в присутствии SLS принципиально отличается от горения гидрата метана без SLS. При отсутствии SLS пена не образуется. Наличие SLS при горении приводит к образованию толстого слоя пены, которая тормозит диссоциацию газовых гидратов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта КНП № 075-15-2024-543

Список литературы

1. Sloan E.D., Koh C.A., Clathrate hydrates of natural gases, 3rd ed., CRC Press. Boca Raton, FL, 2008. – 752 p.
2. Makogon Y.F., Holditch S.A., Makogon T.Y. Natural gas-hydrates - A potential energy source for the 21st Century // J. Pet. Sci. Eng. – 2007. – V. 56. – P. 14-31.

УДК 544.452

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИЗУЧЕНИЕ ГОРЕНИЯ И ОКИСЛЕНИЯ СМЕСЕЙ АММИАКА С УГЛЕВОДОРОДАМИ

Осипова К.Н.[1)], Шмаков А.Г. [1)]

[1)] Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Одной из наиболее важных задач современности является поиск новых видов топлива с низким содержанием углерода. С этой точки зрения аммиак является перспективным безуглеродным топливом. Однако ввиду низкой скорости горения, аммиак малопригоден для использования в качестве индивидуального топлива. Для улучшения характеристик горения аммиака предлагается добавить к нему некоторое количество углеводородов. В рамках настоящей работы были получены данные по окислению и горению смесей аммиака с CH_4, C_2H_6 и C_2H_4.

Эксперименты по структуре пламен проводились при помощи молекулярно-пучковой масс-спектрометрической установки с мягкой ионизацией электронным ударом. В экспериментах плана стабилизировались на плоской горелке, температура которой составляла 368К. Структура пламен измерялась в диапазоне давлений от 1 до 5 атм. При проведении экспериментов при повышенном давлении горелка помещалась в специальную камеру. Соотношение C_xH_y/NH_3 составляло 1/1, а коэффициент избытка топлива менялся в диапазоне от 0.8 до 1.2. Профили температуры измерялись при помощи тонких термопар S-типа. Окисление смесей аммиака с углеводородами изучалось помощи реактора струйного перемешивания. Измерения проводились при атмосферном давлении, в температурном диапазоне 600 до 1300К, время пребывания составляло 1с, коэффициент избытка топлива варьировался в диапазоне от 0.5 до 2.0.

Численное моделирование проводилось при помощи программного пакета CHEMKIN с использованием модулей PREMIX и PSR. Было протестировано 5 детальных химико-кинетических механизмов окисления смесей аммиака с углеводородами, взятых из литературы.

Было проведено сравнение экспериментальных и численных данных с целью оценки предсказательной способности механизмов. Также был проведен анализ влияния давления и соотношения топливо/окислитель на образование и расходование промежуточных и конечных продуктов горения. Кроме того, было проанализировано влияние добавки различных углеводородов на процессы горения и окисления аммиака.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00165, https://rscf.ru/project/24-19-00165/

УДК 662.612

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ СЕРОВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗА В КЕРАМИЧЕСКОМ СЛОЕ ИЗ ДИСКРЕТНЫХ ЧАСТИЦ

Павлов Г.И. [1)], Демин А.В. [1)], Теляшов Д.А. [1)]

[1)] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева - КАИ

Для огневого обезвреживания горючих сероводородсодержащих газов, образующихся при добыче природного газа, предлагается беспламенное горелочное устройство инжекционного типа с фильтрационным керамическим слоем [1]. Горелочное устройство относится к горелкам полного предварительного смешения (необходимый для горения воздух инжектируется в смеситель за счет энергии газовой струи). Общий вид пилотной горелки приведен на рисунке 1. Она включает в себя: трубку подачи газа с вентилем 1, шайбу для регулировки воздуха 2, инжекционную горелку 3, насадок из керамических гранул 4.

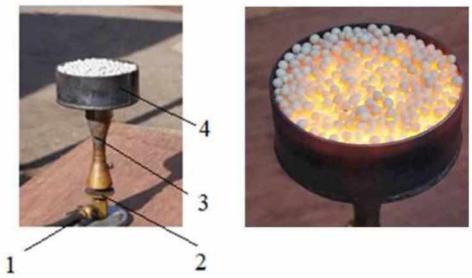


Рисунок 1- Модельная горелка

Принцип работы: при подаче горючего газа за счет энергии газовой струи в инжекционную горелку подсасывается воздух. Коэффициент избытка воздуха составляет 1,01…1,05. Далее, газовоздушная смесь подается в газовый коллектор и по щелям поступает на пористый слой, представляющий собой керамические шарики в рассыпном виде. После поджига горючевоздушная смесь воспламеняется, горение которой продолжается в керамическом слое. При вышеуказанных коэффициентах избытка воздуха над поверхностью слоя пламени не наблюдается. Визуально можно отметить высокую скорость сгорания горючей смеси в слое. Для понятия физики процесса при тех же исходных данных проводились расчетные исследования с учетом кинетики химических реакций [2]. Расчеты горения проводились для разного состава газа, в том числе, для газа, который сжигался на модельной горелке. Для проверки адекватности расчетной модели сравнивались концентрации диоксида углерода и окислов азота. Расхождение в результатах составили: по CO 12%, по NO_x – не более 23%. Моделирование сжигания горючего газа с содержанием сероводорода показало полное его отсутствие в продуктах сгорания.

Литература:

1.Р.С.Буркина. Фильтрационное горение газа в полуограниченной пористой среде// Физика горения и взрыва, 2000, т.36, № 4

2.Демин А.В., Павлов Г.И., Накоряков П.В., Зайнутдинова Д.А. Снижение содержания диоксида углерода в выбросах при использовании метано-водородного топлива // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т.26. № 2. С.3-14.

УДК 621.18

СОПЛОВОЙ БЛОК БЛОЧНОЙ ГОРЕЛКИ С ХОРДАЛЬНЫМИ ГАЗОВЫМИ СТРУЯМИ

Павлов Г.И.[1)], Теляшов Д.А.[1)] Шайхутдинов Я.О. [2)]

[1)] Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева, г. Казань, Россия

[2)] ООО ИЦ «Энергопрогресс», г. Казань, Россия

В настоящее время в РФ на предприятиях теплоэнергетической отрасли широко используются блочные горелки: Weishaup (Гермсания), Oilon GRP (Финляндия), VECTRON (США), Lamborghini (Италия), Giersch (Гкрмания), Прома (Россия), Старорусприбор (Россия). По устройству и принципу действия эти горелки однотипны. Основным элементом в блочных горелках является сопловой блок, от конструкции которого существенно зависит эффективность сжигания топлива и надежность работы горелочного устройства в целом. Большая часть сопловых блоков устроена по одной и той же технической схеме и содержит газовый коллектор с соплами и расположенный поперёк потоку воздуха в сопловом блоке диск с закручивающими лопатками. Воздушный поток «натыкается» на диск с лопатками и, закручиваясь, сильно турбулизируется. В эту же зону подается горючий газ. При их взаимодействии образуется качественно перемешанная горюче-воздушная смесь. Главным недостатком такой схемы является большое газодинамическое сопротивление в сопловом блоке. Авторами работы предложена друга схема организации смесеобразования - диск с закручивающими лопатками из соплового блока заменяется на кольцевой коллектор с соплами, оси которых направлены под определенными углами как к оси, так и к радиусу коллектора (Рис. 1). По предложенной схеме спроектирована и изготовлена экспериментальная модель горелки. Результаты исследований свидетельствуют о том, что сопловой блок предложенной конструкции по сравнению с традиционной имеет минимальное гидравлическое сопротивление и позволяет сохранять турбулентные характеристики потока практически без изменений (торможение потока минимальное). Благодаря этому в составе горелочного устройства появляется возможность использования маломощного и дешевого осевого вентилятора вместо тангенциальных. При этом существенно упрощается конструкция горелочного устройства и уменьшаются энергозатраты.

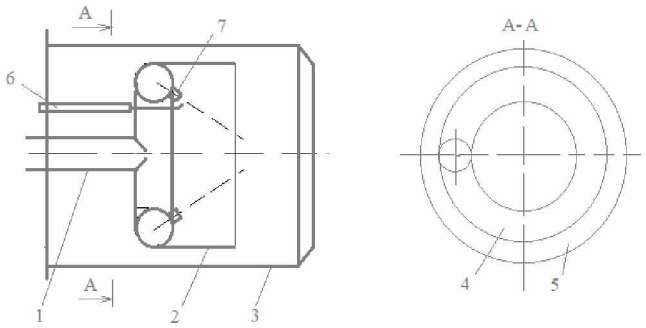


Рис. 1. Схема соплового блока с хордальной подачей газовых струй.
1-газовый трубопровод, 2-эжектор, 3-корпус соплового блока, 4-газовый коллектор, 5-кольцевой воздушный зазор, 6-электрод поджигового устройства, 7-газовые сопла.

Список литературы

1. Адаптированные итальянские горелки для модернизации традиционных российских паровых котлов // Пром. и отопит. котельные и мини-ТЭЦ. - 2016. - N 3. - С.34-35.
2. Анализ аэродинамической структуры закрученного течения в моделях вихревых горелочных устройств / Гешева Е.С., Литвинов И.В., Шторк С.И., Алексеенко С.В. // Теплоэнергетика. - 2014. - N 9. - С.33-41. - Библиогр.: 20 назв.

УДК 544.452

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ФОСФОРСОДЕРЖАЩЕГО БЕНЗОКСАЗИНА И ГРАФЕНА НА ГОРЮЧЕСТЬ АРМИРОВАННОЙ СТЕКЛОВОЛОКНОМ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ

Палецкий А.А. [1)], Трубачев С.А.[1)], Сагитов А.Р. [1)], Куликов И.В. [1)],Соснин Е.А. [1)],
Чернов А.А.[1)], Шмаков А.Г.[1)],Тужиков О.О.[2)], Буравов Б.А.[2)], Yuan Hu[3)], Xin Wang[3)]
[1)] Институт Химической Кинетики и Горения СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2)] Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия
3) University of Science and Technology of China, Hefei, China

Благодаря физико-механическим свойствам и химической стабильности, устойчивости к коррозии и простоте изготовления, материалы на основе эпоксидных смол нашли широкое применение в производстве композитных материалов для авиационной и автомобильной промышленности, кораблестроении и электротехники. Однако применение эпоксидных смол ограничивается их горючестью. Одним из способов улучшения пожаробезопасности материалов является введение в состав полимеров антипиренов на основе различных соединений, включая фосфор. Бензоксазины – относительно новый класс гетероциклических соединений, которые безопасны в использовании, имеют долгий срок хранения при комнатной температуре, а при их полимеризации не выделяются токсичные летучие продукты.

Было проведено исследование влияния добавок антипиренов фосфорсодержащего мономера бензоксазина на основе карданола (CBz) до 20 масс.% и графена до 2 масс.% и их комбинации на горючесть армированной стекловолокном эпоксидной смолы (GFRER) с использованием стандартных (LOI, UL-94, ТГА, конусный калориметр) и уникальных методов (распространение пламени при различных концентрациях кислорода, масс-спектрометрический термический анализ). Образцы с добавкой только CBz показали наилучшие результаты по итогам тестов LOI, UL94 HB. В случае комбинации CBz и графена улучшались механические свойства образцов GFRER на растяжение. Таким образом, было показано, что добавка CBz по совокупности тестов лучше подходит материалам, для которых важна огнестойкость, в то время как смесь графена и CBz в определенной пропорции может улучшить механические свойств материала при небольшой потере огнестойких свойств. Анализ состава продуктов термического разложения образцов GFRER показал, что добавка CBz может промотировать разложение бисфенола-А и более тяжёлых продуктов разложения эпоксидной смолы в конденсированной фазе до фенола. При этом добавление CBz способствует более раннему выходу легких летучих продуктов пиролиза в газовую фазу относительно фенола, что, вероятно, являлось причиной снижения горючести образцов с добавкой CBz. Влияние добавки графена вероятней всего приводит к задержке выхода более высокомолекулярных продуктов термического разложения эпоксидной смолы в газовую фазу, что приводит к более полному их разложению в конденсированной фазе.

Полученные результаты могут быть использованы для изготовления новых композиционных материалов для нужд различных отраслей промышленности, построения модели термического разложения и модели диффузионного горения армированных материалов из эпоксидной смолы с добавками антипиренов и без них.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (Грант № 20-19-00295).

УДК 662.74

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ОБОГАЩЕННОГО ВОДОРОДОМ СИНТЕЗ-ГАЗА ПРИ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ УГЛЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Пензик М.В., Баденко В.В., Козлов А.Н.
ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А.Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

Пиролиз и газификация являются наиболее перспективными технологиями термохимической конверсии различных твердых топлив. При этом технологии получения водорода из угля привлекают все больше внимания научного сообщества [1, 2].

В настоящей работе изучен процесс пиролиза каменного угля в условиях индукционного нагрева в кварцевом реакторе. Для передачи тепла к частицам угля использовали его смеси с железными опилками или стальными шариками. В зависимости от состава металлической засыпки и заполнения реактора образуется синтез-газ с различным содержанием H_2. Стоит отметить, что имеется ограниченное количество работ, посвященных использованию индукционного нагрева для пиролиза различных видов биомассы [3,4] и для угля ранее этот метод не исследовался.

На рис. 1 показано влияние условий эксперимента на содержания основных газов (H_2, CH_4, CO, CO_2). Максимальная температура в реакторе составляла 600°C при скорости нагрева 250 °C/мин.

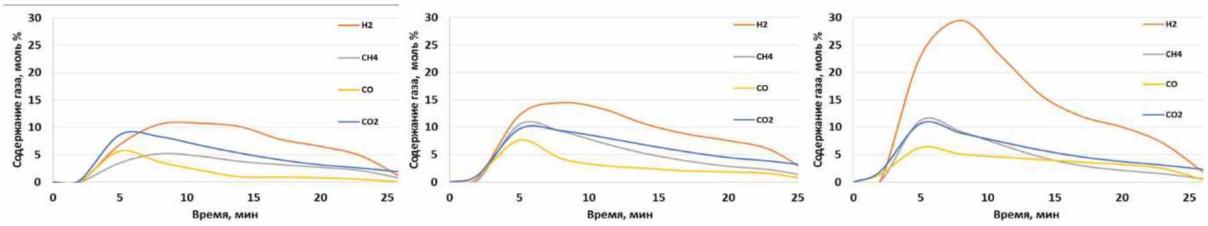


Рис. 1. Содержание газов при индукционном нагреве в инертных условиях: 1а) смеси угля с железными опилками, 1б) смеси угля со стальными шариками, 1в) смеси угля со стальными шариками, с дополнительным слоем железных опилок.

Наблюдается значительное увеличение (до 2-х раз) содержания водорода в синтез-газе при нагреве смеси стальных шариков и угля, над которой расположен слой железных опилок. Это объясняется разложением образующихся жидких продуктов пиролиза на поверхности железа, что подтверждается снижением содержания образующихся смол. Исследован состав газообразных, жидких и твердых продуктов пиролиза с помощью газовой хроматографии, хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС), синхронного термического анализа (ТГ/ДСК-МС).

Список литературы

1. Midilli, A., Kucuk, H., Topal, M. E., Akbulut, U., Dincer, I. A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities // International Journal of Hydrogen Energyю – 2021. – V.46. – P. 25385-25412.
2. Matamba, T., Iglauer, S., Keshavarz, A. A progress insight of the formation of hydrogen rich syngas from coal gasification // Journal of the Energy Institute. – 2022. – V. 105. – P. 81-102.
3. Muley, P. D., Henkel, C., Abdollahi, K. K., Marculescu, C., Boldor, D. A critical comparison of pyrolysis of cellulose, lignin, and pine sawdust using an induction heating reactor // Energy conversion and management / - 2016. – V.117. – P.273-280.
4. Sabogal, O. S., Valin, S., Thiery, S., Salvador, S. Design and thermal characterization of an induction-heated reactor for pyrolysis of solid waste // Chemical Engineering Research and Design. – 2021. – V. 173. – P.206-214.

УДК 536.3

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ РАЗРЫВОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВЕРХОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА

Перминов В.А. [1], Касымов Д.П.[2], Голубничий Е.Н. [2]
[1] Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
[2] Томский государственный университет, г. Томск, Россия

На практике для защиты и охраны лесов от пожара используются лесопожарные разрывы и заслоны. Лесопожарный заслон представляет собой лесную полосу из деревьев негоримых лиственных пород, а кроме того, может быть реализован созданием переувлажненной полосы перед фронтом пожара из тех же пород деревьев, что и основной участок. Эти полосы препятствуют распространению верховых и низовых лесных пожаров.

Рассматривается нестационарная задача о зажигании лесного массива и возникновения верхового лесного пожара.

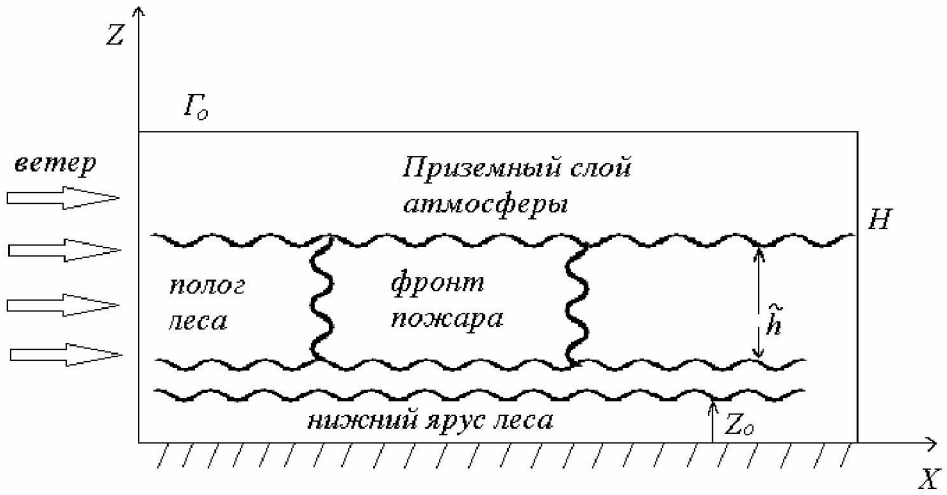


Рис. 1. Фотография эксперимента по взаимодействию группы горящих частиц с образцом древесины сосны

С использованием разработанной математической модели проведены расчеты, показывающие зависимость массовой концентрации кислорода и газообразных горючих продуктов пиролиза; распространение фронта пожара при различных скоростях ветра в различные моменты времени; зависимости длины противопожарного разрыва от скорости ветра при различных значениях влагосодержания ЛГМ. Верификация предложенной математической модели производилась на основании серии экспериментальных исследований по моделированию фронта горения с учетом противопожарных разрывов с переменными параметрами (ширина, запас ЛГМ, влагосодержание).

Полученные результаты и зависимости позволяют получить критические условия распространения верхового лесного пожара при заданных размерах разрыва, значениях влагосодержания и запаса ЛГМ, скорости ветра, что, в свою очередь, дает возможность применять такой метод расчетов для профилактики и разработки новых методик тушения и предотвращения лесных пожаров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-21-00069).

УДК 536.46; 661.21

ВЛИЯНИЕ УГОЛЬНОЙ ВЗВЕСИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ И НИЖНИЙ КОНЦЕНТРАЦИОННЫЙ ПРЕДЕЛ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В МЕТАНОВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ

Пинаев А.В.[1)], Пинаев П.А.[1)]

[1)] Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Параметры детонации и волн горения в смесях метан/воздух и метан/уголь/воздух близки между собой, массовая доля сгоревшего угля не превышает 20% от стехиометрии – основное энерговыделение в зоне реакции волн происходит за счёт горения метана.

Данные о нижнем концентрационном пределе распространения (НКПР) пламени метана в воздухе отличаются у разных авторов (α^* = 5÷5.95% (об.)). Для смесей CH_4/воздух при распространении пламени вверх, горизонтально и вниз в закрытых трубках α^* = 5.35, 5.40 и 5.95% (об.) соответственно [1]. Распространение пламени вниз (поджигание сверху) наиболее затруднено из-за всплывающих кверху более лёгких продуктов горения.

Может ли возникнуть или усилиться неустойчивость пламени и понизиться метановый НКПР пламени в бедной метановоздушной смеси с добавками угольной взвеси? Для ответа на этот вопрос исследованы смеси с концентрацией метана $\alpha \leq 5\%$ (об.). Опыты выполнены при атмосферном давлении в закрытой вертикальной ударной трубе длиной L 6.75 м, диаметром d 70 мм ($L/d \approx 96$). Трубу заполняли смесями газов и взвесью угля (размер частиц 0÷200 мкм, концентрация пыли $\rho_0 \approx$ 50÷900 г/м^3). Горение возбуждали искрой или раскалённой спиралью, в опытах регистрировали профили свечения с фотоумножителей и сигналы с пьезодатчиков. Волны горения снимали видеокамерой FASTCAM SA5 с частотой 60÷1000 кадр/с.

Установлено, что пламя не распространяется сверху вниз в вертикальном закрытом канале в газовых и газоугольных смесях с содержанием метана $\alpha \leq$ 5-5.5% (об.), и распространяется при $\alpha \geq$ 6% (об.). В двухтопливной гетерогенной смеси (6%CH_4+94%воздух)/уголь по сравнению с волной горения в газовой смеси 6%CH_4+94%воздух существенно возрастает яркость пламени. В смесях (6%CH_4+94%воздух)/уголь обнаружены два режима распространения пламени – с короткой и длинной областью свечения. Пламя с коротким свечением в виде кругового диска движется равномерно. Во втором режиме, при большей концентрации угольной взвеси, возникает неустойчивость пламени в виде сильных продольных колебаний со знакопеременной скоростью, пламя распространяется быстрее короткого пламени. При 9.5 > α > 6 % (об.) колебания пламени сохраняются, добавление угольной взвеси в газовую смесь не увеличивает скорость волны горения, влияние ρ_0 на скорость пламени не обнаружено.

В открытой с одного конца прозрачной трубке d 40 мм, L 60 см исследованы возможность существования и характер распространения пламён в газообразных смесях CH_4/воздух с содержанием метана 9.5÷5.5% (об.) и в тех же газовых смесях с взвешенной угольной пылью. Установлено, что пламя распространяется в горизонтальной трубке в газовых смесях с $\alpha \geq 6\%$ и в газоугольных смесях с $\alpha \geq 5.5\%$. Т.е. присутствие в газовой смеси угольной взвеси увеличило метановый НКПР пламени. В гетерогенной смеси αCH_4/воздух/уголь по сравнению с волной горения в газовой смеси αCH_4/воздух возрастает яркость пламени. Усреднённые скорости пламени в смесях возрастают с увеличением доли метана. Наличие угольной взвеси практически не влияет на скорость пламени, способствует усилению продольных колебаний скорости фронта пламени и уменьшает НКПР пламени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2024-543 от 24.04.2024.

Список литературы

[1] Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах // М.: Мир. 1968, 592 с.

О ПРИМЕНЕНИИ ГАЗОВЫХ ЗАВЕС ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ СТЕН КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ДОЖИГАЮЩИХ УСТРОЙСТВ КОТЛОВ-УТИЛИЗАТОРОВ ПГУ

Полонский В.С., Горр Д.А., Швецов О.Н., Поздеев Д.Д.
ООО "СКБ котельных установок", Комсомольский просп., д.40, г. Барнаул, 656056 Россия

В ближайшие годы энергоблоки ПГУ в России будут создаваться на базе отечественных ГТУ и ПГУ. С целью увеличения их КПД целесообразно повышение температуры выхлопных газов ГТУ и параметров пара ПГУ. Для этих целей имеет смысл использовать дожигающие устройства (ДУ) в котлах-утилизаторах (КУ). В настоящее время нет нормативной базы для проектирования ДУ. Отсутствует также общепринятый подход для системы охлаждения стенок камеры сгорания (КС) ДУ. Возможное охлаждение стенок КС ДУ с помощью газовых завес было рассмотрено в [1].

На основе теории газовых завес научной школы Кутателадзе С.С. – Леонтьева А.И. и прикладных разработок Г. Лефевбре (H. Lefevbre) для ГТУ была предложена модель расчёта температурного режима внутренней обшивки КС ДУ. Определяемыми параметрами являются – размер щели вдува холодного газа и температура стенки по длине КС. Расчётная температура стенки не должна превышать допустимую температуру для применяемой стали внутренней обшивки КС ДУ. Регулированием размера щели достигается выполнение этого условия. Определяющими параметрами при этом подходе являются эффективная температура и длина факела (пламени) в КС ДУ.

Применительно к условиям работы КС ДУ (примерные объёмные концентрации – $O_2 \approx 12\%$, $N_2 \approx 76\%$, $H_2O \approx 8\%$, $CO_2 \approx 4\%$) рекомендации по расчёту этих параметров в открытой литературе практически отсутствуют. Поэтому для их оценки использовались результаты промышленных испытаний ряда КУ на природном газе при различных тепловых нагрузках и геометрии КС. Для контроля температурного режима боковых стен на внешней стороне обшивки устанавливались термопары. Измерялась также температура дистанционирующей гребёнки первой поверхности нагрева на выходе ДУ.

С целью оценки длины пламени производилась кино/фотосъёмка работы микрофакельных горелок КС ДУ. Для обработки полученных данных предложена аппроксимация на базе модели [2] с коррекцией на реальные концентрации O_2 и балластных газов. Температура пламени рассчитывалась по рекомендациям [3]. Сравнение расчётных и измеренных значений температуры и длины факелов, а также температуры боковых стенок КС ДУ показало, что модель охлаждения посредством газовой завесы вполне удовлетворительно описывает результаты промышленного эксперимента.

Список литературы

1. Полонский В.С., Горр Д.А. Плёночное (завесное) охлаждение стенок камеры сгорания дожигающих устройств котлов-утилизаторов ПГУ, Энергетик, 2021, N10, с.13-20
2. Полежаев Ю.В., Мостинский И.Л., Горяинов Д.А. Диффузионный режим горения, глава 2 в монографии "Законы горения"/Под общ. ред. Ю.В. Полежаева. М.: Энергомаш, 2006. -352с.
3. Хайрулин С. М. Совершенствование теплового состояния жаровых труб и температурного поля на выходе высокофорсированных камер сгорания энергетических газотурбинных установок. Автореф. Дисс. … канд. техн. наук. – СПб., 2004

УДК 614.84, 662.612

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО ОЧАГА ПОЖАРА В БАГАЖНОМ ОТСЕКЕ САМОЛЕТА

Пономарев А.А.[1)], Мулляджанов Р.И. [1)]

[1)] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Одной из наиболее актуальных тем развития транспортной пожаробезопасности является применение численных методов расчета для анализа и оценки рисков возникновения и динамики распространения пожаров. Для выполнения данной задачи были созданы программные комплексы специализированные на численных методах расчета. Одной из наиболее популярных программ в этой области является программный комплекс Fire Dynamic Simulator (FDS)[1].

В 2002 году на основе эксперимента Federal Aviation Agency (FAA) по горению пластика в виде брикета размером 0.1 x 0.1 x 0.025 м^3, состоящим из шести различных пластиков: полиэтилен, поливинилхлорида, нейлона, полистерена, термополиуретан, полибутилентерефталата[2], в багажном отсеке самолете Boeing-737 была выполнена валидация расчета динамики очага пожара в программном коде FDS. Данный очаг заявлялся как «универсальный» источник огня, так как его состав подобран под усредненный состав багажа пассажиров, а также ввиду возможности создавать как пламенное горение, так и выделять достаточного количества дыма. Данные расчета согласуются с данными эксперимента, однако в некоторых параметрах отличия значительны. В валидации для описания химической кинетики применялась одностадийная реакция для химического вещества $C_1H_{12.2}$ с массовыми долями выхода CO и сажи 0.065 и 0.12, соответственно. Данное вещество не соответствует реальному составу очага в эксперименте. Кроме того, работы в области исследования кинетики пластиков указывают на то, что одностадийной реакции газификации некоторых твердых пластиков недостаточно для точного описания их скорости горения и пиролиза[3].

В данной работе на основе экспериментальных данных FAA выполнен расчет цифрового двойника «универсального» очага пламени на основе уточненной химической кинетики и процессов пиролиза твердых пластиков.

Список литературы

1. Official FDS site https://www.nist.gov/services-resources/software/fds-and-smokeview
2. Blake D. R. Development of a standardized fire source for aircraft cargo compartment fire detection systems. – US Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Office of Aviation Research and Development, 2006.
3. Silvarrey L. S. D., Phan A. N. Kinetic study of municipal plastic waste //International journal of hydrogen energy. – 2016. – Т. 41. – №. 37. – С. 16352-16364.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543.

УДК 544.452, 536.7

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНУСНОГО ПЛАМЕНИ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В СЛАБОМ ПОПЕРЕЧНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Пономарев А.А.[1),2)], Мулляджанов Р.И.[1),2)], Дулин В.М.[1),2)]

[1)] Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

[2)] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Изучение особенностей поведения пламен при воздействии на них внешним полем особенно интересно с точки зрения управления режимами горения. В работе Zake, Turlas, Purmals [1] показано, что под действием электрического поля возможно уменьшение выбросов вредных продуктов горения, таких как NO_x и сажа. На- данный момент имеется множество экспериментальных работ в этой области, посвященных определению выбросов вредных продуктов горения [2], оценки влияния электрического поля на скорость горения различных смесей [3,4].

Для точного описания поведения пламен в электрическом поле необходимо полноценно учитывать дрейф заряженным частиц и объемное распределение ионов и электронов. Однако в области численного моделирования имеется относительно небольшое количество работ посвященных данной проблеме. В основном, данные работы связаны с моделированием пламени в упрощенных конфигурациях, таких как осесимметричные задачи [5] или двумерные задачи [6]. При этом в литературе авторами не было обнаружено работ посвященных изучению особенностей горения конусных пламен.

В данной работе было выполнено численное исследование особенностей пламени метановоздушной смеси в слабом поперечном электрическом поле методом прямого численного моделирования. Для учета динамики заряженных частиц использовался механизм GRI3.0 [7] с добавлением кинетики ионов H_3O+, e-, HCO+, C_2H_3O+, CH_5O+, CO_3-, CHO_2-, CHO_3-, O-, O_2-, OH- согласно [8]. Подвижность заряженных частиц вычислялась по формуле Эйнштейна, которая учитывает температурную зависимость:

$$\mu = qD/kT;$$

где q — заряд частицы, D — коэффициент диффузии, k — константа Больцмана, T — температура.

По итогу численных расчетов было получено распределение заряженных частиц в пламени, распределение электрического поля и объемной силы действующей на поток. Также получено распределение линий тока, поля температуры, скорости, давления и плотности.

Список литературы

1. Zake M., Turlajs D., Purmals M. Electric field control of NOx formation in the flame channel flows //Global Nest: The Int. J. – 2000. – Т. 2. – №. 1. – С. 99-108.
2. Vatazhin A. B. et al. Effect of an electric field on the nitrogen oxide emission and structure of a laminar propane diffusion flame //Fluid dynamics. – 1995. – Т. 30. – №. 2. – С. 166-174.
3. Van Den Boom J. et al. The effect of a DC electric field on the laminar burning velocity of premixed methane/air flames //Proceedings of the Combustion Institute. – 2009. – Т. 32. – №. 1. – С. 1237-1244.
4. Fang J. et al. Effects of electric fields on the combustion characteristics of lean burn methane-air mixtures //Energies. – 2015. – Т. 8. – №. 4. – С. 2587-2605.
5. Ricchiuti V. OpenFOAM simulations of impinging coflow flames, including chemi-ionization and electric fields. – University of California, Irvine, 2016.
6. Belhi M. et al. A computational study of the effects of DC electric fields on non-premixed counterflow methane-air flames //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2017. – Т. 50. – №. 49. – С. 494005.
7. Официальный сайт GRi3.0 (http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/version30/text30.html)
8. Prager J., Riedel U., Warnatz J. Modeling ion chemistry and charged species diffusion in lean methane-oxygen flames //Proceedings of the Combustion Institute. – 2007. – Т. 31. – №. 1. – С. 1129-1137.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант No 22-19-00803). Использование инфраструктуры предоставлено в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

УДК 662.939

ОСОБЕННОСТИ ТОПОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ В КОТЛАХ С ИНВЕРСИОННОЙ ТОПКОЙ

Пузырев Е.М.[1)], Сурин Д.Е.[2,4)], Маслов К.В.[3)], Хуторненко С.Н.[2,4)]

1) ООО «ПроЭнергоМаш-Проект», г. Барнаул, Россия.
2) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул, Россия.
3) ООО «Энергомаш Инжиниринг», г. Барнаул, Россия.
4) Барнаульское ОП ООО «Интер РАО – Инжиниринг», г. Барнаул, Россия.

Компоновка котлоагрегата и его отдельных элементов, особенно топочного устройства, подразумевает взаимное расположение газоходов и размещение в них его отдельных поверхностей нагрева и основывается на рассмотрении достаточно большого количества, в том числе, традиционных схем. Конкретный выбор компоновки обычно является первым шагом при проектировании котлоагрегатов. Он основан и должен выбираться с учётом ограничений, например, имеющегося здания или площадки строительства, характеристик котла по производительности и параметрам пара, а также вида и характеристик топлива, особенно влажности, зольности, выхода летучих, а также плавкостных характеристик золы для твердых типов топлив или горючих отходов. В энергетических агрегатах различают несколько компоновок: П-, Г-, Т-, N-образные и башенная компоновки. Каждая из компоновок имеет собственные положительные свойства. Например, наиболее часто используется П-образная компоновка, которая имеет следующие достоинства: подача топлива, горелки и выход дымовых газов расположены внизу, кроме того используется одна конвективная шахта.

Не менее важна компоновка топочной камеры, включая топочно-горелочные устройства, так как типично топка занимает большую часть всего объёма котлоагрегата. При этом, для уменьшения габаритов котла, целесообразно принимать меры для эффективного использования экранов, но при сохранении экономических и экологических характеристик. Среди наиболее применяемых топок, в которых используются угловые (тангенциальные) горелки и горелки с L- и U- образным факелом в докладе выделены и подробно рассмотрены инверсные топки с потолочным расположением горелок. Инверсные топки наиболее часто применяются в зарубежной энергетике и устанавливаются в котлоагрегатах с различной компоновкой U-, L-, M- и W- образной, выбираемой в зависимости от характеристик топлив и мощности котлов.

При этом котлы могут сжигать газообразное, жидкое и пылевидное топливо, в том числе сильно шлакующие сланцы и бурые угли, быть водогрейными либо паровыми, с естественной или принудительной циркуляцией, то есть в какой-то мере, схемы с инверсными топками являются универсальными. В этих котлах не используют высокотемпературное удаление шлака в жидком виде, то есть они изначально имеют более высокие экологические характеристики.

Особенно эффективно применение подобных котлов для мощных блоков СКР, на суперкритических и более высоких параметрах пара. Котлы имеют небольшую высоту, часть золы выгружается сразу в повороте за топкой, а большинство поверхностей нагрева находятся дальше, в восходящем потоке и они мало подвержены износу золой и зашлаковыванию и это увеличивает их ресурс работы. Наиболее подверженные шлакованию ширмы и пароперегреватели расположены внизу, в поворотной камере, в легко доступной для обслуживания зоне.

Расположенные на потолке топочной камеры горелки с большими выходными скоростями воздуха и аэросмеси ограничивают возможность взаимодействия факелов с ограждающими экранами и их шлакование. Факела эффективно и равномерно заполняют объем топочной камеры и организуют за счёт присосов интенсивную рециркуляцию дымовых газов в корень факела, а горящие газовые потоки за счет меньшей плотности увеличивают свое пребывание в топке. В итоге инверсные схемы компоновки топочной камеры обеспечивают лучшее охлаждение и создают возможности для значительного увеличения экологических и экономических характеристик котлов.

УДК 662.926: 662.939

РАЗРАБОТКА ШАХТНЫХ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Пузырёв Е.М., Афанасьев К.С., Голубев В.А.
ООО «ПроЭнергоМаш-Проект», г. Барнаул, Россия. www.pem-energo.ru

Борьба с метановой опасностью жизненно важна и обостряется из-за углубления шахт, интенсификации проходки и повышения выделения метана из горного массива, что является общей тенденцией при шахтной добыче угля. Разработка усовершенствованных воздухонагревательных установок (ВНУ) особенно актуальна для условий России, так как на основе статистики выявлено, что наибольшее число аварий из-за взрыва метана, сопро-вождающихся жертвами, около 80%, у нас произошло именно в отопительный период.

Россия имеет четвертое место в мире по запасам угля, включая невскрытые. На 2022 год по добыче угля она уверенно занимает шестое место в мире и третье место, с долей около 15%, на международном рынке по его экспорту. При этом из обзора общей ситуа-ции и принципов работы ВНУ также следует, что уголь по-прежнему важен как почти иде-альное топливо и сырьё. В России его добыча расширяется, причем с заходом на припо-лярные территории, и создание экономически и экологически эффективного котельно-топочного оборудования, действующего в составе ВНУ, нам необходимо как сейчас, так и в дальней перспективе.

Мощности шахтных ВНУ достигают десятков МВт, они выполняются как теплоэнер-гетические комплексы, занимают большие площади и могут иметь теплотрассы, так как должно быть не менее 30 м от дымовой трубы до места забора вентвоздуха.

В докладе значительное место отведено классификации ВНУ с рассмотрение принци-пов их действия. В наиболее распространённых ВНУ-К, «котельная – калорифер», в каче-стве теплоносителя применяются вода – ВНУ-Кв, пар – ВНУ-Кп, а в нашей схеме ВНУ-Ка для защиты ВНУ от размораживания используют антифризы нового типа. Достаточно распространены также ВНУ с воздухоподогревателем – (ВП), ВНУ-ВП. Их производит ОА «Кемеровский экспериментальный завод средств безопасности» – (КЭЗСБ). В Китае Харбинский теплоэнергетический завод Дантун произвел более 100 установок типа WRL. ВНУ-ВП типа LRF предлагает ARV-GROUP. В итоге Китай продает эти более эффектив-ные ВНУ-ВП, причём в комплекте с шахтными вентиляторами KANAM и другим обору-дованием, взамен, как ими указано, наших малоэффективных, что ставит отечественных производителей ВНУ в невыгодное положение.

В ВНУ обычно используется энергия сгорания угля, дополнительным признаком в классификации предлагается использовать тип источника энергии: ВНУ-Э – электроэнер-гия; ВНУ-Г – горючие газы; ВНУ-ВТ – вторичные энергоресурсы; ВНУ-ВИЭ – возобнов-ляемые и др. Наиболее широкую группу ВНУ представляют комбинированные варианты из различных типов ВНУ. Так, комбинация ВНУ-К и ВНУ-ВП позволяет иметь, надёжно работающую ВНУ-К/ВП с охлаждаемой экранами топкой. Сжигание с углем шахтного ме-тана в виде подсветки, ВНУ-К/Г и ВНУ-ВП/Г, снижает проблему дегазации шахт.

В итоге из классификации видна возможность применения большого разнообразия технических решений, путей развития и совершенствования ВНУ, и то, что её введение необходимо. Так развивается любое направление, в том числе и в технических науках.

Рассмотрены пути улучшения, необходимые для удержания на нашем рынке ВНУ. Это снижение объёма инвестиций в строительство ВНУ, затрат на топливо, повышение надёжности, экологической и экономической эффективности ВНУ-ВП, с низким КПД. Проведён анализ классификации, проблем и недостатков отечественных разработок, названы причины их низкой эффективности, включая осмотры и испытания оборудования в промышленных условиях. Разработаны новые технологические схемы и принципы орга-низации топочного процесса. Эксплуатацией подтверждено, что новые комплексы ВНУ-К и ВНУ-ВП, обеспечивают надежность и повышение эффективности. Причем экономич-ность обеспечивается, в том числе, за счёт вовлечения в топливный баланс углесодержа-щих отходов шахт и обогатительных фабрик.

УДК 662.926: 662.939

ПОДАВЛЕНИЕ ЗОЛОВЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В КОТЛАХ НА ПОДСОЛНЕЧНОЙ ЛУЗГЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭКОНОМИЧНОСТЬ МЭЗ

Пузырев М.Е., Пузырёв Е.М., Голубев В.А.
ООО «ПроЭнергоМаш-Проект», г. Барнаул, Россия. www.pem-energo.ru

Подсолнечная лузга является сухим, качественным, однородным по составу, простым в обращении биотопливом, требующим утилизации. Однако сжигание связано с проблемами: вынос недогоревших частиц и отложения золы, приводящие к вынужденному остановку котла и значительному снижению эффективности работы энергетической установки.

Из-за золового загрязнения и плохого тепловосприятия количественные показатели и эффективность работы котла снижаются, дымосос и другие механизмы работают неэффективно, на пределе возможного, а процедура очистки требует длительного расхолаживания котла, 1-2-е суток. Выполнена оценка финансовых затрат вызванными необходимостью очистки остановами лузгового котла.

В расчете лузга, как отход, вывозится на полигон, а выработка пара осущетсвляется газовым резервным котом. В базовом варианте при останове котла каждые 7 суток затраты составляют, млн.руб/год: 24,46 в варианте с вывозом на собственный полигон и 33,68 при вывозе на специализированный. Увеличение межочистного периода снижает затраты:до 15 суток – на 49%; до 30 суток – на 73%; до 60 суток – на 85%;

Таким образом, продолжительность рабочей компании до останова котла на очистку можно считать одним из наиболее значимых показателей эксплуатационных качеств котла. А достижение условий, требующих останова для очистки – лимитирующим фактором.

На основе промышленных испытаний котла КЕ-10-14 до и после его реконструкции с установкой вихревой топки (ВТ) «Торнадо» и обдувочных аппаратов построена диаграмма (рисунок 1), демонстрирующая прирост толщины отложений. В котле без устройств вывода золы и шлака их накопление происходит практически линейно и быстро достигает критического количества.

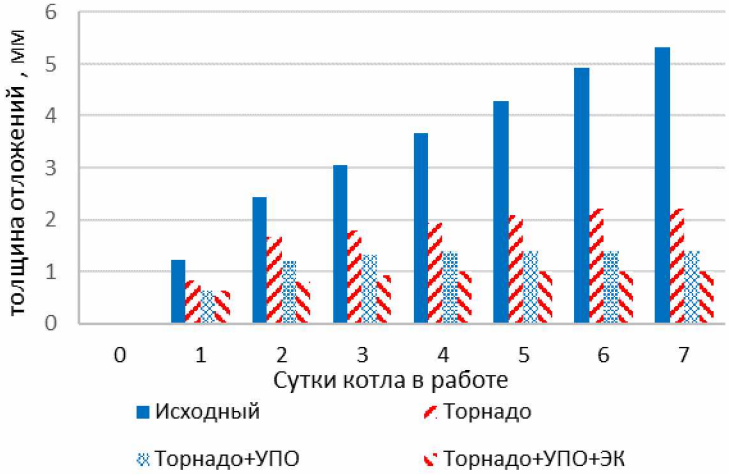


Рисунок 1 – Толщина отложений в котле с неохлаждаемой ВТ, в ВТ «Торнадо» и с учетом работы обдувочных аппартов в конвективном пакете и экономайзера с шахматным пучком

Применение ВТ «Торнадо» позволяет стабилизировать количество отложений и обеспечить безостановочную работу котла, и повысить эффективность разработанным комплексом мер, включающим: устройства выгрузки золы из ВТ; обдувочные аппараты адаптированные под место установки с разным агентом; виброочистка, ударно-волновая, газоимпульсная для экономайзеров.

УДК 536.468

ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

Романов Д.С.[1,2], Скорюпин В.В. [1], Стрижак П.А. [1,2], Вершинина К.Ю. [1]

[1] Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

[2] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Ископаемые топлива в энергетическом секторе по сей день является одними из основных источников получения тепловой и электрической энергии. Доля энергии, генерируемой при использовании угля близка к 30%, что является промежуточным значением между долями энергогенерации при использовании нефти ≈32% и природного газа ≈20%. Ежегодно регистрируется прирост не только нефте- и газодобычи, но и угля. Основными потребителями угля являются электростанции, на которые приходится около 70% добываемого угля. При этом около 18% добываемого угля используется в качестве топлив для объектов малой энергетики (малые объекты энергогенерации), около 10% угля используют при коксовании и лишь 2% подвергается другим видам термохимической конверсии (пиролиз и газификация). Данная особенность обуславливается тем, что используемые технологии уже устаревшие и требуют больше ресурсов для получения высокого КПД. В следствии чего потребление энергоресурсов и загрязнение окружающей среды становится значительно выше. Основными проблемами, возникающими в последние годы является истощение энергоресурсов и повышение эффективности использования ископаемых топлив на объектах энергогенерации.

Решением данных проблем является конверсия высокосортного и низкосортного угля, а также отходов его переработки и обогащения. Основными методами термохимической конверсии для производства энергии являются пиролиз, газификация и сжигание. Прямое сжигание на данный момент является устаревшей технологией выработки энергии в отличии от газификации и пиролиза. При этом альтернативные варианты выработки энергии, например использование композиционных топлив в качестве замены традиционным ископаемым топливам представляют особый интерес для энергогенерирующих предприятий.

Использование смесевых топлив является одной из перспективных задач, способствующих расширению сырьевой базы, и требует изучения влияния различных компонентов топливной смеси на качественные и количественные показатели экологичности топлива в процессе сжигания.

Целью исследования является изучение особенностей термического разложения композиционных топлив и их компонентов в высокотемпературной среде окислителя. В качестве компонентов композиционных топлив использовались каменные угли марок «К» и «СС», бурый уголь марки «Б2». В качестве жидких компонентов использовалось дистиллированное талловое масло, рапсовое масло и отработанное моторное масло.

В работе определены диапазоны изменения концентраций состава антропогенных выбросов при сжигании композиционных жидких топлив и их компонентов. Полученные результаты позволили оценить синергетический эффект совместного термического разложения смесевых топлив в широком температурном диапазоне и определить вклад каждого из компонентов на качественный и количественный состав газовых выбросов. Результаты исследования могут быть полезны при разработке котельных агрегатов, модернизации технологий топливо сжигания и моделировании процессов тепломассопереноса в топочных камерах.

Исследование поддержано грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение №075-15-2024-543

Список литературы

1. Filippov S.P., Keiko A.V. Coal Gasification: At the Crossroad. Technological Factors // Therm. Eng. – 2021. – V. 68. – P. 209–220.
2. Coal – World Energy Outlook 2019 – Analysis - IEA n.d.
3. Saxena R.C., Seal D., Kumar S., Goyal H.B. Thermo-chemical routes for hydrogen rich gas from biomass: A review // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2008. – V. 12. – P.1909–1927.
4. Keskin A., Gürü M., Altiparmak D. Influence of tall oil biodiesel with Mg and Mo based fuel additives on diesel engine performance and emission// Bioresour. Technol. – 2008. – V. 99. – P. 6434-6438.

УДК 662.9

СИСТЕМА СЖИГАНИЯ УГЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОВОРОТНЫХ ГОРЕЛОК

Рыжий И.А.[1)], Штегман А.В.[1)], Сосин Д.В.[1)]
[1)] Всероссийский теплотехнический институт, г. Москва, Россия

По состоянию на 2024г существенную долю в топливном балансе энергетики РФ по-прежнему занимает уголь. Годовая добыча угля в РФ существенно выросла за последние годы и составляет 430-435 млн.т/год. Значительная часть этого объёма поставляется на электрические станции: в 2023г на ТЭС было отгружено 107,7 млн.т угля (включая 17,2 млн.т угля, импортированного из Казахстана) [1]. Существующие тенденции говорят о том, что сжигание угля в энергетических котлах РФ будет актуально ещё долгие годы.

Одной из основных проблем, с которой сталкивается современная угольная ТЭС, является существенный диапазон колебания характеристик поставляемого топлива. Это приводит к проблемам, связанным с изменением режимов горения. К ним относятся изменение температуры газов на выходе из топки в широком диапазоне, трудности с поддержанием стабильного значения температуры перегретого пара, шлакование поверхностей нагрева, ухудшение эффективности сжигания и др.

Расчётные исследования на примере котла БКЗ-210-140 Томской ГРЭС-2 показали, что температура газов на выходе из топки при существенном изменении характеристик угля может колебаться в диапазоне 104°С при 100% нагрузке и в диапазоне 81°С при 50% нагрузке. Одним из способов решения описанной проблемы является реализация системы сжигания с возможностью регулирования вектора направления факела по высоте. Диапазон поворота горелки ±15° позволит регулировать значение температуры газов на выходе из топки в диапазоне ~90-100°С.

Ключевым элементом системы сжигания является вихревая поворотная горелка. На рис. 1 представлена конструкция поворотной горелки, разработанной под условия работы котла БКЗ-210-140 с возможностью сжигания угольной пыли и природного газа.

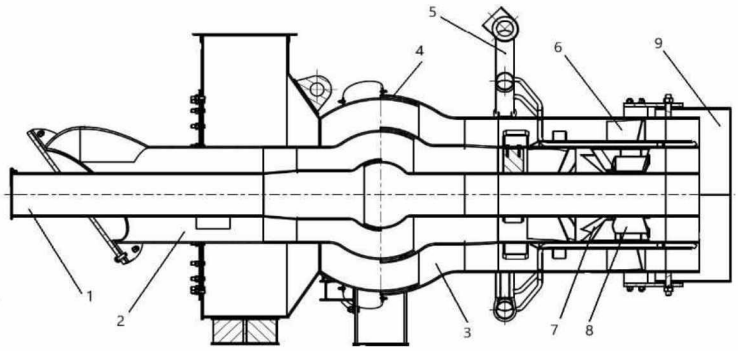


Рис. 1. Боковой вид горелки в разрезе (1 – канал запальника; 2 – канал аэросмеси; 3 – канал вторичного воздуха; 4 – узел сопряжения; 5 – газовый коллектор; 6 – завихритель воздуха; 7 – завихритель аэросмеси; 8 – рассекатели потока аэросмеси; 9 – выходная насадка для горизонтального поворота на ±5°)

Для поворота горелки в вертикальной плоскости на ±15° используется гидравлическая станция, оснащённая двумя гидравлическими цилиндрами. В канале аэросмеси горелки установлены рассекатели потока, обеспечивающие снижение образования оксидов азота NO_x [2]. Опытный образец горелки установлен на котле БКЗ-210-140 Томской ГРЭС-2.

Список литературы

1. Мешков Г.Б., Петренко И.Е., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за 2023 год // Уголь, №3, 2024. С 18-29.
2. Сосин Д.В., Рыжий И.А., Штегман А.В., Котлер В.Р. Успешная реконструкция котла П-57 блока 500 МВт Троицкой ГРЭС // Энергетик. 2014. № 4. С. 34–38.

УДК 620.9:532.5

О СХЕМАХ ПОЛУЧЕНИЯ «ЗЕЛЕНОГО» МЕТАНОЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЦИРКУЛИРУЮЩЕГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ

Рябов Г.А., Литун Д.С., Фоломеев О.М.

ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО ВТИ), г. Москва, Россия

Считается, что использование водорода является одним из главных направлений декарбонизации за 2030 годом При этом водород должен быть произведен с минимальным углеродным следом («зеленый» или «голубой» водород, то есть полученный при использовании возобновляемых источников или с улавливанием CO_2). Наряду с водородом предполагается применение метанола, также полученного без выбросов CO_2. Показано, что метанол является потенциально жизнеспособным топливом в контексте технологии Power-to-Fuels, где избыточная возобновляемая электроэнергия может быть преобразована в водород с помощью электролиза воды, а затем подвергнута реакции с CO_2 с образованием метанола. Дымовые газы от сжигания топлив могут обеспечить относительно концентрированный поток CO_2 для реакции метанации. Рассмотрены технологии получения метанола с минимальным углеродным следом. Наиболее предпочтительным топливом является биомасса, так как она углеродно-нейтральна (технологии BECCS). Интерес представляют и разработки схем получения метанола с использованием котлов с кипящим слоем при сжигании биомассы [1]. Другим важным направлением является объединение химических циклов с использованием биомассы и электролизом воды, которые могут быть наиболее перспективным способом получения CO_2 и H_2 для последующего производство метанола [2].

Для условий России с ограниченными возможностями использования энергии ветра и солнца при низких ценах на биомассу возможным направлением исследований гибридных систем является применение схем с сжиганием или газификацией биомассы с производством электроэнергии от этих процессов для электролиза с получением водорода. Предложены новые схемы на основе использования технологии циркулирующего кипящего слоя при сжигании и биомассы. Даны результаты оценок тепловых и материальных балансов. Помимо гибридных схем с электролизером и котлом с ЦКС рассмотрена схема с аллотермической газификацией и химическими циклами получения водорода [3]. Эта схемы фактически имеет несколько потоков осушенного CO_2 и поток водорода. Остается только дополнительно очистить генераторный газ от частиц в керамическом фильтре и убрать возможные остатки кислорода и соединений серы. Рассмотрены два варианта работы установки: вся установка, включая газификатор с циркулирующей массой, работает под давлением 2 – 3 МПа и вариант с работой газификатора при атмосферном давлении. Выполнена оценка габаритов реакторов. Показаны положительные и отрицательные стороны использования этих вариантов. Приведены технико-экономические оценки и сравнения с известными зарубежными данными по приведенной стоимости метанола за жизненный цикл работы установок [4]. Показано, что результаты наших разработок по стоимости «зеленого» метанола вполне укладываются в диапазон зарубежных данных.

Список литературы

1. Pratschner, S. Power-to-Green Methanol via CO_2 Hydrogenation — A Concept Study Including Oxyfuel Fluidized Bed Combustion of Biomass /S. Pratschner, P. Skopec, J. Hrdlicka and F. Winter // 1Energies, 2021, 14, 4638. https://doi.org/10.3390/en14154638.

2. V. Spallina, G. Motamedi, F. Gallucci, M. van Sint Annaland, Techno-economic assessment of an integrated high pressure chemical-looping process with packedbed reactors in large scale hydrogen and methanol production, Int. J. Greenh. Gas Control 88 (2019) 71–84, ttps://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.05.026

3. Д. С. Литун, Г. А. Рябов Расчетное обоснование системы получения водорода из биомассы с использованием газификации в химических циклах. Теплоэнергетика, № 2, 2024 г. С 90 – 106.

4. Pratschner, S. Power-to-Green Methanol via CO_2 Hydrogenation — A Concept Study Including Oxyfuel Fluidized Bed Combustion of Biomass /S. Pratschner, P. Skopec, J. Hrdlicka and F. Winter // 1Energies, 2021, 14, 4638. https://doi.org/10.3390/en14154638

УДК 620.9

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛА АЛЛАМА ПРИ РАБОТЕ НА СИНТЕЗ-ГАЗЕ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА

Садкин И.С.[1,2], Щинников П.А.[1]

[1] Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

[2] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В основе цикла Аллама лежит сжигание газообразного топлива в кислородной среде с получением в качестве продуктов сгорания CO_2 и H_2O, из которых образуют рабочее тело цикла [1]. Воду выводят из цикла в системе регенерации в процессе ее конденсации, а избыток CO_2 направляют на захоронение. Чистота углекислого газа, как и степень его улавливания, в данном случае стремится к 100%. Оставшаяся часть углекислоты рециркулирует в цикле и попадает в систему регенерации [2]. Так как обновление рабочего тела происходит в процессе сжигания топлива, характеристики (состав, теплота сгорания) данного топлива определяет состав и количество добавки рабочего тела в камере сгорания. Чем выше требуется температура рабочего тела, тем больше нужно подвести энергии, тем больше требуется сжечь топлива, и тем выше доля обновления/вывода рабочего тела. С другой стороны, доля обновления рабочего тела определяет баланс масс между потоками в системе регенерации, что влияет на сходимость энергетических балансов [3]. Таким образом, характеристики топлива непосредственно влияют на термодинамические и энергетические характеристики установок на основе CO_2 циклов.

В настоящем исследовании анализируются показатели эффективности цикла Аллама, как наиболее известного представителя семейства CO_2 циклов, от состава синтез-газа, а именно: соотношения CO-H_2-CO_2 в его составе.

На рис. 1 приводится расчетная кривая зависимости термического КПД цикла Аллама от состава CO-H_2 смеси для начальных параметров 300 бар, 1200 °C .

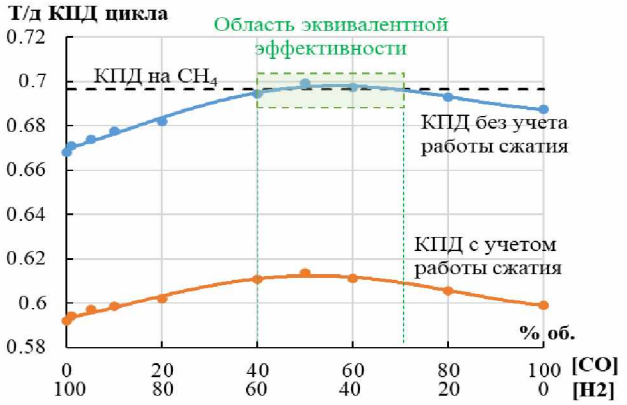


Рис. 1. Зависимость термического КПД цикла Аллама от состава сжигаемой смеси CO-H_2.

Результаты востребованы для выбора оптимальной системы газификации угля и технологии предварительной очистки синтез-газа при использовании в кислородно-топливных энергетических циклах на углекислом газе.

Список литературы

2. Алексеенко С.В., Щинников П.А., Садкин И.С. Влияние термодинамических параметров на энергетические характеристики CO2-циклов при кислородном сжигании метана // Теплофизика и аэромеханика. – 2023. – Т. 30, № 1. – С. 89-98.
2. Sadkin I.S., Shchinnikov P.A. Thermodynamic features of the regenerative system of direct fired sCO2 power cycles with oxygen combustion of methane // Applied Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 234. – P. 121301.
3. Sadkin I.S., Shchinnikov P.A. Influence of the Proportion of the Working Fluid Renewal on Semi-closed Oxy-Fuel sCO2 Power Cycles Efficiency Indicators // Arab J Sci Eng. – 2024. https://doi.org/10.1007/s13369-024-09286-x

УДК 620.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОДАЧИ ОКИСЛИТЕЛЕЙ-РАЗБАВИТЕЛЕЙ В КАМЕРУ ГАЗОГЕНЕРАЦИИ НА ГОРЕНИЕ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ

Садкин И.С.[1,2], Копьев Е.П.[1], Шадрин Е.Ю.[1]

[1] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

[2] Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Актуальной научно-технической задачей является развитие перспективных технологий производства энергии и двигателестроения с учетом целей ресурсосбережения и уменьшения антропогенного воздействия на окружающую среду. В работе изучаются характеристики горения жидкого углеводородного топлива в горелочном устройстве с добавлением газов-окислителей и газов-разбавителей в целях управления процессом горения для достижения сверхнизких выбросов CO и NOx [1]. В качестве разбавителей-окислителей используется азот, углекислый газ, перегретый водяной пар и кислород в различных соотношениях и способах подачи внутрь горелочного устройства [2, 3]. Принцип работы горелочного устройства основан на том, что в горелочное устройство через форсунку подается высокоскоростная струя газа-распылителя (водяной пар, углекислый газ или их смесь). Через топливоподающую трубку в основание паровой струи самотеком в виде тонкой струи подается жидкое топливо с заданным расходом. В результате взаимодействия газовой и жидкостной струй формируется однородный мелкодисперсный газокапельный поток. При этом, в камеру газогенерации принудительно подается воздух с добавлением CO_2, N_2, O_2 для инициации процесса горения и создания условий частичной газификации топлива. На рис. 1 приведена схема горелочного устройства.

Рис. 1. Схема распылительного горелочного устройства с принудительной подачей первичного дутья.

В ходе экспериментального исследования определяются профили температуры пламени, количество выделяемой теплоты, состав промежуточных и конечных продуктов сгорания топлива. Результаты могут быть востребованы для создания низкоэмиссионных горелочных устройств с целью утилизации некондиционных топлив (в рамках Waste-to-Energy технологий).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект №23-79-10029 (https://rscf.ru/project/23-79-10029/).

Список литературы

1. Мухина М.А., Садкин И.С., Копьев Е.П., Шадрин Е.Ю. Поиск режимных параметров для низкоэмиссионного сжигания жидких углеводородов при подаче окислителей-разбавителей // 40 Сибирский теплофизический семинар : сб. тез. докл. Всерос. конф. – Новосибирск : ИТ СО РАН, 2024. – С. 234.
2. Садкин И.С., Копьев Е.П., Шадрин Е.Ю., Мухина М.А. Исследование преимуществ сжигания жидких углеводородов в высокоскоростной струе перегретого водяного пара при сравнении с другими распылителями: CO2, воздух // Теплофизика и аэромеханика. – 2023. – Т. 30, № 1. – С. 115-126.
3. Sadkin I., Mukhina M., Kopyev E., et al. Low-Emission Waste-to-Energy Method of Liquid Fuel Combustion with a Mixture of Superheated Steam and Carbon Dioxide // Energies. – 2023. – Vol.16, №15. – P. 5745.

УДК 662.951.23

СНИЖЕНИЕ ГИСТЕРЕЗИСА ИЗБЫТКА КИСЛОРОДА ПРИ МОДУЛЯЦИИ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ БЛОЧНЫХ ГАЗОВЫХ ГОРЕЛОК

Саушин И.И.[1,2], Телешев М.И. [1], Телешев И.В. [1], Гольцман А.Е. [2],
[1] ООО «НПП Прома», г. Казань, Россия
[2] ФИЦ КазНЦ РАН, г. Казань, Россия

Уровень избытка кислорода в продуктах горения топливного газа является одним из основных измеряемых показателей работы горелочного оборудования в составе котлоагрегата [1, 2]. Этот параметр является определяющим сразу для двух важных характеристик: коэффициента полезного действия энергетической установки и концентрации оксидов азота (NOx). Расходы топливного газа и его окислителя в промышленных дутьевых блочных горелках регулируется набором устройств с начальным уровнем механического или электромагнитного гистерезиса, что в результате приводит к гистерезису состава сжигаемой смеси и, следовательно, к гистерезису концентрации кислорода в дымовых газах при модуляции тепловой мощности. По данным отчета [3] известного производителя промышленных блочных горелок Webster Combustion (США) даже для нового изделия (без системы автоматического позиционирования заслонок) при модуляции тепловой мощности уровень гистерезиса кислорода в дымовых газах составляет от 0.5% до 1%.

В данном исследовании представлены результаты анализа причин гистерезиса и возможные технологические решения по его уменьшению. Результаты исследования использованы для модернизации серийной блочной газовой горелке ПРОМА ЕММА-С2-1.8-50-Л-Г-У1-КС с номинальной тепловой мощностью 1.8 МВт (производства ООО «НПП Прома», Россия), рис. 1. Проведенные автономные лабораторные испытания и промышленные испытания работы горелки в составе котла LAVART-1500ML (производства ЗАО «ОмЗИТ», Россия) показали хорошее согласование измеренных величин гистерезиса избытка кислорода и эффективность принятых мер по его уменьшению, рис. 1.

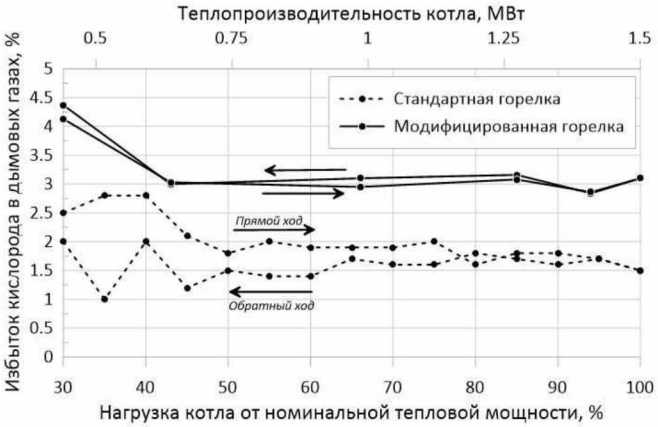


Рис. 1. Слева: блочная газовая горелка ПРОМА ЕММА-С2-1.8-50-Л-Г-У1-КС; справа: результаты измерения уровня избытка кислорода в дымовых газах при работе в составе котла LAVART-1500ML при промышленных испытаниях.

Список литературы

1. Bikić S. et al. Air torque position damper hysteresis // Flow Measurement and Instrumentation. – 2020. – Т. 71. – С. 101688.
2. Krakow K. I. Reduction of hysteresis in PI-controlled systems //ASHRAE Transactions. – 1998. – Т. 104. – С. 524.
3. Официальный сайт Webster Combustion – URL: https://www.webstercombustion.com/retrofit-burner-efficiency-savings-payback (дата обращения 29.05.2024).

УДК 536.46

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СРЫВА ПЛАМЕНИ В ФОРМЕ КОНУСА МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕТАЛЬНЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ

Сластная Д.А.[1)], Хребтов М.Ю.[1,2)], Мулляджанов Р.И.[1, 2)], Дулин В.М.[1, 2)]
[1)] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2)] Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Возникновение срыва или проскока пламени внутрь сопла является серьезной проблемой многих энергетических систем [1-3]. Эти явления могу привести к снижению срока службы оборудования, увеличению выбросов загрязняющих веществ и даже к аварийным ситуациям. Причиной нарушения стабильного горения пламени может стать некорректно подобранное соотношение между характерными временами переноса и химической кинетики. Данная работа направлена на исследование возможности моделирования срыва пламени с использованием кинетических механизмов разной сложности.

Вычисления проводятся на основе открытого расчетного кода OpenFOAM, где для разрешения гидродинамики используется метод конечных объемов в сжимаемой постановке. Задача решается в осесимметричной нестационарной постановке с учетом сил плавучести. Химическая кинетика определяется с помощью расчетного пакета laminarSMOKE [4], позволяющего учитывать детальные механизмы реакций. Данные об элементарных реакциях задаются отдельным файлом в формате CHEMKIN. Используемые кинетические механизмы содержат детальное описание химических реакций, происходящих в процессе горения, включая процессы цепного разветвления.

В работе исследуется реагирующий поток, образованный осесимметричным сужающимся соплом с выходным диаметром D = 15 мм (сопло с профилем Витошинского). На выходе из сопла предварительно перемешанная метановоздушная смесь имеет ударный профиль скорости. Коэффициент избытка топлива и число Рейнольдса варьировались. Вычислительная область представляет собой сектор цилиндра с углом раствора 5° (предполагается осевая симметрия течения). Вычислительная сетка состоит из 4×10^5 призматических ячеек, со сгущением на фронте пламени до 8 мкм. При этом, на толщину фронта пламени приходится порядка 10 узлов сетки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-19-00803.

Вычислительные мощности суперкомпьютера «Каскад» ИТ СО РАН / НГУ предоставлены в рамках государственного задания.

Список литературы

1. S. Candel. Combustion dynamics and control: Progress and challenges. Proc. Combust. Inst., 29(1):1–28, 2002.
2. T. Lieuwen. Unsteady Combustor Physics. Cambridge University Press, 2012.
3. T. Poinsot and D. Veynante. Theoretical and Numerical Combustion. Third Edition, 2011.
4. Cuoci A. et al. Numerical modeling of laminar flames with detailed kinetics based on the operator-splitting method //Energy & fuels. – 2013. – T. 27. – №. 12. – C. 7730-7753.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ - КАК ОСНОВНОЕ УСЛОВИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ НА БАЗЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ТОПКАХ МОЩНЫХ КОТЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГОРЕЛОК ТИПА ГМПВ «ЭКОТОП»

Соболев В.М., Шиндер Ю.К, Лупуляк С.В.

ООО «НТО «ЭКОТОП», г. Санкт-Петербург, Россия

Институт прикладной математики и механики СПбГПУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Основные технико-экономические показатели работы теплоэнергетического оборудования и требований экологической безопасности в значительной степени зависят от выбора горелок, однако сам выбор размещения горелок нередко приходится увязывать с существующей их компоновкой при техническом перевооружении, а также с учётом базовых характеристик конструкций топок котлов, принятых при их разработке заводами-изготовителями.

В заданных условиях применения мат. моделирования позволяет получить наглядную картину развития факела в топке с целью уточнения при необходимости как конструктивных характеристик горелок, так и технологических решений.

Математическое моделирование оценки выработки наилучшего решения проводилось в программном комплексе ANSISCFX (с учётом допущений, приведённых в статье [1]).

Была принята исходная конструкция котла Е-450. В качестве верификации результатов математического моделирования были использованы существующие инженерные методики, направленные на снижение выбросов NOx, а также результаты математического моделирования подобных котлов и опытных данных, в частности, котлов ТГМ-96 ТЭЦ -21 Мосэнерго, полученных совместно с ОРГРЭСи «ВТИ» (г. Москва) и ТГ-104 Сургутской ГРЭС-1 и др.[1].

Целью математического моделирования являлась разработка конструктивных решений и внутритопочных мероприятий по снижению выбросов NOx, не более 60 мг/нм^3 (приведённые к NO_2 и O_2= 3%).

Рассматривались с проведением трёхмерного математического моделирования топочного процесса котла Е-450 следующие основные этапы с использованием прямоточно-вихревых горелок типа ГМПВ-50 «ЭКОТОП»: с установкой 8-х горелок в 2-а яруса с фронта топки с увеличенной подачей газа через нижние горелки; с вводом через них рециркулирующих газов в смеси с воздухом, а также с подачей их части через сопла вторичного дутья над верхними горелками.

Из рассмотренных результатов математического моделирования было отмечено следующее:

Развитие факела при 2-х ярусном расположении горелок и их достаточно низком расположении: 2,4м. от пода топки – способствует активному заполнению нижней ее части продуктами горения. Из приведенных концентрационных полей в топке: O_2, CO_2, CH_4, CO, H_2O – наброса факела на экраны топки не следует ожидать.

При этом длина факела по глубине топки находится в пределах от 1/2 до 3/4 ее глубины в зависимости от яруса горелок. Длина факела при подаче рециркулирующих газов сравнительно меньше.

Из приведенных отображений образование NOx происходит на границе активной части факела, величина которой (NO_2) на выходе из топки составляет в режиме без рециркулирующих газов порядка 215 мг/нм^3 (α = 1,01). Это вполне коррелируется с расчетами по инженерной методике порядка 290 мг/нм^3 (α = 1,01) и данными, полученными на других объектах с подобными горелками, например, на котле ТГМ-104 (200÷250 мг/нм^3) [2].

Расчетная температура газов на выходе из топки составила 1212 °С (r= 0) и 1177 °С (r= 20%), а при подачи дополнительно части через сопла до 22% газовоздушной смеси – 1169 °С.

По данным теплового расчета температура на выходе из топки при номинальной нагрузке составляло 1169 °С (r = 15%), т.е. значения температур расчетной и согласно результатам мат. моделирования практически коррелируются.

Показано отсутствие зон высоких температур, которые могут образовываться при взаимодействии факелов соседних горелок. При этом усредненная расчетная температура в ядре факела при (r= 0) составляет порядка T ≈ 1850 К, при (r=20%) T ≈ 1730 К, при подаче части смеси через сопла ≈ 1700 К.

Величина NO_2 на выходе из топки в режиме с рециркуляцией (r ≈ 20%) падает согласно расчету до 12÷13 мг/нм^3. При подаче смеси через сопла – несколько меньше. Это объясняется тем, что энергия активации реакции образования оксидов азота из азота воздуха (термические оксиды азота) очень высока, поэтому они образуются при высоких температурах T ≥ 1500 °С. Поскольку подача дымовых газов рециркуляции вместе с воздухом в зону горения осуществляется с большой долей (в количестве 20%), это снижает температуру факела ниже 1500 °С.

Расчет с подачей рециркулирующих газов в количестве до r ≈ 10% показал значения NO_2 на уровне 70 мг/нм^3.

(С рециркуляцией газов (r ≈ 8÷10%) на котле ТГМЕ-206 с горелками «ЭКОТОП» концентрация NOx составила около 80÷90 мг/нм^3).

Выполненное численное моделирование турбулентного диффузионного факела природного газа в топочном пространстве, оснащенном прямоточно-вихревыми горелками большой мощности «ЭКОТОП» с целью выработки наилучшего решения по организации топочного процесса и обеспечения минимального уровня вредных выбросов NOx показало, что NOx не будет превышать 60 мг/нм^3 (O_2= 3%).

Достижение CO с учетом представленных концентрационных полей составит на уровне до 50 мг/нм^3 (O_2= 3%).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Соболев В.М. Использование низкоэмиссионных горелок для достижения предельно низких выбросов NO, при обеспечении надёжной и экономичной эксплуатации топочно-горелочных устройств на паровых котлах большой мощности. //Энергетик.1997, №1 с. 35-41.

2.Коваленко А.Л., Козлов В.Г., Уткин А.П., Пермяков В.Н. Результаты испытаний горелок с малотоксичными выбросами ЗАО «ЭКОТОП и фирмы «Todd Combustion» (США) на котлах ТГ-104 и ТГМЕ-206 при сжигании попутного и природного газа // Теплоэнергетика – 2003 – №4 – С. 41-44.

УДК 62-611

ГАЗОГИДРАТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

Стрижак П.А.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Газовые гидраты могут использоваться во множестве приложений, таких как очистка и опреснение воды, охлаждение и производство напитков и продуктов питания, а также пожаротушение. Однако основной областью применения газовых гидратов является энергетика. В частности, газогидратные технологии перспективны для транспортировки горючих и инертных газов, а также в качестве основного или дополнительного топлива при производстве энергии.

Основные преимущества газогидратных технологий связаны с возможностью транспортировать метан или другие горючие газы на большие расстояния, разделять природный и попутный нефтяной газ на их составляющие компоненты, контролировать в широких пределах характеристики физико-химических превращений. Газогидратные технологии предлагаются как альтернатива затратному процессу сжижения природного газа для его дальнейшей транспортировки. Для сжижения природного газа является достаточно энергоемкой технологией, расход энергии для сжижения природного газа может достигать до 25% от ее количества, содержащегося в сжиженном газе. Помимо этого, при доставке сжиженного природного газа к месту использования, его необходимо подвергнуть регазификации – испарению без присутствия воздуха в специальных испарителях. В свою очередь, процессы гидратообразования менее энергозатратны, а для регазификации возможно использование реакторов диссоциации, работающих на теплоте дымовых газов котлоагрегатов.

В качестве топлива газовые гидраты могут использоваться как самостоятельное топливо, а также при совместном сжигании с традиционными и альтернативными топливами. На настоящий момент знания о процессах горения газовых гидратов достаточно ограничены. Гидраты имеют многофазную структуру, отличную от структуры традиционных топлив. При нагревании гидрата метана образуется вода, снижающая температуру пламени и дестабилизирующая горение. Энергоэффективное сжигание газогидратов на объектах энергетики требует знания особенностей горения гидратов метана и способов их оптимизации. Большинство известных экспериментальных исследований посвящено распространению фронта пламени и изменению основных параметров газовоздушной смеси. Диссоциация горючего газа с поверхности газогидрата существенно влияет на процесс воспламенения и горения газогидратов. Гранулированный гидрат с равномерно распределенным размером частиц демонстрирует более высокую скорость диссоциации, чем гидрат с полидисперсными частицами. Неоднородные размеры частиц газогидратов приводят к неустойчивому горению, что, в свою очередь, снижает скорость диссоциации. Основными параметрами, влияющими на эффективность сгорания газогидратов, являются способ нагрева, тепловой поток, количество гидрата.

Другим перспективным направлением является совместное использование газовых гидратов с традиционными и альтернативными топливами. Реализация такого подхода позволяет интенсифицировать зажигание низкосортных и низкореакционных топлив (в частности, угольных отходов и топливных суспензий на их основе), увеличить количество получаемой тепловой энергии за счет высокой теплоты сгорания газового гидрата, а также снизить уровень антропогенных выбросов на единицу получаемой тепловой энергии за счет высоких экологических характеристик горения компонентов газового гидрата. Таким образом, вовлечение газогидратных технологий в топливно-энергетический сектор позволяет решать совокупность проблем, связанных с удорожанием ископаемых энергоресурсов и загрязнением окружающей среды объектами энергетики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543.

УДК 532.2

УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ФАКЕЛЕ ПОДСВЕТКИ ГИДРАТНОГО ГАЗА

Стрижак П.А.[1)], Шлегель Н.Е. [1)], Школа М.В. [1)].
[1)] Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Одной из основных проблем, связанных с угольной промышленностью, является накопление отходов, загрязняющих окружающую среду. В данной работе предложен метод сжигания угольных шламов совместно с гидратным газом, извлеченным из искусственных или природных гидратов. Наличие водяных паров в гидратном газе позволит снизить концентрацию антропогенных выбросов. А высококалорийный газ (метана) в составе гидрата интенсифицирует процесса горения.

Для проведения экспериментальных исследований по изучению особенностей сжигания угля и его отходов обогащения (угольный шлам) в факеле подсветки из гидратного газа разработан и изготовлен экспериментальный стенд представленный на рис. 1.

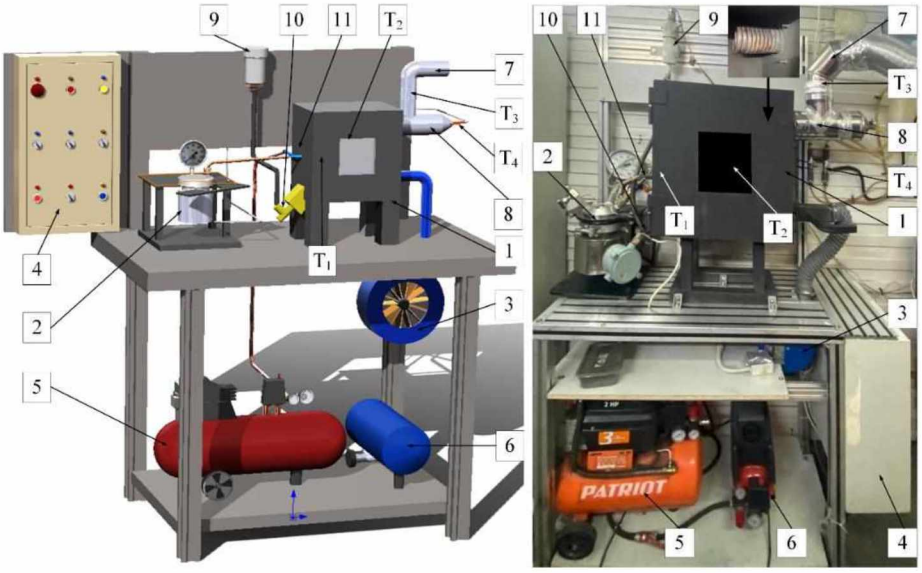


Рис. 1. Внешний вид (а) и схема экспериментального стенда (б): 1 – камера сгорания; 2 – блок диссоциации; 3 – дутьевой вентилятор; 4 – щит управления; 5 и 6 – компрессоры; 7 – дымоход; 8 – теплообменное оборудование; 9 – емкость пылевидного топлива с вибромотором; 10 и 11 – горелочные устройства для газообразного и твердого топлив; T1, T2, T3 и T4 – места установки термопар.

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования обосновывающие возможность утилизации угольных шламов в факеле подсветки гидратного газа. Установлено, что температура в камере сгорания возрастает за счет добавления угля и угольного шлама практически на 200 и 300 °С соответственно. Такой прирост позволит увеличить тепловую мощность котельного агрегата. Предлагаемое технологическое решение, основанное на совместном сжигании гидратного газа с низкосортным топливом, дает ряд преимуществ. Во-первых, полученный газ интенсифицирует воспламенение низкосортного топлива и увеличивает степень его сгорания. Во-вторых, содержание паров воды в гидратном газе снижает выбросы: концентрация SO_2 снижается вдвое, CO – на 28%, NO – на 43%, CO_2 – на 21%. В целом эта система позволит снизить выбросы загрязняющих веществ в атмосферу и стоимость производства тепловой энергии.

Список литературы

1. Haibin L., Zhenling L. Recycling utilization patterns of coal mining waste in China //Resources, Conservation and Recycling. – 2010. – Т. 54. – №. 12. – С. 1331-1340.

УДК 532.2

ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОГИДРАТОВ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ВОЗГОРАНИЙ

Стрижак П.А.[1),2)], Шлегель Н.Е. [1)], Подгорная Е.Р. [1)], Забелин И.В. [1)]
[1)] Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
[2)] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Возгорания представляют значительную угрозу для жизни, имущества и окружающей среды во всем мире. Традиционные методы пожаротушения, такие как вода и пена, часто неэффективны или имеют ограниченную применимость в определенных ситуациях. Газовые гидраты обладают уникальными свойствами, которые делают их перспективными для применения в качестве средств пожаротушения. Предлагается использование гидратов инертных газов в качестве пожаротушащего агента. При воздействии положительных температур при атмосферном давлении гидрат диссоциирует на воду и газ. Высвобождаемый газ может разбавлять и вытеснять кислород из зоны горения, создавая инертную атмосферу, тем самым подавляя возгорание [1]. При этом вода и водяной пар способствуют снижению температуры в окрестности реагирующего материала.

На Рис.1 приведены результаты математической обработки экспериментальных данных. При ликвидации возгорания с V_f = 0,0045 м^3 установлено, что необходимая и достаточная масса гидрата в огнетушителе составляла около 42 г. Увеличение массы гидрата приводило к снижению времени времени ликвидации возгорания. Такой эффект обусловлен тем, что большое количество льда попадало на поверхность реагирующего материала, в связи с чем нужно большее количество теплоты для его плавления и смены агрегатного состояния. В-третьих, определено, что использование ПАВ в гидрате позволяет после плавления льда образовывать устойчивый пенный слой на поверхности реагирующих материалов. Этот слой блокирует подвод окислителя в зону горения.

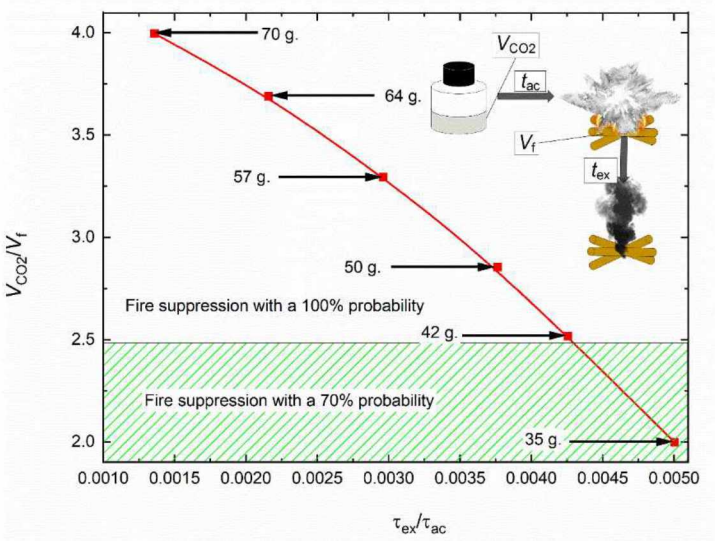


Рис. 1. Зависимость отношения длительности подавления возгорания (τ_{ex}) к времени срабатывания (τ_{ac}) от отношения объема углекислого газа в гидрате (V_{CO2}) к объему навески твердого материала в очаге возгорания (V_f).

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Минобрнауки России, Соглашение № 075-15-2024-543.

Список литературы.

1. Hatakeyama T. et al. Fire extinction using carbon dioxide hydrate //Industrial & engineering chemistry research. – 2009. – Т. 48. – №. 8. – С. 4083-4087.

УДК 533.6.011.72: 539.91

ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ ПРИ ПАДЕНИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ГОРЮЧИЙ ГАЗОВЫЙ ПУЗЫРЬ ВБЛИЗИ ТВЕРДОЙ СТЕНКИ

Сутырин О.Г. [1)], Георгиевский П.Ю. [1)], Левин В.А. [1,2)]

[1)] Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

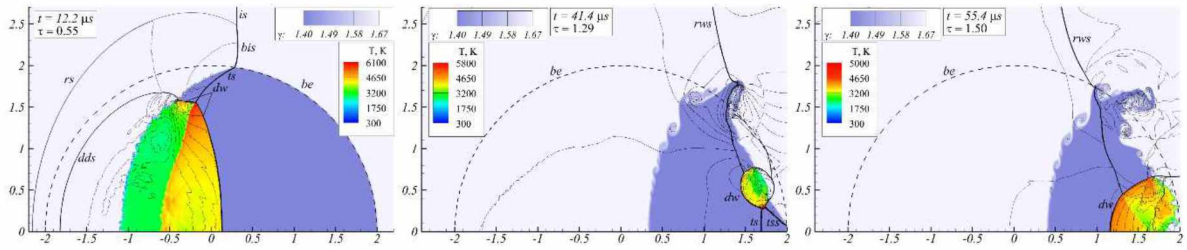
[2)] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Исследуется падение ударной волны на горючий газовый пузырь, прилегающий к твердой стенке. Течения моделируются с помощью уравнений Эйлера для совершенного газа с неоднородным распределением термодинамических характеристик. Для численного моделирования применяется схема семейства WENO повышенного порядка аппроксимации, дополненная специальным методом аппроксимации уравнения переноса показателя адиабаты газа. Реакция горения газовой смеси моделируется с помощью двухстадийной кинетики Коробейникова-Левина с параметрами реакций, соответствующими водородо-кислородной смеси, разбавленной аргоном.

Описаны различные режимы инициирования детонации при взаимодействии ударной волны с пристеночным газовым пузырем (рис. 1): прямое инициирование за счет разогрева в падающей волне (рис. 1a), инициирование при проникновении отраженной от стенки ударной волны *rws* в горючий газ и взаимодействии с внутренними скачками *ts* и *tss* (рис. 1b), а также при фокусировке преломленных и отраженных от стенки скачков уплотнения на плоскости или оси симметрии (рис. 1c).

На основе серии расчетов определена зависимость режимов воспламенения от числа Маха падающей волны и формы пузыря. Наличие стенки снижает пороговое число Маха с M = 2.2 до M = 1.7 для круглого пузыря, с M = 1.7 до M = 1.6 для вытянутого пузыря, и, особенно существенно, с M = 2.3 до M = 1.6 для сплюснутого пузыря. Фокусировка волны при взаимодействии с вытянутым пузырем оказывается более эффективна, чем простое отражение плоской волны (детонация инициируется при M ≥ 1.95), тогда как свободные круглые и сплюснутые пузыри воспламеняются при преломлении падающей волны более высокой интенсивности. При наличии стенки наименьшее пороговое число Маха M = 1.6 достигается в случае сплюснутого пузыря за счет несколько лучшей локализации фокусировки волн непосредственно вблизи стенки. Столь существенное уменьшение пороговой интенсивности падающей волны за счет сочетания эффектов отражения и фокусировки поперечных скачков открывает возможность для разработки новых эффективных газодинамических способов эффективного инициирования детонации в перспективных системах сгорания горючих газовых смесей.

Работа выполнена в НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543).



a *b* *c*

Рис. 1. Режимы инициирования детонации в пристеночном горючем пузыре, изолинии давления. *a* – прямое инициирование (M = 3.0), *b* – при отражении волны от стенки и преломлении в пузыре (M = 2.2), *c* – при отражении и фокусировке на плоскости симметрии (M = 1.9). Цветом показаны различные газы и температура в области горения. Координаты в сантиметрах, пунктирная линия *be* – исходная граница пузыря. Нижняя граница рисунков – плоскость симметрии, правая граница – твердая стенка. *is, bis* – падающая ударная волна (движется слева направо) и её искривленный участок, *rs* – отраженная от пузыря волна, *ts* – прошедшая в пузырь волна, *rws* – отраженная от стенки волна, *tss* – поперечная вторичная волна, *dw*– детонационная волна, *dds* – вызванная детонацией ударная волна в инертном газе.

УДК 532.525.2

ИССЛЕДОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ ДИФФУЗИОННОГО ГОРЕНИЯ МИКРОСТРУЙ ВОДОРОДА ПРИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

Тамбовцев А.С.

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В представленной работе исследуются сценарии диффузионного горения микроструй водорода при их взаимодействии [1].

1. Обнаружены основные сценарии диффузионного горения микроструи водорода окруженной соосным потоком воздуха.

2. В работе впервые экспериментально показана возможность стабилизации процесса диффузионного горения микроструи водорода соосным потоком воздуха, истекающим из соосно расположенной кольцевой щели, обнаружен полезныйэффект позволяющий поддерживать горение при воздействии на процесс диффузионного горения потока агрессивной среды на примере водяного пара.

3. Обнаружены основные сценарии диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из кольцевого сопла.

4. Впервые обнаружен эффект «запирания» процесса горения в узкой области конусовидной формы вблизи среза сопла при взаимодействии водорода, истекающего из кольцевого сопла, со сверхзвуковой струей воздуха, истекающей из соосно расположенного микросопла.

5. Впервые экспериментально показаны условия и особенности взаимодействия двух одиночных микроструй водорода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543

1. Тамбовцев А. С. Автореферат "Исследование сценариев диффузионного горения микроструй водорода при их взаимодействии" на соискание ученой степени кандидата физикоматематических наук по специальности 1.1.9 - механика жидкости, газа и плазмы, 2024г.

УДК 536.46

АНАЛИЗ КОГЕРЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ МЕТОДОМ POD В ЗАКРУЧЕННОМ ИМПАКТНОМ ПЛАМЕНИ

Толстогузов Р.В.[1)], Шараборин Д.К.[1)], Савицкий А.Г.[1)], Лобасов А.С.[1)], Дулин В.М.[1)]

Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Применение современных оптических методов, позволяющих проводить одновременные измерения температуры, скорости и концентрации веществ, даёт возможность детально исследовать локальный теплообмен и особенности химических реакций в турбулентных, зачастую нестационарных, трёхмерных потоках. Такие экспериментальные данные необходимы для оптимизации конструкций горелочных устройств и камер сгорания, в частности, для повышения их эффективности и снижения вредных выбросов [1, 2].

Цель работы – экспериментальное исследование структуры потока, формы фронта пламени и анализ когерентных структур в потоке закрученной импактной струи с горением на основе одновременного применения метода HCHO (формальдегид), OH (гидроксильный радикал) плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (ПЛИФ) и метода анемометрии по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry, PIV). Одновременная регистрация ПЛИФ OH и HCHO была использована для обнаружения областей интенсивного локального тепловыделения в предварительно перемешанном пламени пропано-воздушной смеси. Для анализа когерентных структур, наборы данных, полученные методами PIV и ПЛИФ, были обработаны с помощью POD (Proper Orthogonal Decomposition) с применением метода разложения по сингулярным значениям.

Экспериментальный стенд включал в себя осесимметричное профилированное сопло (с внутренним диаметром d = 15 мм) с возможностью установки внутрь лопаточного завихрителя с различными параметрами закрутки потока (S = 1 и 0.41, сильная и слабая закрутка, соответственно). В качестве импактной поверхности выступала нижняя часть стальной цилиндрической ёмкости, расположенной над соплом, температура которой поддерживалась постоянной циркулирующей водой при температуре 96 °C. Рассмотрены случаи различных расстояний между соплом и импактной поверхностью H/d = 3, 2 и 1. Коэффициент избытка топлива был равен Φ = 0.7, число Рейнольдса составляло Re = 5 000. Используемая в работе стереоскопическая система PIV включала пару ПЗС-камер и импульсный Nd:YAG лазер накачки. ПЛИФ система состояла из перестраиваемого лазера на красителях, двух импульсных Nd:YAG лазеров накачки и двух чувствительных в УФ диапазоне интенсифицированных камер с усилителями на основе ЭОП для регистрации сигнала флуоресценции.

В работе представлено поле средней скорости и распределение сигналов флуоресценции HCHO и OH при сильной и слабой закрутке потока для каждого исследуемого расстояния H/d. На основании полученных данных было установлено, что наличие импактной поверхности приводит к формированию конусообразной центральной зоны рециркуляции и к появлению дополнительной моды когерентных пульсаций скорости вблизи поверхности в случае сильной закрутки. На основе OH и HCHO ПЛИФ показано, что гидродинамические пульсации сопряжены со значительными изменениями условий протекания химических реакций, в том числе с пульсациями тепловыделения.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

Список литературы

1. Бурас Ф. Численное моделирование турбулентной структуры горения обедненной смеси с предварительным перемешиванием и испарением // ПМТФ. – 2014. – Т. 55, № 4. – С. 74–88.
2. Веселов К. Е., Евдокимов О. А. Исследование газодинамики и горения жидкого топлива в модельной камере сгорания // ПМТФ. – 2023. – Т. 64, № 2. – С. 105–120

УДК 534.222.2+544.45

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ДВУХТОПЛИВНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ

Троцюк А.В.

Институт гидродинамики им. М.А. Лавреньева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В предложенной работе проведено физико-математическое моделирование детонационного сгорания двухтопливных газовых смесей на основе водорода: синтез-газ (CO-H_2) и метано-водородная смесь (CH_4-H_2). Рассматривались стехиометрические смеси с воздух, при разном мольном содержании H_2 в бинарном топливе, при стандартных начальных условиях. Интерес к исследованию детонации рассматриваемых смесей связан, прежде всего, с перспективами их технического использования в энергетики промышленности. Например, в двигателях на непрерывно вращающейся детонационной волне (ДВ) (метано-водородная смесь); установках по детонационной переработке органического сырья, в том числе твердых бытовых отходов, ультра-перегретым паром (т.е. производство синтез-газ). Во-вторых, разбавление CO и CH_4 водородом играет роль инструмента для управления и контроля детонационных процессов, приводя к уменьшению размера детонационной ячейки, перестройке детонационной структуры, к изменению параметров в ДВ и уменьшению энергии прямого инициирования ДВ.

Исследование состояло из двух взаимосвязанных частей: разработки обобщенных моделей детонационной кинетики и проведения двумерных численных расчетов многофронтовой (ячеистой) структуры ДВ в указанных смесях. Предложенные модели кинетики двустадийные. Первая стадия – период индукции, вторая – стадия основного тепловыделения. Для расчета длительности периода индукции предложены алгебраические формулы аррениусовского типа для двухтопливных смесей на основе времени индукции для каждого индивидуального топлива. Сложные процессы в зоне индукции заменялись одной брутто-реакцией. В зоне основного тепловыделения использовалось одно кинетическое уравнение на величину средней молярной массы смеси. Для расчета показателя адиабаты и внутренней энергии смеси (а также любых других параметров газа) предложены явные алгебраические формулы относительно давления и температуры.

Предложенные модели кинетики имплементированы в двумерный численный код расчета параметров и структуры детонационной волны, созданный в нашем коллективе. Динамика газовой смеси описывалась двумерными нестационарными уравнениями Эйлера. Производился расчет распространения детонационной волны в плоском канале различной ширины H. Полагалось, что поперечный размер ячейки a_0 соответствует такой ширине канала H, при которой после выхода волны на самоподдерживающийся стационарный (в среднем) режим распространения структура волны включает две основные максимально симметричные поперечные волны, движущиеся в противофазе относительно поперечной координаты.

Полученные в расчетах поперечные размеры детонационной ячейки a_0 в указанных выше смесях при различных соотношениях между топливами хорошо соответствуют доступным в литературе экспериментальным данным. Кроме того, полученные в моделировании двумерные структуры фронта ДВ отражают основные качественные особенности многофронтовых детонационных структур, обнаруженные в эксперименте для указанных смесей − степень регулярности многофронтовой структуры, наличие вторичных поперечных волн на лидирующем ударном фронте, возникновение несгоревших очагов газа за зоной индукции, и ряд других особенностей. Кроме того, параметры в пике Неймана и точке Чепмена-Жуге, рассчитанные по предложенным моделям кинетики и по детальному кинетическому механизму совпадают с точностью меньше двух процентов (самое большое отклонение). Таким образом, совокупность данных численных экспериментов подтверждает высокую точность предлагаемых детонационных кинетических моделей и эффективность разработанного численного кода для расчета динамики ДВ в рассматриваемых газовых смесях.

Параллельные вычисления проведены с использованием многопроцессорного комплекса MVS-10Q в МСЦ РАН, Москва.

УДК 534.22.2

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ И РАСЧЕТ СТРУКТУРЫ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В СМЕСИ ГЕКСАНА С ОКИСЬЮ УГЛЕРОДА

Троцюк А.В., Фомин П.А.
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Предложена и верифицирована на численных двумерных расчетах ячеистой структуры детонационной волны (ДВ) обобщенная модель кинетики горения двухтопливной газовой смеси гексан (C_6H_{14}) - окись углерода (CO) - воздух при детонационных давлениях и температурах.

Модель проста, физически обоснована, описывает как течение реакции во времени, так и состояние химического равновесия, применима во всем диапазоне концентраций реагирующих компонент внутри детонационных пределов.

Двумерное численное моделирование ДВ в стехиометрической смеси гексана с окисью углерода и воздухом выполнено впервые. Использован численный код, описанный в [1]. Расчет поперечного размера ячейки при различных соотношениях между горючими хорошо соответствует эксперименту [2]. Это свидетельствует о высокой точности сформулированной кинетической модели и эффективности используемого численного алгоритма.

Результаты расчета отражают основные качественные особенности экспериментально зарегистрированных детонационных структур. Воспроизведена нерегулярная ячеистая структура с хаотическим несогласованным движением основных поперечных волн (ПВ) и вторичными ПВ, составляющими иерархию уменьшающихся по размерам возмущений лидирующего ударного фронта. На рис. 1 представлен пример расчета двумерной структуры ДВ (численная шлирен-визуализация) в стехиометрической смеси C_6H_{12} – CO – воздух при нормальных начальных условиях. Ширина канала соответствует поперечному размеру детонационной ячейки. AA, BB, CC, DD и aa, bb, cc – основные и вторичные ПВ. Точка инициирования ДВ соответствует x°=°0.

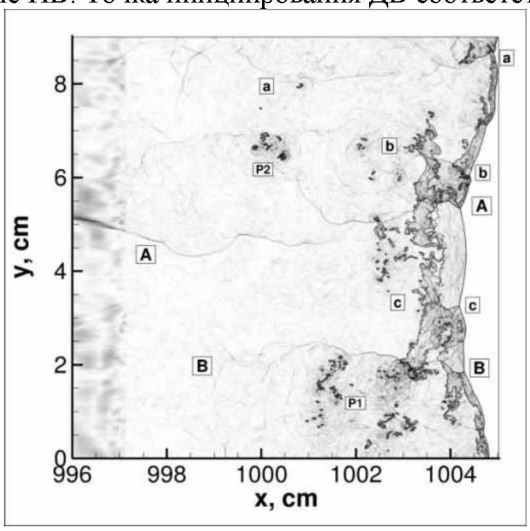


Рис. 1. Структура детонационной волны в смеси C_6H_{12} – CO – воздух (стех.), 0.131% C_6H_{14}. Численная шлирен-визуализация. Ширина канала равна размеру детонационной ячейки.

Вычисления выполнены с использованием комплекса MVS-10Q в МСЦ РАН, Москва.

Список литературы

1. Austin J.M., Shepherd J.E. Detonation in hydrocarbon fuel blends // Combustion and Flame. - 2003. - Vol. 132, № 1-2. - P. 73-90.

Fomin P.A., Trotsyuk A.V., Vasil'ev A.A. Approximate model of chemical reaction kinetics for detonation processes in mixture of CH_4 with air // Combustion Science and Technology. - 2014. - Vol. 186, № 10-11. - P. 1716-1735.

УДК 544.452

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИЗУЧЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПО АРМИРОВАННОЙ СТЕКЛОВОЛОКНОМ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Трубачев С.А.[1)], Палецкий А.А. [1)], Шаклеин А.А. [2)], Сагитов А.Р. [1)], Куликов И.В. [1)], Соснин Е.А. [1)]

[1)] Институт Химической Кинетики и Горения СО РАН, г. Новосибирск, Россия

[2)] УдФИЦ УрО РАН, г. Ижевск, Россия

Пожаробезопасность является практическим применением теории горения твердых материалов, и сосредоточена на изучении динамики развития пожаров и методах борьбы с ними. Одним из направлений является исследование влияния антипиренов на горючесть полимерных материалов, например, армированных стекловолокном эпоксидных смол (АСЭС). Одним из основных методов описания и предсказания процессов горения твердых материалов является численное моделирование распространения пламени по ним. В данной работе представлено полностью трёхмерное связанное моделирование распространения пламени по тонким пластинам армированной стекловолокном эпоксидной смолы под действием дополнительного теплового излучения с двух сторон с помощью пакета Fire Dynamics Simulator. Модель включает трёхмерный тепломассоперенос, диффузию основных веществ в газовой фазе, диффузионный перенос продуктов пиролиза в твердой фазе. Процессы пиролиза и окисления представлены одностадийными макро-реакциями и учитывают действие фосфорсодержащего антипирена ДДМ-ДОПО. Моделью удовлетворительно предсказывается экспериментально наблюдаемая динамика распространения пламени (Рис.1).

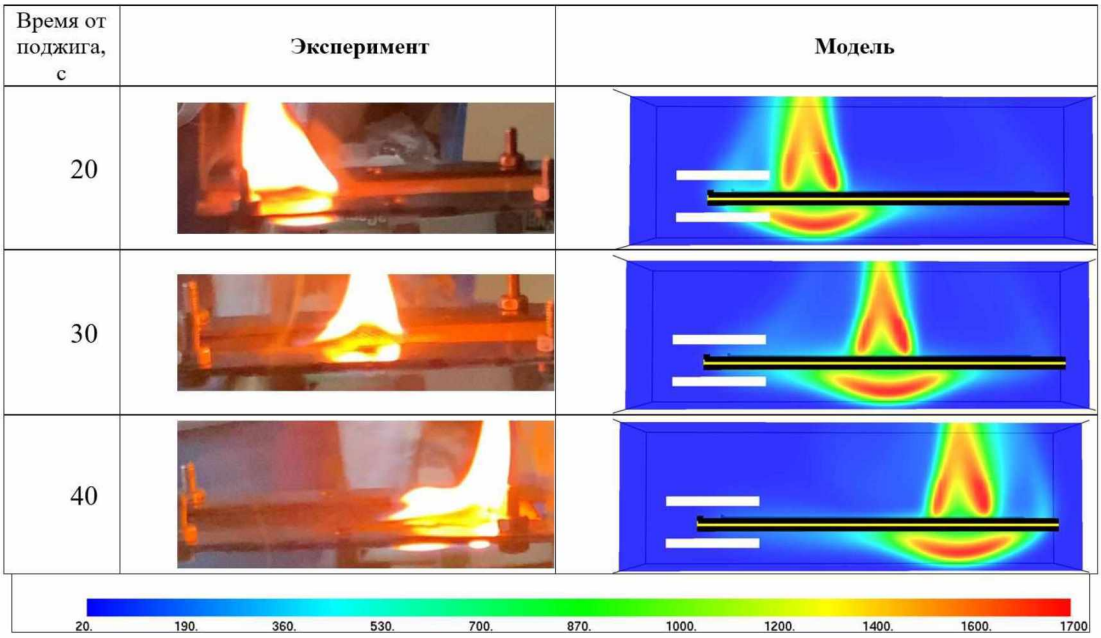


Рис. 1. Динамика распространения пламени по АСЭС. Модель и эксперимент.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (Грант № 20-19-00295).

УДК 621.311.22

УГОЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИЯ В МИРЕ И РОССИИ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Тугов А.Н.[1)], Киселева О.А.[1)]

[1)] Всероссийский теплотехнический институт, г. Москва, Россия

Доля угольной генерации в общей мировой выработке электроэнергии в XXI веке оставалась относительно стабильной (на уровне 35–40 %; в 2023 г. — 35,5 %) и превалирующей над другими первичными источниками энергии. Производство электроэнергии из угля в последние два десятилетия увеличилась на 80%, с 5809 ТВт-ч в 2000 году до 10468 ТВт-ч в 2023 году.

Сейчас эксплуатируется более 2400 угольных ТЭС в 76 странах мира (чуть меньше половины — в Китае). Установленная мощность 39 угольных ТЭС составляет 4000 МВт и более. Примерно 87,5 % мирового производства угольной электроэнергии приходится на девять стран: Китай, Индию, США, Японию, Индонезию, Южную Корею, Россию, ЮАР и Германию, причем три первых обеспечивают более 75 % общей выработки (табл. 1).

Таблица 1. Производство электроэнергии из угля в лидирующих по этому показателю странах

Страна	Общая выработка электроэнергии по годам, ТВт-ч					Установленная электрическая мощность в июле 2024 г., ГВт
	2000 г.	2010 г.	2015 г.	2020 г.	2023 г.	
Мир	5809	8460	9281	9417	10468	2129,9
Китай	1060	3234	4046	4922	5742	1146670
Индия	390	643	1007	1144	1480	239650
США	1966	1847	1352	773	675	196160

Рост объемов производства электроэнергии из угля обеспечивается устойчивым увеличением суммарной мощности угольных ТЭС, которая сейчас составляет более 2,1 ТВт. Почти 87 % всех электрогенерирующих угольных мощностей находится в тех же упомянутых ранее странах-лидерах, а на долю Китая, США и Индии приходится 74,5 % (табл. 1).

Некоторое сокращение темпов роста угольных мощностей (нетто) в последние годы (рис. 1) обусловлено интенсивным выводом из эксплуатации устаревшего оборудования.

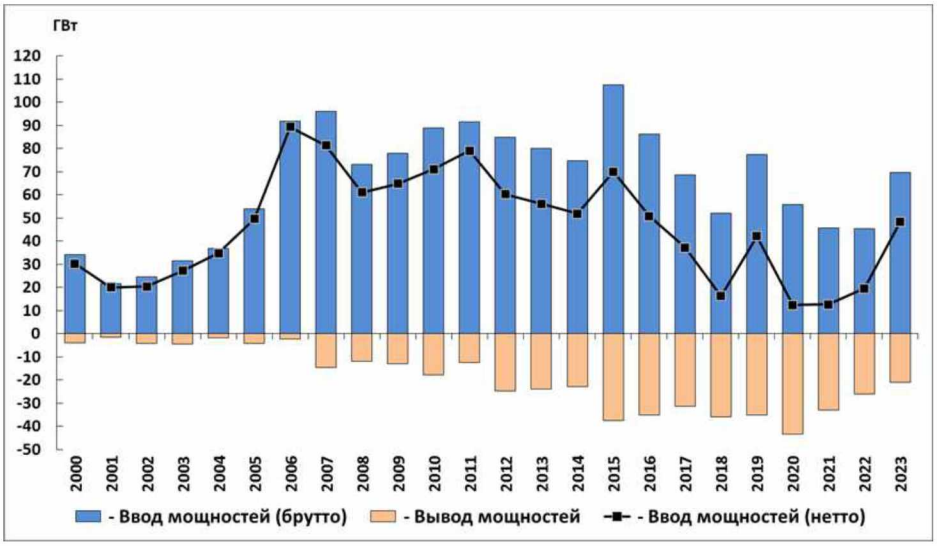


Рис. 1. Ввод и вывод мощностей угольных ТЭС в мире, ГВт

(ввод мощностей-нетто — разница между их вводом и выводом)

Следует отметить, что ввод новых мощностей осуществлялся в основном за счет строительства новых современных энергоблоков сверхкритического давления (СКД) и энергоблоков с суперсверхкритическими параметрами пара (ССКП). Из рис. 2 видно, что начиная с 2010г., ежегодно запускалось в эксплуатацию по 25-40 энергоблоков ССКП, и уже сейчас работает примерно 550 энергоблоков с такими параметрами пара в более чем в 20 странах, общей мощностью свыше 450 ГВт.

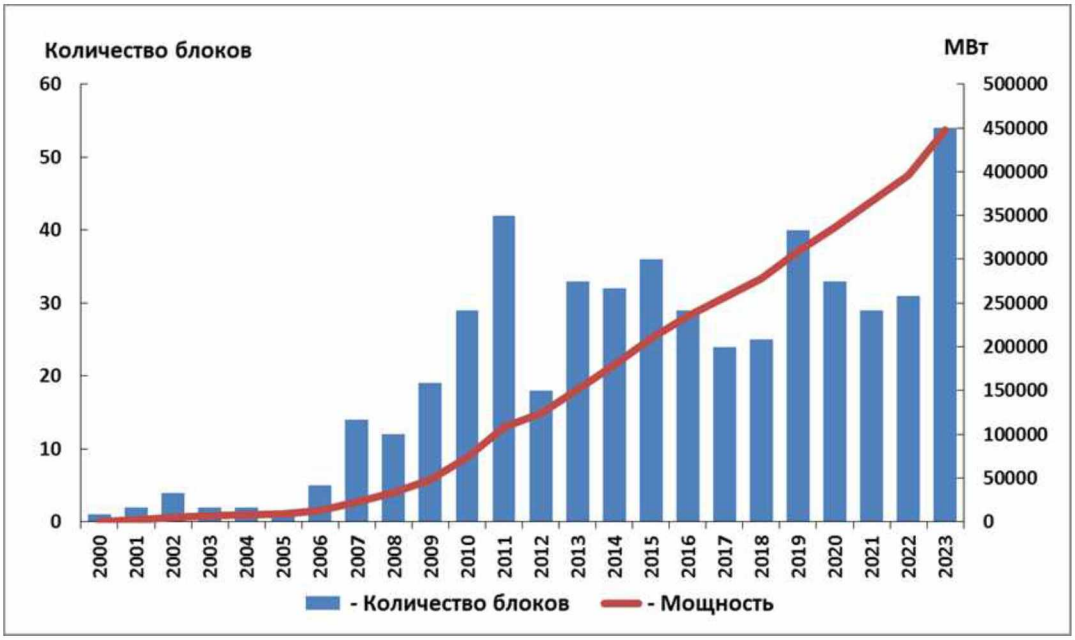


Рис. 2. Динамика ввода энергоблоков ССКП и рост суммарной установленной мощности с такими блоками, МВт

Почти 79 % от общего количества блоков ССКП эксплуатируется в Китае. Эти блоки характеризуются высокой экономичностью и минимальным воздействием на окружающую среду [1]. За счет вывода устаревшего оборудования и ввода современного существенно поменялась структура угольной генерации в мире. ТЭС с энергоблоками ССКП и СКД сейчас составляют почти 48 % от общей мощности угольных ТЭС, в некоторых странах еще больше (в Корее — 89 %, в Японии — 76 %, в Китае — 58 %).

Существенно «омолодился» и средний возраст угольных ТЭС, особенно в Китае. Доля мощностей, проработавших менее 20 лет, составляет 65 % (в Китае — 86 %), более 30 лет — 24 % (в Китае — 3 %).

В электроэнергетике основной тенденцией последних лет является уменьшение выбросов углекислого газа за счёт изменения структуры производства электроэнергии в пользу CO_2-нейтральных источников энергии, прежде всего, возобновляемых (ВИЭ) [2]. Выбросы CO_2 в электроэнергетическом секторе сейчас составляют примерно 40 % от всех выбросов CO_2, связанных с энергетическим использованием ископаемых топлив, и в 2022 г. превысили 12,4 млрд т, что в 1,8 раза больше, чем в 2000 г. Доля выбросов CO_2 угольной электрогенерацией оценивается на уровне 75 % от всех выбросов CO_2 в электроэнергетическом секторе [3]. В этой связи различными зарубежными сценариями намечено снижение общемировой выработки электроэнергии из угля. Но пока же ситуация иная. В Китае ежегодно вводится в эксплуатацию 20–40 ГВт новых угольных мощностей. Вывод из работы существующего оборудования в последние годы заметно уменьшился. В 2021–2023 гг. в Китае выведено из эксплуатации только 0,1% угольных мощностей, а количество новых запланированных угольных электростанций достигло самого высокого уровня с 2015 года. В

Индии доля угольной генерации в общем энергобалансе страны постоянно растет и сейчас составляет почти 79 %. В 2022 г. Центральное управление электроэнергетики Индии потребовало, чтобы угольные электростанции не закрывались до 2030 года, и уже в 2023 г. вывод угольных мощностей из эксплуатации в этой стране был практически прекращен. В Японии доля электроэнергии, выработанной на угольных ТЭС, постоянно увеличивается: с 20 % в 2000 г. до 33 % в 2023 г. С 2019 г. в этой стране существенно увеличился ежегодный ввод новых угольных мощностей, а вывод действующих в последние годы значительно уменьшился [4]. В Южной Корее производство электроэнергии из угля остается стабильным на протяжении последних 15 лет и находится на уровне 200 ТВт-ч в год. В Индонезии наблюдается стремительный рост мощностей угольных ТЭС, на которых в 2023 г. уже было выработано 217 ТВт-ч электроэнергии, в 6,5 раза больше чем в 2000 г. Снижение выработки электроэнергии из угля сейчас наблюдается только в США и Европе.

В России примерно 17 % электроэнергии страны производят угольные ТЭС. Суммарная мощность этих электростанций находится на уровне 38 ГВт, что составляет примерно 16 % от всей установленной электрической мощности РФ. В 2022 г. выбросы CO_2 в электроэнергетическом секторе РФ составили 409 млн тонн CO_2, или 3,3 % от общих мировых выбросов, связанных с производством электроэнергии. Несмотря на то, что годовой спрос на электроэнергию в нашей стране в XXI веке увеличился на 34 %: с 819 ТВт-ч в 2000 году до 1102 ТВт-ч в 2022 году, выбросы электроэнергетического сектора России за это время выросли всего лишь на 22 % [3]. Доля выбросов CO_2 угольной генерацией, приходящихся на электроэнергетический сектор, в России составляет 35–45 % (в мире — примерно 75 %) и не превышает 0,5 % общемировых, обусловленных использованием ископаемых топлив. Таким образом, весомых предпосылок снижения доли угольной генерации, связанных с так называемым углеродным следом, в РФ нет.

Однако следует отметить, что на угольных ТЭС России в основном работает низкоэффективное оборудование со сроком службы больше паркового ресурса и значительными выбросами загрязняющих веществ (ЗВ) в окружающую среду. В этой связи, основной причиной сокращения российской угольной генерации может стать не снижение выбросов парниковых газов, как во всем мире, а ликвидация выбросов традиционных для сжигания угля загрязняющих веществ (твердых частиц, оксидов серы и др.). В нашей стране наиболее очевидным и доступным по экономическим соображениям путем улучшения экологической ситуации является замещение угольных мощностей парогазовыми и газомазутными энергоблоками. (Что и происходит в настоящее время). В планах Минэнерго — дальнейшее сокращение доли угольной генерации, как в валовом производстве электроэнергии, так и по установленной мощности, вплоть до 5 % к 2050 г.

В тоже время, формируя стратегию развития электрогенерации РФ, следует иметь в виду, что:

- по разведанным месторождениям угля Россия занимает второе место в мире (с долей около 15 % мировых запасах). Запасы угля в РФ превышают 162 млрд т.
- доля России в мировой добычи составляет примерно 5,5 % (шестое место). В абсолютном значении этот показатель находится на уровне 440 млн т в год.
- по объемам потребления угля Россия находится на четвертом месте в мире с долей 3 %, и основными потребителями угля в нашей стране являются именно ТЭС (более 50 %).
- замещение угля природным газом и ВИЭ породит ряд негативных последствий. В частности, это приведет к стагнации и последующей ликвидации угольной промышленности, создаст проблемы для надежного энергообеспечения многих регионов страны, станет причиной снижения стратегической устойчивости энергетики страны.

В этой связи руководству энергетической отрасли следует пересмотреть свое отношение к российской угольной генерации и поставить во главу угла не ее сокращение, а техперевооружение угольных ТЭС с целью достижения на них мировых эксплуатационных показателей, а также снижение выбросов ЗВ на существующих электростанциях.

Именно на это сейчас нацелены работы ВТИ в области угольной тематики. В последние годы институтом выполнен комплекс работ, направленных на улучшение экологических показателей действующих угольных ТЭС, разработаны технические решения по созданию угольной ТЭЦ нового

поколения, на основании обобщения зарубежного опыта определены пути дальнейшего развития отечественных конденсационных энергоблоков на повышенные параметры пара.

Работы, связанные с уменьшением негативного воздействия угольными ТЭС на окружающую среду, ведутся в двух направлениях: снижение выбросов маркерных ЗВ в атмосферу, усовершенствование и создание нового газоочистного оборудования.

Первое связано с получением ТЭС комплексного экологического разрешения, выполнением требования по снижению выбросов ЗВ в атмосферный воздух в связи с актуализацией справочника ИТС 38-2022 и утверждением технологических нормативов Приказом Минприроды России № 248, достижением установленных квот в рамках проведения эксперимента по квотированию. Для решения этих задач разрабатываются технические решения по снижению выбросов ЗВ, позволяющие снизить их валовые выбросы в соответствии с экологическими требованиями к объекту, оптимизировать условия рассеивания выбросов ЗВ в атмосферном воздухе, а, следовательно, снизить загрязнение атмосферного воздуха, что является целевым показателем при обеспечении экологической безопасности для населения. Такие работы институтом выполнены для Кемеровской ГРЭС, Иркутской ТЭЦ-10, Назаровской ГРЭС.

Среди работ по второму направлению специалистами ВТИ: выполнены пуско-наладочные работы на оборудовании сероочистки по NID-технологии, по результатам которых разработан проект по усовершенствование данной установки сероочистки на Черепетской ГРЭС; разработан базовый проект аммиачно-сульфатной сероочистки, реализованный на Нижнекамской ТЭЦ; разработан фильтрующий материал повышенной пылеемкости рукавного фильтра для ТЭС, работающих на экибастузском угле; разработаны решения по внедрению селективного некаталитического восстановления оксидов азота (технология СНКВ) для металлургического завода, проведено моделирование и разработан базовый проект упрощенной мокросухой сероочистки (E-SOx) для новых блоков Нерюнгринской ГРЭС. Разработанные и изготовленные в ВТИ малоэмиссионные пылеугольные горелки установлены и испытаны на котле БКЗ-420-140 Омской ТЭЦ-5 и на котле БКЗ-210-140 Томской ГРЭС-2.

Институт выполнил ряд важных исследований, связанных с использованием технологии циркулирующего кипящего слоя (ЦКС). ВТИ участвовал в пуске и наладке первого в России котла с ЦКС блока 330 МВт Новочеркасской ГРЭС. В январе 2023 года этот блок прошел испытания для подтверждения мощности 320 МВт, а начиная с августа 2023 года, работал непрерывно до конца года без остановок. Однако надежная работа блока с котлом ЦКС во всем регулировочном диапазоне пока сопряжена с рядом трудностей, которые институт в настоящее время решает.

В области сжигания углей работы ВТИ сейчас в основном направлены на снижение выбросов оксидов азота и процессов шлакования, увеличение регулировочного диапазона работы котла, а также на расширение топливного баланса станций: возможность сжигать непроектные и альтернативные виды топлив в существующих котлах. Опыт, накопленный ВТИ в многочисленных работах по сжиганию в котлах непроектных топлив, позволил разработать методические указания по организации изменения топливного режима на ТЭС, основные положения которого вошли в новую редакцию ГОСТ Р 50831.

Список литературы

1. Сомова Е.В., Тугов А.Н., Тумановский А.Г. Современные угольные энергоблоки на суперсверхкритические параметры пара (обзор) // Теплоэнергетика. – 2023. – № 2. – С. 5–23.
2. Тугов А.Н., Артемьева И.В. Производство электроэнергии в мире: тенденции и достигнутые в 2021 г. результаты // Электрические станции. – 2022. – № 1. – С. 2–11.
2. Тугов А.Н. Вклад угольной электрогенерации в глобальные выбросы CO_2: существующее положение и современные тенденции их сокращения // Теплоэнергетика. – 2024. – № 7. – С. 5–18.
3. Тугов А.Н., Артемьева И.В. Угольная электрогенерация в Японии // Электрические станции. – 2024. – № 6. – С. 2–12.

УДК 536.46

О МЕХАНИЗМАХ ВОЗДЕЙСТВИЯ СЛАБОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ЛАМИНАРНОЕ УГЛЕВОДОРОДНОЕ ПЛАМЯ

Тупикин А.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Фундаментальный и практический интерес представляют способы активного управления процессом сжигания и стабилизацией пламени. В случае горения углеводородных топлив эффективными являются методы управления, использующие внешние электрические поля [1-3]. Это связано с высокой концентрацией носителей заряда, возникающих в реакциях хемоионизации. В случае, когда напряженность электрического поля мала (E[В/см]/P[тор]<2), тепловыделение от протекания тока и влияние на химические реакции пренебрежимо малы, остается электрогидродинамический механизм влияния на горение.

В работе рассматривалось воздействие постоянного электрического поля на пламя горелки Бунзена. Исследования проводились на лабораторной горелке аксиальной симметрии, где было установлено сужающееся сопло с выходным диаметром D =15 мм, имеющее профиль Виташинского. На выходе горелки реализовывалось течение с «ударным профилем скорости». На диэлектрической площадке располагались плоскопараллельные электроды, нижний край которых находился на уровне среза сопла. Для регистрации полей скорости применялась разработанная в ИТ СО РАН PIV-система «ПОЛИС». Форма пламени снималась на видеокамеру на длине волны излучения OH*.

При анализе полей скорости были получены распределения скорости на фронте пламени, из которых определялась скорость распространения ламинарного фронта. Установлено, что на значительной части фронта скорости распространения ламинарного пламени можно считать постоянной. При этом значения справа и слева от вершины пламени различаются: со стороны анода значение скорости распространения фронта практически совпадает со случаем горения без электрического поля; со стороны катода возрастает примерно на 10%. Наблюдается также газодинамический отклик, вызванный дрейфом отрицательных ионов.

Обычно действие слабого электрического поля на пламя стараются описать в рамках модели, называемой «ионным ветром» [4]. Механизм «ионного ветра» опирается на вовлечение нейтральных частит в дрейф зарядов, тем самым создавая гидродинамический напор. Как в рамках такой модели объяснить изменение в гидродинамике течения в области пространства, через которую не проходит дрейф зарядов? В этом случае следует рассматривать изменения в распределении давления во фронте пламени. Результатом протекания дрейфового тока вдоль фронта может стать изменение степени деформации пламени [5]. Заметим, что наложение внешнего поля на область пространства, в которой имеются свободные ионы и электроны, ведет к разделению заряда. Возникновение наведенного заряда, как и «ионный ветер», может приводить к изменению гидродинамики течения. При этом результатом будет также изменение степени деформации пламени.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№122041400020-6)

Список литературы

1. Starikovskiy A, Aleksandrov N. Plasma-assisted ignition and combustion // Progress in Energy and Combustion Science. –2013. –N.39. –P.61-110.
2. Jianfeng Fang, Xiaomin Wu, Hao Duan, Chao Li and Zhong-quan Gao Effects of electric fields on the combustion charac-teristics of lean burn methane-air mixtures // Energies. –2015. –V.8. –P.2587-2605.
3. Chien, Y.-C., Escofet-Martin, D., Dunn-Rankin, D. Ion cur-rent and carbon monoxide release from an impinging me-thane/air coflow flame in an electric field // Combustion and Flame. –2019. –V. 204. –P. 250-259
4. Лаутон Дж., Вайнберг Ф. Электрические аспекты горения. – М.: Энергия, 1976. – 294 с.
5. Тупикин А.В., Замащиков В.В. Растяжение ламинарного пламени в слабом электрическом поле // Физика горения и взрыва. –2020. –Т.56, No.2. –С. 3-9.

УДК 621.181.2.016:662.951.2

ОГНЕВАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА В ФИЛЬТРАЦИОННОМ СЛОЕ

Турчин С.В.[1)], Кулеш Р.Н.[2)]

[1)] Общество с ограниченной ответственностью «Завод Аэроэнергопром», г. Минск, Республика Беларусь

[2)] Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, Россия

Проблемы утилизации отходов актуальны. Из-за логистической удаленности мест их образования, например, на опорных базах нефтегазодобывающих предприятий Арктической зоны и Крайнего Севера централизованный вывоз отходов становится задачей весьма затратной. К основным факторам, усложняющим работу системы обращения с отходами, добавляется невысокая плотность населения, что приводит к малотоннажным образованиям отходов, таким образом, с учетом стоимости оплаты труда, проекты по их переработке становятся нерентабельными.

В сложно климатических и логистических условиях Арктической зоны и Крайнего Севера применение компактной установки огневой утилизации жидких углеводородных отходов самостоятельно, или совместно с технологией пиролиза, может способствовать эффективной утилизации производных пиролиза с минимальным воздействием на окружающую среду. Оправданным может стать использование пиролизной жидкости и газа в качестве энергоносителей, а пиролизный углеродистый остаток пригоден в качестве материала, формирующего фильтрационный слой зоны активного окисления устройства, и дополнительного топлива. Это позволит сократить металлоемкость установки, обезвредить продукты пиролиза до зольного остатка и использовать полученную теплоту для отопления и горячего водоснабжения, например, в передвижных комплексах экспедиций.

На рис. 1 представлено фото модуля фильтрационного горения теплогенератора [1] в режиме работы.

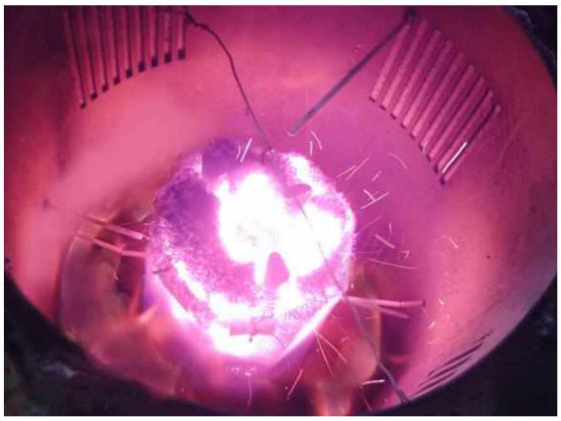


Рис. 1. Фото модуля фильтрационного горения (режим работы)

В процессе утилизации продуктов пиролиза возможно образование конверсионных газов по механизму термического реагирования пароводяной смеси с углеродом слоя и выделение дополнительного тепла при окислении обводненных жидких углеводородов.

Список литературы

1. Турчин С.В., Заворин А.С., Субботин А.Н., Кулеш Р.Н. ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Теплогенератор, Патент №2747900, МПК F23C 3/00 (2006.01), F23G 7/05 (2006.01); Заяв. 02.10.2020; Опубл. 17.05.2021, Бюл. №14.

УДК 620.9

ТЕРМИЧЕСКАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ЗАГРЯЗНЕННЫХ НЕФТЕПРОДУКТАМИ ВОД

Упский М.В.[1)], Гончаренко Ю.Б.[1)], Лесных А.В.[1)]

[1)] Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

Наличие нефтепродуктов в сточных водах промышленных котельных и иных промышленных объектов, образовавшихся в виде конденсата отстоя в мазутных баках, стоков при ремонтных работах и авариях, разогрева паром цистерн при сливе мазута, грунтовых вод, ранее загрязненных мазутом, а также утечек мазута, может достигать величины до 7-10%. Наличие водяных линз в слое мазута приводит к нарушению процесса горения в котлах, таких как неустойчивость горения и обрыв факела. Нефтеловушки позволяет лишь частично решить проблему, т.к. часто такой вид загрязненных вод смешивается с другими стоками и эффективность ловушки из-за больших объемов стоков падает.

С целью гарантированного предотвращения попадания нефтепродуктов в сточные воды загрязненную воду возможно ввести в топочное пространство, например, перемешивая воду с топливом с помощью диспергаторов. Но подобные устройства требуют дополнительного обслуживания и финансовых затрат. Появление воды в топочном объеме при определенных соотношениях расхода воды и топлива может привести к уменьшению выбросов некоторых составляющих продуктов сгорания, например окислов азота [1,2].

Сотрудниками Департамента энергетических систем ДВФУ было сделано предложение о термической утилизации с применением циклонных предтопков, как горелочных устройств и раздельной подачи жидкого топлива и загрязненной жидкости с помощью многосопловой центробежной форсунки [3, 5]. У данной форсунки имеются периферийный (топливный канал) и центральный канал, по которому подается обезвреживаемая жидкая среда [4]. Форсунки различных типоразмеров отличаются расходом топлива (от 1 до 6 т/час), расходом впрыскиваемой воды (от 0,1 до 1,5 т/час), количеством сопел (от 6 до 21), диаметрами шнеков-завихрителей (от 8 до 16 мм) и углами раскрытия факелов (от 60 до 160 градусов).

Системы циклонного обезвреживания были спроектированы и исследованы на котлоагрегатах БКЗ-75, КВГМ-100 и КВГМ-20 трех котельных Приморского края.

К основным результатам всех испытаний можно отнести следующее:

1. Имеется возможность полного удаления нефтесодержащих компонент за счет их выгорания. Вода в парообразном состояние удаляется с уходящими газами.

2. В отличие от систем, включающих дозирование и дальнейшее диспергирование, регулирование расхода мазута и замазученной воды производятся независимо друг от друга.

3. При необходимости допускается большое количество подаваемой воды в топку без срыва факела.

4. Оптимальное соотношение расхода замазученной воды и мазута составило от 15% до 20% (снижение окислов азота на 15-25%).

5. В диапазоне доли впрыска от 0 до 30% КПД котла не изменяется.

Список литературы

1. Воликов А. Н. Уничтожение замазученных вод отопительных котельных путем сжигания в виде водомазутных эмульсий./ Промышленная энергетика – 1997. - № 7. – С. 10 – 14.

2. Исаев В.В. Снижение выбросов оксидов азота от котельных установок путем ввода влаги в зону горения./ Промышленная энергетика. – 1998. - № 5. – С. 32 – 35.

3. Штым А.Н., Упский В.А. Способ снижения концентрации оксидов азота в отходящих дымовых газах при сжигании углеводородного топлива и форсунка для осуществления способа. Патент на изобретение №2173815 от 27 октября 1999 г.

4. Штым А.Н., Упский В.А., Упский М.В. Комбинированная форсунка. Свидетельство на полезную модель №22220 от 13 декабря 2001 г.

5. Штым А.Н., Упский В.А., Упский М.В. Исследование и применение многосопловых центробежных форсунок на котлах с циклонными предтопками. Теплоэнергетика и энергосбережение/; Дальневост. федерал. ун-т. –Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2011. С. 75-89.

УДК 533.6;544.332

САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ ПАРАФИНА В ВЫСОКОТОМПЕРАТУРНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

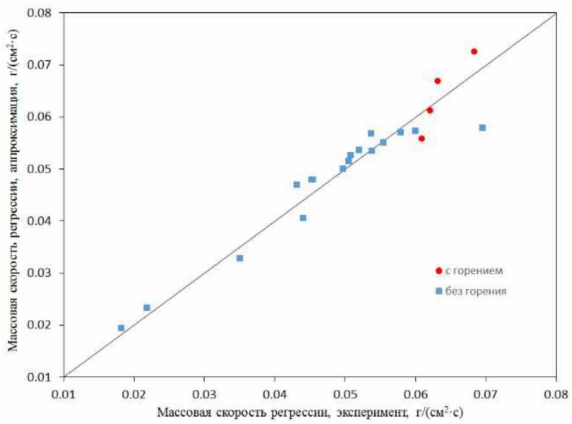
Усанов В.А.[1)], Гембаржевский Г.В.[1)], Рашковский С.А.[1)], Якуш С.Е.[1)]
[1)] Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

Экспериментально исследовано горение парафина в высокотемпературном потоке воздуха. Образец парафина прямоугольной формы со скошенной передней частью помещался в рабочую камеру, снабженную звуковым выходным соплом, в которую подавался нагретый воздух. В экспериментах измерялось давление в рабочей камере, температура продуктов сгорания на выходе из рабочей камеры и тяга установки. Температура воздуха на входе в рабочую камеру варьировалась в диапазоне 600–1000 К, расход воздуха – в пределах 0.05–0.22 кг/с, давление в рабочей камере варьировалось в диапазоне 0.4–2.0 МПа. Рабочая камера снабжена смотровым окном, через которое проводилась скоростная видеосъемка процесса (см. рис. 1а). Испытуемый образец взвешивался до и после опыта и определялась средняя массовая скорость регрессии образца.

Установлено, что самовоспламенение образца происходит, если температура воздуха на входе в рабочую камеру T_{in} превышает 770 К, а его расход G_a превышает 0.1 кг/с. В тех случаях, когда самовоспламенение образца не происходило, установка работала в режиме пульверизатора: происходило распыление расплава парафина на выходе из сопла. По результатам экспериментов построена граница области устойчивого самовоспламенения парафина в координатах (G_a, T_{in}). Разработана модель самовоспламенения парафина в высокотемпературном потоке воздуха, объясняющая пределы самовоспламенения. Определено время задержки самовоспламенения, показано, что наибольшее влияние на него оказывает расход воздуха.

Установлена зависимость массовой скорости регрессии образца парафина от G_a и T_{in}. Анализ кадров скоростной видеосъемки показал, что горение происходит не над поверхностью образца, а за ним (рис.1). Скоростная видеосъемка поверхности образца через микроскоп позволила установить механизм горения: под действием высокотемпературного потока воздуха происходит плавление парафина и образование на поверхности образца тонкого (толщиной 1–3 мм) слоя расплава, который течет вдоль поверхности под действием касательных напряжений со стороны воздушного потока. Большая часть расплава стекает с задней кромки поверхности образца, где и сгорает; меньшая часть образует капли. Разработана модель регрессии образца в высокотемпературном потоке воздуха. Сравнение теоретической скорости регрессии образца парафина с полученными экспериментальными данными приведено на рис. 1 б.

а



б

Рис. 1. Кадр стационарной работы установки (а) и сравнение теоретической скорости регрессии образца с экспериментальной (б)

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00703, https://rscf.ru/project/24-19-00703/

УДК 532.2

ВНЕДРЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ

Усатов А.Ю.[1)]

[1)] АО «Сибтехэнерго» - инженерная фирма по наладке, совершенствованию технологий и эксплуатации электро-энергооборудования предприятий и систем.

Электрохимическая технология факельного сжигания (ЭХТС) – это новое направление в области факельного сжигания топлива.

Данная технология основана на воздействии диффузным электрическим разрядом на предпламенную зону факела, которая обеспечивает протекание гетерогенных химических реакций при низких температурах ещё до выхода летучих, что позволяет воспламенять холодную аэросмесь и обеспечивать горение низкореакционного топлива в виде факела.

Данная технология позволяет в значительной степени повысить эффективность сжигания топлива, расширить диапазон регулирования паровой нагрузки, исключить дополнительное высокореакционное топливо из технологического процесса, обеспечить устойчивое горение топлива в котле даже при сжигании топлива низкого качества, в значительной степени понизить содержание вредных выбросов.

Электрохимическая технология факельного сжигания позволяет обеспечить безмазутную растопку котла.

На рис. 1 приводится график подьема температуры в поворотной камере топки котлоагрегата БКЗ-420-140 ст.№2 Красноярской ТЭЦ-2 при растопочных операциях проводимых системой ЭХТС.

Рис. 1. Зависимость итоговой конверсии от времени контакта.

В данном докладе будут представлены практические примеры освоения и внедрения технологии ЭХТС на тепловых электростанциях Российской Федерации, с описанием работы, технологическими решениями и отчетами о проведенных испытаниях.

Список литературы

1. Плазменная безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела /М.Ф.Жуков, Е.И. Карпенко, В.С. Перегудов и др. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН,1995. – 304 с. (Низкотемпературная плазма. Т. 15).
2. Лаутон Дж., Вайнберг Ф. Электрические аспекты горения.-М.Энергия,1976.-296с.
3. Афанасьев В. В., Кидин НИ. Диагностика и управление устойчивостью горения в камерах сгорания энергетических установок. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 176 с.

УДК 532.2

ВЛИЯНИЕ МИКРО-ВЗРЫВНОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ ВОДОТОПЛИВНЫХ КАПЕЛЬ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИХ ГОРЕНИЯ В СОСТАВЕ СПРЕЯ

Федоренко Р.М., Яновский Л.С., Стрижак П.А.
Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Ужесточение требований по ограничению выбросов загрязняющих веществ при сжигании жидких углеводородных топлив и увеличение соответствующих штрафных санкций мотивируют разработку новых технологий организации горения в камерах сгорания [1]. Интегральные характеристики работы таких устройств и эффективность горения в целом определяются процессами распыления топлива и смешения компонентов топливовоздушной смеси [2]. Если при использовании газообразных видов топлива задача решается интенсификацией массообменных процессов в зоне частичного и полного предварительного смешения, то в случае применения жидкого топлива она состоит в необходимости полного испарения жидкой фазы в минимальной по размерам области [2]. Для этого необходимо создать условия, приводящие к многократному измельчению в режиме дробления капель топливных композиций с формированием мелких вторичных фрагментов. Перспективная технология организации вторичного измельчения капель топливных композиций базируется на их микро-взрывном распаде в многофазных и многокомпонентных потоках. Процессы микро-взрывного распада позволяют кратно увеличить площадь поверхности испарения жидкости и ее химического реагирования за счет быстрого измельчения исходных капель до нескольких десятков микрон [3]. Цель настоящей работы – определение диапазонов снижения основных антропогенных выбросов при сжигании эмульгированного топлива за счет микро-взрывной фрагментации.

Исследования влияния микро-взрывной фрагментации капель топлив на характеристики горения проводились в проточной испытательной камере сгорания. По результатам проведенных экспериментов фиксировались средние концентрации выбросов двуокиси углерода (CO_2), оксидов углерода (CO), азота (NO_x) и серы (SO_2). В процессе проведения экспериментов регистрировались температуры дымовых газов перед и после теплообменника, а также температура воды в баке с водой. Проведенные эксперименты позволили установить концентрации двуокиси углерода (CO_2), оксида углерода (CO), азота (NO_x) и твердых частиц (PM), образующихся при сгорании эмульгированного топлива при изменении объемной концентрации воды в его составе. Добавление 10 об% воды к дизельному топливу позволяет снизить выбросы CO_2 на 4%, NO_x на 24% и твердых частиц на 37%. Увеличение расхода воздуха в диапазоне от 72.6 до 89.4 г/с приводит к снижению CO на 51% и 38%, CO_2 на 30% и 27%, NO_x на 11% и 20%, PM на 51% и 7.4% для чистого дизельного топлива и эмульсии. Анализ влияния типа топлива на концентрации выбросов показал, что с увеличением длины углеводородной цепочки концентрации всех регистрируемых выбросов возрастают, при этом усиливается эффект добавления воды. На основе обобщения ранее опубликованных работ выделены наиболее рациональные условия для стабильной реализации эффектов микро-взрывного распада в составе спреев. Для спреев целесообразно выдерживать дисперсность распыла капель ($R_d < 1.5$ mm), а также соответствующие концентрации капель в аэрозольном облаке ($\gamma < 0.07$ 1/m^3). С использованием полученных данных сформулирована физическая модель для стабильной реализации микро-взрывного распада капель эмульсий в камерах сгорания.

Список литературы

1. Mridha B., Ramana G.V., Pareek S., Sarkar B. An efficient sustainable smart approach to biofuel production with emphasizing the environmental and energy aspects // Fuel. – 2023. – V. 336. – 126896.
2. Evdokimov O.V., Prokhorov D.A., Guryanov A.I., Mikhailov A.S., Veretennikov S.V. A study of flame and flow structures and their effect on emission properties in a bidirectional vortex pulverized peat combustor // Fuel. – 2021. – V. 291. – 120120.
3. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Micro-explosion and puffing of a group of two-component droplets // Appl. Therm. Eng. – 2020. – V. 181. – 116023.

УДК 532.2

ТЕРМОМЕХАНОХИМИЧЕСКАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ

Фролов С.М.

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, г. Москва, Россия

Новая технология термомеханохимической газификации органических отходов высокотемпературным газифицирующим агентом (ВГА) – продуктами импульсной газовой детонации метанокислородной смеси, расширенными до атмосферного давления (в основном H_2O и CO_2) с начальной температурой выше 2300 К – применена для газификации жидких (отработанное машинное масло, грунтовый и резервуарный нефтешламы, водноугольная суспензия) и твердых (печатные платы, нефтекокс) отходов. Термин «термомеханохимическая газификация» означает, что суммарно эндотермический процесс газификации отходов связан не только с термическим воздействием продуктов детонации: он сопровождается механической фрагментацией отходов импульсными ударными волнами и химическими реакциями между ВГА и компонентами отходов. Вклад всех трех воздействий – термического, механического и химического – может быть разным. Например, при газификации печатных плат механическое воздействие приводит к тонкой фрагментации стекловолоконного материала подложки, а термическое и химическое воздействия – к газификации органических компаундов и лаков. В соответствии с термодинамическим расчетом (см. рисунок) при конечных температурах процесса газификации 1000–1200 К и при массовом соотношении отходы/ВГА Ω = 0,4–1,7 сухие продукты газификации тяжелых углеводородов типа н-гексадекана могут состоять при крайних значениях Ω либо из H_2 и CO с небольшим количеством CO_2 (при Ω = 0,4) либо из CH_4 и CO с небольшим количеством H_2 и C_2–C_3 углеводородов (при Ω = 1,7). При промежуточных значениях Ω они в основном состоят из H_2, CH_4 и CO. Смолы и полукокс в продуктах газификации отсутствуют. Цель экспериментальных исследований – определить состав сухих продуктов газификации указанных органических отходов и сравнить с термодинамическим расчетом. Экспериментальная установка состояла из импульсно-детонационной пушки (ИДП), неохлаждаемого проточного реактора-газификатора и системы очистки отходящего газа в виде конденсатора и трех циклонов. ИДП присоединялась тангенциально к реактору-газификатору у его днища, а труба для отвода отходящего газа была утоплена в реактор-газификатор и выходила из его верхней крышки. Эксперименты при $\Omega \approx$ 0,5–0,9 показали, что сухие продукты газификации содержали до 95 об% горючего газа, который в основном состоял из H_2 и CO с небольшими количествами CH_4 и C_2–C_3 углеводородов. Смолы и полукокс в продуктах газификации не обнаружены. Измеренные температуры стенки реактора-газификатора удовлетворительно согласуются с расчетным значением конечной температуры продуктов газификации. Измеренное содержание CO хорошо согласуется с термодинамическим расчетом. По сравнению с расчетом измеренное содержание H_2 несколько занижено, а содержание CH_4, C_xH_y и CO_2 несколько завышено. По-видимому, это связано с неоднородным распределением массового отношения отходы/ВГА в реакторе-газификаторе. Для повышения однородности смешения отходов с ВГА предложена специальная форма реактора-газификатора. Также предложено смешивать измельченный нефтекокс с жидкими нефтешламами с образованием пасты и подавать комбинированные отходы в реактор-газификатор с помощью поршневого податчика специальной конструкции.

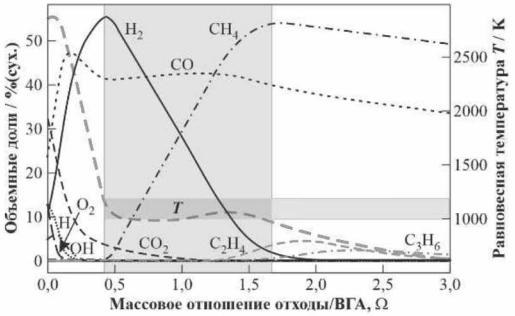


Рис. 1. Равновесные состав и температура сухих продуктов газификации тяжелых углеводородов.

УДК 621.762

ДРОБЛЕНИЕ СТРУЙ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ МНОГОКРАТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ УДАРНЫМИ И ДЕТОНАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ

Фролов С.М.[1)], Иванов В.С.[1)], Аксенов В.С.[1)], Шамшин И.О.[1)]
Манегин С.Ю.[2)], Розанов С.Д.[2)], Межевов А.В.[2)]
[1)] Федеральный исследовательский центр химической физики
им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, г. Москва, Россия
[2)] Государственный научный центр ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина

Задача об исследовании дробления жидких струй при многократном воздействии ударными и детонационными волнами ставится впервые. Подразумевается, что повторные воздействия могут обеспечить не только первичное и вторичное дробление струй и капель, но и целый каскад актов дробления в зависимости от частоты газодинамических импульсов. Практическая задача, на которую направлена работа заключается в создании научных основ для разработки установок по получению порошков металлов, которые можно использовать в аддитивных технологиях (3Д-принтерах по металлу) и других приложениях. Актуальность работы связана с современными тенденциями использования аддитивных технологий в производственных цепочках, особенно в опытном производстве. Такие технологии позволяют значительно снизить металлоемкость и трудоемкость производства и изготавливать детали сложной формы, недостижимой при механической обработке.

Цель данной работы состоит в теоретическом и экспериментальном изучении дробления струи жидкого металла при многократном воздействии проходящими сильными ударными волнами, порожденными импульсной детонацией топливно-кислородной смеси. В предлагаемом методе для получения порошка струя жидкого металла обрабатывается ударными волнами с частотой 15-25 Гц. Ввиду огромных сдвиговых напряжений, возникающих при воздействии ударных волн на жидкую струю и на ее фрагменты дробления, можно обеспечить тонкую фрагментацию жидкости с требуемым средним размером фрагментов, который может контролироваться интенсивностью и частотой ударных волн. Немаловажно, что таким методом можно создавать порошки в восстановительной газовой атмосфере, что будет препятствовать образованию оксидных пленок на частицах порошка. На рис. 1 показан образец порошка нержавеющей стали, полученного предлагаемым методом. Ввиду относительно большого времени пролета капель металла от момента дробления до застывания в водяной ванной капли порошка имеют выраженную сферическую форму. Минимальный размер частиц порошка, полученного предлагаемым методом, составляет 20-50 мкм.

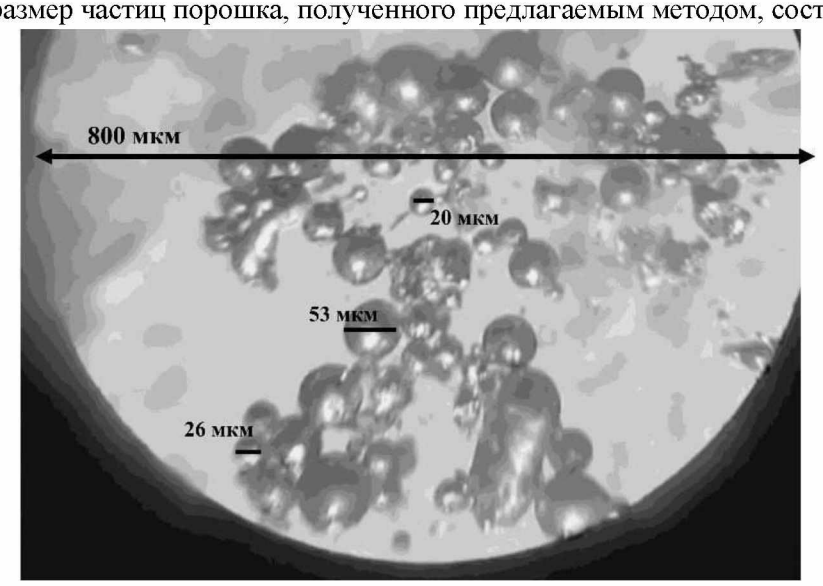


Рис. 1. Образец порошка нержавеющей стали, полученного при многократном воздействии ударными и детонационными волнами на струю жидкой стали.

УДК 621.18

РАЗРАБОТКИ СОВРЕМЕННЫХ ЭФФЕКТИВНЫХ ТОПОЧНО-ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ТКЗ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Химченко С.А., Юрьев Е.И., Свирякин И.Г., Ткаченко А.А.
ПАО ТКЗ «Красный котельщик», г. Таганрог, Россия

ПАО ТКЗ «Красный котельщик» (ТКЗ) разрабатывает топочно-горелочные устройства на базе многолетнего опыта проектирования, наладки и эксплуатации котельного оборудования.

ТКЗ располагает высокопроизводительными вычислительными ресурсам и научно-технической базой для решения задач высокой сложности. Оптимизация и повышение эффективности работы широкого спектра оборудования, а также разработка инновационных решений выполняется с использованием численного моделирования, стендовой базы и натурных испытаний.

Компания имеет значительный опыт по проектированию, поставке, наладке и послегарантийному обслуживанию котлов для сжигания фактически всех традиционных видов органического топлива. Для углубленного анализа и обоснования технических решений по схеме сжигания и конструкции топочно-горелочных устройств помимо традиционных подходов и уникального опыта используются современные расчетные технологии, реализованные в программных продуктах, в частности: SigmaFlame, модернизированная программа позонного расчёта топки Flame2 (разработчик: ПАО ТКЗ «Красный котельщик», г. Таганрог).

В докладе будет представлен пример разработки проекта топочно-горелочного устройства котла докритического давления паропроизводительностью 810 тонн пара в час с применением численного моделирования. Котёл предназначен для сжигания бурых углей. В котле реализована трехступенчатая схема сжигания с организацией восстановительной зоны за счет подачи угольной пыли. Данная схема отработана ранее на других, уже эксплуатируемых объектах, для которых выполнялось моделирование и была выполнена верификация моделей горения. Особенностью проекта является дополнение схемы сжигания соплами нижнего дутья, а также ввод дожигающего/третичного воздуха стадийно в два яруса.

Другой пример разработки проекта топочно-горелочного устройства газомазутного котла докритического давления паропроизводительностью 480 тонн пара в час с применением численного моделирования. Особенность проекта: при сжигании газа реализована ступенчатая схема сжигания за счет отключения по топливу верхнего яруса горелок, и перераспределения топлива между тремя ярусами при сжигании мазута. Был выполнен доклад по моделированию данного объекта при сжигании газа на НТС с участием специалистов отраслевых институтов – ОАО «ВТИ» и ОАО «НПО ЦКТИ», по результатам которого, специалистами была отмечена высокая степень соответствия результатов численного моделирования ожидаемым результатам на основе опыта.

Для рассмотренных примеров, по результатам моделирования, были получены выбросы оксидов азота ниже требований Заказчика и нормативов. На момент написания тезисов доклада на объектах еще не выполнены наладочные работы.

Список литературы

1. ГОСТ Р 50831-95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования.
2. Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов / под ред. Э.Х. Вербовецкого, Н.Г. Жмерика. — СПб.: НПО ЦКТИ-ВТИ, 1996. — 270 с.

УДК 536.46

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА СТАБИЛИЗАЦИЮ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОДНЯТОГО ФАКЕЛА

Шараборин Д.К.[1)], Толстогузов Р.В.[1)], Лавронов К.Д.[1)], Дулин В.М.[1)]
[1)] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Требования по экологической безопасности и эффективности энергетических установок на углеводородных топливах ужесточаются от года к году. Обеспечение таких требований, а также создание, модернизация существующих установок является актуальной задачей для современной науки. В частности, остро стоит задача управления процессами горения в камерах сгорания и в качестве одного из способов управления возможно использование наложения внешнего электрического поля [1-3]. Основным источником носителей заряда в углеводородном пламени являются продукты реакции хемоионизации [4]. Наложение электрического поля изменяет форму и условия стабилизации пламени, так как имеет место различия в подвижности электронов, переносящих отрицательный заряд, и ионов (преимущественно H_3O^+ [5]), переносящих положительный заряд, что способствует созданию гидродинамического дисбаланса.

Цель работы состояла в экспериментальном исследовании влияния продольного электрического поля на характерные режимы горения и стабилизацию метано-воздушного турбулентного пламени, стабилизированного на расстоянии над соплом. Анализ данных визуализации, поля скорости и пространственного распределения гидроксильного радикала.

Предварительно перемешанное турбулентное поднятое пламя смеси метан/воздух формировалось сужающимся соплом $d = 15$ мм с профилем Витошинского, что обеспечивало ударный профиль скорости на срезе сопла. Электрическое поле было организовано пластиной из спрессованного графита, расположенного на уровне среза сопла, и стального кольца $d = 28$ мм, расположенного на расстоянии от сопла $h = 80$ мм таким образом, чтобы линии напряженности электрического поля были параллельно направлены потоку газа из сопла. При помощи высоковольтного источника питания на пластины-электроды подавалось напряжение в диапазоне U = 2.5-15 кВ. Измерения поля скорости осуществлены методом анемометрии по изображениям частиц в стереоскопической конфигурации. Визуализация пространственного распределения гидроксильного радикала в пламени произведена методом плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции с использованием перестраиваемого лазера на красителях и интенсифицированной камеры.

В работе представлена визуализация характерных режимов горения, трёхкомпонентные реализации поля скорости и распределение гидроксильного радикала в области реагирования и продуктов сгорания в турбулентном метано-воздушном пламени, стабилизированном на расстоянии от сопла. Наложение электрического поля приводит к изменению высоты стабилизации пламени, включая его присоединение к соплу. В последнем случае наблюдается гистерезис, так как после выключения поля пламя остается стабилизированным на кромке сопла, чего не происходит до наложения продольного электрического поля.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (код проекта 22-19-00803), и использовании методик, разрабатываемых в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

Список литературы

1. Starikovskiy A, Aleksandrov N. Plasma-assisted ignition and combustion // Prog. Energy Combust. Sci. – 2013. – V. 39. – P. 61-110.
2. Jianfeng Fang, Xiaomin Wu, Hao Duan, Chao Li and Zhongquan Gao Effects of electric fields on the combustion characteristics of lean burn methane-air mixtures // Energies. – 2015. – V. 8. – P. 2587-2605.
3. Chien Y.-C., Escofet-Martin D., Dunn-Rankin D. Ion current and carbon monoxide release from an impinging methane/air coflow flame in an electric field // Combust. Flame. – 2019. – V. 204. – P. 250-259.
4. Colcote H.F. Mechanism of the formation of ions of flames // Combust. Flame. – 1957. – V. 1. – P. 385–403.
5. Gooding J. M., Bohme D. K. and Chung-Wai Ng. Detailed ion chemistry in methane-oxygen flames. I. Positive ions // Combust. Flame. – 1979. – V. 36. – P. 27–43.

УДК 628.475.3

ПАРОВАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ ПЛАСТИКА

Шевырёв С.А., Мажейко Н.Е., Якутин С.К.
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
г. Кемерово, Россия

В процессе жизнедеятельности человека образуется достаточно высокое количество отходов, которые необходимо утилизировать и обезвреживать. Большую группу отходов занимают разнообразные пластические массы, встречающиеся повсеместно в виде бутылок, пищевых пленок, пакетов, различных емкостей для хранения и других предметов. Экологичная утилизация таких отходов может быть осуществлена путем паровой газификации в кипящем слое с получением генераторного газа [1], содержащего относительно высокое содержание горючих газов. К наиболее ценным горючим газам относятся H_2 и CO_2, являющихся исходными веществами для различного нетопливного применения.

Для исследования процесса газификации пластиковых отходов использовался пластик ПЭТ (полиэтилен-терефталат) в виде первичных гранул (рис.1) с характеристиками, представленными в табл.1.

Рис. 1. Исходный пластик ПЭТ в виде гранул.

Таблица 1. Характеристики исследуемого пластика ПЭТ

W^a, %	A^d, %	V^{daf}, %	$Q^a_{s,V}$, МДж/кг	C^{daf}, %	H^{daf}, %	N^{daf}, %	S^{daf}, %	O^{daf}, %
0,14	<0,1	90,67	33,92	63,83	4,89	0	0	31,28

В результате процесса газификации были получены данные состава газа (табл. 2) в стационарном и нестационарном режиме, необходимые для моделирования процесса двухстадийных газогенераторов.

Таблица 2. Усредненные характеристики состава газа при паровой газификации ПЭТ

CO	H_2	CO_2	CH_4	O_2
ПЭТ, стационарный режим, расход пара – 82 л/мин, температура пара – 850 °C				
13,4	51,5	28,3	12,2	2,6
ПЭТ, нестационарный режим, расход пара – 82 л/мин, температура пара – 850 °C				
6	39,3	13,7	2	21,3

Список литературы

S. A. Shevyrev, N. E. Mazheiko, S. K. Yakutin, and P. A. Strizhak, “Investigation of characteristics of gas and coke residue for the regime of quasi- and non-stationary steam gasification of coal in a fluidized bed. Part 1,” Energy 251, 123938 (2022).

УДК 544.452

СТРУКТУРА ПЛАМЕН ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННЫХ СМЕСЕЙ КОМПОНЕНТОВ СУРРОГАТНОГО КЕРОСИНА С КИСЛОРОДОМ И АРГОНОМ

Шмаков А.Г. [1)], Дмитриев А.М. [1)], Матюшков В.В. [1,2)], Чернов А.А. [1)], Осипова К.Н. [1)], Князьков Д.А. [1)], Большова Т.А. [1)]

[1)] Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск, Россия

2) Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Углеводородные топлива остаются основным источником энергии для различных видов транспорта и в энергетике. Для разработки и создания эффективных и экологичных двигателей, в том числе газотурбинных, необходимо применение высокоточного компьютерного моделирования внутрикамерных процессов горения в широком диапазоне изменения основных параметров. Разработка численных моделей газотурбинных двигателей требует надежной и обоснованной информации о комплексе физических и химических свойств сжигаемых в них топливах. Реальные углеводородные топлива, такие как керосин ТС-1, состоят их нескольких сотен веществ, поэтому химико-кинетические модели их горения являются очень сложными, в связи с чем их использование требует очень мощных вычислительных ресурсов и больших временных затрат. Для решения этой проблемы вместо реальных топлив используют суррогатные смеси, состоящие из минимального количества компонентов, и в то же время моделирующие наибольшее число главных физико-химических параметров реального топлива. Вместе с тем очень важно чтобы не только физические, но и химические свойства суррогатного топлива максимально соответствовали реальному топливу, в том числе имели близкие параметры воспламенения и горения. Поэтому актуальной научной задачей проекта является разработка и обоснование компактного химико-кинетического механизма горения для суррогатного керосина, моделирующего свойства широко используемого для газотурбинных двигателей топлива - керосина ТС-1. Для разработки и проверки такого механизма требуются экспериментальные данные по химической структуре пламен суррогатного керосина в широком диапазоне условий.

В данной работе получены экспериментальные данные по химической и тепловой структуре бедных и стехиометрических пламен индивидуальных компонентов суррогатного керосина (метилциклогексан, н-декан) в смеси с O2 и Ar, стабилизированных на плоской горелке при атмосферном давлении. Проведены расчеты профилей концентрации исходных реагентов, основных продуктов горения, а также промежуточных соединений в пламенах предварительно перемешанных смесей метилциклогексана, н-декана, с O2 и Ar, стабилизированных на плоской горелке, с помощью известных химико-кинетических механизмов горения углеводородов. Результаты расчетов сопоставлены с данными экспериментальных измерений структуры изученных пламен.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2024-543 от 24.04.2024.

УДК 544.452

СТРУКТУРА ПЛАМЕН ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННЫХ СМЕСЕЙ КОМПОНЕНТОВ СУРРОГАТНОГО КЕРОСИНА С КИСЛОРОДОМ И АРГОНОМ

Шмаков А.Г. [1)], Дмитриев А.М. [1)], Чернов А.А. [1)], Осипова К.Н. [1)], Князьков Д.А. [1)], Большова Т.А. [1)]
[1)] Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Углеводородные топлива остаются основным источником энергии для различных видов транспорта и в энергетике. Для разработки и создания эффективных и экологичных двигателей, в том числе газотурбинных, необходимо применение высокоточного компьютерного моделирования внутрикамерных процессов горения в широком диапазоне изменения основных параметров. Разработка численных моделей газотурбинных двигателей требует надежной и обоснованной информации о комплексе физических и химических свойств сжигаемых в них топливах. Реальные углеводородные топлива, такие как керосин ТС-1, состоят их нескольких сотен веществ, поэтому химико-кинетические модели их горения являются очень сложными, в связи с чем их использование требует очень мощных вычислительных ресурсов и больших временных затрат. Для решения этой проблемы вместо реальных топлив используют суррогатные смеси, состоящие из минимального количества компонентов, и в то же время моделирующие наибольшее число главных физико-химических параметров реального топлива. Вместе с тем очень важно чтобы не только физические, но и химические свойства суррогатного топлива максимально соответствовали реальному топливу, в том числе имели близкие параметры воспламенения и горения. Поэтому актуальной научной задачей проекта является разработка и обоснование компактного химико-кинетического механизма горения для суррогатного керосина, моделирующего свойства широко используемого для газотурбинных двигателей топлива - керосина ТС-1. Для разработки и проверки такого механизма требуются экспериментальные данные по химической структуре пламен суррогатного керосина в широком диапазоне условий.

В данной работе получены экспериментальные данные по химической и тепловой структуре бедных и стехиометрических пламен индивидуальных компонентов суррогатного керосина (метилциклогексан, н-декан) в смеси с O2 и Ar, стабилизированных на плоской горелке при атмосферном давлегнии. Проведены расчеты профилей концентрации исходных реагентов, основных продуктов горения, а также промежуточных соединений в пламенах предварительно перемешанных смесей метилциклогексана, н-декана, с O2 и Ar, стабилизированных на плоской горелке, с помощью известных химико-кинетических механизмов горения углеводородов. Результаты расчетов сопоставлены с данными экспериментальных измерений структуры изученных пламен.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2024-543 от 24.04.2024.

УДК 620.9

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПОРИСТОЙ ГОРЕЛКИ

Штым К.А. [1)], Кулик А.В. [1)], Гончаренко Ю.Б. [1)]

[1)] Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

Применение пористых материалов для получения тепловой энергии при сжигании газообразного топлива получило широкое распространение, так как подобные устройства обладают рядом преимуществ:

- отсутствие необходимости в пространстве для организации процесса горения, так как поры являются, по сути, топкой, где должен завершиться процесс горения;

- значительная тепловая инерционность пористого материала за счет массы и толщины, что определяет хорошие прочностные характеристики устройства;

- термоустойчивость, позволяющая работать в диапазоне температур 800-1050^{0}С [1] с генерацией радиационного потока высокой плотности равной 0,2-0,3 МВт/м^2 и с низкой эмиссией оксидов азота.

При детальном рассмотрении возможных условий применения пористых устройств, в промышленных условиях, необходимо решить две задачи:

- организация оптимального долевого соотношения топлива и окислителя;
- формирование области смешения, воспламенения, стабилизации топливо-воздушных потоков.

Для организации эффективной работы пористой горелки топливо и окислитель подаются в коллектор смесеобразования через отдельные вводы, оснащенные регуляторами расхода сред. После коллектора смесеобразования топливо-воздушная смесь равномерно распределяется в камеру сгорания через три ввода. Топливно-воздушные вводы, выполнены в виде трубок и оснащаются керамическими огнепреградителями расчётного сопротивления для предотвращения проскока пламени в смесеобразующий коллектор.

Объем камеры сгорания рассчитывается в соответствии с заданной мощностью устройства. По результатам исследований, камеру сгорания рекомендуется выполнять в форме диффузора, что позволяет предотвращать образование застойных течений в момент розжига. Расстояние от входа топливно-воздушной смеси в камеру сгорания до пористой пластины выбирается из условия замедления скорости потока. Поджёг смеси, внутри камеры сгорания, производится с помощью запального устройства на основе иридиевой свечи зажигания, так как к этому элементу предъявляются требования по термостойкости и надёжности. Внутренняя поверхность камеры сгорания закрыта плотно подогнанными пластинами из огнеупорного материала, что позволяет предотвратить перегрев корпуса камеры сгорания.

После поджёга смеси в камере сгорания продукты реакции нагревают пористую пластину [2] и зона активного горения перемещается на внутреннюю поверхность пластины. Это способствует её разогреву и пластина начинает излучать теплоту как наружу, так и вовнутрь камеры сгорания на изоляционный материал, который охлаждается набегающим потоком свежей смеси. За счёт этого происходит рекуперация тепловой энергии, что позволяет сильней разогреть пористый материал и способствует увеличению плотности испускаемого им теплового потока.

Обязательным условием надежной работы установки является контроль за процессом горения. Воспламенение происходит в закрытой камере сгорания и момент розжига первоначально определяли по уровню шума, что не допустимо в условиях промышленной эксплуатации. В связи с этим принято решение организовать визуальный контроль, так как избыточное давление в камере сгорания практически отсутствует. Система автоматического регулирования процессом горения оснащена контроллером температуры внутренней стенки камеры сгорания. Надежная работа при наборе мощности сопровождается непрерывным ростом температуры до заданного значения. В случае нарушения горения происходит падение температуры, но так как материал пластины и теплоизоляции камеры сгорания имеет большую тепловую инерцию, то восстановить процесс горения без использования запальника возможно в течение 2 минут.

Оптимизация конструкции камеры сгорания и системы управления устройства с пористой пластиной позволила сделать её пригодной для использования в промышленных теплотехнологических процессах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZNS-2024-0003).

Список литературы

[1] Fursenko R., Maznoy A., Odintsov E., Kirdyashkin A., Minaev S., Sudarshan K. Temperature and radiative characteristics of cylindrical porous Ni-Al burners // International Journal of Heat and Mass Transfer. - 2016. - V. 98. - P. 277-284.

[2] Maznoy, A., Pichugin, N., Kirdyashkin, A. Zambalov, S., Guschin, A. Predicting oxidation-limited lifetime of Ni-Al-Cr porous radiant burners made by combustion synthesis, Journal of Alloys and Compounds., 2023, 934, 167885.

УДК 621.311.22

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВВОДА ВЛАГИ В ЗОНУ АКТИВНОГО ГОРЕНИЯ В КОТЛАХ С РАЗЛИЧНОЙ КОМПАНОВКОЙ ТОПОЧНО-ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ

Штым К.А.[1)], Лесных А.В.[1)], Глазебная А.А. [1)]

[1)] Дальневосточный Федеральный университет, г. Владивосток, Россия

Как известно ввод влаги в зону активного горения позволяет снизить эмиссию оксидов азота (NO_x) за счет отвода теплоты равной по величине скрытой теплоте парообразования [1]. Средняя эффективность данного мероприятия составляет 20 % [2,3]. Принято считать, что доля снижения выбросов оксидов азота прямо пропорционально количеству впрыскиваемой влаги, однако увеличение доли впрыска на величину более 10 % негативно сказывается на технико-экономических показателях работы котла в том числе повышение потерь теплоты с уходящими газами (q_2) и с химических недожогом топлива (q_3) [4,5]. Количество впрыскиваемой влаги оценивается через водотопливное соотношение (1):

$$g = \frac{G_{\text{вл}}}{G_{\text{тпл}}} \quad (1)$$

Исследование по влиянию впрыска в топочную камеру проводились на котле БКЗ 210-140 при работе на природном газе, загрузкой 6 горелок с компоновкой треугольником с вершиной вниз. При впрыске через нижний ярус горелок в диапазоне водотопливного соотношения (g) от 0 до 15 % никакого изменения в концентрации оксидов азота не наблюдалось. При отключении нижнего яруса горелок и впрыске воды через каждую горелку верхнего яруса с увеличением впрыска до 30 % выбросы оксидов азота сократились до 20 %, при этом отсутствовал химический недожог, но увеличение q_2 составило 0,65 %. Это говорит о том, что в данном случае за счет воздействия сопел третичного дутья относительный уровень расположения ядра факела оцениваемый параметром M находится немного ниже расположения второго яруса горелок. При впрыске через верхний ярус факел, создаваемый штатными форсунками, частично воздействует на зону максимальных температур и фактическое снижение NOx ниже расчетного, практически в два раза. При впрыске через нижний ярус горелок ядро факела не перекрывается и соответственно никакого эффекта от впрыска нет.

При осуществлении впрыска воды на котле КВГМ 100-150 МЦ оборудованном циклонно-вихревыми предтопками (*ЦВП*) и работе на нагрузках 40 – 100 Гкал/ч независимо от водотопливного соотношения с вводом влаги в камеру сгорания ЦВП не дает никакого эффекта. Однако со снижением нагрузки котла ниже 38 Гкал/ч отмечается значительное снижение NOx до 35 % при водотопливном соотношении 8 %. Это объясняется тем, что при низких нагрузках и относительно низких скоростях газотопливного потока зона активного горения находится непосредственно в камере сгорания *ЦВП* и впрыск через односопловую форсунку позволяет ее полностью перекрыть. С увеличением нагрузки зона активного горения полностью смещается в топочную камеру и впрыск в камеру сгорания ЦВП приводит к увеличению объемов продуктов сгорания.

Список литературы

1. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод) Абрютин А. А., Карасина Э. С., Петросян Р. А. //СПб.: Изд-во «ВТИ» и НПО «ЦКТИ. – 1998.
2. Трембовля В.И. и др. "Теплотехнические испытания котельных установок", - М., "Энергия", 1977.
3. СТО 70238424.13.020.30.002-2010. Методика расчёта и установления максимальных допустимых удельных выбросов для действующих котельных установок тепловых электростанций
4. Методические указания по составлению и содержанию энергетических характеристик оборудования тепловых электростанций: РД 34.09.155-93. - М.: СПО ОРГРЭС, 1993.
5. Бузников Е.Ф., Роддатис К.Ф., Берзиньш Э.Я. Производственные и отопительные котельные., М.: Энергоатомиздат, 1984, -248 с.

УДК 621.311

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОМУ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ И ЭКОНОМИЧЕСКОМУ АНАЛИЗУ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ CO2-ЦИКЛОВ

Щинников П.А.[1)], Садкин И.С.[1)]

[1)] Новосибирский государственный технический университет

Современная климатическая повестка ставит задачу снижения выбросов углекислоты в атмосферу при производстве электроэнергии на основе сжигания органического топлива. Одним из вариантов технических решений является использование CO_2-циклов в основе генерирующих установок [1-6]. Такие технические решения не имеют широкого распространения в мировой практике, анализ их работы затруднён, методическое обеспечение для анализа разрабатывается каждым коллективом, изучающим проблему, самостоятельно. В докладе представлены основные положения методологии исследования CO_2-циклов, разработанные в НГТУ, коллективом УНЛ "Теплоэнергетика". Показана работоспособность методологии, представлены некоторые результаты анализа работоспособности энергетических установок на основе CO_2-циклов. Основные теоретические положения методологии включают совокупность методических подходов, каждый из которых отражает отдельный аспект анализа с собственными задачами и опирается на группу методов. Применение подобного подхода можно расширить до анализа любых перспективных технологий генерации электроэнергии на основе сжигания органического топлива.

В докладе приводятся некоторые результаты, проведённого анализа установок на основе CO_2-циклов в разных конфигурациях. В частности показано, что термическая эффективность CO_2-циклов при сжигании метана высока и лежит в диапазоне значений 0,55-0,65 в зависимости от архитектуры цикла и, даже, 0,72 при сжигании метанола. Энергетическая их эффективность существенно ниже в связи с высокими затратами электроэнергии на собственные нужды (от 20 до 48%, при сжигании метана). Себестоимость электроэнергии составит 5,9-6,9 центов US$/кВт*ч электроэнергии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 23-29-00035, https://rsct.ru/project/23-29-00035/

Список литературы

1. Allam R., Martin S., Forrest B., et al. Demonstration of the Allam Cycle: an update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture. Energy Procedia 2017; 114; 5948-5966. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1731
2. Kosoi A.S., Zeigarnik Y.A., Popel O.S. et al. The Conceptual Process Arrangement of a Steam–Gas Power Plant with Fully Capturing Carbon Dioxide from Combustion Products. Therm. Eng 2018; 65; 597–605. https://doi.org/10.1134/S0040601518090045
3. Rogalev A., Grigoriev E., Kindra V., Rogalev N. Thermodynamic optimisation and equipment development for a high efficient fossil fuel power plant with zero emissions. J. Clean. Prod. 2019; 236; 117592. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.067
4. Thermodynamic features of the regenerative system of direct fired sCO2 power cycles with oxygen combustion of methane / I. S. Sadkin, P. A. Shchinnikov. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2023.121301. – Text : direct // Applied Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 234. – Art. 121301.
5. Alekseenko S.V., Shchinnikov P.A., Sadkin, I.S. Effect of thermodynamic parameters on energy characteristics of CO2 power cycles during oxygen combustion of methane. Thermophysics and Aeromechanics. 2023; 30; 83–92. https://doi.org/10.1134/S0869864323010109
6. La Porte Test Facility. NET Power. https://netpower.com; 2023 [accessed 15 July 2023].

УДК 544.452.4

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПЛАМЕН В СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ: МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ПОРОВОМ МАСШТАБЕ

Яковлев И.А.[1)], Астахов Д.С. [1,2)]
[1)] Томский научный центр СО РАН, г. Томск, Россия
[2)] Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Технология сжигания газообразных смесей в пористых средах обладает рядом важных преимуществ по сравнению с системами со свободным пламенем вследствие механизма рекуперация тепла от продуктов сгорания к свежей смеси за счет теплопроводности твердой фазы и излучения. Однако, возникает проблема стабилизации волны горения в пределах реактора. Известно решение, когда пористая среда исполняется в виде неоднородной структуры в виде двух слоев с мелкими и крупными порами [1] или с градиентным переходом [2].

При исследовании таких эффектов стабилизации пламен, объемно-осредненные подходы фильтрационного горения способны учитывать тепловые эффекты и среднюю дисперсию потока, однако, локальная структура пламен на поровом масштабе не может проанализирована.

В данной работе показано, что в стабилизации фронта горения в пористых средах важную роль играет структура течения в порах [3]. Например, в двухслойных пористых горелках фронт пламени якорится на элементах каркаса и локализуется вдоль линий отрывных течений и вблизи зон рециркуляции потока. На рис. 1 показана локальная структура фронта пламени в модельной двухмерной упаковке частиц. Было показано, что в условиях высоких скоростей фильтрации расширение предела срыва пламени определяется не только механизмом рекуперации тепла, но и эффектами растяжения и искривления фронта в существенно неоднородном поле течения.

Результаты показывают, что оптимизация локальной структурой пористой матрицы позволяет управлять процессом горения. В частности, аддитивные технологии производства изделий из керамики позволяет получать пористые блоки с заданной структурой, где обеспечивается как эффективный теплоперенос, так и оптимальная структура течения.

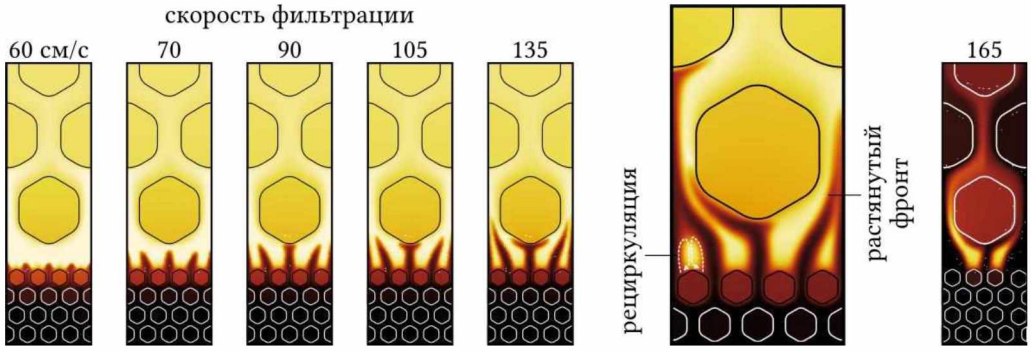


Рис. 1. Зависимость итоговой конверсии от времени контакта.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01328, https://rscf.ru/project/23-79-01328/.

Список литературы

1. Ellzey J.L., Belmont E.L., Smith C.H. Heat recirculating reactors: Fundamental research and applications // Prog. Energy Combust. Sci. – 2019. – V. 72. – P. 32–58.
2. Sobhani S., Muhunthan P., Boigné E., Mohaddes D., Ihme M. Experimental feasibility of tailored porous media burners enabled via additive manufacturing // Proc. Combust. Inst. – 2021. – V. 38. – P. 6713–6722.
3. Muller F., Dounia O., Selle L. Direct pore-level simulation of hydrogen flame anchoring mechanisms in an inert porous media // Phys. Fluids. – 2024. – V. 36. – P. 013336.

УДК 662.731

УТИЛИЗАЦИЯ ПИХТОВОГО ШРОТА В СЛОЕВОМ КОТЛЕ

Янковская Н.С.[1]
[1)] Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Предприятие, производящее полезные косметологические и фармацевтические продукты из хвойного сырья сталкивается с существенной проблемой утилизации отходов производства в виде так называемого шрота [1]. Эти отходы большей степени складируются на длительное хранение. Решение задачи полезной и энергоэффективной переработки подобных отходов актуально для предприятий, работающих в направлении биотехнологий. Одним из возможных и наиболее доступных путей решения данной проблемы может стать совместная утилизация отработанной биомассы (пихтового шрота) совместно с углем, например, для выработки тепла на том же производстве, где и организована технология переработки биомассы с получением полезных продуктов [2]. Целью данного исследования является апробация результатов лабораторных исследований, которые показали потенциальную возможность замены 50 % угля по массе пихтовым шротом. В отличие от лабораторных испытаний в натурных экспериментах не проводилось совместное измельчение шрота и угля, а использовалось естественное состояние шрота после завершения переработки пихтового хвойного сырья.

В работе приведены результаты натурных испытаний совместного сжигания угля и отходов производств фармакологического и косметического назначения на основе переработки пихтовой хвои, называемой далее пихтовым шротом. Сжигание смеси осуществлялось в энергетическом котле Q MAX EKO 1000 кВт в соотношении угля и шрота, равном по массе.

Испытания показали, что добавление пихтового шрота к углю в целом является эффективным мероприятием для сжигания (особенно низкореакционного угля), поскольку повышенных выход летучих веществ интенсифицирует процесс горения. Вместе с тем проявились затруднения в поддержании стабильных параметров теплоносителя на выходе из котла, что оказалось неприемлемым по условиям технологии переработки сырья. Они состояли в периодических флуктуациях горения, которые сказывались на колебаниях содержания кислорода и соответственно избытка воздуха в уходящих газах, а также значений К.П.Д (брутто) в диапазоне 85-91%.

Установленная в ходе натурного эксперимента причина этого состоит в формировании слоя в топке данного котла. Особенностью котла Q MAX EKO 1000 является наличие слоевой топки ретортного типа, в которой топливо поступает в слой снизу под действием шнекового механизма, в результате чего в топочном пространстве на круговой колосниковой решетке образуется слой с конусообразной поверхностью, в котором на вершине конуса находится вновь поступившее свежее топливо, а у его основания по окружности – выход золошлаковых остатков. Такая подача топлива приводит к неравномерному распределению компонентов смеси, при котором более мелкие фракции шрота проваливаются вниз в промежутки между крупными частицами угля. В результате выполненных натурных испытаний можно сделать вывод, что смесь пихтового шрота с углем является перспективным видом топлива, но для слоевых топок ретортного типа требуется дополнительная подготовка смеси, например, пеллетирование.

Работа выполнена при финансовой поддержке Томского политехнического университета в рамках проекта ПИШ-НИР-2024-011.

Список литературы

1. Anastopoulos I, Katsouromalli A, Pashalidis I (2020) Oxidized bio-char obtained from pine needles as a novel adsorbent to remove caffeine from aqueous solutions. J Mol Liq 304:112661

R. Saidur, E. A. Abdelaziz, A. Demirbas, M. S. Hossain, и S. Mekhilef, «A review on biomass as a fuel for boilers», Renewable and Sustainable Energy Reviews, т. 15, вып. 5. Pergamon, сс. 2262–2289, июнь 2011 г. doi: 10.1016/j.rser.2011.02.015. УДК 62-408

УДК 62-408

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ, СОДЕРЖАЩИХ БОЛЬШОЕ КОЛИЧЕСТВО КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЫ, С ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ВЫХОДНЫХ ТРАНСЗВУКОВЫХ ВТУЛОК ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

Яновский Л.С., Суриков Е.В.[@]
ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», г. Москва, Россия
[@]*e.v.surikov@ya.ru*

В работе ряда энергетических установок используются газогенераторы, где осуществляется процесс первичного сжигания твёрдого топлива при достаточно высокой температуре (от 1000 до 2000 К).

Для обеспечения независимости процесса сгорания от условий вне газогенератора на его задней крышке используются выходные втулки, обеспечивающие сверхкритический перепад давления.

Продукты газогенерации часто имеют сложный химический и фазовый состав и могут содержать конденсированную фазу, доля которой превышает 50 %. С одной стороны, она оказывает термическое, химическое и эрозионное воздействие на внутреннюю поверхность втулок, способствуя увеличению их диаметра. С другой стороны, продукты газогенерации могут налипать и осаждаться на поверхности теплообмена и приводить к уменьшению диаметра выходных втулок. Данные явления особенно чувствительны при малых размерах диаметров выходных втулок.

Использование углеродных материалов, в частности, графита марки МПГ-7, показало хорошую термоэрозионную стойкость выходных втулок, но не решило проблему зашлаковки тракта конденсированной фазой.

В качестве конструктивного решения по предотвращению шлакования в качестве материала выходных втулок далее использован псевдосплав вольфрам-медь, марки ВД-МП, с содержанием меди 18%. Рассматриваемый материал относится к классу так называемых «потеющих» сплавов». Данное решение позволило существенно облегчить проблему шлакования рабочей поверхности втулок, но поставило задачу оценки деградации материала в процессе использования.

Исследования структуры, элементного и фазового состава поверхности и приповерхностного слоя образцов были получены с применением методов растровой и просвечивающей электронной микроскопии с возможностью микрорентгеноспектрального анализа [1].

В результате проведенных исследований обнаружено проявление инициированного воздействием высокотемпературного (1500 К) полидисперсного потока газа эффекта полного исчезновения частиц медной фазы (размером до нескольких микрометров) из поверхностного слоя (на глубину до 30 мкм за 90 с) образцов промышленного псевдосплава (композита) марки ВД-МП (W – 18 % Cu) путём диффузии атомов меди по внутренним поверхностям раздела (границам зёрен и субзёрен) вольфрама с образованием полостей на местах бывших частиц меди и наноразмерной пористости.

Почти двукратное увеличение времени воздействия на материал втулок, путём снижения расхода продуктов газогенерации одинаковой исходной массы, привёл к двукратному снижению толщины слоя (около 15 мкм), из которого медь вышла на поверхность.

Данное явление необходимо учитывать при прогнозировании ресурса работы втулок из рассматриваемого материала. Для задаваемых времён воздействия на материал нет необходимости использовать втулки с толщиной стенки, превышающей технологически приемлемую величину.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543.

1. Колобов Ю.Р., Манохин С.С., Суриков Е.В., Яновский Л.С. Исследование особенностей эволюции структуры приповерхностного слоя псевдосплава W-Cu при воздействии высокотемпературным газовым потоком // Известия вузов. Физика. 2021, № 4, с. 63–66.

УДК 536.3

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ РАЗРЫВОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВЕРХОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА

Перминов В.А. [1)], Касымов Д.П.[2)], Голубничий Е.Н. [2)]
[1)] Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
[2)] Томский государственный университет, г. Томск, Россия

На практике для защиты и охраны лесов от пожара используются лесопожарные разрывы и заслоны. Лесопожарный заслон представляет собой лесную полосу из деревьев негоримых лиственных пород, а кроме того, может быть реализован созданием переувлажненной полосы перед фронтом пожара из тех же пород деревьев, что и основной участок. Эти полосы препятствуют распространению верховых и низовых лесных пожаров.

Рассматривается нестационарная задача о зажигании лесного массива и возникновения верхового лесного пожара.

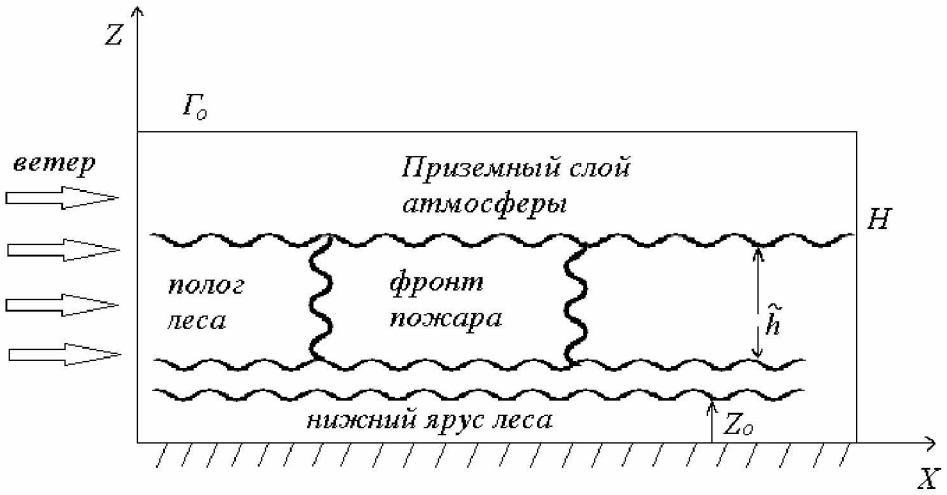


Рис. 1. Схема зоны двумерного пожара

С использованием разработанной математической модели проведены расчеты, показывающие зависимость массовой концентрации кислорода и газообразных горючих продуктов пиролиза; распространение фронта пожара при различных скоростях ветра в различные моменты времени; зависимости длины противопожарного разрыва от скорости ветра при различных значениях влагосодержания ЛГМ. Верификация предложенной математической модели производилась на основании серии экспериментальных исследований по моделированию фронта горения с учетом противопожарных разрывов с переменными параметрами (ширина, запас ЛГМ, влагосодержание).

Полученные результаты и зависимости позволяют получить критические условия распространения верхового лесного пожара при заданных размерах разрыва, значениях влагосодержания и запаса ЛГМ, скорости ветра, что, в свою очередь, дает возможность применять такой метод расчетов для профилактики и разработки новых методик тушения и предотвращения лесных пожаров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-21-00069).

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

К

Л

М

Н

О

П

Р

С

Т

У

Ф

Х

Ц

Ч

Ш

Щ

Ю

Я

XI Всероссийская конференция с
международным участием
ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА: ТЕОРИЯ,
ЭКСПЕРИМЕНТ, ПРИЛОЖЕНИЯ
ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ
9–12 ноября 2021 года
г. Новосибирск

ISBN 978-5-89017-089-7

Ответственный за выпуск:
к.т.н. Бутаков Е.Б.

Подписано в печать 5.11.2024 г. Печать офсетная.
Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Усл. Печ. 20 л.
Номер заказа 1368

Отпечатано в типографии «Дигит Про»
г. Новосибирск, ул. Журинская, оф.208
Тел. 8-909-534-58-31