Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

X Всероссийская конференция

с международным участием

ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА: ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ, ПРИЛОЖЕНИЯ

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

6-9 ноября 2018 года

г. Новосибирск

Конференция проводится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант № 18-08-20122

Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: Сб. тезисов докладов X Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 6-9 ноября 2018 г. – Новосибирск: Срочная полиграфия, 2018. – 145 с.

ISBN 978-5-89017-060-6

Сборник содержит тезисы докладов X 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

Сопредседатели:
Алексеенко С.В., академик РАН, ИТ СО РАН
Маркович Д.М., чл.-корр. РАН, ИТ СО РАН

Заместители председателя:
Шарыпов О.В., д.ф.-м.н., ИТ СО РАН
Шторк С.И., д.ф.-м.н., ИТ СО РАН

Ученые секретари:
Бутаков Е.Б., к.т.н., ИТ СО РАН
Чикишев Л.М., ИТ СО РАН

Члены оргкомитета:
Васильев А.А., д.ф.-м.н., ИГиЛ СО РАН
Дулин В.М., д.ф.-м.н., ИТ СО РАН
Куйбин П.А., д.ф.-м.н., ИТ СО РАН
Лукашов В.В., к.т.н., ИТ СО РАН
Перепечко Л.Н., к.ф.-м.н., ИТ СО РАН
Прууэл Э.Р., к.ф.-м.н., ИГиЛ СО РАН
Терехов В.В., д.ф.-м.н., ИТ СО РАН
Цепенок А.И., к.т.н., ООО «ЗиО-КОТЭС»
Шмаков А.Г., к.х.н., ИХКГ СО РАН

Программный комитет
Алексеенко С.В., академик РАН, ИТ СО РАН, председатель
Маркович Д.М., чл.-корр. РАН, ИТ СО РАН, зам. председателя
Аглиулин С.Г., ген. директор, АО «Сибтехэнерго», Новосибирск
Баев В.К., д.т.н., ИТПМ СО РАН, Новосибирск
Батенин В.М., чл.-корр. РАН, ОИВТ РАН, Москва
Батмунх С., академик АН Монголии, МонГУНТ, Монголия
Благодырь И.В. зам. пред. СО РАН, Новосибирск
Бородуля В.А., чл.-корр. НАНБ, ИТМО НАНБ, Минск, Беларусь
Бурдуков А.П., д.т.н., ИТ СО РАН, Новосибирск
Волков Э.П., академик РАН, ОАО «ЭНИН», Москва
Вонг Чоу Сан, профессор, УМПТИЦ, Малайзия
Грицко Г.И., чл.-корр. РАН, ИНГГ СО РАН
Даниленко В.Г., ген. директор, АО «ПМЗ», Подольск

Дектерев А.А., к.т.н., ИТ СО РАН, Новосибирск
Ждан С.А., д.ф.-м.н., ИГиЛ СО РАН, Новосибирск
Заворин А.С., д.т.н., ТПУ, Томск
Зарко В.Е., д.ф.-м.н., ИХКГ СО РАН, Новосибирск
Иноземцев А.А., чл.-корр. РАН, АО «ОДК-Авиадвигатель», Пермь
Исмагилов З.Р., чл.-корр. РАН, ИУХМ СО РАН, Кемерово
Кавтарадзе Р.З., д.т.н., МГТУ
Ки Ф., профессор, Шанхайский университет Джао Тонг, Китай
Клименко А.В., академик РАН, МЭИ, Москва
Коржавин А.А., д.т.н., ИХКГ СО РАН, Новосибирск
Коробейничев О.П., д.ф.-м.н., ИХКГ СО РАН, Новосибирск
Кочетков В.Н., д.т.н., КемНЦ СО РАН, Кемерово
Крюков В.А., чл.-корр. РАН, ИЭОПП СО РАН, Новосибирск
Кузнецов М.В., ген. директор, ООО «СГК», Новосибирск
Левин В.А., академик РАН, МГУ, Москва
Мессерле В.Е., д.т.н., ИПГ КазНУ, Алматы, Казахстан
Минаев С.С., д.ф.-м.н., ДВФУ, Владивосток
Носков А.С., д.т.н., ИК СО РАН, Новосибирск
Пармон В.Н. академик РАН, СО РАН, Новосибирск
Пенязьков О.Г., академик НАНБ, ИТМО НАНБ, Минск, Беларусь
Потатуркин О.И., д.т.н., ИАиЭ СО РАН, Новосибирск
Рыжков А.Ф., д.т.н., УрФУ, Екатеринбург
Саломатов В.В., д.т.н., ИТ СО РАН, Новосибирск
Серант Ф.А., д.т.н., ООО «ЗиО-КОТЭС», Новосибирск
Скьялдоне О., профессор, университет Палермо, Италия
Снегирев А.Ю., д.т.н., СПБПУ, Санкт-Петербург
Старченко А.В., д.ф.-м.н., ТГУ, Томск
Стенников В.А. чл.-корр. РАН, ИСЭМ СО РАН, Иркутск.
Сысолятин С.В. д.х.н., ИПХЭТ СО РАН, Бийск
Терехов В.И. д.т.н., ИТ СО РАН, Новосибирск
Титов В.М., академик РАН, ИГиЛ СО РАН, Новосибирск
Титова Н.С., к.ф.-м.н., ЦИАМ, Москва
Тугов А.Н., д.т.н., ОАО «ВТИ», Москва
Тумановский А.Г., д.т.н., ОАО «ВТИ», Москва
Фаворский О.Н., академик РАН, ОЭММПУ РАН, ЦИАМ, Москва
Федорук М.П., чл.-корр. РАН, НГУ, Новосибирск
Фомин В.М., академик РАН, ИТПМ СО РАН, Новосибирск
Фортов В.Е., академик РАН, ОЭММПУ РАН, Москва
Фролов С.М., д.ф.-м.н., ИХФ РАН, Москва
Ханъялич К., профессор, ТУ Делфт, Нидерланды
Чернова Г.В., к.т.н., ИТ СО РАН, Новосибирск
Шмотин Ю.Н., д.т.н., АО «ОДК», Москва
Штым К.А., д.т.н., ДВФУ, Владивосток
Щинников П.А., д.т.н., НГТУ, Новосибирск
Энхсаруул Б., профессор, МНУ, Монголия

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

«Численное моделирование процессов в технологиях энергетического использования угля»
Дектерев Александр Анатольевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

«Применение трехмерного численного моделирования процессов горения при проектировании малоэмиссионных камер сгорания ГТД»
Сипатов Алексей Матвеевич – доктор технических наук, профессор, начальник отдела камер сгорания ОАО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Россия

«Новые подходы к изучению горючести полимерных материалов»
Коробейничев Олег Павлович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск, Россия

«Химическое ингибирование процессов воспламенения газообразных топлив»
Еремин Александр Викторович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, г. Москва, Россия

«Механизмы образования температурных неоднородностей и их влияние на процессы горения и детонации»
Пенязьков Олег Глебович – доктор физико-математических наук, Академик Национальной академии наук Беларуси, директор, Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Беларусь

«Топливные композиции на основе углей. Эксперимент, теория, практика, перспективы»
Кузнецов Гений Владимирович - доктор физико-математических наук, профессор, Томский политехнический университет г. Томск, Россия

«Газификация механоактивированного угля при подаче пара в поточную установку»
Рыжков Александр Филиппович – доктор технических наук, профессор, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

«Отработка технологий лазерной диагностики в исследованиях процессов распыла топлива и течений в камерах сгорания ГТД»
Диденко Алексей Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара, Россия

«Моделирование воспламенения пылеугольного топлива в плазменно-топливной системе»
Мессерле Владимир Ефремович – доктор технических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем горения КазНУ -- им. Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

«Диффузионное горение микроструи водорода при до и сверхзвуковом истечении из сопла (явление запирания)»
Козлов Виктор Владимирович - доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт теоретической и прикладной механики им С.А. Христиановича, г. Новосибирск, Россия

«Топливно-энергетический комплекс России и Сибири: проблемы и перспективы»
Суслов Никита Иванович – доктор экономических наук, профессор, заместитель директора, Институт экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия

ГАЗИФИКАЦИЯ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ ПРИ ПОДАЧЕ ПАРА В ПОТОЧНУЮ УСТАНОВКУ

Абаимов Н.А.[1], Бурдуков А.П.[2], Бутаков Е.Б.[2], Рыжков А.Ф.[1]
[1] Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия
[2] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В настоящее время вопросы повышения энергоэффективности угольных электростанций с использованием технологии газификации угля находят все больший интерес среди исследователей. Поточный газификатор на воздушном дутье является основным узлом таких станций - парогазовых установок с внутрицикловой газификацией (ПГУ-ВЦГ), так как во многом определяет режим работы газотурбинной установки (ГТУ).

Цель работы - получение новых сведений о высокотемпературном процессе термохимической конверсии механоактивированного угля в паровоздушной среде для разработки перспективного газификатора парогазовой установки с внутрицикловой газификацией. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: 1) провести экспериментальные исследования высокотемпературной паровоздушной газификации в поточном реакторе, включающие ряд различных режимов работы и получить фактические данные для отладки вычислительных инструментов; 2) отработать и верифицировать на полученном экспериментальном материале вычислительные инструменты; 3) с их помощью изучить фундаментальные закономерности, позволяющие повышать теплоту сгорания синтез-газа и отношение H_2/CO в нём.

Повышение реакционной способности окисленного кузнецкого каменного угля с высокой влажностью за счёт механоактивации позволяет решить проблему энергодефицита в газификаторе на воздушном дутье с подачей водяного пара, доказательством чему служит проведённое исследование работы поточной установки ИТ СО РАН с неадиабатной стенкой, автотермический режим в которой поддерживается при подаче холодного воздуха с низким коэффициентом расхода окислителя 0,42 и значительного количества пара (до 0,5 кг пара/кг угля).

Подаваемый в установку пар выполняет функции разбавителя и окислителя. Разбавление реагирующей гетерогенной системы уголь-воздух паром вызывает противоположные эффекты: снижение температуры реагирующей смеси и уменьшение скорости реакций горения и (особенно) газификации; повышение концентрации кислорода в головной части установки, увеличение тепловыделений, температуры и скорости реагирования, а также снижение мехнедожога.

Появление в системе нового более активного чем CO_2 окислителя приводит к качественному изменению в составе синтез-газа в сторону заметного повышения H_2/CO при снижении его теплоты сгорания. В результате на каждые 0,1 кг пара на кг угля происходит увеличение H_2/CO на 4-6% и снижение теплоты сгорания на 3-8%.

С ростом температуры пара от 200 до 2000°C количество теплоты, подаваемой в газификатор, увеличивается на 15%, а температура смеси за счёт этого возрастает на 400 K. В связи с этим теплота сгорания синтез-газа и H_2/CO возрастают на 10%. Столь незначительное влияние температуры пара объясняется малым расходом пара относительно газо-топливной смеси.

Термодинамическое исследование 2 теоретически возможного режима показало, что синтез-газ с равновесного состава будет иметь теплоту сгорания порядка 4,5 МДж/м^3, соответствующую теплоте сгорания стандартного воздушного синтез-газа, и отношение H_2/CO чуть больше 1, что характерно для паровоздушной газификации.

Экспериментальные исследования, верификация модели, численное (CFD) моделирование и выработка механизмов управления газификацией в установке ИТ СО РАН 1 МВт выполнены при финансовой поддержке РФФИ, грант № 16-38-50188 (Абаимов Н.А., Бурдуков А.П.).

Исследование в части термодинамического моделирования и разработки CFD-модели выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00524) (Абаимов Н.А., Рыжков А.Ф.).

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИЕ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

Абдуракипов С.С., Бутаков Е.Б., Кузнецов А.В.
Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В данной работе искусственная нейронная сеть была применена к экспериментальным данным, полученным методом термогравиметрического анализа. Экспериментальные измерения проводились в широком диапазоне температур (от комнатной до 1000 С) при разных скоростях нагрева угольной смеси различного состава и степени измельчения. Данные о типе угля, степени измельчения, скорости нагрева и температуре нагрева в качестве значимых параметров, влияющих на тепловое поведение при горении, были использованы для обучения многослойной искусственной нейронной сети предсказывать кривые термогравиметрического анализа (зависимость коэффициента потери угольной массы). Показано, что модель четырехслойной нейронной сети позволяет прогнозировать кривые ТА с хорошей точностью (средняя относительная ошибка равняется 7%, коэффициент детерминации равен 92%), что подтверждается сравнением с тестовыми экспериментальными данными.

Данные для обучения состоят из 4 параметров: температура, скорость нагрева, тип угля и степень измельчения. Последние три имеют категориальный или порядковый тип, поэтому для использования в модели были закодированы с помощью процедуры бинаризации (в виде 0 и 1). Таким образом, входной слой нейронной сети включает 17 параметров. Целевым параметром, зависимость которого мы хотим обучиться наиболее точно описывать - коэффициент потери угольной массы. Перед применением в модели данные масштабировались на отрезок 0-1.

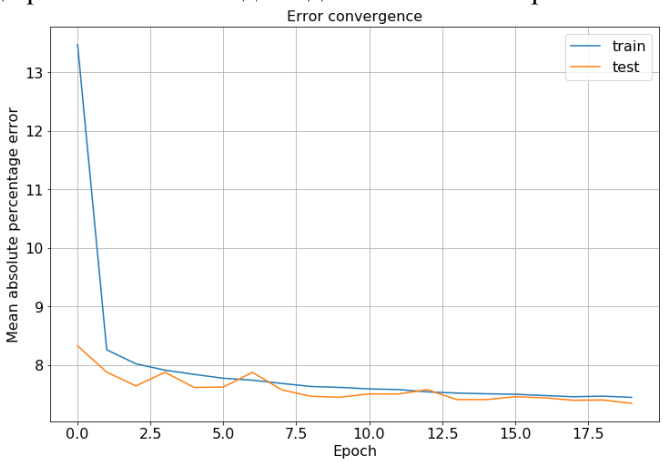


Рис. 1 Кривая обучения. Функция потерь в зависимости от номера эпохи обучения.

Финальная оценка качества модели проверялась на тестовой выборке. Обучение нейронной сети на тренировочной части останавливалось, когда величина функции ошибки начинала сходиться и далее переставала снижаться с ростом числа эпох (ранняя остановка). Ранняя остановка обучения происходила на 19-ой эпохе при размере бэтча равного 100.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 18-48-543015.

Список литературы

1. Peisheng, L., Youhui, X., Dunxi, Y., & Xuexin, S. (2005). Prediction of grindability with multivariable regression and neural network in Chinese coal. Fuel, 84(18), 2384-2388.

ПЛАЗМЕННАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ ТБО И ТАРИФЫ НА УТИЛИЗАЦИЮ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Аверкин П.А.
Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН,
г. Новосибирск, Россия

В связи со значительными изменениями государственной политики утилизации твердых бытовых отходов (ТБО) [1], вырос интерес к современным технологиям утилизации мусора, не предполагающим захоронение основной массы отходов (сортировка с последующим сжиганием или газификацией). Однако, значительные капитальные затраты и высокие операционные расходы, связанные с внедрением новых методов переработки ТБО, не позволяют экономически эффективно функционировать подобным предприятиям при сохранении прежнего уровня тарифов.

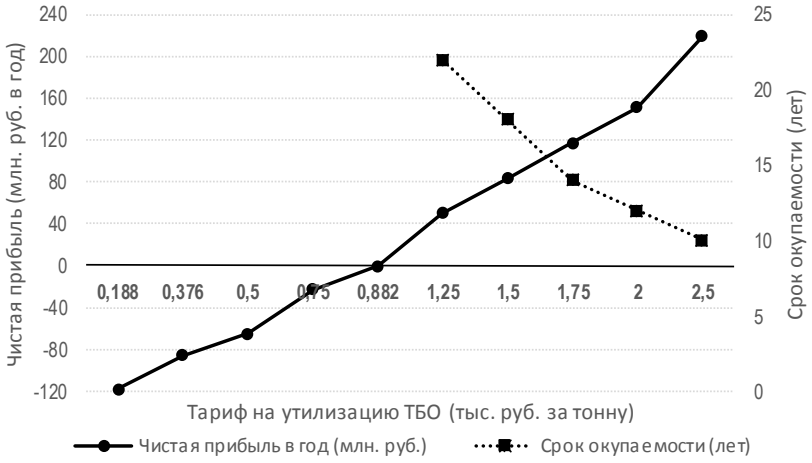


Рис.1. Объем чистой прибыли завода и срок окупаемости в зависимости от тарифа на утилизацию ТБО

В рамках работ по созданию системы обращения с отходами в Новосибирской области, автором оценивался ряд разрабатываемых современных технологий переработки ТБО, включая роботизированную сортировку отходов и плазменную газификацию. Технико-экономическая оценка завода по переработке ТБО в синтез-газ для близлежащей котельной показала, что его экономически эффективная деятельность невозможна без увеличения тарифов относительно текущего уровня практически в 5 раз (см. Рис. 1). При этом, отказ от предварительной сортировки ТБО и/или реализации синтез-газа ещё более увеличивали тариф для населения, как и переработка на предприятии ТБО с существующего полигона.

Проведенные оценки показали, что коммерчески привлекательными современные технологии утилизации ТБО становятся при росте тарифов в 8-10 раз. Сохранение умеренного уровня тарифов возможно при предоставлении подобным заводам налоговых льгот, облегчении сбыта производимых ими вторсырья, тепла и электроэнергии при увеличении производительности предприятий до уровня 150-200 тыс. тонн ТБО в год.

Список литературы

1. Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года. Распоряжение Правительства РФ от 25 января 2018 года №84-р // Портал Правительства России. URL: http://government.ru/docs/31184 (дата обращения: 11.06.2018)

БЕЗМАЗУТНЫЕ РАСТОПКИ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОАГРЕГАТОВ НА ПРИМЕРЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПАО «ИРКУТСКЭНЕРГО»

Аглиулин С.Г., Яганов Е.Н., Наумов Ю.И., Николаев С.Ф., Волобуев А.Н.
АО «Сибтехэнерго», г. Новосибирск, Россия

В рамках инновационной деятельности АО «Сибтехэнерго» проведены работы по промышленному внедрению систем электрохимического сжигания топлива (ЭХТС) в горелки пылеугольных котлов электростанций ПАО «Иркутскэнерго».

Целью работ являлось сокращение на электростанциях энергосистемы расходования мазута на растопку котлов.

Промышленному внедрению предшествовали исследовательские работы на огневом стенде, которые позволили определить граничные условия расходно-динамических параметров и оптимизировать конструкцию электродугового блока для эффективного зажигания угольной пыли непосредственно для котельного оборудования электростанций ПАО «Иркутскэнерго».

В рамках работы проанализированы характеристики сжигаемого топлива на котлах, основные конструктивные особенности оборудования. Проведен анализ параметров при пуске из различных состояний при растопке с помощью горелки, оснащенной системой ЭХТС.

Потребляемая электрическая мощность системы ЭХТС составила 5 кВт. Тепловая мощность горелок составляет до 8 МВт. Система обеспечивает стабильное и устойчивое воспламенение угольной пыли при пуске котла из холодного состояния и при режимах подсветки факела при паровых нагрузках котла от 30% до 60% без сжигания высокореакционного топлива. Горелка ЭХТС организовывает подачу в топочную камеру горящего факела с температурой 1250…1350 °С. Факел от муфельной горелки при работе системы ЭХТС распространяется вглубь топочной камеры на 4…7 м.

Всего проведено пять растопок котла ТП-10 (Е-220-100-545) из различных тепловых состояний и одна растопка котла ПК-24 (Пп-270-140-545) из холодного состояния.

Сделаны выводы о преимуществах применения электрохимической технологии. Система адаптируется к существующим системам пылесжигания и горелочным устройствам, не требуя значительных затрат по переделке имеющихся технологических решений. В настоящий момент ведутся работы по промышленному внедрению технологии ЭХТС на электростанциях ПАО «Иркутскэнерго», АО «Интер РАО - Электрогенерация», АО «Сибэко» и на нескольких котельных сибирского региона.

СТРУКТУРА ПЛАМЕНИ СМЕСИ ДИМЕТИЛОВЫЙ ЭФИР/O_2/AR ПРИ 1 АТМ

Альянова Н.В.[1)], Дмитриев А.М.[1),2)], Большова Т.А.[1)], Шварцберг В.М. [1)], Князьков Д.А. [1), 2)], Шмаков А.Г.[1), 2)], Коробейничев О.П.[1)]

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

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

Для дизельных двигателей в мире широко применяется диметиловый эфир (ДМЭ), вытесняющий традиционные топлива. В недалеком будущем диметиловый эфир может стать стратегическим энергетическим сырьем, замещающим нефть и ее производные. Потребление ДМЭ в виде моторного топлива постоянно увеличивается. Горение ДМЭ происходит без образования сажи, что позволяет не только снизить вредные выбросы в атмосферу, но и уменьшить потери топлива в виде несгоревшего углерода. В связи с этим, в последнее время интерес к химии горения ДМЭ и его смесей с различными топливами значительно возрос. Надежные данные о кинетике процессов горения ДМЭ необходимы при моделировании, оптимизации и разработке усовершенствованных двигателей внутреннего сгорания. Целью этой работы является получение данных о химической структуре пламени ДМЭ при атмосферном давлении и проверка имеющихся в литературе детальных механизмов окисления ДМЭ.

Методом молекулярно-пучковой масс-спектрометрии и численного моделирования исследовано ламинарное предварительно перемешанное пламя стехиометрической смеси ДМЭ/O2/Ar = 0.0648 / 0.1852 / 0.75), стабилизированное на плоской горелке при 1 атм. Измерены профили мольной ДМЭ, O2, CO, CO2, H2O, H2 и промежуточные продукты, такие как метан, формальдегид, ацетилен, этан, этилен, кетен, перекись водорода, пропан, а также радикалы OH, H, CH3, HO2. Экспериментальные данные сопоставлены с результатами моделирования (PREMIX), полученными с использованием двух детальных кинетических механизмов окисления ДМЭ, предложенных в работе [Wang et al., Combust. Flame 2015, 162 (4), 1113-1125.] (Механизм 1), и в работе [Tran et al., Proc. Воспламеняться. Inst. 36, 2016] (механизм 2).

Механизм 1 предсказывает завышенную мольную долю ацетальдегида. Кроме того, этот механизм не включает реакции образования и окисления пропана, хотя его максимальная мольная доля в пламени, согласно измерениям, составила 3 × 10-5. В пламени также был обнаружен метоксиэтан (H3CCH2OCH3), однако в механизм 1 это соединение не включено. Механизм 2 хорошо предсказывает адекватно максимальные мольные доли всех соединений, идентифицированных в пламени. Согласно экспериментам и данным расчетов, формальдегид является наиболее значимым промежуточным соединением в пламени. Его измеренная максимальная мольная доля составляет ~ 8 × 10-3, однако оба механизма дают заниженное ее значение. Для установления недостатков механизмов в предсказании мольных долей промежуточных продуктов проведен кинетический анализ путей превращения ДМЭ.

ГОРЕНИЕ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В СТРУЕ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА

Ануфриев И.С., Копьев Е.П., Шарыпов О.В., Вигриянов М.С., Арсентьев С.С., Осинцев Я.А.
Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В устройствах для сжигания органического топлива вода (или пар) используется в целях снижения тепловой нагрузки и подавления детонации в камерах сгорания, обеспечения диспергирования тяжелых топлив, создания водо-топливных эмульсий. Использование воды является известным способом снижения концентрации NOx [1]. В ИТ СО РАН предложен способ сжигания жидкого углеводородного топлива в потоке перегретого водяного пара, при котором происходит газификация углеродосодержащих частиц неполного сгорания жидких углеводородов, при этом на горелочных устройствах испарительного типа было показано [2, 3] существенное влияние водяного пара на основные характеристики процесса. Указанный способ сжигания обеспечивает устойчивое воспламенение, высокую полноту сгорания топлива и низкое содержание токсичных компонентов в продуктах сгорания. Этот подход является перспективным для экологически безопасной утилизации низкокачественных жидких углеводородных топлив и горючих производственных отходов с получением тепловой энергии.

В данной работе экспериментально изучается процесс горения жидкого углеводородного топлива в горелочном устройстве с принудительной регулируемой подачей пара, в котором реализована перспективная схема диспергирования жидкого топлива [4]: распыление жидкого топлива обеспечивается в результате взаимодействия с высокоскоростной струёй перегретого водяного пара, без контакта топлива с форсункой. Отличительной особенностью данного способа является то, что топливо и распыляющая среда (несущая фаза) – водяной пар – предварительно не смешаны друг с другом: перегретый пар выходит из пневматической форсунки в виде струи, в которую подается жидкое топливо, в результате чего формируется мелкодисперсный газокапельный поток. Помимо распыления топлива, перегретый водяной пар повышает температуру топливных капель, что интенсифицирует массообмен и смесеобразование, способствуя устойчивому воспламенению. Вместе с тем, в зоне горения происходит паровая газификация продуктов термического разложения топлива, что также повышает показатели сжигания жидких углеводородов. Образующаяся горючая смесь CO и H2 догорает в факеле, смешиваясь с кислородом из внешней атмосферы. Данный способ диспергирования имеет существенные технологические преимущества при использовании некондиционного жидкого топлива, связанные с предотвращением коксования форсунки и засорения каналов подачи топлива, что улучшает эксплуатационные характеристики и надёжность горелочного устройства.

Для научного обоснования данного способа сжигания жидких углеводородов, проведены исследования состава продуктов сгорания и удельной мощности тепловыделения в широком диапазоне изменения режимных параметров работы горелочного устройства (расход пара и топлива). Найдены режимы, при которых обеспечивается высокая полнота сгорания топлива при низком содержании вредных выбросов в газообразных продуктах реакции.

Список литературы

1. Dryer F.L. Water addition to practical combustion systems – Concepts and applications // Symposium (International) on Combustion. – 1977. – Vol. 16. – P.279-295
2. Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Копьев Е.П., Шарыпов О.В. Характеристики сжигания дизельного топлива в горелочном устройстве с подачей струи перегретого водяного пара // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т. 52, № 3. – С. 37-44
3. Anufriev I., Arsentyev S., Vigriyanov M., Kopyev E., Sharypov O. Burning of substandard liquid hydrocarbons with steam gasification // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 115. – Article No. 03013. – 4 p.
4. Вигриянов М.С. Патент РФ на изобретение № 2450207 от 10.05.2012.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДЫХ КОМУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Аньшаков А.С., Домаров П.В., Перепечко Л.Н., Фалеев В.А.
Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Исследование газификации твердых коммунальных отходов (ТКО) связано с необходимостью решения экологических и энергетических задач: сделать безопасными токсичные органические соединения путем их разложения на простые компоненты, использовать энергетический потенциал отходов.

В настоящее время технологии газификации отходов смещаются в область высоких температур, превышающих 1500 °С. Этому условию хорошо соответствуют плазменные электротехнологии, одним из недостатков которых является высокая энергоемкость (до 1 МВт на 1 тонну отходов). Поэтому исследование процессов плазменной газификации в электротехнологических установках с уменьшением энергозатрат для задач переработки ТКО является весьма востребованной задачей в настоящее время.

Известно, что в составе ТКО наряду с органической составляющей также присутствует и неорганическая часть (стекло, керамика, металлы и др.). В зависимости от региона процент содержания неорганической части варьируется. Неорганическая часть отходов поглощает энергию на разогрев и переплав.

В работе приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований плазменной газификации ТКО и их органической составляющей. Химические превращения рассчитывались с помощью пакета программ АСТРА-4.

Выполнены расчеты энергетического и массового баланса плазменной электропечи при газификации ТКО с предварительной отсортировкой неорганики и без неё.

Результаты расчетов проверялись на экспериментальной электроплазменной установке.

Экспериментально показано, что при газификации только органической части отходов происходит снижение энергозатрат на 10%.

При уменьшении требуемой мощности плазмотрона значительно повышаются ресурсные характеристики его электродов, т.к. при меньшей мощности, выделяемой от плазмотрона, значительно снижается токовая нагрузка на электроды. В свою очередь это приводит к меньшей эрозии электродов [3], увеличивая их срок службы.

Список литературы

1. Аньшаков А.С., Фалеев В.А., Даниленко А.А., и др. Исследование плазменной газификации углерод-содержащих техногенных отходов // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14, №4. С.639-650.
2. Аньшаков А.С., Васильев А.А., Пинаев А. В., Фалеев В.А. Газификация углеродсодержащего сырья в плазменно-дуговой электропечи с теплонагревателем и взрывоопасность смесей синтез-газа // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, №4. С.633-641.
3. Домаров П. В., Аньшаков А. С. Исследование энергетических характеристик в электродуговом плазмотроне с выходным ступенчатым электродом // Научный вестник НГТУ. – 2013. -№4(53). –С.139-144.

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЭНЕРГЕТИКЕ НЕФТЯНОГО КОКСА

Артемьева Н.В., Богомолов В.В., Алехнович А.Н.
Инженерный центр энергетики Урала, филиал УралВТИ, г. Челябинск

Нефтяной кокс - это твердый остаток глубокой вторичной переработки тяжёлых нефтепродуктов. Увеличение производства нефтяного кокса в мире развивается динамично. На топливный баланс и оборудование энергетики это влияет появлением в заметных объёмах нового вида топлива и уменьшением производства мазута.

В зависимости от свойств исходного сырья, технологии и “глубины” процесса коксования нефтяной кокс разных производителей имеет отличающиеся характеристики. К характерным особенностям относится высокая теплота сгорания (Qir= 7150-7900 ккал/кг), высокое содержание ванадия (5-17% в наших исследованиях отечественных проб) и серы (Std=1,2-8,0%), низкая величина зольности (Ad<1,0%) и выхода летучих Vdaf=5,0-13%.

При малой зольности и высокой теплоте сгорания нефтяной кокс, тем не менее, не относится к предпочтительному типу топлива из-за высокого содержания серы и низких реакционных свойств. Из-за низких реакционных свойств и высоких шлакующих и загрязняющих организация сжигания нефтяного кокса “в чистом виде” представляет сложную задачу.

Низкие реакционные свойства нефтяного кокса по принятым показателям связаны с отмеченным низким выходом летучих и сильной гиперболической зависимостью ряда показателей реакционных свойств от выхода летучих в данном диапазоне. Кроме того, имеются исследования, согласно которым нефтяной кокс имеет более низкие показатели реакционных свойств, чем угли и антрацит при равном выходе летучих (показатель реакционных свойств RIt15 Foster Wheeler, данные ТГА). Изложенное согласуется с результатами исследований сжигания нефтяного кокса и низкореакционных каменных углей на огневом стенде УралВТИ. На стенде при похожих режимах степень выгорания нефтяного кокса измерена β=21-40%; при сжигании кузнецкого тощего угля с Vdaf=6,4% она составляла 47-85%. Правда отметим, что имеются исследования других показателей реакционных свойств (концентрационный предел распространения пламени) по которым реакционные свойства нефтяного кокса лучше.

Как и для ряда низкореакционных углей размолоспособность нефтяного кокса при уменьшении выхода летучих ухудшается, что дополнительно усложняет его сжигание. Из-за низкой зольности нефтяного кокса не удаётся измерить показатели шлакующих свойств, принятые в нашей стране (температура начала шлакования, прочность шлаковых отложений). Отсутствует опыт длительного сжигания нефтяного кокса для определения показателей, характеризующих образование первичных отложений и загрязнений. Тем не менее, по аналогии с углями и на базе результатов выполненного впервые в нашей стране сжигания нефтяного кокса “в чистом виде” на огневом стенде УралВТИ можно утверждать о высоких шлакующих и загрязняющих свойствах нефтяного кокса. На стенде отложения плавленой структуры образовывались не только на футерованных стенках камеры сгорания с максимальной температурой газов 1200-1240 оС, но и в измерительном газоходе со средней температурой на входе 1060-1070 оС. Особенности состава минеральной части имеют практическое значение при сжигании нефтяного кокса в “чистом” виде. При смешении с углями из-за малой зольности нефтяного кокса эта его специфика не проявляется.

Нефтяной кокс широко используется за рубежом в качестве энергетического топлива в смеси с углями в пылеугольных котлах и в котлах с ЦКС. Созданы также топки для сжигания нефтяного кокса в чистом виде с применением обогащённого кислородом воздуха или в специальных топочно-горелочных устройств (системы с пылеконцентраторами, ультра-вихревое сжигание, вихревые горелки с повышенной рециркуляцией газов). В нашей стране ОАО “ТКЗ” разработан проект реконструкции газомазутного котла ТГМЕ-464 на сжигание нефтяного кокса в схеме с пылезаводом. По мнению авторов, перспективным решением является применение горелочных устройств с термоподготовкой топлива и топка с жидким шлакоудалением.

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ СЖИГАНИЯ КАЗАХСТАНСКИХ НИЗКОСОРТНЫХ УГЛЕЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛАХ ТЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОЙ ГАЗИФИКАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ ГОРЕНИЯ

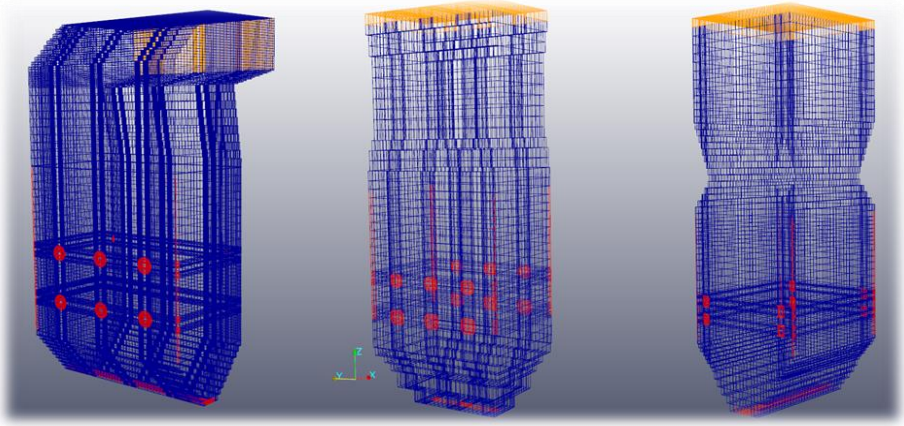
Аскарова А.С.[1], Мессерле В.Е.[2], Болегенова С.А.[1], Болегенова С.А.[2], Максимов В.Ю.[2] Нугыманова А.О.[1]

[1] Казахский Национальный Университет имени Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

[2] Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики (НИИЭТФ), г. Алматы, Казахстан

Казахстан располагает огромными запасами энергетических ресурсов, достаточными для удовлетворения не только своих потребностей, но и для экспорта в другие регионы. В балансе энергетических ресурсов республики преобладают каменные и, в меньшей степени, бурые угли. Сегодня в мире на угольных ТЭС вырабатывается более 50% электрической и тепловой энергии, а в Казахстане – почти 85% [1]. Более 80% угля, сжигаемого на ТЭС, является низкосортным, таким, например, как экибастузский уголь, зольность которого составляет около 40–50 %. Сжигание низкосортных углей сопряжено со сложностями по их воспламенению, увеличением вредных пылегазовых выбросов.

Непосредственное сжигание низкосортных углей, обладающих высокой зольностью, влажностью, сернистостью и низким выходом летучих, в существующих топочных устройствах связано со значительными трудностями из-за ухудшения воспламенения и выгорания топлива, увеличения мехнедожога и вредных пылегазовых выбросов [2].



а) БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ-2; б) ПК-39 Аксуйской ГРЭС; в) БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ-3

Рис. 1. Конечно-разностные сетки и геометрии топочных камер исследуемых котлов

Предлагаемая в статье плазмохимическая технология обработки углей и их компьютерное моделирование являются новыми и технически реализуемы при сжигании всех типов углей, используемых на пылеугольных ТЭС по всему миру. Эта технология позволит исключить из баланса ТЭС дорогостоящий и дефицитный мазут и природный газ, которые традиционно используются для растопки котлов и стабилизации горения пылеугольного факела. Трехмерное компьютерное моделирование топочных процессов позволит оптимизировать процесс воспламенения, газификации и сжигания углей, в том числе низкосортных (высокозольных).

Список литературы

2. Askarova A., Messerle V., Ustimenko A., Bolegenova S., Maksimov V. Numerical simulation of the coal combustion process initiated by a plasma source // J. of Thermophysics and Aeromechanics. 2014. Vol. 21, Issue 6. P. 747–754.
3. Аскарова А.С., Мессерле В.Е., Нагибин А.О., Устименко А.Б. Горение пылеугольного факела в топке с плазменно-топливной системой // «Теплофизика и аэромеханика» - Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН, 2010. -Т.17, №3. - С.467 - 476.

РЕАКТИВНАЯ ТЯГА ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ГЕПТАН-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ КИСЛОРОДОМ

Ассад М.С., Пенязьков О.Г., Чернухо И.И.
Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Перспективным направлением для форсирования тяги реактивного двигателя считается применение детонационного сжигания жидкого или газообразного топлива, о чем свидетельствуют многочисленные публикации (например, [1–4]). В настоящей работе изучена динамика тяги пульсирующей детонационной установки реактивного типа при сжигании гептан-воздушных смесей, обогащенных кислородом.

Эксперименты проводились на детонационной установке (ПулДУ), описанной в [3, 4]. Установка работает в цикличном режиме и представляет собой полузакрытую трубу диаметром 20 мм и длиной 664 мм. Установлено, что с увеличением в смеси отношения кислорода к воздуху реактивная тяга ПулДУ существенно растет (рисунок 1), Максимальная тяга (более 200 Н) достигается при сжигании около-стехиометрической смеси (ф = 0.95–1.15) с наибольшим обогащении смеси кислородом ([O2/air] = 0.65 – 0.75) в данной серии экспериментов.

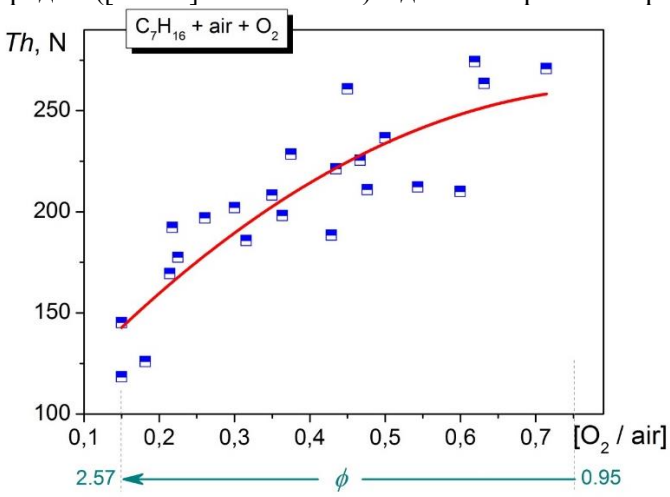


Рисунок 1. Зависимость максимальной тяги детонационной установки от содержания кислорода в смеси при горении гептан-кислород-воздушной смеси (ϕ = 0.95 – 2.57).

Очевидно, влияние отношения кислорода к воздуху на величину тяги ПулДУ связано со скоростью волны горения и имеет прямую зависимость от перехода горения в детонацию и места этого перехода относительно источника воспламенения смеси.

Список литературы

1. Kiyanda C. B., Connolly-Boutin S., Joseph V., Mi X., Ng H.D., Higgins A.J. Small Size Rotating Detonation Engine: Scaling and Minimum Mass Flow Rate. Proc. of the 26th Int. Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems. Boston, USA, 2017 (1133).
2. Потапкин А. В., Долматов В.Л. Трубицын А.И. Экспериментальные исследования тяговых характеристик модельной прямоточной эжекторной камеры сгорания при вибрационном горении водорода / ФГВ, 2004, Т. 40, № 3. С. 9–13.
3. Ассад М.С., Пенязьков О.Г., Чернухо И.И. Влияние соотношения компонентов на инициирование детонации гептан-воздушно-кислородной смеси в пульсирующей установке реактивного типа / Горение и взрыв, 2017, Т. 10, № 2. – М.: Торус пресс. – С. 59–62.
4. Ассад М.С., Пенязьков О.Г. Способы ускорения перехода горения в детонацию в малогабаритной камере сгорания реактивного типа // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2015. – № 3. – С. 72–76.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ СЖИГАНИЯ СТАРЫХ ШПАЛ

Ахметшина А.И., Накоряков П.В., Ситников О.Р., Никитин М.А.
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева,
г. Казань, Россия

При сжигании твердых древесных отходов, в частности деревянных шпал, пропитанных креозотом, в атмосферу выделяется большое количество токсичных веществ. Поэтому для утилизации таких видов отходов применяются специально разработанные устройства, так называемые топки-сателлиты. [1] Они эксплуатируются совместно с промышленными котлами, камера которых используется в качестве камеры дожига. В данной работе представлен один из видов топок-сателлитов – слоевая топка с вихревым движением газовой смеси, работающая в составе промышленного твердотопливного водогрейного котла КВУ-1000. При эксплуатации такой установки происходит экономия товарного топлива до 20% и экологически безопасная утилизация отходов. Схема усовершенствованного водогрейного котла представлена на рис.1, где: 1 – базовый котел КВУ-1000, 2 – воздушный коллектор, 3 – система подачи первичного воздуха, 4 – топка-сателлит, 5 – система подачи топлива, 7 – пульт управления, 8 – электровентилятор.

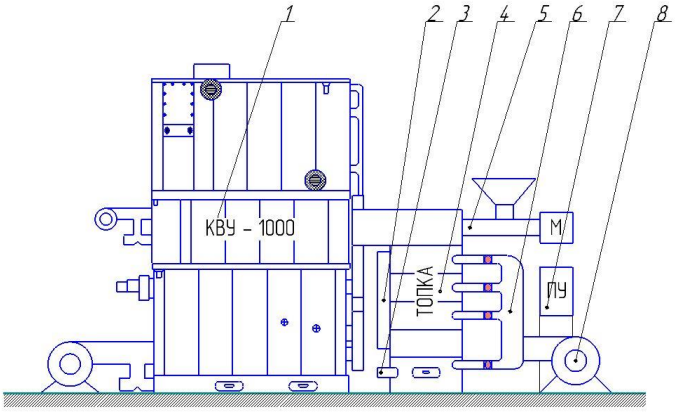


Рис. 1. Схема усовершенствованного водогрейного котла КВУ-1000.

Основным критерием, по которому оценивается работа любой теплоэнергетической установки является ее коэффициент полезного действия (КПД). В статье приведен расчет КПД усовершенствованного водогрейного котла по формуле 1:

$$\eta = \left(0{,}8\left(\frac{Q_1^k}{Q_{r_i}^k}\right) + 0{,}2\left(\frac{Q_1^c}{Q_{r_i}^c}\right)\right)\cdot 100\% \qquad (1)$$

Коэффициенты 0,8 и 0,2 перед первым и вторым членами уравнения свидетельствуют о доле вклада в генерацию тепла и полезного его использования в усовершенствованном котле базового котла и топки-сателлита.

Данные для расчета КПД получены экспериментальным путем: химическая и механическая неполнота сгорания топлива, потери с физическим теплом шлака и потери тепла в окружающую среду через стенки топки. Теплопотери, связанные с температурой уходящий газов не учитывались, так как теплоносителем являются продукты сгорания, которые направляются в камеру дожига базового котла и смешиваясь с основными продуктами сгорания передают энергию теплоносителю.

Список литературы

1. Потапов В.В. Исследование слоевого сжигания топлива с организацией вихревого движения дымовых газов в котлах малой мощности: автореф. Дис. канд. тех. Наук: 05.23.03 /Потапов Владимир Васильевич. – И., 2005. – 17с.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ МУСОРОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ЗАВОДОВ

Багрянцев Г.И.
ООО «Огневая технология»

Разработаны ряд технологий и оборудования для создания заводов по переработке промышленных и бытовых отходов. Приведены технико-экономические показатели заводов производительностью $50 \cdot 10^3$ т/год, $100 \cdot 10^3$ т/год, $150 \cdot 10^3$ т/год

Прогнозируемые основные технико-экономические показатели заводов номинальной производительностью 50, 100 и 150 тыс.т/год приведены в таблице.

Таблица 1. Технико-экономические показатели

Наименование показателя	**Ед.изм.**	**Значение**		
1. Услуги по переработке ТБО, твердых и жидких производственных отходов*	тыс.т/год	50 (max 80)	100 (max120)	150 (max 170)
2. Выработка тепла, всего в том числе: -тепло для собственных нужд -тепло для сторонних потребителей -электроэнергия	тыс.Гкал/год - « - - « - тыс. МВт.ч/год	120,0 25,0 100,0 -	240,0 40,0 200,0 -	360,0 60,0 198,0 75,0
3. Годовая программа по выпуску продукции -плитные материалы -шлакоблоки и др. строительные изделия -лом черных и цветных металлов	 тыс.м^2 тыс.шт. т	 200,0 500,0 2000,0	 400,0 1000,0 4000,0	 600,0 1500,0 6000,0
4. Потребность в трудовых ресурсах	чел.	110-130	130-150	150-170
5. Годовой расход энергоресурсов: -электроэнергия -хозпитьевая вода -природный газ	 тыс.кВт.ч тыс.м^3 тыс.м^3	 9500,0 80,0 1500,0	 15000,0 110,0 2500,0	 21000,0 140,0 3500,0
6. Мощность электроприемников	кВт	4500,0	5000,0	6000,0
7. Площадь участка	га	2,2	2,6	3,0
8. Капитальные вложения без НДС	млн.долл. США	12-15	17-18	19-22
9. Срок окупаемости	лет	6 – 8 (уточняется при проектировании)		

Примечания к таблице.

* Соотношение видов отходов зависит от условий конкретной площадки и определяется при составлении задания на проектирование.

Технические решения по созданию мусороперерабатывающих заводов защишены патентами РФ.

Комплектация заводов рассчитана на оборудование, производимое в России.

О ПРИМЕНЕНИИ ПАРОВОГО ЭЖЕКТОРА ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ГОРЕНИЯ ЖИДКИХ ТОПЛИВ

Баев В.К., Бажайкин А.Н., Чусов Д.В., Шумский В.В.

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

В [1] была показана целесообразность использования парового эжектора при термохимических преобразованиях твердых топлив в камерах с пористыми хорошо проницаемыми стенками. Возможность организации горения жидкого топлива при поступлении его на пористую поверхность была продемонстрирована в эксперименте при использовании для эжекции сжатого воздуха.

В работе [2] была продемонстрирована возможность моделирования течений с образованием зон рециркуляции при горении в прозрачной камере сгорания и дросселированием потока пористыми вставками в канал. Горение жидкого топлива при его подаче совместно с эжектирующей паровой струей было реализовано в такой камере с целью визуализации процесса. В экспериментах проведен также газовый анализ. Результаты измерений сопоставлены с расчетами равновесных составов продуктов сгорания.

Экспериментальные данные позволяют заключить о возможности организации горения при подаче топлива вместе с паром и, тем самым, в единой конструкции реализовать горение твердых, жидких и газообразных топлив, то-есть, создать многотопливную камеру сгорания (газификации).

Список литературы

1. В.К. Баев, А.Н. Бажайкин, Д.В. Чусов, В.В. Шумский Двухстадийное термохимическое преобразование твердого топлива в установке с паровым эжектором// Теплофизика и аэромеханика, 2018, том 25, №2, с 311-316
2. В.К. Баев, А.Н. Бажайкин, Д.В. Чусов Расчетная модель эжекторной камеры сгорания с проницаемыми перегородками и ее экспериментальное обоснование. // XV Всероссийский семинар “Динамика многофазных сред» с участием иностранных ученых, 3-5 окт. 2017г., тезисы докл., Новосибирск, ИТПМ СО РАН, 2017, с 5-6.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ УРАНА ПРИ СЖИГАНИИ РАДИОАКТИВНОГО ГРАФИТА В СРЕДЕ КИСЛОРОДА

Барбин Н.М.[1), 2), 3)], Колбин Т.С.[1)], Тереньев Д.И.[1)], Алексеев С.Г.[1)]
[1)] ФГБОУ ВО Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Россия
[2)] ФГБОУ ВО Уральский государственный аграрный университет, г. Екатеринбург
[3)] ФГАОУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

В соответствии с Генеральной схемой размещения объектов энергетики до 2035 года реакторы типа РБМК должны быть выведены из эксплуатации [1]. На трех российских АЭС работают 11 реакторов РБМК. Масса графитовой кладки энергоблока типа РБМК составляет приблизительно 1798 тонн, а общее число радиоактивного графика подлежащего утилизации соответственно 19 778 тонн. Ввиду вышеизложенного возникает необходимость разработки метода уменьшения числа отходов. Перспективным считается метода сжигания радиоактивного графита.

Исследование проводили методом термодинамического моделирования при помощи патека программ TERRA с учетом баз данных ИВТАНТЕРМО, расширенной за счет информации из базы данных HSC5. Исходную основу газовой фазы составлял кислород, конденсированной – радиоактивный графит.

Термодинамическое моделирование с применением TERRA успешно используется в теплофизических расчетах [2-3].

Баланс U представлен на рис. 1. До температуры 2000 К наблюдается уменьшение количества конденсированного $CaUO_4$ с одновременным ростом количества конденсированного UO_2. Дальнейшее увеличение температуры приводит к уменьшению числа конденсированного UO_2 и росту количества газообразных UO_3, UO_2 и ионов UO_3-.

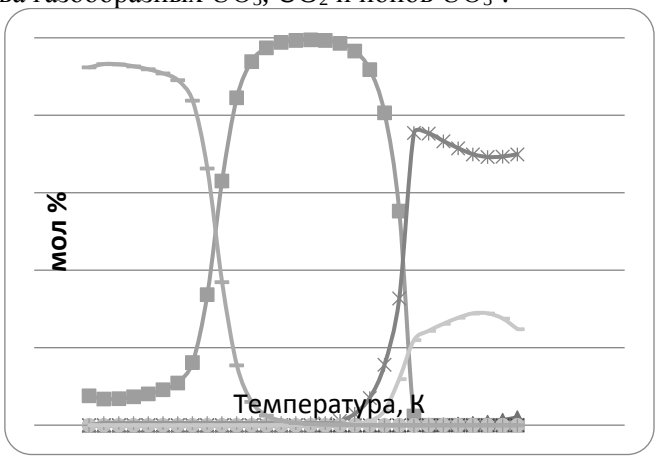


Рис. 1. Распределение урана по фазам.

При температурах свыше 2000 К уран находится преимущественно в газообразных соединениях. Газообразные соединения конденсируются на более крупные частицы в потоке газов, которые могут быть удалены газоочистительной системой [4].

Список литературы

1. Распоряжение правительства Российской Федерации от 09.06.2017 №1209-р.
2. Колбин Т.С., Терентьев Д.И., Барбин Н.М., Алексеев С.Г. Поведение Eu, Pu, Am при горении радиоактивного графита в среде кислорода при различных давлениях. Техносферная безопасность. 2013 №1. С 30-36
3. Barbin N.M., Terentev D.I., Alekseev S.G., Dan V.P. Modeling the behavior of carbon nanoparticles C44 when heated in an argon atmosphere. Computer experiment. Smart Nanocomposites. 2016. Т. 7. № 1. С. 1-5.
4. Беспала Е.В., Павлюк А.О., Котляревский С.Г. Влияние газодинамики высокотемпературного потока на эффективность переработки ядерного графита // Альтернативная энергетика и экология. 2015. №23 (187). с. 19-25

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТОВ ДЛЯ КОТЛОВ ЧЕРЕПЕТСКОЙ ГРЭС, НИЖНЕКАМСКОЙ ТЭЦ И БЛАГОВЕЩЕНСКОЙ ТЭЦ

Безгрешнов А.Н., Иваненко В.В., Озеров А.Н., Свирякин И.Г., Юрьев Е.И.
ОАО ТКЗ «Красный котельщик», г. Таганрог, Россия

ОАО ТКЗ «Красный котельщик» на сегодняшний день обладает необходимыми компетенциями, ресурсам и научно-технической базой для решения задач высокой сложности. Работы по оптимизации и повышению эффективности работы оборудования, а также разработка инновационных решений выполняется с использованием численного моделирования, стендовой базы и натурных испытаний.

Для обоснования технических решений используются современные расчетные технологии, реализованные в программных продуктах: SigmaFlame (поставщик ООО «Торинс», г. Красноярск), ANSYS Fluent (поставщик компания ANSYS, США), модернизированная программа позонного расчёта топки Flame2 (разработчик ОАО ТКЗ «Красный котельщик», г. Таганрог).

В качестве примера применения этих технологий рассмотрим следующие материалы:

- Обзорный доклад по реализованным и текущим проектам ОАО ТКЗ по сжиганию пылевидного топлива, в частности на Черепетской ГРЭС, Нижнекамской ТЭЦ, Благовещенской ТЭЦ.
- Численное моделирование топочного процесса в котле ТПЕ-223 Черепетской ГРЭС с применением специализированного программного обеспечения и сопоставление результатов с опытными данными, перспективы применения моделирования топочных процессов.
- Опыт применения модернизированной программы позонного расчёта топки.
- Моделирование движения пылевоздушной смеси по пылепроводу и пылевоздушному каналу горелки котла Благовещенской ТЭЦ. Рассмотрение вариантов малозатратной реконструкции с целью снижения эрозионного износа элементов горелки.
- Обзор технических решений по котлам Нижнекамской ТЭЦ с целью сжигания нефтяного кокса. Перспективы моделирования топочного процесса с целью снизить сроки и трудозатраты на пусковой и режимной наладке.

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МЕТОДИКА ВЫГОРАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ФАКЕЛА

Бойко Е.А., Пачковский С.В.
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия

Совершенствованию технологии производства и потребления энергии, вырабатываемой при использовании твердых органических топлив, уделяется значительное внимание в энергетической отрасли. Создание новых и повышение эффективности существующих технологических приемов сжигания углей на тепловых электростанциях основано на всесторонней оценке их состава и свойств. При этом следует отметить, что в большинстве случаев не выполняется анализ выгорания топлива и не учитывается его реакционная способность. Рациональным подходом при решении подобных задач является использование методов математического моделирования. Усовершенствованная кинетическая модель и ее расчетная схема положена в основу новой математической диффузионо-кинетической модели процесса горения и тепло- массообмена пылеугольных частиц в газовом потоке.

В результате расчетных исследований, выполненных на основе вышеизложенных моделей, выявлена существенная зависимость исследуемых процессов от качества исходного топлива, температуры газового потока, избытка воздуха и размеров пылеугольных частиц. На основе полученных температурно-временных зависимостей выполнено усовершенствование методики проектирования топочных устройств энергетических котлов. Предложена схема расчета степени выгорания топлива, как для зоны активного горения, так и для зон, расположенных в камере охлаждения топочного пространства. Сущность предлагаемого подхода заключается в раздельной оценке и учете длительности стадий испарения влаги, смоловыделения (как основного этапа выхода летучих веществ) и горения коксового остатка. Количественная оценка степени выгорания топлива определяется в результате итеративного комплексного позонного расчета выгорания пылеугольного факела и теплообмена в топочной камере.

Методика расчета выгорания пылеугольного факела реализована в виде программно-вычислительного комплекса, который позволяет выполнить расчет: тепловых потоков на поверхностях нагрева, значений температур продуктов сгорания, промежуточных и конечных концентраций реагирующих веществ в любой расчетной точке по высоте топочного пространства с одновременной возможностью диагностики причин изменения длительности и механизма протекания сложных, последовательно-параллельных физико-химических реакций горения и теплообмена; учесть не только режимные параметры топочных устройств, но и индивидуальные особенности органической и минеральной части сжигаемого топлива, посредством использования данных о реакционной способности отдельных этапов термохимического превращения угля; расширить возможности изучения топочных процессов; увеличить точность и скорость вычислений.

Результаты теоретических исследований были сопоставлены с результатами экспериментальных исследований топочных процессов выгорания пылевидного твердого органического топлива в промышленных установках, которые были получены на котле БКЗ-320-140 ст. № 19 Красноярской ТЭЦ-1. При этом, было получено удовлетворительное совпадение, между расчетными и экспериментальными данными (коэффициент корреляции составил 0,934–0,951), что свидетельствует о надежности усовершенствованной методики позонного расчета степени выгорания пылеугольного факела в топочных камерах паровых котлов.

Расчет выгорания бородинского угля в топочной камере котла по усовершенствованной методике позволил разработать практические рекомендации по повышению эксплуатационной надежности и тепловой эффективности работы топочных камер котлов БКЗ-320-140 Красноярской ТЭЦ-1.

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТУПЕНЧАТОГО ПОДВОДА ТЕПЛОТЫ В ПРОЦЕССЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТВЕРДОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА

Бойко Е.А., Страшников А.В.
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия

Совершенствованию технологии производства и потребления энергии, вырабатываемой на твердом органическом топливе, уделяется значительное внимание в энергетической отрасли. Существующие проблемы энергетического использования углей в значительной степени можно решить, если перед сжиганием угольную пыль подвергнуть термохимической обработке. Хорошая воспламеняемость продуктов термообработки, их высокая калорийность и реакционная способность открывают широкие возможности для применения на тепловых электростанциях процесса предварительной термической обработки угля перед сжиганием. Однако, вопросы влияния режимов и способов реализации термической подготовки топлива на показатели энергетической эффективности котельных агрегатов, надежности их эксплуатации и экологической безопасности требуют дальнейших исследований.

В данной работе для практического обоснования эффективности организации ступенчатого подвода тепла в процессе предварительной термической обработки твердого органического топлива выполнено сравнение двух возможных вариантов реализации данного процесса. Рассмотрено два варианта термической подготовки: при постоянной температуре и при ступенчатом нагреве. В первом варианте осуществляется единый нагрев угольной пыли до $T_{мах}$ = 1000 °С, во втором варианте осуществляется ступенчатый нагрев T_1 = 400 °С, T_2 = 600 °С, T_3 = 800 °С при $T_{мах}$ = 1000 °С. Показано, что во втором варианте коксовый остаток имеет в 2-3 раза выше реакционную способность исходного топлива.

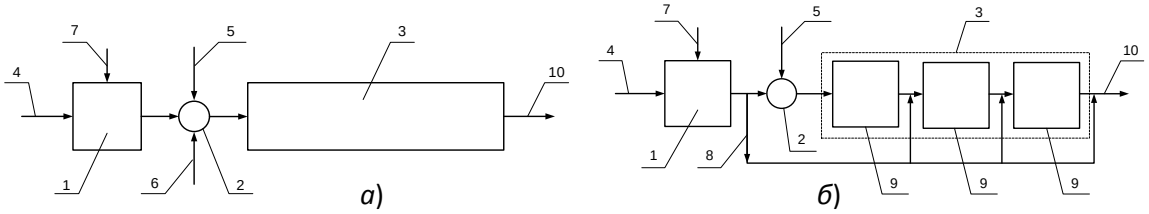


Рис. 1. Расчетные схемы разных способов организации процесса предварительной термической обработки пылевидного твердого топлива: *а* – с подводом всего количества теплоты в начале процесса; *б* – со ступенчатым подводом теплоты; 1 – камера сгорания части топлива для получения высокотемпературных продуктов сгорания; 2 – смеситель; 3 – камера термообработки; 4– подвод части топлива для получения высокотемпературных продуктов сгорания; 5 – подвод основной части топлива на термообработку; 6 – подвод газов рециркуляции; 7 – подвод воздуха; 8 – тракт продуктов сгорания для ступенчатого подвода теплоты; 9 – ступени термохимической обработки; 10 – отвод продуктов термохимческого превращения угля

Приведены формулы расчета скоростей химических реакций, времени процесса термической обработки, числа ступеней процесса. Представлена запатентованная схема реализации способа и устройств для организации ступенчатой термической подготовки пылевидного топлива к сжиганию в условиях котельной установки тепловой электростанции. Дана технологическая схема и описание работы установки.

Список литературы

1. Бойко Е.А., Шишмарев П. В., Жадовец Е. М., Пачковский С. В., Янов С. Р. Патент РФ №2347142, кл. 7F23N 5/00. Способ регулирования режима горения паропроизводительной установки // Бюлл. №15. Опубл. 20.02.2009.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО МИКРОПОМОЛА УГЛЕЙ ДЛЯ РОЗЖИГА И ПОДСВЕТКИ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ

Бурдуков А.П., Бутаков Е.Б., Чернова Г.В.
Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

На тепловых станциях сибирского региона до 90% используется рядовой низкореакционный уголь, а для розжига и подсветки на сотнях пылеугольных котлов используется высокореакционное топливо, в т.ч. мазут, дорогое и дефицитное топливо (дороже угля в 5 – 6 раз). Для повышения эффективности факельного сжигания рядовых углей необходим переход от их прямого сжигания к сжиганию угля с новыми структурными и физико-химическими свойствами, приближающимися к высокореакционному топливу.

Повышение реакционной способности угля до 2-х – 3-х раз рассматривается в Институте теплофизики СО РАН за счет его механоактивированного микропомола. На полупромышленном тепловом стенде до 5 МВт с системой, включающей мельницы-дезинтеграторы микропомола угля до 15-40 мкм, узлы для подвода и подачи угольной пыли и воздуха в горелочное устройство, муфелизированное горелочное устройство, проведены широкие эксперименты по факельному сжиганию ряда углей различного метаморфизма: кузнецких высокореакционных марок Г и Д высокой калорийности, кузнецких тощих с низким выходом летучих до 10-15%, канско – ачинских высокореакционных с повышенной влажностью до 40%, экибастузских с зольностью до 40%. Экспериментальные исследования сжигания углей на стенде показали, что при механохимической активации угли приобретают свойства высокореакционного топлива: снижается температура воспламенения, наблюдается устойчивость горения, увеличивается степень выгорания топлива.

По сжиганию механоактивированного угля микропомола накоплен положительный опыт экспериментальных и расчетных исследований; разработаны рекомендации по характеристикам и наличию дополнительного оборудования сжигания: предприятие - изготовитель мельниц дезинтеграторов для механоактивированного микропомола существует; разработаны технические предложения для изготовления узлов подвода и подачи угольной пыли и воздуха; проведены расчеты технико-экономической эффективности замещения мазута на механоактивированный уголь микропомола при розжиге и подсветке для ряда пылеугольных котлов сибирского региона, показывающие допустимый срок окупаемости проектов замещения мазутного розжига на механоактивированный уголь микропомола (2 – 5 лет). Научно-техническая подготовленность для замещения мазутного розжига и подсветки механоактивированным углем микропомола, возможного на сотнях сибирских пылеугольных котлов Бийского (БКЗ), Таганрогского (ТПЕ), Подольского (ПК) котельных заводов обоснована.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по Соглашению о субсидии № 14.607.21.0150 (Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI60716X0150)

ИСЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ЭКИБАСТУЗСКОГО УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА С МЕХАНО – И ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИЕЙ

Бутаков Е.Б., Бурдуков А.П., Кузнецов А.В.
Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Использование углеродосодержащих твердых топлив и отходов в энергетике встречает различные трудности, оставляя большой потенциал для совершенствования и оптимизации эффективности технологий его сжигания. Одной из проблем, является необходимость сжигания огромного количества дополнительного вспомогательного топлива, например, для стабилизации горения пылеугольного факела и растопки котлов. Существующие методы повышения эффективности топливо использования в основном себя исчерпали. В настоящее время осваиваются новые, прогрессивные, экологически более чистые технологии [1].

В данной работе используется высокочастотное электрохимическое запальное устройство генерирующие высокочастотные холодные плазменные дуги (рис. 1), ионизирующие окислитель, что способствует многократному ускорению термохимических превращений углеродосодержащих твердых топлив и отходов, а, следовательно, и более полному быстрому выгоранию факела.

Рис 1. Экспериментальный стенд 5 МВт с системой механо – и плазмохимической активацией угольного топлива.

В данной работе исследовалось угольное топливо полученное из станции ГРЭС-2 г. Экибастуз, проведены эксперименты по воспламенению и горению угольного топлив с механоактивацией, а также с использованием высокочастотного электрохимического запального устройства. После подачи угольного топлива в улиточный завихритель, производился прогрев камеры сгорания в течение 4 минут, после достижения 500 ^{o}C уголь горел в автотермическом режиме. Данные результаты будут использоваться для проектирования растопочной горелки на станции ГРЭС-2 г. Экибастуз, Казахстан.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00416 мол_а.

Список литературы

1. Burdukov, A.P., Butakov, E.B., Popov, V.I., Chernetskiy, M.Y., Chernetskaya, N.S The use of mechanically activated micronized coal in thermal power engineering (2016) Thermal Science, Volume 20, 2016, Pages s23-s33

НЕПРЕРЫВНАЯ ГЕТЕРОГЕННАЯ ДЕТОНАЦИЯ СМЕСИ КЕРОСИН/ВОДОРОД – ВОЗДУХ В КОЛЬЦЕВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Быковский Ф.А.[1], Ждан С.А.[1], Ведерников Е.Ф. [1]
[1] Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В докладе представлены результаты по дальнейшему исследованию режимов непрерывной спиновой детонации (НСД) гетерогенной смеси авиационный керосин (ТС-1) - воздух с добавкой водорода [1]. Эксперименты проведены в проточной камере ДК-500 (кольцевая щель для подачи воздуха δ = 3.5 мм, кольцевой зазор между стенками камеры Δ = 18 мм, длина L_c = 490 мм). Расходы изменялись в диапазонах: воздуха - G_a = 7.0 ÷ 14.8 кг/с, водорода - G_H = 0.06 ÷ 0.35 кг/с, керосина G_f = 0.3 ÷ 1 кг/с, а удельные расходы смеси через камеру g_Σ = 230 ÷ 564 кг/(с·м^2). При этом массовая доля водорода в двухфазном горючем $m_H = G_H/(G_f + G_H)$ изменялась в пределах m_H = 8.4 ÷ 42 %.

Результаты экспериментов. В гетерогенной смеси ТС-1/H_2 – воздух при варьировании параметров g_Σ и m_H реализованы режимы НСД с числом поперечных детонационных волн (ПДВ) от одной до пяти, вращающихся в ДК-500 с частотой f = 0.77 ÷ 4.86 кГц и скоростью D = 1.15÷1.67 км/с. Установлено, что количество ПДВ и частота их вращения уменьшаются, а высота поперечного детонационного фронта растёт при уменьшении параметра m_H в двухфазном горючем и удельного расхода воздуха. В ДК-500 определены нижние пределы реализации НСД по $g_{\Sigma,min}$ ≈ 270 кг/(с·м^2) и $m_{H,min}$ ≈ 8.4 %. Также приведены оценки критического диаметра детонационной камеры в зависимости от удельного расхода гетерогенной смеси. По измерениям полного давления на выходе из ДК-500 определены зависимости удельных импульсов на единицу массы горючего $I_{sp,f}$ при НСД от g_Σ и состава двухфазного горючего ТС-1/H_2 (рис. 1).

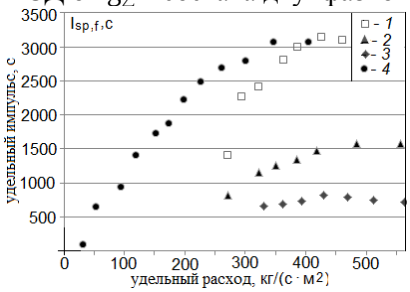


Рис. 1. Зависимости удельного импульса при НСД смесей керосин/H_2 – воздух от удельного расхода смеси: *1* – m_H ≈ 42 %; *2* – m_H ≈ 21 %; *3* – m_H ≈ 9 %; *4* – m_H = 100 %.

Максимальное значение импульса для гетерогенной НСД $I_{sp,f}$ ≈ 3150 с получено при g_Σ ≈ 425 кг/(с·м^2) и m_H ≈ 42 %. При g_Σ ≈ 425 кг/(с·м^2) с уменьшением доли H_2 в составе двухфазного горючего до m_H = 21 и 9 % уменьшаются и значения удельных импульсов до $I_{sp,f}$ ≈ 1500 и 750 с, соответственно. Наибольшие значения $I_{sp,f}$ реализуются на чистом водороде (m_H = 100 %). При g_Σ > 400 кг/(с·м^2) их значения близки к реализуемым для m_H ≈ 42 %. Структура ПДВ в исследованной гетерогенной смеси подобна наблюдавшимся нами ранее в смеси синтез-газ-воздух [2]. Полученные экспериментальные результаты открывают возможность систематических исследований режимов НСД в гетерогенных смесях применительно к кольцевым камерам сгорания детонационных воздушно-реактивных двигателей.

Список литературы

1. Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф. Непрерывная спиновая детонация гетерогенной смеси керосин – воздух с добавкой водорода // ФГВ.–2016. –Т. 52, №3. – С. 128–130.
2. Быковский Ф.А., Ждан С.А. Современное состояние исследований непрерывной детонации топливовоздушных смесей (обзор) // ФГВ. – 2015. – Т. 51, № 1. – С. 31 – 46.

О СКОРОСТЯХ НОРМАЛЬНОГО И ДЕФЛАГРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Васильев А.А.[1),3)], Васильев В.А. [1),2)]
[1)] Институт гидродинамики СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2)] Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[3)] Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Основными механизмами распространения волны нормального горения считаются теплопроводность и диффузия активных частиц из продуктов реакции в исходную смесь. Оба эти процесса описываются законами Фурье и Фика для потоков соответствующих величин, записываемых для систем с химическим энерговыделением. Хорошо известно, что при определенных граничных и начальных условиях уравнения для распространения тепла и диффузии можно сделать идентичными (число Льюиса равно единице), что при выбранном законе энерговыделения в системе позволяет вычислить нормальную скорость распространения пламени.

В это же время уравнения сохранения массы, импульса и энергии для газовой системы при заданном значении энерговыделения смеси допускают в качестве стационарной так называемую дефлаграционную скорость. Эта скорость определяется касанием прямой Михельсона-Рэлея к адиабате энерговыделения в дозвуковой области параметров системы (Рис.1).

Нормальная скорость пламени для большинства газовых смесей составляет величину порядка 1 м/с, в то время как дефлаграционная скорость оказывается почти на два порядка большей и составляет несколько десятков м/с. И если дефлаграционная скорость определяется условием касания, то соображений о том, каким условием должен определяться наклон прямой Михельсона-Рэлея, пересечение которой с адиабатой энерговыделения смеси и будет определять состояние за волной нормального горения, в литературе нет.

На рис. 1 приводится типичная диаграмма давление – удельный объем для горючей смеси и линия OW, пересечение которой с адиабатой энерговыделения DVPDF определяет состояние за волной нормального горения.

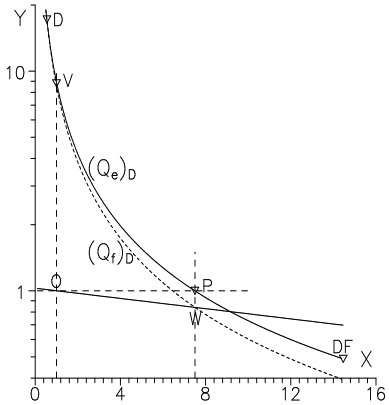


Рис. 1. Точка O – начальное состояние горючей смеси, точками обозначены конечные состояния.

В докладе анализируется соотношение скоростей нормального и дефлаграционного горения типичных газовых смесей и делается попытка найти некоторое соотношение, которое упростит оценку нормальной скорости распространения пламени. Дополнительно рассмотрена скорость «диффузионной волны».

Предложена оценка нормальной скорости пламени через скорости «диффузионной волны» и скорости дефлаграции. Проведено сравнение оценочных и экспериментальных величин. Получено качественное соответствие поведения скорости нормального пламени от основных параметров горючей смеси.

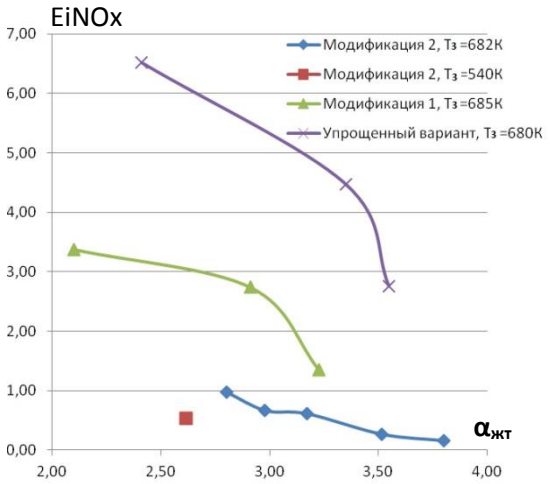
ПРИНЦИПЫ СЖИГАНИЯ ЖИДКИХ ТОПЛИВ В МАЛОЭМИССИОННЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Васильев А.Ю., Захаров В.М., Майорова А.И., Медведев Р.С., Челебян О.Г.
Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва, Россия

В последние годы одним из основных требований к летательным аппаратам гражданской авиации становится обеспечение низкой эмиссии вредных веществ в выхлопных газах. Начиная с конца прошлого века, нормируются выбросы несгоревших углеводородов; дыма; CO_2; NO_X и уровня шума. С 2022 года добавляется нормирование: NO_X в полете и несгоревших микрочастиц. Современные мировые тенденции обязывают ведущие фирмы ставить амбициозные цели по снижению эмиссии вредных веществ, согласующиеся с рекомендуемыми уровнями ИКАО (международной организации гражданской авиации). Один из передовых путей решения - использование технологии TAPS. Однако, по проведенным оценкам, обеспечить этой технологией планируемые нормы 2030 г. при параметрах перспективных двигателей не представляется возможным.

Для дальнейшего продвижения по пути развития технологии сжигания обедненных гомогенизированных топливовоздушных смесей авторами предлагается разбить единую массивную кольцевую зону бедной смеси (формируемую, например, за модулями технологии TAPS) на отдельные, слабо взаимодействующие зоны горения. При этом каждый из таких очагов должен быть окружен потоком относительно холодного газа. В центре же всей этой кольцевой структуры обедненной топливовоздушной смеси остается зона богатого пламени, но ее тепловая мощность должна быть снижена до эквивалента 15-20 % по расходу топлива. Этим достигается наиболее значительное снижение температуры газа в индивидуальных очагах без существенного ухудшения пределов бедного срыва. Конструктивно создать такие отдельные очаги пламени возможно с помощью малоразмерных смесительных модулей (по типу многофорсуночных камер сгорания). Здесь на первый план выходит проблема эффективного дробления и смешения жидкого топлива с воздухом в очень ограниченных габаритах и с малыми временами взаимодействия.

В работе проведен большой объем исследований: сформулированы новые принципы распыла и смешения топлива с воздухом для получения смеси приближенной к гомогенной; проведены расчеты гидравлики топливных каналов форсуночного модуля (ФМ); исследована аэродинамика воздушных завихрителей; изготовлен и испытан на качество дробления топлива экспериментальный образец ФМ; сформулированы принципы сжигания жидких топлив, выполнение которых позволит снизить эмиссию вредных веществ; разработаны и исследованы 3 модификации 3х горелочного отсека камеры сгорания; определены основные требования и сделана 1я попытка разработать и испыт камеры сгорания.



Сравнение эмиссии NO_x для различных модификаций экспериментальной КС.

По результатам "холодных" испытаний фронтового устройства показано, что получаемая смесь приближенна по своим характеристикам к гомогенной. Для реализованных в испытаниях режимов с Тк~680-690К и коэффициента избытка воздуха смеси $\alpha_{жт}$ 2 - 4, удалось добиться значительного снижения индекса эмиссии оксидов азота до уровня EINOx~1г/кг топлива.

Таким образом, опыты показали правильность предложенных принципов сжигания жидких топлив. Разработанный форсуночный модуль позволяет сформировать близкую к гомогенной смесь жидкого топлива с воздухом. На его основе авторам удалось сконструировать прототип малоэмиссионной камеры сгорания с низким выбросом оксидов азота NOx, что позволит обеспечить самые жесткие нормы Российских правил и требований ИКАО.

СОВМЕСТНОЕ СЖИГАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ И МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОТХОДОВ В ВИДЕ ТОПЛИВНЫХ СУСПЕНЗИЙ

Вершинина К.Ю., Шлегель Н.Е., Стрижак П.А.
Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Одной из мировых задач современного мира является разработка и внедрение технологий безопасной переработки многочисленных отходов промышленности и потребления. Отходы представляют значительную опасность для окружающей среды и здоровья человека. Одним из направлений утилизации является создание и использование композиционных топливных суспензий на основе отходов.

В настоящей работе базовым компонентом для приготовления топливных суспензий являлся влажный отход флотационного обогащения коксующегося угля. В качестве добавок (5–10% масс.) использовались отходы нефтяного происхождения (шлам, водонефтяная смесь, грунт, загрязненный нефтью); отходы водоотведения (осадки очистных сооружений); отходы пищевых производств (солодовые, хлебные, яичные). Данные отходы являются типичными для промышленности и бытового сектора многих регионов мира. В частности, для Томской области минимальные объемы накопленных отходов составляют: 76800 тонн отходов добычи и переработки нефти; 167875 тонн жидких и обводненных отходов коммунального сектора; 5906 тонн пищевых отходов.

В работе исследованы энергетический, экологический и экономический аспекты использования совместного сжигания промышленных и муниципальных отходов в виде суспензий. Эксперименты проведены с использованием муфельной печи, высокоскоростной видеокамеры, термопар, газоанализатора. Установлено, что относительные показатели эффективности сжигания водоугольных суспензий с добавками различными отходов в 35–165 раз выше, чем у угля. При наличии сопоставимых с углем выбросов, изученные суспензии имеют сильное преимущество в стоимости.

Показано, что большая часть из исследованных отходов рассмотренного индустриального региона представляют перспективные добавки к топливам. Установлено, что времена задержки зажигания топливных суспензий при добавлении отходов могут быть снижены на 10–60%, минимальные температуры зажигания – на 10–45 °C, концентрации выбросов NOx и SOx – на 5–85%. Теплота сгорания водоугольных топливных суспензий может быть увеличена на 5–20% при использовании дополнительных примесей из индустриальных отходов (например, грунта, загрязненного нефтешламом, отходов нефтехимического производств).

Согласно полученным результатам можно сделать вывод о целесообразности использования широкой группы отходов (отходов углеобогащения, нефтедобывающей и нефтехимической отраслей, отходов пищевого и коммунального секторов) для приготовления суспензионных топлив, не уступающих по экологическим, энергетическим и экономическим характеристикам традиционному пылеугольному топливу. Полученные экспериментальные оценки и сделанные на их основе заключения полезны для развития технологий утилизации многочисленных отходов промышленности и потребления в развитых индустриальных регионах по всему миру.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-73-00013).

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ЭТАНОЛА

Генарова Т.Н., Грушевский В.В., Кривошеев П.Н., Лещевич В.В., Пенязьков О.Г., Шимченко С.Ю., Шушков С.В.
Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск

В работе определены характеристики самовоспламенения и горения немодифицированного этанола и этанола, модифицированного ультрадисперсными углеродными структурами [1,2]. Проведено количественное сравнение продуктов окисления и термолиза, образующихся при этих процессах.

Для изучения самовоспламенения жидких топлив использовался модернизированный экспериментальный стенд на базе установки быстрого сжатия [3].

Результаты измерений, полученных с использованием установки быстрого сжатия представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Сравнение опытных данных с расчетными значениями

№	Образец	Параметры в конце сжатия		Время задержки самовоспламенения, мс			Максимальный прирост давления, МПа	Средняя скорость нарастания давления, МПа/с
		P, МПа	*T*, К	t_P	t_{CH}	t_L		
1	немодифицир. этанол (α=1)	1,849	1142	1,80	1,75	1,12	2,99	1283
2	немодифицир. этанол (α=1,7)	1,91	1150	0,54	-0,37	-0,19	2,24	1217
3	модифицир. этанол (α=1)	1,93	1142	1.87	1,87	1,48	3,09	1548
4	модифицир. этанол (α=1,7)	1,83	1140	0,95	1,02	0,69	2,36	1453

Установка была дополнена приспособлением для отбора продуктов сгорания на хроматографический анализ. Для анализа газообразных продуктов пиролиза этанола использовали газовую хроматографическую систему Agilent Technologies 7890A. Из всех продуктов сгорания образующихся при самовоспламенении различных видов топлива определялось содержание (в объемных %) водорода, аргона, кислорода, азота, метана и монооксида углерода.

Список литературы

1. Penyazkov O. G., Silenkov M. A., Shushkov S. V. Ignitability of Ethanol Containing Carbon Nanoparticles // Journal of Engineering Physics and Thermophysics: Volume 86, Issue 3 (2013), pp 534-539.
2. Шушков С.В., Генарова Т.Н., Лещевич В.В., Пенязьков О.Г., Гусакова С.В., Егоров А.С., Говоров М.И., Ю.А. Присмотров. Повышение скорости горения топлива при добавлении углеродных наноразмерных частиц //ИФЖ. 2012. Т.85, №4. С.797 – 803.
3. Лещевич В.В., Пенязьков О.Г. Импульсные установки для исследования процессов воспламенения и горения при повышенных давлениях// Перспективные технологии/Под ред. В.В. Клубовича. Витебск: Изд-во Витебского гос. техн. ун-та, 22011. С. 482-501.

СТРУКТУРА ПЛАМЕНИ ПОЛИОКСИМЕТИЛЕНА В ПРОТИВОТОКЕ ВОЗДУХА И КИНЕТИКА ЕГО РАЗЛОЖЕНИЯ

Глазнев Р.К.[1), 2)], Палецкий А.А.[2)], Гончикжапов М.Б.[2)], Коробейничев О.П.[2)]
[1)] Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия
[2)] Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Полимерные материалы получают всё большее распространение в современном мире. В связи с этим возрастают требования к их пожарной безопасности. Одним из эффективных и малозатратных методов понижения горючести полимеров является добавление в их состав антипиренов. Для определения наиболее эффективных добавок и изучения механизма их влияния на горение полимеров необходимо в первую очередь изучить термическое разложение и горение чистого полимера. Одним из популярных полимерных материалов является полиоксиметилен (ПОМ, $OH[-CH_2O-]_nH$) – продукт полимеризации формальдегида. Из него изготавливаются шестерни, элементы скольжения, корпуса электрической бытовой техники и т.д. В настоящее время в литературе имеются лишь общие сведения о горение полиоксиметилена.

Цель данной работы – изучение тепловой и химической структур пламени ПОМ в противотоке воздуха, а также кинетики термического разложения полиоксиметилена как основной стадии процесса горения.

Объектами исследования стали цилиндрические образцы ПОМ (Sigma Aldrich, CAS# 30525-89-4, ∅=14 мм, ρ=1410 кг/м^3), приготовленные методом горячего прессования при T=120 °C и P=50 атм. Образцы располагались в термостатируемом металлическом стакане. Для обеспечения стационарности пламени образцы перемещались со скоростью горения, определённой в предварительных экспериментах. Постановка эксперимента детально описана в [1]. Тепловая двумерная структура пламени была получена с помощью Pt-Pt+10%Rd микротермопар диаметром 50 мкм со спаем диаметром 80 мкм. Была доказана квазиодномерность пламени в пределах образца и оценён тепловой поток на его поверхность. Методом зондовой масс-спектрометрии на базе масс-спектрометрического комплекса Hiden HPR 60 [1] исследована химическая структура пламени ПОМ на противотоке. Были получены профили концентраций основных компонентов пламени: CH_2O, CO, CO_2, H_2O, O_2, N_2. Показано, что пиролиз формальдегида происходит вблизи поверхности полимера в отсутствии кислорода с образованием CO. Результаты моделирования (программа OPDIFF из пакета ChemKin, механизм [2]) структуры пламени ПОМ в противотоке удовлетворительно совпали с экспериментальными результатами по ширине зон реагирования веществ и положениям их максимумов. Методом молекулярно-пучковой масс-спектрометрии [3] было показано, что основным продуктом термического разложения ПОМ в потоке аргона является формальдегид – мономер ПОМ. Методом термогравиметрического анализа (ТГА) в инертной среде при темпе нагрева 10 К/мин была получена константа скорости реакции термического разложения ПОМ.

Полученные данные будут использованы для создания сопряжённой модели горения полиоксиметилена с целью определения эффективных методов понижения его горючести.

Список литературы

1. Korobeinichev O. P., Gonchikzhapov M. B., Paletsky A. A., Tereshchenko A. G., Shundrina I. K., Kuibida L. V., Shmakov A. G., Hu Y., Counterflow flames of ultrahigh-molecular-weight polyethylene with and without triphenylphosphate. Combust. Flame 2016; 169:261-271. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.04.019.
2. Li J. et al. A comprehensive kinetic mechanism for CO, CH2O, and CH3OH combustion // International Journal of Chemical Kinetics. – 2007. – V. 39. – №. 3. – P. 109-136.
3. Korobeinichev O. P., Kuibida L. V., Paletsky A. A., Shmakov A. G., “Molecular-beam Mass-Spectrometry to Ammonium Dinitramide Combustion Chemistry Studies”, Journal Propulsion and Power, 1998, Vol. 14, No 6, pp. 991-1000.

ГОРЕНИЕ КРУПНЫХ ЧАСТИЦ ТИТАНА В ВОЗДУХЕ

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

В [1, 2] исследовано горение крупных монодисперсных титановых агломератов в свободном падении в воздухе при атмосферном давлении. Агломераты диаметром 300, 390 и 480 микрометров были сформированы из множества мелких частиц неправильной формы. В данной работе представлен модифицированный подход, который позволяет получать *монолитные* горящие частицы титана с диаметром до 540 микрометров. Особенности подхода – возможность “тонкой настройки” начального размера частиц и высокая точность его определения. Эксперименты по горению проводили как описано в [1, 2]. Горящие частицы падали с высоты более 2 м. Использовали видеозапись со скоростью 25 или 500 кадров в секунду, чтобы регистрировать временные характеристики процесса горения частиц: начало фрагментации, конец фрагментации и время горения. Определена зависимость времени горения частиц t_b от диаметра *D* (рис. 1), которую можно аппроксимировать степенной функцией $t_b(D) = (3.53\pm2.13)\times10^{-6}\cdot D^{2.05\pm0.10}$, где время t_b в секундах, диаметр D в микрометрах из интервала 120 – 540 мкм. Установлено, что смена режима фрагментации «звезда» → «еловая ветвь» происходит при диаметре частиц 250 – 300 мкм, при этом величина этого граничного диаметра имеет значительную случайную составляющую. Режим фрагментации «звезда» есть однократный звездообразный взрыв материнской частицы. Режим «еловая ветвь» – растянутый во времени процесс, протекающий как отстрелы многочисленных мелких фрагментов от материнской частицы с сохранением последней. Представлены данные о конденсированных продуктах горения крупных монолитные частиц в свободном падении в воздухе. Продукты горения относятся к одному из трёх типов: (1) крупные остатки горения материнских частиц, (2) остатки горения фрагментов, (3) аэрогелевые образования, состоящие из первичных оксидных частиц–сферул с размером около 70 нанометров.

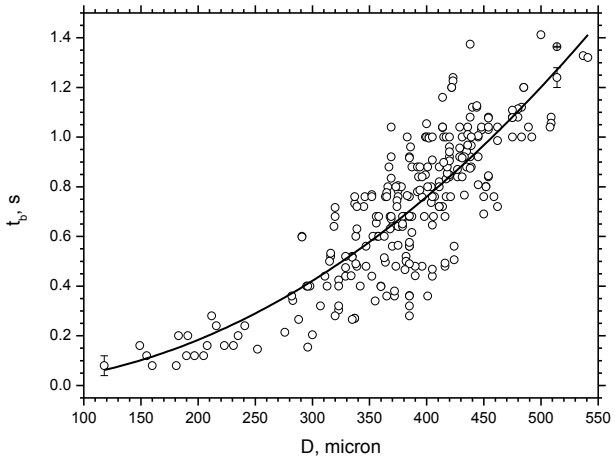


Рис. 1. Зависимость времени горения крупных частиц титана от диаметра.
Точки (267 штук) – эксперимент, линия – аппроксимация. Среда – воздух, атмосферное давление.

Список литературы

1. Глотов О.Г. Горение сферических титановых агломератов в воздухе. I. Экспериментальный подход. // Физика горения и взрыва. – 2013. – Т. 49, № 3. – С. 50–57.
2. Глотов О.Г. Горение сферических титановых агломератов в воздухе. II. Результаты // Физика горения и взрыва. – 2013. – Т. 49, № 3. – С. 58–71.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ МОДЕЛЬНЫХ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ С ДИБОРИДОМ АЛЮМИНИЯ

Глотов О.Г.[1], Суродин Г.С.[1], Зарко В.Е.[1], Корчагин М.А.[2]

[1] Институт химической кинетики и горения им. Воеводского, г. Новосибирск, Россия
[2] Институт химии твердого тела и механохимии, г. Новосибирск, Россия

Работа продолжает сравнительное исследование [1] высоконаполненных модельных смесевых топлив с приблизительно 40%-ой массовой долей различных борсодержащих горючих. Основное внимание в этой работе уделено дибориду алюминия и влиянию механоактивации.

Объект исследования – три модельные смесевые топлива на основе перхлората аммония, энергетического связующего и борсодержащего горючего. Первое горючее, МА1, – “сырьевой” материал – является механически активированной (МА) смесью порошков алюминия и бора, взятых в том же самом массовом соотношении, как в дибориде алюминия. Второе горючее, МА2, является диборидом алюминия, полученным из этого “сырья” с помощью метода, близкого к описанному в [2]. Третье горючее, МА3, является материалом МА2, снова подвергнутым механической активации. Таким образом, мы сравнили три горючих AlB_2-типа, полученных при различном МА-воздействии.

В работе представлены скорости горения топлив при давлениях 1.2 МПа и 2.5 МПа и данные о параметрах конденсированных продуктов горения (КПГ), полученные методом отбора [3, 4]. Определены распределения по размерам для частиц в диапазоне от 0.5 микрона до миллиметров; описана морфология частиц КПГ. Продукты миллиметрового размера – это каркас, остающийся в стаканчике после сгорания топлива. Данные по полноте сгорания горючего получены с помощью цериметрического метода [5].

Разработаны подходы для сравнения топлив по массовым параметрам продуктов горения и по эффективности энерговыделения. Для анализа данных по полноте сгорания предложен параметр E, названный “эффективностью энерговыделения”. Этот интегральный параметр объединяет данные о неполноте сгорания горючего, о массовом соотношении Al и B в комбинированном горючем, о восстановительном числе и удельной теплоте сгорания горючего, а также о массе каркаса, оставшегося в стаканчике.

Эффективность энерговыделения E существенно зависит от величины скорости горения и от особенностей процесса агломерации, а также от состава топлив и параметров комбинированного горючего. Топливо с горючим МА3 имело наибольшее значение параметра E среди трех исследованных.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-03-04321.

Список литературы

1. Glotov O. G., Zarko V. E., Surodin G. S., Kiskin A. B. Combustion efficiency of boron containing fuels in composite propellant / Energetic Materials – Reactivity and Modeling // 48th Intern. Annual Conference of the Fraunhofer Institute for Chemical Technology (ICT). – Karlsruhe, Germany, 2017. – P. 14-1–14-14.
2. Korchagin M. A., Zarko V. E., Bulina N. V. Synthesis of Nanocrystalline Magnesium and Aluminum Diborides // Eurasian Chemico-Technological Journal. – 2017. – V. 19, No 3. – P. 223-229.
3. Глотов О. Г., Зырянов В. Я. Конденсированные продукты горения алюминизированных топлив. I. Методика исследования эволюции частиц дисперсной фазы // Физика горения и взрыва. – 1995. – Т. 31, № 1. – С. 74-80.
4. Korotkikh A. G., Glotov O. G., Arkhipov V. A., Zarko V. E., Kiskin A. B. Effect of iron and boron ultrafine powders on combustion of aluminized solid propellants // Combust. and Flame.– 2017.–V. 178. – P. 195-204.
5. Fedotova T. D., Glotov O. G., Zarko V. E. Application of Cerimetric Methods for Determining the Metallic Aluminum Content in Ultrafine Aluminum Powders // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2007. – V. 32, No 2. – P. 160–164.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ ИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ И БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В РАМКАХ АНАЛИЗА ПЕРСПЕКТИВ ИХ СЖИГАНИЯ ДЛЯ ВЫРАБОТКИ ЭНЕРГИИ

Глушков Д.О., Стрижак П.А.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

В результате анализа статистических данных установлено, что энергетический потенциал промышленных и бытовых отходов составляет более $650 \cdot 10^{18}$ Дж, что характеризует перспективы их утилизации путем сжигания в составе композиционных топлив. Поэтому в рамках выполненного исследования экспериментально установлены закономерности и необходимые условия зажигания капель композиционных топлив на основе жидкого отхода углеобогащения (фильтр-кека) с добавлением мелкодисперсных частиц типичных твердых бытовых отходов (ТБО) в количестве 10 % (древесина, пищевой отход, пластик, картон) в условиях нагрева, соответствующих условиям сжигания топлива в топках котлов. Выделены основные стадии взаимосвязанных физико-химических процессов, протекающих в течение индукционного периода.

На примере рассмотренных составов композиционного топлива (фильтр-кек с добавками древесины, пищевых отходов, пластика, картона) экспериментально обоснована устойчивость зажигания и горения капель топлива до полного выгорания. Установлена область гарантированных времен задержки зажигания капель композиционных топлив размерами около 1 мм в диапазоне варьирования температуры окружающей среды 600–1000 ^{0}C. Минимальные значения времен задержки зажигания составляют около 3 с, максимальные – около 25 с. Отличие времен задержки зажигания для составов с разными компонентами из числа ТБО составляет менее 25 % в области относительно невысоких температур (600–700 ^{0}C). При температурах окружающей среды более 900 ^{0}C отличие времен задержки зажигания для разных составов топлива не превышает 10 %.

При добавлении типичных твердых бытовых отходов в состав композиционного топлива в процессе его горения выделяется эквивалентное количество энергии с меньшей концентрацией основных антропогенных выбросов в составе газообразных продуктов сгорания по сравнению с топливом без добавления отходов. Максимальное отличие концентраций NO_x и SO_x для таких составов топлив около 60 % и 35 %, соответственно. В абсолютных единицах измерения эти отличия составляют около 110 ppm и 45 ppm (при концентрации NO_x и SO_x в продуктах сгорания фильтр-кека без добавления других горючих компонентов около 300 ppm и 130 ppm).

В результате анализа установлено, что при частичной замене угля (50 % по генерации энергии) в топливно-энергетическом комплексе эквивалентным по энерговыделению количеством перспективного композиционного топлива экономия высококачественного твердого натурального топлива будет составлять около 1 млрд. тонн ежегодно на протяжении 20 лет (в течение регламентированного срока эксплуатации котла). Это позволит утилизировать более $24 \cdot 10^9$ тонн фильтр-кеков; $5{,}5 \cdot 10^9$ тонн ТБО; $0.35 \cdot 10^9$ тонн отработанных масел. Предлагаемые мероприятия будут способствовать решению проблемы утилизации накопленных до 2017 года отработанных масел, а также проблемы утилизации ежегодно производимых отходов углеобогащения и 10 %-му уменьшению объемов, накопленных до 2017 года фильтр-кеков. Кроме этого добавление в состав композиционных топлив ТБО позволит утилизировать последние в количестве до 50 % от ежегодного объема производства.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-2454.2018.3).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВКЛАДА ГОМОГЕННЫХ ФРОНТОВ ПЛАМЕНИ В ОБРАЗОВАНИЕ NO_X В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ С ПЕРСПЕКТИВНЫМИ СХЕМАМИ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

Гольцев В.Ф., Щепин С.А.
Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова,
г. Москва, Россия

Улучшение эмиссионных характеристик камер сгорания технических устройств в настоящее время не теряет актуальности. Среди методов снижения эмиссии оксидов азота (NOx) наиболее перспективна организация сжигании топлива или его части в составе предварительно перемешанной (гомогенной) бедной смеси. Однако схемы сжигания топлива с гомогенизацией более сложны при их практической реализации, чем традиционные. При их отработке возрастает роль предварительной оценки уровня эмиссии NOx. Достоверность оценок определяется качеством используемых моделей горения и образования оксидов азота.

Данная работа посвящена исследованию и анализу вклада гомогенных фронтов пламени в суммарную эмиссию NOx камерами сгорания. Это новый аспект в моделировании, который в перспективе дает дополнительную информацию о суммарной наработке NOx. Он способствует повышению точности оценки суммарной эмиссии NOx в сложных схемах сжигания топлива.

В рамках проведенного исследования для расчета вклада фронтов гомогенного пламени в суммарную наработку NOx использовался подход, ранее успешно апробированный при оценках наработки CO. Проведены расчеты уровня NOx в модельной камере сгорания с диффузионным и гомогенными фронтами пламени и дан их анализ. В качестве топлива в расчетах использовалось модельное топливо – метан. Для оценок использовался достаточно простой подход, базирующийся на представлениях, развитых в ЦИАМ. Суть его состоит в разделении общей задачи определения эмиссии NOx при горении на две задачи, которые решаются независимо. Первая задача состоит в определении распределения скоростей, состава газа и параметров турбулентности в камере сгорания. Для этого используется система осредненных по Фавру уравнений Навье-Стокса (RANS - Reynolds Averaged Navier-Stokes), дополненная моделями замыкания. Вторая задача состоит в непосредственном расчете уровней концентраций оксидов азота с использованием модели тонкого фронта, базирующейся на результатах решения первой задачи. Применение модели тонкого фронта позволило использовать в расчетах детальные кинетические схемы большой размерности, что необходимо для правильного моделирования всех механизмов наработки оксидов азота.

Для модельных условий показан характер влияния времени пребывания и степени гомогенизации на суммарный уровень NOx. Показано распределение полученного уровня эмиссии оксидов азота по источникам образования. Установлено, что образование оксидов азота на гомогенных фронтах пламени практически не зависит от времени пребывания, в то время, как суммарные выбросы NOx повышаются с ростом времени пребывания продуктов сгорания в камере. Установлено, что при высокой степени гомогенизации вклад гомогенных фронтов в суммарную эмиссию NOx становиться значительным.

Из анализа полученных результатов следует, что для повышения точности оценки эмиссии, при моделировании схем сжигания с частичной гомогенизацией целесообразно учитывать влияние гомогенных фронтов пламени на образование NOx.

ФАКЕЛЬНОЕ СЖИГАНИЕ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Гореликов Е.Ю.[1)], Литвинов И.В.[1)], Шторк С.И.[1)]
[1)]Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Факельное сжигание пылеугольного топлива со средним диаметром частиц порядка сотни микрон остается наиболее популярным способом сжигания. При таком способе сжигания повышается эффективность горения и снижается концентрация вредных выбросов. С развитием современных бесконтактных способов диагностики потока в литературе появляются актуальные и востребованные исследования факельного сжигании угля, направленные на аэродинамические способы стабилизации горения [1]. Исследование аэродинамики факела в пылеугольной микрогорелке с помощью бесконтактной методики при помощи лазерно-допплеровский анемометр позволяет получить информацию о структуре потока при варьировании соотношения стехиометрии, способа помола углей, а также возможности аэродинамического способа стабилизации пламени за счёт изменения соотношения подачи вторичного воздуха и условий закрутки (закрутка и противокрутка) в пылеугольной микрогорелке [2,3]. Одним из основных инструментов для совершенствования существующих и разработки новых технологий сжигания твердого топлива является математическое моделирование, но для развития математических моделей описания процессов, имеющих место при сжигании мелкодисперсного твердого топлива и их верификации, необходимо получение надежных экспериментальных результатов на лабораторных установках, где представляется возможным провести полные детальные измерения. Для исследования процессов горения пылеугольного топлива в закрученном потоке была создана экспериментальная установка тепловой мощностью 25 кВт рис. 1. Суть данной установки заключается в поджоге пылеугольного топлива при воздействии на него пламени пилотной пропан бутановой горелки. Закрутка потока осуществляется при помощи улиточного завихрителя.

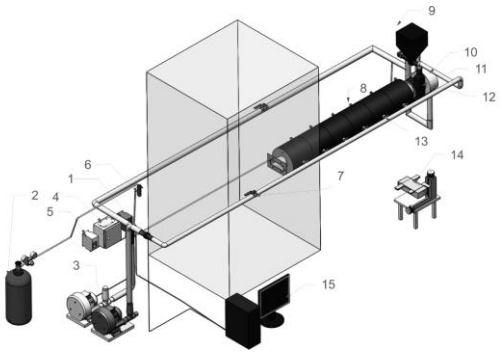


Рис. 1. Экспериментальная установка 1 – расходомеры, 2 – газовый баллон, 3 – воздуходувка, 4 – частотный преобразователь, 5 – блок сбора данных, 6 – ротаметре, 7 – вентили, 8 – термопары, 9– питатель, 10 –ЗЗУ, 11- улитка, 12- газовая горелка, 13- смотровые окна, 14– система ЛДА, 15 – ПК.

При этом в качестве трассеров для получения допплеровского сигнала использовались частицы твердого топлива. Данные с ЛДА позволили получить профили аксиальной и тангенциальной скорости при горении пылеугольной смеси при сокрутке и противокрутке. Для исследования процессов воспламенения и выгорания топлива были исследованы три образца угольного топлива. Проведен газовый анализ уходящих дымовых газов. Проведен сравнительный анализ температуры на стенке муфелей, а также в центре пока.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ грант № 18-48-543020.

Список литературы

1. Sung, Y., & Choi, G. Non-intrusive optical diagnostics of co-and counter-swirling flames in a dual swirl pulverized coal combustion burner. Fuel, 174, 76-88, 2016.
2. Weidmann, M., Honoré, D., Verbaere, et al. Experimental characterization of pulverized coal MILD flameless combustion from detailed measurements in a pilot-scale facility. Combustion and Flame. 2016. Vol. 168. P.365-377.
3. Litvinov I., Nazarov A., Shtork S. Suppression of vortex core precession in a swirling reacting flow. Thermophysics and Aeromechanics. 2016. Vol. 23. №2. P. 305-308.

ПРЯМОТОЧНЫЕ КОТЛЫ ДЛЯ ТЭС БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ С КОТЛАМИ БАШЕННОЙ КОМПОНОВКИ НА СВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПАРА

Горр Д.[1)], Brandau L.[2)]
ООО «Интерэнерго»,
«Steinmüller Engineering GmbH», IHI Group Company

В статье изложены основные преимущества котлов башенной компоновки, разработанных по технологии и с учётом опыта работы Steinmüller Engineering в сравнении с традиционными П-образными и Т-образными котлами. Дополнительно сделан акцент на особенности систем сжигания в широком диапазоне топливных характеристик, а также монтажа. Представлены примеры опыта работающих котлов башенной компоновки для промышленных предприятий и собственных нужд.

В докладе представлены:

- Основные этапы и история развития технологии котлов Башенной компоновки;
- Преимущества и особенности применения котлов башенной компоновки для мощных энергоблоков; сравнение преимуществ котлов Башенной компоновки и П-образных;
- Основные технические решения по топочно-горелочным устройствам и системе сжигания; обеспечение требований по выбросам NOx;
- Особенности применения систем очистки дымовых газов (deNox, deSOx);
- Очистка топочной камеры и конвективных поверхностей нагрева;
- Некоторые особенности технологии монтажа Башенных котлов;
- Примеры котлов Башенной компоновки, находящихся в промышленной эксплуатации;
- Актуальность внедрения современной технологии создания котлов башенной компоновки на рынке РФ на основе накопленного опыта Steinmuller Engineering.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ СМЕШАННОГО И СИНТЕТИЧЕСКОГО ТОПЛИВА В УСЛОВИЯХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОТИВОТОКА

Гурьянов А.И. [1], Кононова В.В. [2], Пиралишвили Ш.А.[1], Гурьянова М.М.[1], Евдокимов О.А.[1]

[1] РГАТУ им. П.А. Соловьева, г. Рыбинск, Россия

[2] ПАО «ОДК-Сатурн», г. Рыбинск, Россия

Проведен анализ перспективных схем организации рабочего процесса в камере сгорания, использующих альтернативное топливо, в том числе водородосодержащий синтез-газ. Выполнены исследования особенностей процессов горения топливных смесей, содержащих продукты каталитической конверсии метана (синтез-газ) в условиях газодинамического противотока. Был выполнен комплекс экспериментальных исследований противоточного горелочного модуля, работающего на метане с добавками синтез-газа, определен концентрационный диапазон устойчивого горения топливно-воздушной смеси и эмиссионные характеристики по оксидам азота, несгоревшим углеводородам и монооксидам углерода. Разработана модель противоточного горелочного устройства, осуществляющая низкоэмиссионное сжигание топливной смеси метана и синтез-газа в широком диапазоне коэффициента избытка воздуха.

Выполненный комплекс экспериментальных исследований показал эффективность добавок синтез-газа на концентрационный предел устойчивого горения. Исследования позволили сделать вывод, что перевод устройств горения на синтезгаз способствует двукратному снижению эмиссии оксидов азота во всем концентрационном диапазоне устойчивого горения, относительно горения метана. Объёмная доля целесообразной добавки синтез-газа, составляющая 15%, сокращает эмиссию оксидов азота при горении в условиях газодинамического противотока в 1,5 раза относительно горения метана во всём диапазоне по коэффициенту избытка воздуха. Эмиссия несгоревших углеводородов в богатой области горения уменьшается 7,7 раз, в области бедного горения снижается в 1,8 раза, в случае стехиометрического горения концентрация уменьшается в 42 раза. Эмиссия монооксидов углерода в области бедного горения снижается в 1,7 раза, в области богатого горения в 4 раза, в случае стехиометрии в 2,5 раза.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №16-08-00974 «Развитие модельного описания тепломассообменных процессов в закрученных ограниченных течениях и его применение при создании устройств перспективных технологий».

Список литературы

1. Guryanov A.I., Evdokimov O.A., Veretennikov S.V., Guryanova M.M. Experimental investigation of premixed air–fuel mixtures and of the combustion specifics of diffusion fuel jets // International Journal of Energy for a Clean Environment, 2017. – Vol. 18(4) – P. 335 – 348. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.20180212232.
2. Guryanov, A.I. Experimental investigation of the burning of mixed and synthetic fuel counterflow burner module [Text] / V.V. Kononova, A.I. Guryanov // Journal of Physics: Conference Series, 2017. – Vol. 891 – P. 1 – 6. DOI:10.1088/1742-6596/891/1/012227
3. Guryanov, A.I. Heat transfer simulation of unsteady swirling flow in a vortex tube [Text] / S.V. Veretennikov, Sh.A. Piralishvili, O.A. Evdokimov, A.I. Guryanov // Journal of Physics: Conference Series, 2018. – Vol. 980 – P. 1 – 6. DOI:10.1088/1742-6596/980/1/012007
4. Гурьянов, А. И. Горение синтез-газа в условиях газодинамического противотока [Текст] / А.И. Гурьянов, Ш. А. Пиралишвили, В. В. Кононова // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева, 2017. – №4 (43). – С. 74 – 78.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЯ

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

Уголь остается одним из широко используемых топлив в энергетике развитых стран. Для повышения эффективности сжигания и снижения количества экологически опасных выбросов совершенствуются традиционные способы сжигания угля и разрабатываются новые технологии.

Развитие методов математического моделирования и вычислительной техники, появление доступного программного обеспечения привело к тому, что численное моделирование физико-химических процессов становится одним из основных инструментов исследования и анализа при модернизации существующих устройств и создании новых технологий.

В Красноярском филиале института теплофизики СО РАН развиваются модели и алгоритмы расчета процессов, происходящих при горении: турбулентная аэродинамика многокомпонентного газового потока с дисперсной фазой, распыл жидкого топлива, сложный теплообмен, движение дисперсной фазы, горение газового и твердого топлива. Совместно с коллегами из ИТ СО РАН, НИИ (ВТИ, СибВТИ, ЗиоКОТЭС и др.) и ВУЗов (УрФУ, ТПУ, СФУ, НГУ и др.) был проведен широкий цикл исследований и разработаны модели для различных технологий энергетического использования угольного топлива: факельного горения [1,2], термоподготовки пылеугольного топлива [3], поточной газификации угля [4], горения водоугольного топлива [5] и механоактивированного угля микропомола [6].

Доклад посвящен опыту математического моделирования различных технологий энергетического использования угольного топлива.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по Соглашению о субсидии № 14.607.21.0150 (ПНИЭР RFMEFI60716X0150).

Список литературы

1. Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А. Математическая модель процессов теплообмена и горения пылеугольного топлива при факельном сжигании. Физика горения и взрыва. 2011, № 3, стр. 37-46
2. Chernetskiy M. Yu., Kuznetsov V. A., Dekterev A. A., Abaimov N. A., Ryzhkov A. F. Comparative analysis of turbulence model effect on description of the processes of pulverized coal combustion at flow swirl // THERMOPHYSICS AND AEROMECHANICS. 2016 Volume: 23 Issue: 4 Pages: 591-602
3. Chernetskaya N., Chernetsky M., Dekterev A. Numerical investigation of influence thermal preparation coal on nitric oxides formation in combustion process. Cleaner Combustion and Sustainable World. Proceedings of the 7th International Symposium on Coal Combustion, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012., p.233-237
4. Kuznetsov V., Chernetskiy M., Abaimov N., & Ryzhkov A. (2017). Study of the two-stage gasification process of pulverized coal with a combined countercurrent and concurrent flow system. In MATEC Web of Conferences (Vol. 115, p. 03008). EDP Sciences.
5. Chernetskiy M., Vershinina K., & Strizhak P. (2018). Computational modeling of the combustion of coal water slurries containing petrochemicals. Fuel, 220, 109-119
6. Chernetskiy M., Dekterev A., Chernetskaya N., & Hanjalić K. (2018). Effects of reburning mechanically-activated micronized coal on reduction of NO x: Computational study of a real-scale tangentially-fired boiler. Fuel, 214, 215-229

ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ И ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПРОЦЕССОВ РАСПЫЛА ТОПЛИВА И ТЕЧЕНИЙ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТД, ОСУЩЕСТВЛЯЕМЫХ В НОЦ ГДИ САМАРСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Диденко А.А., Матвеев С.Г.
Самарский университет, г. Самара, Россия

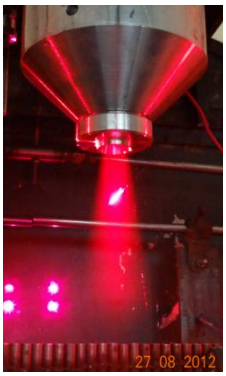
В научно-образовательном центре газодинамических исследований (НОЦ ГДИ) Самарского университета испытания форсуночных устройств газотурбинных двигателей (ГТД) и исследования характеристик факелов распыла и двухфазных течений осуществляются на созданной для этих целей экспериментальной установке УПФ-372. Установка имеет системы подачи керосина, воздуха, вытяжки и очистки отработавших газов и оснащена комплексом стандартных приборов для измерения и контроля режимных параметров – давления, температуры и расходов рабочего тела, 35-ти-канальным сборником жидкого топлива, а также несколькими лазерными доплеровскими и фазо-доплеровскими измерителями – 3D-LDA-PDA Dantec, ЛАД-056С, ЛАД-078С-ФДА и термоанемометром CTA Dantec.

При выполнении госбюджетных и хоздоговорных НИР и НИОКР по договорам с двигателестроительными предприятиями и отраслевыми НИИ для одно- и двухфазных потоков (рис. 1а, б) получены с помощью лазерных измерителей данные по скорости воздуха, средним диаметрам и распределениям капель по диаметрам, полям распределения перечисленных параметров; результаты сравниваются с данными исследователей других учреждений и предприятий.

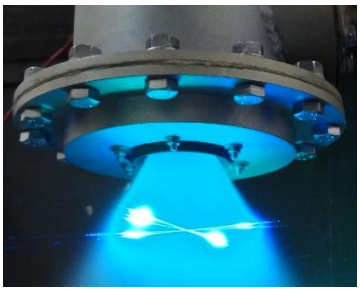
Исследования внутренних процессов и выходных характеристик горелочных устройств и камер сгорания ГТД осуществляются на созданных испытательном стенде и ряде модельных установок с применением средств химического анализа, измерения давления, температуры и расхода газа, лазерных измерений скорости газа с помощью 3D-LDA (рис. 1в).

Изучаются физико-математические основы и отрабатываются технологии применения методов молекулярной спектроскопии на основе лазерно-индуцированной флуоресценции с применением PLIF LaVision. В настоящий период тренировочные измерения выполняются на пламени (метан-воздух) калибровочной горелки МакКенна по определению концентрации OH и температуры пламени. Изучаются теоретические основы методов Raman, Rayleigh, CARS. Рассчитанные LIF-OH и CARS-H2 спектры сравниваются с расчетными и экспериментальными данными других авторов.

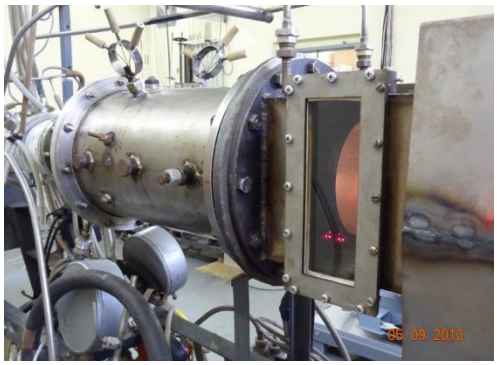
Для исследования процессов смесеобразования, физики и химии горения газообразных и жидких топлив в форсуночных и горелочных устройствах и в камерах сгорания ГТД широко применяются методы численного моделирования в среде ANSYS Fluent в RANS и LES постановках с использованием ресурсов суперкомпьютера «Сергей Королёв».



а) струя из сопла



б) топливно-воздушный факел



в) струя на выходе из камеры сгорания

Рис. 1. Применение лазерных систем для измерения параметров одно- и двухфазных потоков, пламени

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОВМЕСТНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ И ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ В КИСЛОРОДНОМ ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ

Донской И.Г., Козлов А.Н., Свищев Д.А., Шаманский В.А.
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

Использование биомассы в энергетике связано с двумя важными задачами: снижением зависимости энергосистем от дорогого качественного топлива, и повышением экологической эффективности теплоэнергетических установок (за счет переработки углеродсодержащих отходов и, в ряде случаев, снижения вредных выбросов). Помимо совместного сжигания, возможны другие способы переработки топлив, в том числе их совместная газификация. Процесс газификации низкосортных топлив может быть неустойчивым из-за их низкой теплотворной способности, часто сопровождается образованием смолистых продуктов, поэтому добавление угля способствует повышению эффективности их переработки. С другой стороны, высокая реакционная способность биомассы может способствовать стабилизации режимов горения и газификации низкореакционных топлив, таких как угли высокой степени метаморфизма или коксовые остатки нефтепереработки. В данной работе рассматривается процесс газификации измельченного топлива в несущем потоке, который позволяет получать газовое топливо для разных целей (парогазовый цикл, химическая технология). Совместная газификация углеродсодержащих промышленных отходов и биомассы с углем реализована на действующих угольных станциях.

Совместная газификация топлив с существенно отличающимися свойствами не только смещает оптимальные режимы работы газогенератора (по удельному расходу окислителя и условиям шлакования), но и существенно влияет на процессы, связанные с подготовкой горючего газа к использованию в камере сгорания или каталитическом реакторе. Часто требуется дополнительная очистка (которая связана с потерями физической теплоты генераторного газа), либо регулировка состава горючей смеси (разбавление воздухом, азотом, водяным паром и т.д.). Минеральная часть топлив также оказывает влияние на процесс газификации, поскольку зола биомассы может смещать температурные границы шлакования и усиливать коррозионные свойства шлака.

Использование низкосортных топлив позволяет в ряде случаев получить дополнительную выгоду в виде платы за утилизацию отходов, однако, для этого обычно требуется модернизация тепловой схемы (дополнительные секции подготовки сырья, охлаждения и очистки газа). Теплотворная способность низкосортных топлив практически всегда ниже, чем у энергетических углей, поэтому тепловой КПД энергоустановки при прочих равных условиях будет уменьшаться. Однако в условиях ограничений на вредные выбросы использование биомассы и отходов (даже при небольшом добавлении к основному топливу) может стать эффективным. Требуется выбирать условия таким образом, чтобы газификация биомассы была технически и экономически оправданной.

Как показывают теоретические и экспериментальные работы, при совместной газификации угля и биомассы часто существует оптимальное соотношение, при котором реализуется достаточно эффективная конверсия компонентов топливной смеси при незначительном изменении технической эффективности. Настоящая работа посвящена исследованию термических режимов конверсии топливных частиц в реакционной зоне поточных газогенераторов. В работе проведено математическое моделирование стационарных режимов газификации угольной пыли с добавлением биомассы в поточном газогенераторе с парокислородным дутьем, получены расчетные зависимости эффективности процесса от управляющих параметров: доли биомассы в смеси с углем и удельного расхода кислорода.

Работа выполнена в рамках научного проекта III.17.1. программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310448-0

КИНЕТИКА СУШКИ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ТОПЛИВ

Донской И.Г.[1)], Козлов А.Н.[1)], Шаманский В.А.[1)]
[1)] Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

Процесс сушки топливной биомассы является неотъемлемой начальной стадией любых способов ее термической переработки. При этом следует учитывать, что вода в органической массе находится в различных энергетических состояниях, что влияет на кинетику обезвоживания топливных частиц. Как правило, выделяют три основных вида состояния влаги в органической массе [1]: 1 – мономолекулярный сорбционный слой, непосредственно контактирующий с макромолекулами органической фазы (до 5% влажности); 2 – полимолекулярная адсорбция, образующая сплошную пленку воды в микропорах топливных частиц (до 13% влажности); 3 – конденсационная влага в микропорах (до 40-50% влаги). При влажности выше ~50% свойства влаги не отличаются от свойств обычной воды. Очевидно, что сушка топливных частиц происходит в непрерывном режиме с постепенным переходом от одного состояния испаряемой влаги к другому [2]. Более того, в условиях энергетической переработки лигноцеллюлозных топлив (газификация, сжигание) процесс сушки протекает одновременно с процессами пиролиза и горения из-за термической неоднородности реакционного пространства (как отдельных частиц, так и всей их совокупности) [3]. Это необходимо учитывать при моделировании общей кинетики многофазного реагирующего потока, поскольку выделяющаяся влага влияет как на состав газовой фазы, так и на внутреннюю структуру топливной частицы и ее взаимодействие с внешними потоками [4, 5].

В настоящей работе проводится исследование и моделирование процесса сушки частиц биомассы на примере древесных опилок с различным содержанием лигнина и разной степени увлажненности. Эксперименты выполнены на основе комплекса термического анализа STA449F1 совмещенного с квадрупольным масс-спектрометром QMS403C. Данные получены для неизотермических и изотермических (при разных температурах) условий сушки. Предложена математическая модель скорости испарения различных энергетических форм воды в лигноцеллюлозном топливе с использованием формализма химической кинетики. Предложен способ экспериментального определения энергии связи молекул воды с органической массой и ее изменения в зависимости от влажности топлива.

Работа выполнена в ИСЭМ СО РАН при поддержке РФФИ (проект №16-08-00694) с использованием оборудования ЦКП ИСЭМ СО РАН «Высокотемпературный контур»

Список литературы

1. Чудинов Б.С. Вода в древесине. Новосибирск: Наука. 1984. 470 с.
2. Modeling of coupled heat and mass transfer during drying of tropical woods / M. Simo-Tagne et al. // International Journal of Thermal Sciences. 2016. V. 109. P. 299-308.
3. Numerical models for thermochemical degradation of thermally thick woody biomass, and their application in domestic wood heating appliances and grate furnaces / I. Haberle et al. // Progress in Energy and Combustion Science. 2017. V. 63. P. 204-252.
4. Analysis of the Interactions between Moisture Evaporation and Exothermic Pyrolysis of Hazelnut Shells / C. Di Blasi et al. // Energy & Fuels. 2016. V. 30. No. 10. P. 7878-7886.
5. The Conditions and Characteristics of Wood Particles Ignition in the Stream of the High Temperature Gases / S.V. Syrodoy et al. // Combustion Science and Technology. 2018. V. 190. No. 4. P. 663-686.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ СЖИГАНИЯ ТОРФЯНОЙ ПЫЛИ ЗА СЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПОДПИТКИ СИНТЕТИЧЕСКИМ И НАТУРАЛЬНЫМ ТОПЛИВОМ

Евдокимов О.А.[1], Пиралишвили Ш.А.[1], Гурьянов А.И.[1], Михайлов А.С.[2], Бурцев В.А.[3]
[1] ФГБОУ ВО РГАТУ имени П.А. Соловьева, г. Рыбинск, Россия
[2] ООО «РегионЭнерго», г. Рыбинск, Россия
[3] ООО «Газомотор-Р», г. Рыбинск, Россия

Пылевидное сжигание твердого топлива определяет дополнительные требования к процессам его воспламенения и стабилизации в огневой камере, которые в энергетике объединяются общим понятием «подсветки». Наиболее изученными и распространенными способами в настоящее время является подсветка частиц пыли мазутным и газовым факелами. Также используются и альтернативные способы подсветки, например, за счет генерации низкотемпературной плазмы, факелом твердого топлива высокой реакционной способности, различными синтетическими и биотопливами. В ряде случаев применение дополнительного топлива может снизить эффективность и экологичность топочного процесса, что определяет необходимость проведения исследования по оптимизации параметров подсветки с точки зрения вида применяемого топлива и условий его сжигания.

В работе экспериментальными и расчетными способами установлено влияние энергетической подпитки горения торфяной пыли [1] в вихревой эжекционной горелке [2] натуральными ископаемыми видами топлива (метан и пропан), а также синтез-газом [3]. Показано, что даже небольшие добавки синтез-газа (10-15% по энергетике) приводят к существенной интенсификации процесса, выраженной в расширении концентрационных пределов воспламенения, повышении устойчивости горения и полноты сгорания топлива.

На рис. 1 показана зависимость положения границы бедного срыва пламени по коэффициенту избытка воздуха в торфяной горелке при подаче различных топливных газов от относительного расхода первичного воздуха.

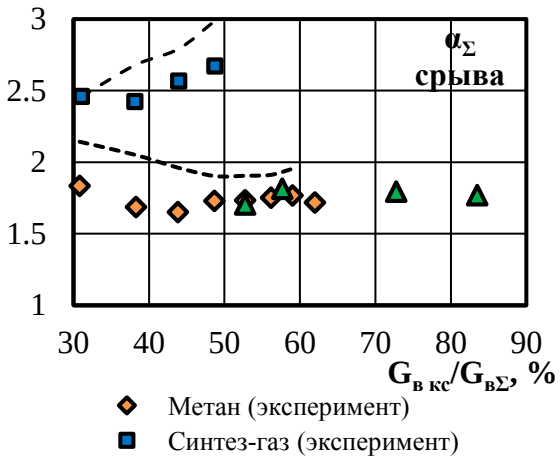


Рис. 1. Граница бедного срыва пламени торфяной горелки при подаче различных топливных газов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ No 18-79-00180 «Теплофизика комбинированных реагирующих и импактных струйных течений».

Список литературы

1. Mikhaylov A.S., Evdokimov O.A., Guryanov A.I., Spesivtseva N.S. The influence of composite fuel granules fractional composition on their characteristics as an energy source // International Journal of Energy for a Clean Environment, 2017. – Vol. 18(3) – P. 231 – 242.
2. Михайлов А.С., Пиралишвили Ш.А. Теплофизика сжигания торфовоздушной смеси в закрученном поток // Вестник рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. – 2015. – № 1(32). – С. 44-52.
3. Kononova V.V., Guryanov A.I. Experimental investigation of the burning of mixed and synthetic fuel counterflow burner module // Journal of Physics: Conference Series, 2017. – Vol. 891 – P. 1 – 6.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ В ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКАХ С ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ (ОБЗОР)

Евсеев А.Р.
Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В обзорном докладе основное внимание уделяется перспективам применения волоконно-оптических датчиков (ВОД) для исследования процессов горения и измерения актуальных параметров (скорости и концентрации частиц, температуры и ее распределения в объекте, давления, деформации, ускорения, перемещения и др.) в двухфазных потоках и местах трудного доступа при высоких температурах (800ºС и более). В НЦВО РАН (http://www.fibopt.ru) разработаны ВОД и волоконные световоды с металлическим покрытием (Al, Cu и др.), которые не теряют оптических свойств при температурах окружающей среды до 800ºС и более. Высокая температурная устойчивость расширяет область применения ВОД в камерах внутреннего сгорания, в кипящем и циркулирующем кипящем слое (ТЭС и ГРЭС), в процессах фильтрационного каталитического горения, в высокотемпера-турных химических реакторах, и др. Промышленное производство волоконных световодов с металлическим покрытием освоено в ОАО Пермская приборостроительная компания (http://www.ppk.perm.ru/ppk60/), а промышленные ВОД на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) выпускаются в ООО «Инверсия - Сенсор» (https://i-sensor.ru).

Процессы горения включают такие стадии, как образование горючей смеси, воспламенение, распространение пламени и излучение, химические превращения и тепловыделение, многофазные течения, турбулентный массообмен и др. В ИТ СО РАН (http://www.itp.nsc.ru) разработаны одно-, двух- и трехволоконные оптические датчики, на основе которых реализованы дифференциальная и инверсно-дифференциальная схемы лазерного доплеровского анемометра (ЛДВА-3), а также схема ЛДВА-1 с опорным пучком. В этих схемах роль блоков формирующей и приемной оптики ЛДА выполняют световоды. С применением волоконных световодов с металлической оболочкой становится возможным проводить измерения скоростей и концентраций частиц в горячих аппаратах с кипящим и циркулирующим кипящим слоем, в процессах фильтрационного каталитического горения и др.

Для визуализации различных теплофизических процессов и измерений в двухфазных потоках с высокой концентрацией дисперсной фазы в ИТ СО РАН разработана оригинальная жесткая зрительная трубка (эндоскоп), которая имеет простую и надежную конструкцию при приемлемом качестве изображения. При импульсной подсветке двухфазной среды возможно измерение скорости и концентрации дисперсной фазы с применением PIV, PTV, ЛДА и др.

Возможность применения трубки для исследования процессов горения в двухфазных потоках при высокой концентрации дисперсной фазы при температуре среды до 950ºС и более определяется следующими факторами: четыре оптических элемента могут быть изготовлены из кварцевого стекла с максимальной температурой эксплуатации до 1400ºС, а для подсветки объекта могут быть применены волоконные световоды с металлической оболочкой и максимальной температурой эксплуатации до 800ºС; возможностью охлаждения зрительной трубки от внешнего источника. Работоспособность оптической схемы не нарушается при деформации трубки до 0.5-0.7 мм.

Работа выполнена за счет средств, полученных от ФАНО России.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ТЕПЛОМАССОПОДВОДА ВБЛИЗИ ДОННОГО СРЕЗА ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ

Ермолаев И.К. [1], Боголепов В.В. [2], Сухановская Л.Д. [3]
[1] НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына МГУ, Москва
[2] ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия
[3] НИИ механики МГУ, Москва

В докладе представлены результаты исследований по снижению донного сопротивления летательного аппарата (тела вращения), обтекаемых сверхзвуковым потоком. К настоящему времени накоплен значительный объем экспериментальных данных по влиянию тепломассоподвода и горения пиротехнических составов в донной части тела вращения. Установлено, что процессы, происходящие за донным срезом, приводят к значительному увеличению донного давления и, как следствие, уменьшению общего коэффициента сопротивления за счет уменьшения составляющей донного сопротивления. Однако максимальное увеличение донного давления в этих случаях не может быть достигнуто. Необходима разработка новых схем, позволяющих снижение донного сопротивления до отрицательного, т.е. до возникновения донной тяги.

Для реализации поставленной задачи исследованы свойства, способ получения и применение термитной пылевой плазмы, полученной при горении оксидно-металлического порошкового композита на основе окиси вольфрама. Показано, что скорость выброса плазмы ~ 2190 м/с, температура 1900^0С, размер частиц от 6 до 180 микрон. При определенных условиях, когда амплитуда поперечных колебаний плазменной струи достигает критических значений головная часть струи может отделиться и просуществовать некоторое время в виде свободно летящего плазмоида, температура которого может изменяться от 3000 до 15000ºС. Установлено, что время существования плазмоида порядка 0.7с. Размеры плазмоидов, при максимальной величине выходного сечения сопла 35мм, 240мм.

Предложено использовать образование плазмоидов для высокотемпературного тепломассоподвода в донную область тела вращения. Исследованы различные конструктивные схемы донных тепловых газогенераторов (ДТГ) с оксидно-металлическим порошковым композитом. Показано, что при числе Маха $M_1 = 3$ для модели ДТГ, позволяющей увеличить время существования плазмоида в донной области до 1.2с, величина донного давления достигает 91.2 % от статического давления в потоке. Установлено, что при вдуве термитной пылевой плазмы в донную область тела вращения при наличии магнитного поля наблюдается увеличение донного давления практиески до статического. Отмечено, что зона рециркуляции для модели ДТГ с магнитами-кольцами, установленными на торце, существенно больше, чем зона рециркуляции для модели ДТГ с магнитами-кольцами, установленными в полости тела вращения, т.е. для дальнейших исследований конструктивная модель ДТГ с магнитами-кольцами, установленными на торце, применима как более эффективная. Для получения максимального увеличения донного давления использование горения высокоэнергетических композитов с образованием термитной пылевой плазмы предполагается перспективным направлением.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №15-01-07687).

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Жданова А.О.[1], Кралинова С.С.[1], Кузнецов Г.В.[1], Хасанов И.Р.[2]

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

[2] Научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Балашиха, Россия

Из года в год угроза лесных пожаров во всем мире стоит перед человечеством все более остро [1]. С использованием современных технологий пожаротушения удается лишь локализовать лесной пожар [2]. Предотвратить возгорания в лесу практически невозможно вследствие различной природы происхождения источников зажигания [3]. Поэтому единственным возможным способом решения этой проблемы является создание эффективных технологий тушения. Однако при сравнении теоретических и экспериментальных значений характеристик пламенного горения и термического разложения лесных горючих материалов (ЛГМ), а также локализации и подавления этих процессов регистрируются довольно большие отклонения [4]. Причины отклонений теоретических и экспериментальных значений часто связывают с принимаемыми при моделировании допущениями по теплофизическим и термокинетическим характеристикам ЛГМ. Известных данных об этих характеристиках недостаточно [5].

На рис. 1 приведены установленные значения теплоемкости типичных ЛГМ Дальневосточного федерального округа (ДФО) для широкого диапазона температур (298–423 К), соответствующего инициированию процессов термического разложения.

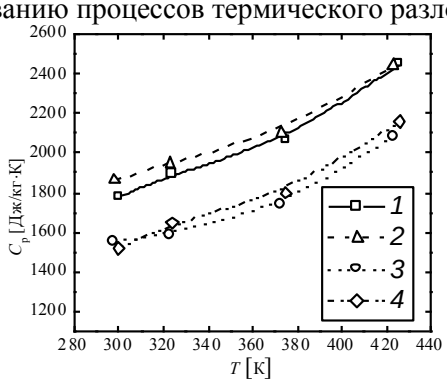


Рис.1. Экспериментальные значения теплоемкости ЛГМ ДФО: *1* – ветки березы, *2* – кора березы, *3* – трава, *4* – смесь веток.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ 18-19-00056.

Список литературы

1. Dimitrakopoulos A., Gogi C., Stamatelos G., Mitsopoulos I. Statistical analysis of the fire environment of large forest fires (>1000 ha) in Greece // Pol. J. Environ. Stud. – 2011. – Vol. 20. – P. 327–332.
2. Жданова А. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А., Хасанов И. Р., Федоткин Д. В. О возможности тушения лесных и торфяных пожаров полидисперсными водяными потоками // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – №2. – С. 49–66.
3. Гришин А. М., Голованов А. Н. О потухании лесных горючих материалов при постоянных и переменных воздействиях потока инертного газа на зону горения // Физика горения и взрыва. –2001. – № 5. – С. 75–80.
4. Копылов Н. П., Чибисов А. Л., Душкин А. Л., Кудрявцев Е. А. Изучение закономерностей тушения тонкораспыленной водой модельных очагов пожара // Пожарная безопасность. – 2008. – № 4. – С. 45–58.
5. Гришин А. М., Перминов В. А. Зажигание лесных массивов под действием высотного источника лучистой энергии // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т.32, №5. – С. 107-115.

СЖИГАНИЕ ОТХОДОВ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Жуков Е.Б., Меняев К.В., Таймасов Д.Р.
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Тенденции развития современной энергетической отрасли требуют повышения экологических и экономических показателей котельных установок.

Сжигание в топочных камерах котлов средней мощности, измельчённых древесных и растительных отходов, представляет существенную проблему как из-за трудности удержания лёгких парусных частиц в процессе их выжигания, так и из-за возможности образования значительных отложений золы в топке и в котельных пучках [1].

В ходе экспериментов на специальной установке были проведены исследования процессов горения на образцах древесины и получены графические зависимости изменения массы частицы от времени пребывания её в высокотемпературной зоне (рис.1).

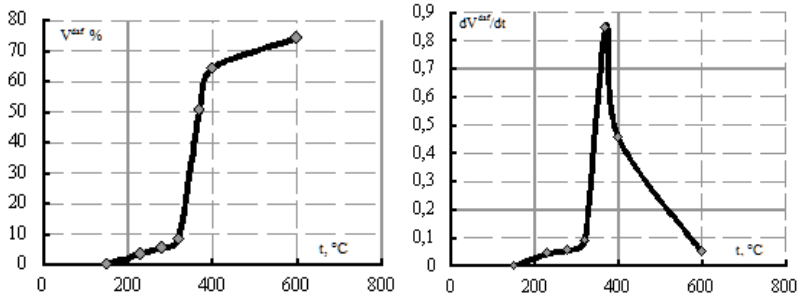


Рис. 1. Графическая зависимость выхода летучих древесных опилок от температуры в интегральной и дифференциальной форме

Предложен профиль топочной камеры, в котором частицы полифракционного топлива, обладающие высокой парусностью и низкой плотностью, удерживаются внутри топки за счет инерционного принципа сепарации (рис.2).

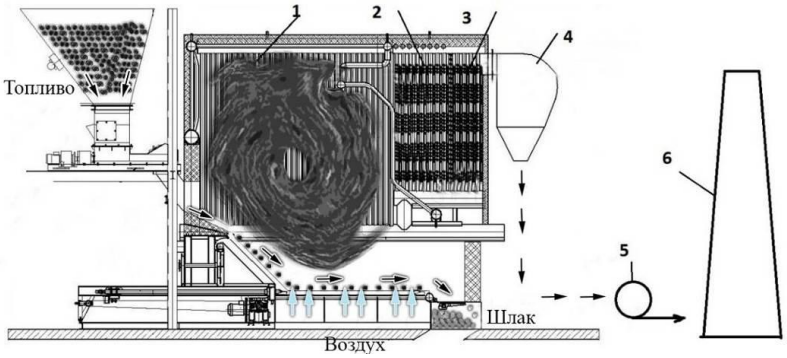


Рис. 2. Котельная установка КВм-5,0ДВО для сжигания древесных отходов

В работе представлены возможности использования кородревесных отходов в качестве топлива в малой и средней энергетике. Предложены методы устранения проблем утилизации низкосортных топлив из отходов различного типа. Результаты натурных экспериментов и CFD-численного моделирования по сжиганию таких топлив показали возможность их эффективного применения в энергетике. Представленные разработки котельных агрегатов с высокими экологическими показателями с применением многократной циркуляции.

Список литературы

1. Zhukov E.B., CO-COMBUSTION TECHNOLOGY OF COAL AND WOOD WASTE/Zhukov E.B., Puzirev E.M., Menyaev K.V. The 8th International Symposium on Coal Combustion (8thISCC) Beijing, China, July 19-22, 2015

ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРАВЛЕНИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕСТНОГО НИЗКОСОРТНОГО ТОПЛИВА

Заворин А.С., Воронцова Е.С.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Тенденция последних лет на развитие ресурсоэффективных технологий придает актуальность исследованиям, направленным на разработку и оценку способов вовлечения низкокачественных твердых топлив в энергетическое использование. Особенно востребовано это для регионов, удаленных от централизованного энергоснабжения, где энергетическая безопасность и жизнеобеспечение целиком зависят от условий доставки привозного топлива. На примере бурогоугольного месторождения Томской области исследованы несколько технологических направлений: непосредственное сжигание в топках энергетических котлов, термическая конверсия в горючие газы, переработка в твердое композитное топливо и подземная газификация.

Исследование процессов горения в топочной камере выполнено с использованием численного моделирования, что позволило рассмотреть большое количество вариантов. Численный эксперимент проведен с использованием пакета прикладных программ FIRE 3D на основе Эйлерово-Лагранжева способа описания аэротермохимических процессов в газодисперсных средах.

Термическая конверсия таловского угля в горючие газы заключается в разработке принципа к глубокой конверсии органической массы в условиях температур не более 500 °С, хотя известно, что при низкотемпературном нагреве крайне затруднительно провести глубокую конверсию углерода топлива в горючий газ.

Направлением переработки низкосортного угля в кондиционное топливо, пригодное для сжигания в слоевых топочных устройствах, является теплотехнология, включающая предварительную термическую переработку исходного сырья в энергетически ценные продукты (углеродистый остаток и пиролизный конденсат) и последующее формование на их основе стандартизированного топлива – твердого композитного топлива (брикетов и пеллет). В качестве способа термической переработки протестирован процесс пиролиза, температура которого не превышает 450 °С, что позволяет использовать доступные материалы при изготовлении технологического оборудования, тем самым минимизируя капитальные затраты. Побочный продукт термической переработки – газ – сжигается для покрытия тепловых издержек теплотехнологии.

Также рассмотрена технология подземной газификации угля (ПГУ). В исследовании представлена одна из практических схем: угольный пласт с пробуренной скважиной, куда введена труба с второй внутренней трубой меньшего диаметра. По внутренней трубе к нижнему основанию угольного пласта подается, подогретая паровоздушная смесь. По истечении некоторого времени угольный пласт прогреется до такой температуры, что в нем начнутся химические процессы. Через отверстия на боковой поверхности наружной трубы образовавшиеся газы проникают во внешнюю трубу и выводятся из угольного пласта на поверхность. Изменение состава газа в зависимости от параметров подаваемой в пласт паровоздушной смеси исследовано методом математического моделирования.

Исследования, проведенные по представленным направлениям, дают основания для технико-экономических расчетов и обоснования оптимального энергетического использования таловского угля.

ГАЗИФИКАЦИЯ ГОРЮЧИХ ОТХОДОВ НЕПРЕРЫВНЫМ СВЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Зайцев А.С., Егоров Р.И.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Глобальный рост энергопотребления в мире, а также рост цен на энергоносители, за последние несколько лет, обострил потребность в использовании альтернативных видов топлив [1]. Общепризнанным трендом в последнее время является все более широкое использование в энергетике горючих промышленных отходов и низкосортных топлив. Это расширяет топливную базу энергетики, а также дает возможность утилизировать накопленные за многие годы отходы [2-4].

В данной работе мы предлагаем конвертировать горючие отходы переработки угля и нефти в сингаз с помощью мощного потока непрерывного светового излучения. Это позволяет при минимальных затратах производить топливно-воздушную смесь с достаточно высокой концентрацией горючих компонентов (CO, H2 и CH4).

Исследования состава газовой смеси внутри рабочего объема экспериментальной установки [5-6] показали, что в зависимости от типа исходного топлива, с ростом интенсивности излучения наблюдается не монотонный рост концентрации оксида углерода (до 6000-20000 ppm), оксидов азота (до 20-80 ppm), водорода (до 1000 ppm) и диоксида серы (до 100 ppm). В качестве исходных топлив выступали фильтр кеки газовых углей (зольность до 55%), бурые угли и торфы с месторождений Западной Сибири. Конверсия происходит при атмосферном давлении и относительно низких средних температурах в объеме реактора. Эффективная газификация торфа и бурого угля начинается при интенсивностях изучения порядка 20-30 Вт/см2. Отходы обогащения каменных углей газифицируются при интенсивностях ~800-1000 Вт/см2.

Подбирая интенсивность излучения можно управлять соотношением компонентов сингаза и скоростью газификации. Применение источников света относительно малой мощности позволяет производить эффективную конверсию углеводородов в горючий газ. Применение сфокусированного солнечного света в качестве источника энергии позволяет в перспективе создать эффективный и дешевый метод утилизации промышленных отходов.

Работа выполнена в рамках проекта ВИУ-ИШФВП-299/2018 программы повышение конкурентоспособности ТПУ.

Список литературы

1. Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации. – Режим доступа: https://minenergo.gov.ru/node/435
2. Bosmans and L. Helsen, Energy from waste: review of thermochemical technologies for refuse derived fuel (RDF) treatment // Proc. Venice 2010, Third Int. Sympos. on Energy from Biomass and Waste – 2010.
3. Глушков Д.О., Стрижак П.А., Чернецкий М.Ю. Органоводоугольное топливо: проблемы и достижения (обзор) // Теплоэнергетика. – 2016. – №10. – с. 31-41.
4. Глушков Д. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Зажигание органоводоугольных топливных композиций. Новосибирск.: Изд-во СО РАН. – 2017. – 460 с.
5. Egorov R. I., Strizhak P. A. The light-induced gasification of waste-derived fuel// Fuel. – 2017. – V. 197. – P. 28.
6. Zaitsev A.S., R.I. Egorov., Strizhak P.A. Light-induced gasification of the coal-processing waste: Possible products and regimes // Fuel. – 2018. – V. 212. – P. 347.

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ГОРЯЩИХ И ТЛЕЮЩИХ ЧАСТИЦ

Захаров О.А.[1], Касымов Д.П.[1], Проханов С.А. [1], Фильков А.И. [2]
[1] Томский государственный университет, г. Томск, Россия
[2] The University of Melbourne, Creswick, Australia

Горящие и тлеющие частицы, образующиеся в результате природных и городских пожаров, могут приводить к образованию точечных пожаров и зажиганию соседних строений. В настоящее время отсутствуют средства, позволяющие получать информацию о характеристиках и количестве таких частиц генерируемым пожаром. Одним из возможных способов является обработка тепловизионных видеофайлов. Ранее был разработан ряд алгоритмов, анализирующий характеристики частиц в натурных условиях. Однако они имели ряд недостатков. В связи с этим, данная работа посвящена разработке новых алгоритмов для регистрации и трекинга горящих и тлеющих частиц на тепловизионном видео и тестирования их на основе полунатурных экспериментов.

На первом этапе были проведены эксперименты на уникальной установке для получения необходимых тепловизионных видеофайлов переноса горящих и тлеющих частиц коры и веточек сосны. Для детектирования частиц и их характеристик использовался тепловизор JADE J530SB с узкополосным оптическим фильтром 2.5 – 2.7 мкм. Предварительные результаты показали, что средняя температура частиц составила 570 ^{o}C. Так же была проведена оценка скорости движения частиц, средняя величина которых составила 3,6 м/с.

На втором этапе был написан код для определения местоположения движущихся горящих или тлеющих частиц на изображениях с возможностью регистрации суммарного количества пролетающих частиц и оценки параметров каждой, таких как температура, скорость и размер. Данная программа далее тестировалась на основе полученных тепловизионных видеофайлов. В связи с тем, что частица может двигаться в любом направлении, требуется целый набор фильтров, каждый из которых будет увеличивать отклик для определенно-направленного следа частицы. Для решения этой проблемы были использованы алгоритмы на основе свертки с гауссианом, такие как LoG (Laplacian of Gaussian) и DoG (Difference of Gaussian). После того как в кадре обнаружены все частицы, необходимо определить, новая это частица или она уже присутствовала на предыдущем кадре. И в соответствие с этим присвоить ей идентификационный номер. Для этого были разработаны специальные трекеры частиц и опробованы алгоритмы на основе метода ближайшего соседа и венгерский алгоритм.

Разработка приложения в ведется с применением языка программирования Python, кроссплатформенного фреймворка Qt (https://www.qt.io/) и библиотеки компьютерного зрения OpenCV (https://opencv.org).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-07-00548.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РЕГИСТРАЦИИ ПОТОКА ПРИМИНИТЕЛЬНО К ВОДОУГОЛЬНОМУ ТОПЛИВУ

Зенков А.В., Гвоздяков Д.В.
[1)] Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Существует несколько методов регистрации распыла затемненного потока – от устаревших до современных, более продвинутых. Наиболее простой способ определения качества распыла водоугольного топлива описан в [1]. Распыление суспензии производилось с помощью пневмомеханической форсунки на экран с поддоном. Затем факел распыла пересекался алюминиевой пластиной на определенном расстоянии, и по отпечатку на пластине определялось качество распыла. Однако данный метод является достаточно неточным и устаревшим.

Одним из самых современных методов регистрации скорости потока является метод PIV (Particle Image Velocimetry) – цифровая трассерная визуализация потоков или лазерная анемометрия. Данный способ позволяет определять векторные поля скорости в определенном сечении потока жидкости или газа. Для этого в поток помещаются мелкие частицы, называемые трассерами. Поток подсвечивается с помощью лазера, луч которого преобразуется в «нож» специальной оптикой. Регистрация частиц производится высокоскоростной видеокамерой.

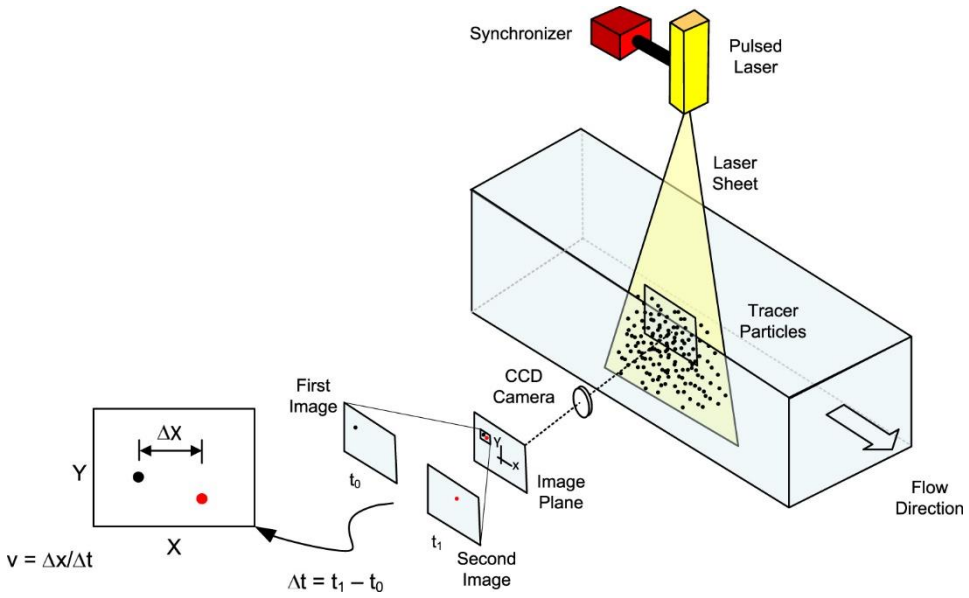


Рисунок 1 – Схематическое изображение принципа работы метода PIV

Список литературы

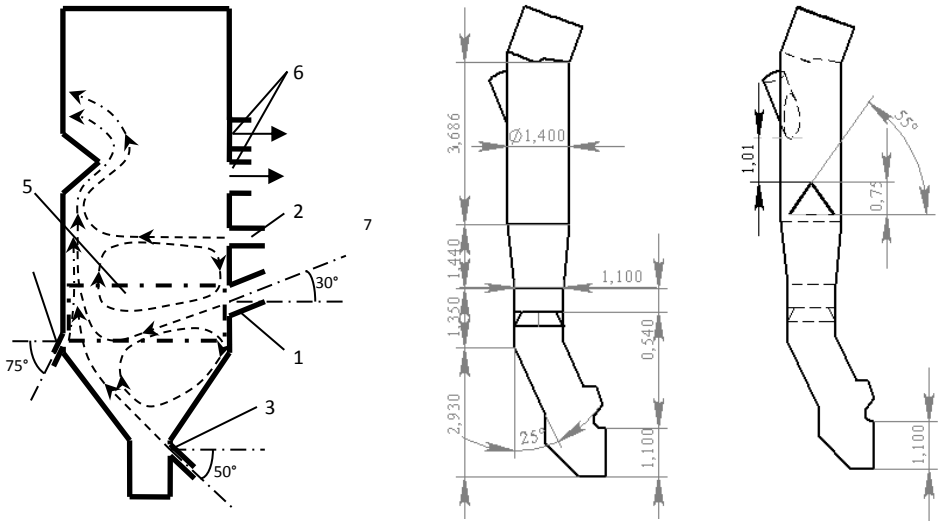
1. Сенчурова Ю.А., Мурко В.И., Федяев В.И., Дзюба Д.А., Пузырев Е.М. Результаты исследований распыления водоугольного топлива пневмомеханическими форсунками // Известия Томского политехнического университета.2008. Т.312. №4 С. 37-40.
2. Баранова М.П., Кулагин В. А. Физико-химические основы получения топливных водоугольных суспензий // Монография, Сибирский федеральный университет, 2011.
3. Tolokolnikov A.A., Yankovsky S.A., Gubin V.E., Zenkov A.V., Zaitsev A.S. Research of Mechanical Treatment Influence on Rheological Properties of Coal-Water Fuel Based on Low-Grade 3B Coal // 4th International Youth Forum on Smart Grids 2016, Tomsk, 2016, vol. 91, article number 01012.
4. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Распылители жидкости // М.: Химия. - 1979. – 216с.
5. Ben Haj Slama R., Gilles B., Ben Chiekh M., Bera J-C. PIV for the characterization of focused field induced acoustic streaming: seeding particle choice evaluation // Ultrasonics, 2017, vol. 76, p. 217-226.
6. Daviault S.G., Ramadan O.B., Matida E.A, Hughes P.M., Hughes R. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer // Fuel, 2012, vol. 98, p. 183-193.

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВЫСОКОВЛАЖНЫХ ТВЁРДЫХ ТОПЛИВ В ТОПКАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ

Зройчиков Н.А.[1], Каверин А.А. [2]
[1] Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского, г. Москва, Россия
[2] Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва, Россия

Сжигание высоковлажных бурых углей отличается низкой температурой горения (из-за низкой калорийности), недостаточно устойчивым воспламенением и низкой скоростью горения (из-за большого количества влаги и балласта) [1]. При пылеугольном сжигании высоковлажных топлив с влажностью Wr выше 40% нередко требуется дополнительное сжигание более дорогостоящего высокореакционного топлива.

В данной работе предложен комплексный подход к модернизации технологической схемы сжигания тюльганского бурого угля марки Б1 [2]. Предполагается замена пыле-угольных горелок, совершенствование топочной аэродинамики, футеровка части топоч-ных экранов на уровне горелок, интенсификация предварительной подсушки угля в су-шильной шахте (рис. 1). Сушка и горение бурого угля в модернизированной схеме иссле-довалось методом компьютерного моделирования в программном продукте ANSYS Fluent на примере парового котла ТП-14А.



а) б) в)

Рис. 1. Вариант модернизации технологической схемы сжигания высоковлажного тюльганского угля. а) компоновка горелок и сопл; б) исходная схема сушильной шахты; в) схема шахты с устройством торможения угля. 1) основные горелки; 2) сбросные горелки; 3) сопла нижнего дутья; 4) сопла отжатия факела; 5) зажигательный пояс; 6) газозаборные окна.

Результаты моделирования показали возможность устойчивого сжигания угля без "подсветки" факела газом. Снижение влажности топлива перед мельницами составило 4%, потери с мехнедожогом q4=1,2%, концентрация оксидов азота в дымовых газах CNOx=300 мг/нм3.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10463 от 12.05.2016)

Список литературы

1. Маслов В.Е. Пылеконцентраторы в топочной технике. М.: Энергия, 1977. 208 с.
2. Зройчиков Н.А., Каверин А.А., Столярова Е.К., Горбуров Д.В., Перфильев А.О. Моделирование сжигания местных высоковлажных бурых углей в топке котла ТП-14А Кумертауской ТЭЦ // Надежность и безопасность энергетики. 2016, №3(34), стр. 39-46

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ РЕАКТОРА ПИРОЛИЗА МЕДИЦИНСКИХ ОТХОДОВ

Зройчиков Н.А.[1], Фадеев С.А. [1], Бирюков Я.А. [1], Каверин А.А. [2], Тарасов Г.А. [2]
[1] Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского, г. Москва, Россия
[2] Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва, Россия

Пиролиз, как способ термической утилизации различных видов отходов, широко применяется в мире и позволяет с высокой эффективностью перерабатывать загрязняющие окружающую среду материалы в высокопотенциальное топливо и ценное промышленное сырьё. По способу подвода теплоты к разлагаемому органическому веществу различают схемы с внутренним и внешним нагревом (через стенку) [1], [2]. Несмотря на очевидные преимущества, второй способ имеет ряд трудностей, связанных с ограниченной максимальной температурой стенки (до 1100-1200°) и необходимостью равномерного обогрева стенки. Т.о. эффективность процесса пиролиза напрямую зависит от конструкции камеры сгорания, обогревающей стенку реактора.

Объектом исследования является схема установки разложения медицинских отходов (рис. 1), включающая в себя реактор 1, в котором шнеком перемещаются измельчённые частицы отходов, и камеру сгорания 2, передающую теплоту стенке 3. Пиролиз в реакторе протекает при температурах 500-600°С, часть газообразных продуктов отбирается эжекционной горелкой 4 в камеру сгорания для поддержания процесса, другая часть уходит далее по циклу. Газы эжектируются в камеру сгорания подаваемым в горелку воздухом.

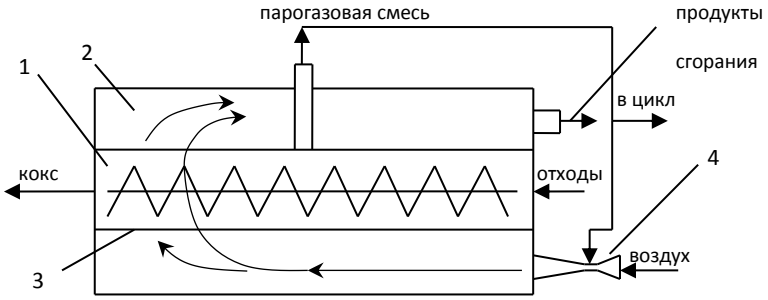


Рис. 1. Схема установки пиролиза медицинских отходов.

В работе методом численного моделирования исследовано влияние таких факторов, как избыток воздуха в горелке, выходная скорость газовоздушной смеси, крутка потока на интенсивность теплоотдачи и равномерность падающего на стенки теплового потока. Подобрана оптимальная конструкция и габариты камеры сгорания и горелки. Установлено, что для необходимого обогрева стенки реактора необходимо повысить избыток воздуха в горелку до значений 1,8-2, выходная скорость истечения смеси из горелки должна быть не менее 30 м/с. Наиболее важное значение имеет вытягивание факела по длине в нижней части камеры сгорания.

Работа выполнена в АО «ЭНИН» в рамках прикладного проекта «Разработка и исследование процесса экологически безопасного обезвреживания опасных медицинских и биологических отходов на основе пиролиза» (RFMEFI57617X0101) с финансовой поддержкой Министерства образования и науки Российской Федерации.

Список литературы

1. Волков Э. П. Избранные труды. в 5 томах. / Том 3. Моделирование процессов горения и пиролиза твёрдого топлива – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – 502 с.
2. Волков Э. П., Герасимов Г.Я., Плешанов А.С. Кинетика и гидродинамика пиролиза углей и сланцев – М.: ЭНИН, 1994. – 183 с.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА РЕАКЦИЮ ГОРЕНИЯ

Илюшов Н.Я., Ридель А.В.
Новосибирский государственный технический университет

В последнее время в печати и в интернете можно довольно часто встретить статьи о возможности тушения открытого пламени электрическим полем, основанные на идеях известного российского изобретателя и ученого Дудышева В.Д. Теоретически все выглядит очень заманчиво: электрическим импульсом воздействуем на цепочный механизм реакции горения, растаскиваем образовавшиеся в пламени ионы, что неминуемо должно привести к прекращению горения. При этом сам процесс тушения при достаточной амплитуде импульса происходит практически мгновенно и без всякого образования дыма. Все это позволяет предположить, что в недалеком будущем новый способ тушения пожаров с помощью электрического поля займет ведущее место в пожарном деле.

В лаборатории нашей кафедры решили повторить некоторые эксперименты по тушению открытого пламени новым способом, но, к сожалению, результаты данных экспериментов оказались не столь впечатляющими. Анализ полученных результатов показывает, что новый способ тушения пламени действительно возможен, но его применение на практике нецелесообразно и опасно.

Анализируя полученные результаты, можно сделать выводы, что вряд ли целесообразно тушить свечи на расстоянии 10-15 см, используя при этом напряжение в десятки киловольт. Но, тем не менее, проведенные эксперименты дали несколько интересных результатов, над которыми стоит еще поработать.

Считаем, что наиболее перспективным направлением дальнейших исследований по тушению пламени электрическим полем является эксперименты с ослаблением интенсивности реакции горения с помощью малых напряжений и одновременным воздействием на пламя импульсом необходимой амплитуды.

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРЯДНО-ИМПУЛЬСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРЕДПРИЯТИЯХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

Исаков Ю.В., Потапов И.И.
АО «ЦКБ «Геофизика» г. Красноярск

Применение высоковольтных разрядов в конденсированных средах для решения разнообразных производственно-технологических задач достаточно подробно изучено в нашей стране и за рубежом. Использование импульсных силовых разрядов в жидкости позволяет создавать эффективные технологические операции с непосредственным преобразованием электрической энергии в различные виды механических воздействий [1]. Применение разрядно-импульсных технологий предполагает использование высоковольтных генераторов и обеспечение условий электробезопасности. Возможности современной элементной базы силовой электроники позволяют снизить стоимость разрядно-импульсных установок и обеспечить доступность их применения в промышленных предприятиях.

Опытные работы в АО «ЦКБ «Геофизика» по применению импульсных разрядных технологий проводились на предприятиях энергетического комплекса ГРЭС-2 г. Зеленогорск, ТЭЦ-1 г. Красноярск в течении нескольких лет по отдельным договорам. Интерес к внедрению таких технологий связан с потребностями предприятий энергетики по выполнению современных экологических требований и снижению нагрузки на окружающую среду.

Совместно с учеными Сибирского федерального университета разработаны технические предложения по запрессовке латунных трубок теплообменных аппаратов при их ремонте, получению водно-угольных суспензий (ВУС) как композиционного топлива, очистки трубопроводов магистралей золошлако отводов с применением разрядно-импульсных технологий, переработке шлаков применительно к условиям Красноярской ГРЭС-2.

По заданию Красноярской ГРЭС-2 АО «ЦКБ «Геофизика» провело исследовательские работы по измельчению углей в жидкой среде с использованием электрогидроимпульсных разрядных эффектов [2], по договору с предприятием ООО «ПОЛИМЕРСТРОЙ» создало опытный образец установки электрогидроимпульсной (ЭГИ). Установка ЭГИ реализована как блочная конструкция в составе высоковольтного, измельчающего и классифицирующего узлов.

В 2017 г. закончены испытания опытного образца установки ЭГИ по измельчению углей Канско-Ачинского бассейна для получения ВУС. По результатам испытаний определен диапазон рабочих режимов оборудования для эффективного измельчения угольного сырья. Эффективность получения тонкого помола ВУС на опытной установке ЭГИ была подтверждена при сопоставлении с результатами механических технологий измельчения [3].

Содержание угля в полученной суспензии на установке ЭГИ составило 40-45 %. После процесса измельчения полученный продукт подвергался осушению и рассеиванию через набор калиброванных сит для получения классификационного состава. При измельчении угольного сырья энергозатраты не превысили 20 кВт×ч/т.

Практический интерес к применению установок ЭГИ для реализации технологии тонкого измельчения и обогащения исходного сырья был проявлен предприятиями г. Красноярска АО «Германий» и СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1986. – 253 с.
2. Применение электрогидравлического способа получения водоугольного топлива для котельных установок / В.А. Дубровский, Ю.В. Исаков, И.И. Потапов и др.– Энергетик. – Москва.– 2011.– №7.– С. 24–27.
3. Балахнина, Е.Е. Обоснование параметров барабанной мельницы для тонкого измельчения горных пород с учетом динамики мелющих тел: диссертация канд. техн. наук : 05.05.06 / Е. Е. Балахнина; – М.: Моск. гос. горн. ун-т, 2002. – 163 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ СЛАНЦЕВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ

Князева А.Г. [1], Маслов А.Л. [2]
[1] Томский Политехнический университет, г. Томск, Россия
[2] Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

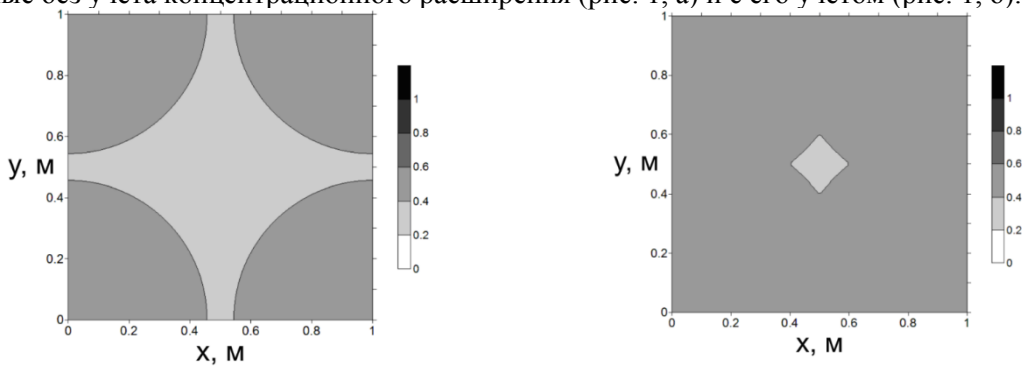
Путем термической переработки горючих сланцев – горных пород осадочного происхождения, можно получать газообразные и жидкие продукты, которые могут быть использованы для нужд энергетической промышленности [1].

Методы переработки горючих сланцев разделяют на две группы: поверхностные (surface retorting, наружный ретортинг) и внутрипластовые или подземные (in-situ). В внутрипластовых методах переработки нагреваются непосредственно сам сланцевый пласт.

Так как натурные испытания в случае подземной переработки дороги, а экспериментальное исследование процессов, проходящих в толще пласта, затруднительно, важную роль в их изучении имеет математическое моделирование. Вообще говоря, математическая модель термического разложения сланцев должна учитывать процессы распространения тепла в породе и продуктах ее разложения, кинетику химических реакций, их тепловые эффекты, течение образующихся продуктов в порах скелета сланца [2]. Такая модель будет включать в себя уравнения теплопереноса для твердой фазы и газа, уравнения химической кинетики, уравнение движения и уравнение состояния. Выбор конкретного вида последнего уравнения существенен для описания процесса термического разложения сланцевого пласта.

Так, учет в уравнении состояния концентрационного расширения (под этим подразумеваем влияние на давление газа концентрации образующихся продуктов) заметно влияет на скорости течения продуктов на поздних стадиях разложения сланца, а, следовательно, и на концентрации компонентов.

В качестве иллюстрации, на рис. 1 приводится концентрации газообразного продукта, найденные без учета концентрационного расширения (рис. 1, а) и с его учетом (рис. 1, б).



а) б)

Рис. 1 – Концентрация газообразного продукта η_G, $t = 6.1$ ч, а) – без учета концентрационного расширения, б) – с учетом концентрационного расширения.

Величину коэффициента концентрационного расширения можно оценить из значений мольных объемов образующихся продуктов.

Список литературы

1. Synthetic Fuels Handbook: Properties, Process, and Performance / Speight J. G. McGraw-Hill Education. – 2008. – 422 p.
2. Knyazeva A.G., Martemyanov S.M., Maslov A.L. A two-phase model of shale pyrolysis // Fuel. – 2018 – V.228. – P. 132-139.

ДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ЗАЖИГАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В УСЛОВИЯХ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА

Князева А.Г.[1), 2)], Зарко В.Е. [3)]
[1)] Томский политехнический университет
[2)] Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия
[3)] Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Анализ потерь тепла в печах и горелках через многослойные теплозащитные слои и корпус, теплоперенос через волокнистые теплоизоляторы, разработка пламепреградителей - эти проблемы далеко не исчерпывают спектр возможных приложений сопряженных задач теплопереноса. Такие проблемы возникают также при изучении инициирования реакций взрывного разложения в энергетических материалах (ЭМ) лазерным излучением. Следствием различия свойств сопряженных слоев могут быть вариации задержек воспламенения, локальные механические напряжения, потери тепла теплопроводностью. В [1] предложена упрощенная модель нагрева кристаллизованной смеси энергетических материалов, в которой влияние стеклянной пластины, препятствующей отводу газообразных продуктов, и металлической подложки, способствующей отводу тепла, учтено с помощью граничных условий. В [2] на основе одномерной сопряженной задачи теплопроводности дана оценка влияния потерь тепла вследствие конечной теплопроводности прозрачного стекла и металлической подложки на характеристики зажигания. В [3] проиллюстрировано влияние оптических свойств вещества на динамику формирования температурного поля и двухфазной зоны. Модель нагрева и разложения двухкомпонентного ЭМ коротким лазерным импульсом учитывает плавления в интервале температур, повышение давления в реакционной зоне вследствие накопления продуктов разложения. На основе численного изучения динамики процесса выделены основные стадии: плавление, распространение зон реакции по смеси и быстрое развитие взрыва либо прекращение протекания реакций в зависимости от количества запасенной энергии. Продемонстрировано влияние оптических свойств смеси на динамику процесса инициирования. Эффект отслоения преграды при зажигании ЭМ через экран продемонстрирован в [4].

В настоящей работе двумерная модель процесса инициирования усовершенствована за счет явного учета сопряженного теплообмена между стеклянной пластиной и ЭМ. Условие на границе контакта учитывает возможную неидеальность теплового контакта на границе раздела. Задача решена численно. Найдены распределение температуры, долей продуктов разложения и жидкой фазы, давления в зоне реакции для разных условий воздействия. Показано, что, с одной стороны, стеклянная пластина поглощает значительное количество тепла и изменяет условия инициирования реакций в объеме ЭМ. С другой стороны, стеклянная пластина становится дополнительным источником тепла, если прекращается внешний нагрев импульсом лазера.

Список литературы

1. Князева А.Г., Зарко В.Е. Нагрев кристаллизованной смеси энергетических материалов коротким импульсом лазерного излучения // Известия вузов, физика. – 2013, Т.56, № 7/2. – С. 8 – 13
2. Князева А.Г. Зарко В.Е. Особенности нагрева лазерным излучением полупрозрачного материала, помещенного между стеклянной и металлической пластинами // «Известия вузов», Физика. – 2014, Т.57, № 9/3 – С. 70 – 75
3. Князева А.Г., Зарко В.Е. Инициирование разложения полупрозрачной смеси энергетических материалов импульсом лазерного излучения // ФГВ. – 2018, Т.54, № 1. – С. 108-117
4. Князева А.Г. Зажигание твердого вещества через отслаивающуюся преграду // ФГВ, 2001, Т.37, № 1. – С.53-60

ДИФФУЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ МИКРОСТРУИ ВОДОРОДА ПРИ ДО И СВЕРХЗВУКОВОМ ИСТЕЧЕНИИ ИЗ СОПЛА (ЯВЛЕНИЕ ЗАПИРАНИЯ)

Козлов В. В.[1)], Грек Г.Р.[1)], Литвиненко Ю. А.[1)], Шмаков А. Г.[2)]
[1] Институт теоретической и прикладной механикиим. С.А. Христиановича СО РАН
[2] Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН

Представлены результаты экспериментальных исследований [1-4] явления запирания микросопла при диффузионном горении микроструи водорода на больших скоростях её истечения в ситуации поджигания водорода вблизи среза сопла. Обнаружено, что причиной запирания микросопла является нагрев стенок сопла от “области перетяжки пламени”, сохраняющейся вплоть до трансзвуковых скоростей и не позволяющей соплу охладиться и перейти на сверхзвуковую скорость истечения струи водорода. Показано, что поджигание водорода вдали от среза сопла при развитом сверхзвуковом истечении водорода в затопленное пространство приводит к исчезновению области перетяжки пламени, отрыву пламени от среза сопла и, соответственно, прекращению нагревания сопла и возможности выхода микроструи на сверхзвуковую скорость истечения струи водорода. Установлено, что область перетяжки пламени является стабилизирующим фактором дозвукового горения микроструи водорода вплоть до трансзвуковых скоростей, а наличие сверхзвуковых ячеек, во втором случае, стабилизирует сверхзвуковое диффузионное горение микроструи водорода. Впервые представлено четыре сценария диффузионного горения плоской микроструи водорода, включая сверхзвуковое горение при наличии сверхзвуковых ячеек как по воздуху, так и по водороду. Обнаружен гистерезис процесса диффузионного горения плоской микроструи водорода в зависимости от способа поджигания микроструи (вблизи или вдали от среза сопла) и направления изменения скорости ее истечения (роста или уменьшения).

Работа поддержана Грантом РНФ 16-19-10330.

Список литературы

1. Козлов В. В., Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А. Явление запирания микросопла при диффузионном горении водорода – ДАН, 2018, том 480, № 1, с. 1–6
2. Kozlov V.V., Grek G.R, Korobeinichev O.P., Litvinenko Yu.A., Shmakov A.G. Features of diffusion combustion of hydrogen in the round and plane high-speed microjets (part II) – Irternational Journal of hydrogen energy 41 (2016) pp. 20240 – 20249
3. Shmakov A.G., Grek G.R., Kozlov V.V., Litvinenko Yu.A, Influence of initial and boundary conditions at the nozzle exit upon diffusion combustion of a hydrogen microjet – International Journal of hydrogen energy 42 (2017) pp. 15913 - 15924
4. Kozlov V.V., Grek G.R., Kozlov G.V., Litvinenko Yu.A., Shmakov A.G. Experimental study on diffusion combustion of high-speed hydrogen round microjets – International Journal of hydrogen energy (2018)

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ОДИНОЧНОЙ ЧАСТИЦЫ В ИНТЕНСИВНОМ ПОТОКЕ ГАЗООБРАЗНОГО ОКИСЛИТЕЛЯ

Козлова М.А.[1),2)], Свищев Д.А.[1)]
[1)] ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия
[2)] Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Одним из вариантов переработки биомассы является процесс слоевой обращённой газификации, который позволяет получать газ с низким содержанием смолы, что облегчает его дальнейшую очистку. В реакторе, в котором происходит такой процесс, принято выделять четыре реакционные зоны: сушки, пиролиза, окисления и восстановления. Однако существуют режимы, в которых отсутствует зона пиролиза. В таких режимах топливо не успевает прогреваться и реагирует с интенсивными потоками воздуха в прифурменной области.

Измерения характеристик горящего топливного слоя затруднено высокой температурой, гетерогенным характером процесса, высокими скоростями конверсии топлива и методологическими сложностями проведения температурных измерений и отбора проб. Исследование конверсии индивидуальных частиц, горящих вне слоя, позволяет преодолеть большинство из имеющихся трудностей.

Существует ряд методик и инструментов исследования конверсии частиц. Среди них можно выделить методы, позволяющие проводить визуальное наблюдение за образцом, измерение его веса и состава газа. Имеющиеся методы ограниченно применимы для исследования горения частиц в прифурменном пространстве. Они недостаточно полно воспроизводят условия конверсии, могут быть не предназначены для измерения весового сигнала, либо имеют ограничения в точности его определения. Метод исследования горения частицы должен: (а) обеспечить интенсивный обдув пробы газообразным окислителем; (б) создать условия при которых проба нагревается с высокой скоростью, составляющей 100-300°С/мин; (в) организовать измерение характеристик горящей пробы, а именно – температуры частицы, ее веса и химического состава; (г) обеспечить визуальное наблюдение за стадиями ее горения и пр.

В работе предложен метод испытания проб топлива, наиболее соответствующий приведенным выше условиям. В соответствии с данным методом испытуемый образец вносится в нагретую до определенной температуры печь и производится его обдув через фурму. В одинаковых условиях испытывается ряд проб, каждая из которых извлекается из печи в определенный промежуток времени и быстро охлаждается. После испытания производится высушивание, взвешивание и анализ степени конверсии каждой из частиц. Для тестирования метода проведено исследование его метрологических характеристик.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00774.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ УГЛЯ НА ОБРАЗОВАНИЕ ОКСИДОВ АЗОТА В КОТЛЕ С ЦИРКУЛИРУЮЩИМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ

Кокшарев О.М., Гиль А.В.
НИ ТПУ, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, г. Томск, Россия

Исследования показывают, что характеристики угля является одним из наиболее важных факторов, влияющих на выбросы N_2O и NO_x. [1, 2, 3, 4].

На рис. 1 приведен график отношения коэффициента конверсии азота топлива в оксиды азота N_2O и NO_x к содержанию углерода в угле.

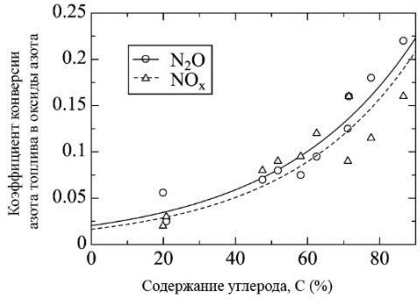


Рис. 1. Зависимость отношения коэффициента конверсии азота топлива в оксиды азота N2O и NOx к содержанию углерода в угле.

На рис. 2 приведен график отношения коэффициента конверсии азота топлива в оксиды азота N_2O и NO_x к содержанию азота в угле.

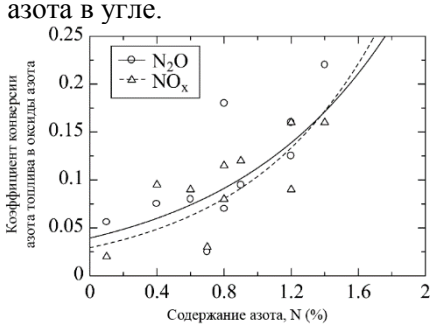


Рис. 2. Зависимость отношения коэффициента конверсии азота топлива в оксиды азота N2O и NOx к содержанию азота в угле.

Видно, что по мере увеличения содержания углерода и азота в угле коэффициент конверсии азота топлива в оксиды азота увеличивается.

Список литературы

1. Collings, M. E., Mann, M. D., Yong, B. C., and Btros, P. E. (1993). The effect of coal-fuel properties on N2O emission in fluidized bed combustion, in Proceedings of the 12th International Conference on Fluidized Bed Combustion, 619–627, ASME, New York.
2. Åmand, L. -E. and Leckner, B. (1991). Influence of fuel on emission of nitrogen oxides (NO and N2O) from an 8-MW fluidized bed boiler, Combust. Flame, 84, 181–196.
3. Moritomi, H., Suzuki, Y., Kido, N. and Ogisu, Y. (1991). NOx formation mechanism of CFB combustion, in Proceedings of the 11th International Conference on Fluidized Bed Combustion 1005–1011, ASME, New York. 4.Bradfield W.S. Solid-liquid contact in stable film boiling // Ind. Eng. Chem. Fundam. – 1966. – V. 5. – P. 200–204.
4. Braun, A., Bu, C., Renz, U., Drischel, J., and Köser, H. J. K. (1991). Emission of NO and N2O from a 4 MW fluidized bed combustor with NO reduction, in Proceedings of the 11th International Conference on Fluidized Bed Combustion, 709–717, ASME, New York.

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПЛАМЕНИ В ЗАКРЫТОМ СОСУДЕ, ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННОМ ПОРИСТОЙ СРЕДОЙ

Коржавин А.А., Козлов Я.В.

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

Экспериментально изучено распространение пламени в закрытом сосуде, содержащем стехиометрическую смесь пропана с воздухом и частично заполненной пористой средой (ПС). Горение в закрытом сосуде, частично заполненном пористой средой, представляет собой модель химического реактора, содержащего засыпные слои катализатора и инертного твердого материала, в котором возможна газофазная реакция горения. Зажигание производилось в свободной части объема. В качестве ПС использовались засыпки из стальных шаров диаметром 3.2 и 6 мм, керамических 6 мм шаров и колец Рашига с характерным размером 7 мм. Показано, что максимальные давления при распространении пламени в сосуде зависят от коэффициента наполнения сосуда пористой средой. При заполнениях выше 50% максимальное давление зависит главным образом от интенсивности теплообмена в пористой среде. Были найдены теоретические оценки давлений, которые удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

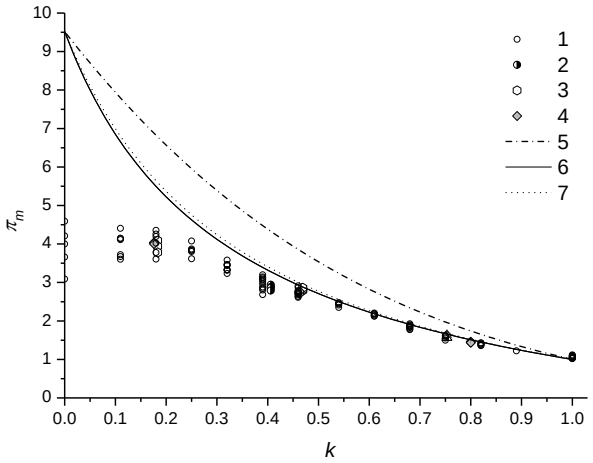


Рис. Зависимость максимального давления от коэффициента заполнения k. 1, 2 –стальные шары 6 мм (L=1.68 м – 1; L=1.89 м - 2); 3 - керамические шары 6 мм; 4 –стальные шары 3.2 мм; 5-7 – теоретические оценки.

Проведено измерение температуры газа в пористой среде в процессе роста давления и проведено сопоставление с динамикой давления. Проанализировано влияние потерь тепла из газа в пористую среду и стенки сосуда на величину максимального давления. Оценки, наиболее близкие к данным эксперимента, основаны на предположениях, что газ горит адиабатически в свободном пространстве и изотермически сжимается в пористой среде.

МЕХАНИЗМ ГОРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ГОЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ И СНИЖЕНИЯ ИХ ГОРЮЧЕСТИ ДОБАВКАМИ АНТИПИРЕНОВ

Коробейничев О.П.[1)], Шмаков А.Г.[1,2)], Трубачев С.А. [1,2)], Палецкий АА.[1)], Чернов А.А.[1)], Глазнев Р.К. [1,2)], Терещенко А.Г.[1)], Шундрина И.К.[3)], Карпов А.И. [4)], Шаклеин А.А.[4], Ху Ю.[5)], Вэнг К.[5)]

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

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

[3)] Новосибирский институт органической химии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

[4)] Институт механики УрО РАН, г. Ижевск, Россия

[5)] Государственная ведущая противопожарная лаборатория, Университет науки и технологии Китая, Хэфей, Китай

Знание механизма горения твердых горючих материалов (ТГМ), таких как полимеры и древесные горючие материалы, и механизма снижения их горючести добавками антипиренов важно как для предотвращения пожаров в быту, промышленности, на транспорте, так и для создания эффективных антипиренов, вводимых в состав материалов, без изменений уникальных характеристик, свойств самого материала. В работе представлен новый подход к изучению механизма снижения горючести ТГМ добавками антипиренов, основанный на изучении их влияния на скорость распространения пламени по пластинам ТГМ (главным образом полимеров), а также на тепловую и химическую структуру пламени. Представлены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования влияния толщины и ширины пластин экструдированного и литого полиметилметакрилата (ПММА), полиоксиметилена (ПОМ) на скорость распространения по ним пламени, на тепловую и химическую структуру пламени, тепловые потоки из пламени в горючее [1, 2]. Установлено удовлетворительное согласие экспериментальных данных по скорости распространения пламени и структуре пламени ПММА и ПОМ с результатами численного моделирования, проведенного с помощью двухмерной сопряженной ламинарной модели горения, которая учитывает одностадийные реакции разложения полимера и окисления летучих продуктов его пиролиза в пламени.

Экспериментально изучено влияние добавок антипиренов трифенилфосфата (ТФФ), 9,10-дигидро-9-окса-10-фосфафенантрен-10-оксида (ДОПО) в пластины ПММА на скорость распространения по ним пламени, на тепловую и химическую структуру пламени, тепловые потоки из пламени в горючее, кислородный индекс, а также на скорость термического разложения полимера по данным термического анализа и скорость выделения тепла по данным конусного калориметра. Установлена корреляция между влиянием добавок на скорость распространения пламени и на тепловые потоки из пламени в топливо. На основе полученных данных сделан вывод о механизме и месте действия антипиренов ТФФ и ДОПО в снижении горючести ПММА.

Список литературы

1. Korobeinichev O.P., Gonchikzhapov M.B., Tereshchenko A.G., Gerasimov I.E., Shmakov A.G., Paletsky A.A., Karpov A.I. An experimental study of horizontal flame spread over PMMA surface in still air // Combust. Flame. – 2018. – V. 188. – P. 388–398.
2. Korobeinichev O.P., Karpov A.I., Bolkisev A.A., Shaklein A.A., M.B. Gonchikzhapov M.B., Paletsky A.A., Tereshchenko A.G., Shmakov A.G., I. E. Gerasimov I.E., Kumar. A. An experimental and numerical study of thermal and chemical structure of downward flame spread over PMMA surface in still air // Proceedings of the Combustion Institute, PROCI3431, – 2018. DOI: 10.1016/j.proci.2018.06.005

ЗАЖИГАНИЕ И ГОРЕНИЕ ВЭМ НА ОСНОВЕ БОРСОДЕРЖАЩИХ КОМПОНЕНТОВ

Коротких А.Г.[1),2)], Сорокин И.В.[1)], Архипов В.А.[2)], Селихова Е.А.[1)]

[1)] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
[2)] Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Порошки бора и боридов являются одними из наиболее перспективных компонентов для твердых и гибридных ракетных топлив за счет высокой удельной энергии окисления в процессе их горения [1-3]. В работе представлены результаты экспериментального измерения времени задержки зажигания и скорости горения ВЭМ на основе перхлората и нитрата аммония, активного горючего-связующего МПВТ-АСП, содержащих порошки алюминия (АСД-4), аморфного бора, диборида алюминия AlB_2 и додекаборида алюминия AlB_{12}.

Скорость горения исследуемых составов ВЭМ определяли по известной длине образца и времени его горения, измеряемому методом сгорающих проволочек. Эксперименты проводились в азоте в диапазоне изменения давления p=0.5 – 6.0 МПа. Установлено, что скорость горения ВЭМ, содержащего порошок аморфного бора, в 1.9–2.4 раза больше, чем ВЭМ с алюминием АСД-4 (рис. 1). Использование порошков AlB_2 и AlB_{12} в составе ВЭМ приводит к увеличению скорости горения в 1.2–1.4 раза по сравнению с ВЭМ, содержащего АСД-4.

Исследование процесса зажигания ВЭМ осуществлялось с использованием установки лучистого нагрева на основе CO_2-лазера непрерывного действия с длиной волны излучения 10,6 мкм и максимальной мощности 200 Вт. Установлено, что времена задержки зажигания ВЭМ, содержащей порошок аморфного бора, в 2.2–2.8 раза меньше по сравнению с ВЭМ, содержащей алюминий АСД-4, в диапазоне q = 90–200 Вт/см^2 (рис. 2). Использование порошка диборида алюминия в составе ВЭМ позволяет снизить времена задержки зажигания в 1.7–2.2 раза в указанном диапазоне q по сравнению с ВЭМ с АСД-4.

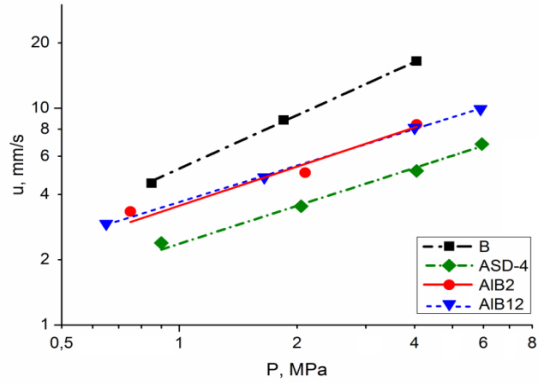


Рис. 1. Скорость горения в зависимости от давления ВЭМ с порошками.

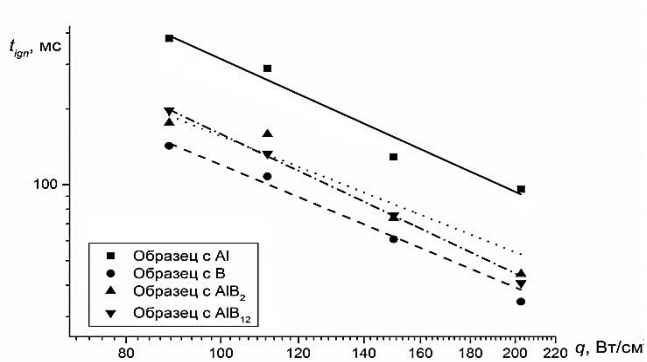


Рис. 2. Время задержки зажигания ВЭМ в зависимости от плотности теплового потока.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-03-00630 а.

Список литературы

1. Сандарам Д., Янг В., Зарко В. Е. Горение наночастиц алюминия (обзор) // Физика горения и взрыва. – 2015. – Т. 51, №2. – С. 37–63.
2. Ао В., Чжоу Цз.-Х., Лю Цз.-Ч., Ян В.-Цз., Ван Ю., Ли Х.-Р. Кинетическая модель воспламенения частицы бора, основанная на механизме диффузии кислорода и (BO)n // Физика горения и взрыва. – 2014. – Т. 50, № 3. – С. 21–31.
3. Chintersingh K.-L., Schoenitz M., Dreizin E.L. Oxidation kinetics and combustion of boron particles with modified surface // Combustion and Flame. – 2016. – V. 173. – P. 288–295.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОКИСЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦЫ АЛЮМИНИЯ

Крайнов А.Ю., Порязов В.А. Моисеева К.М., Крайнов Д.А.
Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Целью данной работы является разработать математическую модель, описывающую окисление наноразмерных частиц алюминия для прогнозирования скорости нарастания оксидного слоя на ее поверхности при хранении на воздухе при нормальных условиях и времени окисления частицы алюминия при попадании ее в высокотемпературную смесь газов, содержащую окислитель.

Разработана физико-математическая модель горения наноразмерной частицы алюминия. В модели учитывается постепенный разогрев частицы в окружающем газе, образование слоя окисла на поверхности частицы и диффузия окислителя через слой образующегося окисла. Окисный слой представляется в виде шарового слоя, покрывающего расплавленный алюминий частицы. Через слой оксида алюминия происходит диффузия кислорода (или другого окислителя). Алюминий, находящийся под слоем оксида алюминия также диффундирует через слой оксида алюминия. Коэффициент диффузии зависит от температуры. На границе между окислом и расплавом алюминия идет гетерогенная химическая реакция. Предполагается, что шаровой слой оксида алюминия не разрушается под действием возникающих напряжений от нарастающего слоя оксида алюминия. Скорость тепловыделения в этой реакции определяется скоростью подвода массы окислителя диффузией через слой окисла. При сформулированных предположениях математическая модель горения одиночной наночастицы алюминия в газообразном окислителе состоит из уравнений диффузии окислителя и алюминия с учетом их расходования в химической реакции.

Разработана оригинальная методика численного решения задачи диффузии окислителя через слой окисла, в которой разностная сетка подвижна и связана с поверхностью окисного слоя и его внутренней границей.

Проведены расчеты зависимости времени сгорания частицы алюминия от температуры окружающего газа при двух значениях давления газа и радиуса частицы. При давлении 0.8 МПа и температуре 2000 К частица алюминия радиусом 40 нм сгорает за время 90 микросекунд. Это совпадает с данными измерений, представленных в [1]. Увеличение давления и температуры приводит к уменьшению времени сгорания. Увеличение диаметра частиц приводит к увеличению времени сгорания. Результаты расчетов времени сгорания наночастицы алюминия при различной начальной температуре и давлении окружающего газа, содержащего окислитель, хорошо согласуется с экспериментальными данными из [1].

Разработанная модель была использована для расчета динамики нарастания окисного слоя при хранении порошка наноалюминия на воздухе при нормальных условиях. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными, представленными в [2].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20011).

Список литературы

1. Bazyn T., Krier H., Glumac N. Combustion of nanoaluminum at elevated pressure and temperature behind reflected shock waves // Combustion and Flame. – 2006. –V.145, № 4. – P. 703-713.
2. Громов А. А и [др.] Физика и химия горения нанопорошков металлов в азотсодержащих газовых средах / А. А. Громов и [др.] – Томск: Изд-во Том. Ун-та, 2007. –334с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В УСЛОВИЯХ ОБДУВА ДОЗВУКОВЫМ И СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКАМИ ВОЗДУХА

Крайнов А.Ю.[1)], Крайнов Д.А.[2)]
[1)]Томский государственный университет, г. Томск, Россия
[2)]Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Проведено численное исследование горения продуктов газификации твердого топлива в камере сгорания гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ГПВРД). Математическая модель строится на основе моделей, изложенных в [1-3].

Набегающий поток воздуха попадает в канал ГПВРД через воздухозаборное устройство. Горючий газ, который является продуктом газификации твердого топлива, подается в поток с поверхности газификации топлива. Протекая в камере сгорания, воздух смешивается с горючим газом, происходит реакция горения, и продукты сгорания истекают из сопла в окружающее его пространство.

Для моделирования течения воздуха во внутреннем тракте ГПВРД и в окружающем его пространстве решается система уравнений Навье-Стокса, записанная для сжимаемого, теплопроводного газа.

Решение системы уравнений проводится с использованием лицензионного пакета Ansys Fluent. Уравнения неразрывности, импульса и энергии решаются совместно с уравнениями переноса характеристик турбулентности в рамках модели турбулентности. Давление определяется из уравнения состояния идеального газа. Для аппроксимации вязких слагаемых используется центрально–разностная схема второго порядка. Для аппроксимация конвективных слагаемых используется схема Роу.

Получены распределения давления, скорости, температуры и концентрации метана во внутренних полостях ГПВРД и в окружающем его пространстве. В зависимости от секундного массового расхода горючего газа в канал и камеру сгорания ГПВРД возникают два режима течения в канале ГПВРД: слоистое, когда над поверхностью горения имеется дозвуковая область течения, и вдали от нее – сверхзвуковая. При большом количестве поступающего горючего газа в канал и камеру сгорания ГПВРД в канале ГПВРД реализуется дозвуковое течение. Такой режим течения возникает по причине существенного повышения температуры в камере сгорания. Наблюдается эффект теплового сопла, когда при нагреве дозвукового потока в канале он может перейти в сверхзвуковое течение, а при нагреве сверхзвукового потока он переходит в дозвуковой режим течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 9.9625.2017/8.9.

Список литературы

1. Vasenin I.M., Shrager É.R., Krainov A.Yu., Krainov D. A. Modelling of internal ballistics processes in scramjet engine during the motion in the atmosphere// Eurasian Physical Technical Journal. – 2015. – Vol.12, No.2(24). – p. 60 – 64.
2. Васенин И.М., Шрагер Э.Р., Глазунов А.А., Крайнов А.Ю., Крайнов Д.А. Моделирование процесса движения ГПВРД в атмосфере//Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. № 8. – С. 54-59.
3. Васенин И.М., Шрагер Э.Р., Крайнов А.Ю., Крайнов Д.А. Расчет внутрибаллистических процессов в гиперзвуковом прямоточном воздушно-реактивном двигателе при движении в атмосфере // Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент. Материалы 9-ой Международной научной конференции, посвященной 90-летию академика Е.А. Букетова. 18-20 июня. Изд-во КарГУ, Караганда, 2015. – С. 465-468.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА, РАСПЫЛЕННОГО СТРУЕЙ ПАРА В ПЕРСПЕКТИВНОЙ ГОРЕЛКЕ

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

Разработка малогабаритных горелок, работающих на некондиционных жидких углеводородных топливах и отходах, представляет большой научно-практический интерес. Известно, что специально организованный подвод водяного пара в зону горения позволяет существенно повысить экологические характеристики и эффективность процесса сжигания тяжелых углеводородных топлив. На основе этого принципа в ИТ СО РАН ранее были разработаны лабораторные образцы перспективного горелочного устройства [1–2] мощностью от 5 до 20 кВт (Патент РФ № 2219435), в которых реализован автономный самоподдерживающийся режим вдува струи перегретого водяного пара в зону горения продуктов термического разложения жидкого углеводородного топлива. Атмосферный воздух поступает в горелочную камеру за счет эжекции через отверстия, расположенные по окружности в нижней части корпуса горелки. В проведенных исследованиях были продемонстрированы эффекты интенсификации горения во внешнем факеле и повышение экологических характеристик (низкие уровни выбросов *CO*, *NOx*, сажи) при стабильной работе такого горелочного устройства. В развитие этой конструкции горелочного устройства в ИТ СО РАН исследуется [3] способ подачи топлива, отличительной особенностью которого является диспергирование (распыл) жидкого топлива, вытекающего из топливоподающей трубки, высокоскоростной аксиально-направленной струей перегретого водяного пара, в результате чего внутри горелочной камеры формируется газокапельный реагирующий турбулентный поток. В нем протекают физико-химические процессы высокотемпературного испарения капель топлива и газофазного многостадийного реагирования в сложной многокомпонентной смеси, сопровождаемые процессами конвективного и лучистого теплопереноса. С целью анализа детальной аэротермохимической картины при горении распыленного дизельного топлива в рассматриваемых условиях, в настоящей работе проведено численное моделирование указанного комплекса процессов в лабораторной горелке.

Применяемая физико-математическая модель динамики и процессов тепломассопереноса для дисперсного газокапельного потока основана на смешанном эйлер-лагранжевом описании двухфазной среды. Дисперсный состав капель задается по данным измерений [3]. При моделировании лучистого теплообмена в рамках P_1 приближения метода сферических гармоник для серой газодисперсной среды дополнительно учитывается вклад сажи в величину коэффициента поглощения. Процессы сажеобразования описываются по модели Мосса-Брукса-Халла с двумя уравнениями переноса для концентраций зародышей сажи и ее массовой доли. Для учета детальной кинетики процессов турбулентного горения топлива используется EDC-модель (по «концепции диссипации вихря» Магнуссена) с привлечением алгоритма ISAT выборочно-адаптивной табуляции термохимического решения. При этом в качестве модельного аналога товарного дизельного топлива в расчетах приняты состав и свойства *n*-гептана. Расчеты выполнены с использованием CFD-пакета FLUENT.

Исследования выполнены при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки РФ, RFMEFI60417X0185.

Список литературы

1. Алексеенко С.В., Пащенко С.Э., Саломатов В.В. Нанокластерное инициирование горения некондиционных углеводородных топлив // ИФЖ. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 682–693.
2. Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Дулин В.М., Копьев Е.П., Шарыпов О.В. Сажепаровый режим горения жидких углеводородов: распределение скорости в факеле горелки // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21, № 3. – С. 411-414.
3. Anufriev I., Kopyev E., Shadrin E. Investigating characteristics of liquid hydrocarbon spraying by a steam jet // MATEC Web of Conferences. – 2017, vol. 115 (05010). DOI: 10.1051/matecconf/201711505010

ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС РОССИИ И СИБИРИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Крюков В.А.[1)], Маркова В.М.[1)], Суслов Н.И.[1)], Чурашев В.Н.[1)]
[1)] Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН

Топливно-энергетический комплекс России является одним из самых мощных в мире и занимает 2 место в мире по добыче нефти и газа, третье – по общему производству ТЭР (около 10% от их мирового выпуска), масштабам использования ядерной энергии и объемам нефтепереработки, а также ведущие места по другим параметрам развития энергетики. При этом, однако, российская экономика пока отстает от передовых стран по глубине переработки ресурсов и эффективности использования энергии, что связано, как с институциональным проблемами, так и с технологическим уровнем применяемого оборудования.

ТЭК Сибири представляет собой важнейшую часть энергетического сектора страны и локализируется на территории Сибирского федерального округа, а также Тюменской области, которая административно входит в Уральский федеральный округ. Здесь производится более 88% всего природного газа, 86% угля и около 2/3 угля страны (табл. 1). ГЭС Сибири дают более половины всей гидроэнергии, вырабатываемой в России. На протяжении нескольких десятилетий энергетические ресурсы региона наполняли федеральный бюджет страны и позволяли получать большую часть валютной выручки от внешней торговли. В настоящее время экспортируется до 40% добываемых в Сибири газа и угля, и практически вся нефть – с учетом вывозимых из страны нефтепродуктов.

Таблица 1. Производство ТЭР по Федеральным округам России в 2017 г.

	Уголь, млн. т	Нефть, млн. т	Газ, млрд. м^3	Э/э, млрд. кВт-ч	ГЭС, млрд. кВт-ч
Россия в целом	410,1	546,5	690,5	1090,1	187,3
Центральный фед. округ	0,2	32,0	4,9	227,6	3,9
Северо-Западный фед. округ	8,9	12,7	19,3	119,5	14,6
Южный фед. округ	5,8	1,2	0,6	72,6	14,9
Северо-Кавказский фед. округ	0,0	0,0	0,0	26,8	6,8
Приволжский фед. округ	0,2	117,6	22,9	183,2	32,4
Уральский фед. округ	1,1	302,4	589,3	195,6	0,0
Сибирский фед. округ	351,4	52,5	19,7	212,6	97,4
Дальневосточный фед. округ	42,4	28,1	33,9	52,2	17,1

Источник: данные Росстата - ЕМИСС

Перспективное развитие энергетики России и Сибири во многом увязывается с возможностями роста и структурных сдвигов в экономике страны. В условиях сложившихся геополитических вызовов и ожидаемых трендов мирового спроса на энергоресурсы приоритетным для России становится не столько количественный рост производства ТЭР, сколько улучшение качества и надежности всей системы энергоснабжения, увеличение глубины переработки минерального топлива, включая твердое топливо, и рециклизации отходов. Возможности увеличения производства электроэнергии связаны в большей степени с ее экспортом в страны Северо-Восточной Азии. То же можно сказать и про угольную промышленность: рост угледобычи возможен в восточных регионах России и увязывается с освоением восточного «коридора» развития с выходом на Азиатско-Тихоокеанские рынки. Развитие и применение технологий комплексного и глубокого использования твердого топлива составляет один из приоритетов технологического развития. В области нефтегазового комплекса должны произойти как институциональные изменения, так и технологическое обновление, что позволит увеличить извлечение ресурсов и поддерживать добычу, в том числе, за счет освоение арктических районов и морского шельфа.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФЛЕГМАТИЗИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ НА ПРОЦЕСС САМОВОЗГОРАНИЯ БУРЫХ УГЛЕЙ

Кузнецов В.А.[1), 2)], Магдеева О.Л. [1)], Необъявляющий П.А.[1), 2)], Дектерев А.А. [1), 2)]
[1)] Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия
[2)] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

С момента появления первых угольных шахт существует проблема самовозгорания угольного топлива. Пожарная опасность объектов теплоэнергетики обусловлена в первую очередь обращением бурого угля и угольной пыли [1-3]. Самовозгорание является основной причиной пожаров на складах топлива и трактах углеподачи (50-60%), по этой причине происходит каждый шестой пожар на ТЭЦ и котельных. Количество пожаров на этих объектах в регионах, где в качестве топлива применяется бурый уголь в 1,5-2 раза больше, чем в других регионах. По экспертным оценкам 90% пожаров и взрывов пылеприготовительных установок происходит по причине самовозгорания [3,4]. Так, в регионе Сибири и Дальнего Востока около 30 % техногенных пожаров на промышленных предприятиях и 50% пожаров на объектах теплоэнергетики происходит по причине самовозгорания [1].

В работе исследовалось влияния процентного содержания флегматизирующей добавки, снижающей реакционные свойства топлива, на процесс самовозгорания бурого угля в навеске. Для исследования характеристик самовозгорания предложена расчетно-экспериментальная методика.

Для определения кинетических параметров и критических условий процессов самовозгорания, протекающих по тепловому механизму, использовалась экспериментальная установка. Основу установки составляет суховоздушный термостат и реакционный сосуд (навеска), в который засыпается исследуемый образец топлива, выполненный в виде цилиндра, из тонкой латунной сетки. В ходе опытов регистрируется температура исследуемого образца не менее чем в трех точках (в центре, вблизи стенки и на границе реакционного сосуда). Отслеживается температура в термостате для соблюдения постоянных условий.

Для моделирования процесса самовозгорания угольного топлива используется пространственное уравнение теплопроводности, в котором тепловыделение при окислении угля учитывается посредством задания источника тепла, основанного на полученных экспериментально кинетических параметрах этого процесса – эффективных энергии активации и предэкспоненциальном множителе. На границах задается коэффициент теплоотдачи, соответствующий постановке задачи.

Выявлены концентрации флегматизирующей добавки блокирующей самовозгорание бурого угля при условиях шахтной добычи и транспортировке.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Субъекта РФ в рамках научного проекта № 18-48-243013.

Список литературы

1. Амельчугов С.П. Научно-техническое обеспечение пожарной безопасности объектов теплоэнергетики // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях», Красноярск, 2000, с.91-93.
2. Bo-tao Q., Lei-lin Z., De-ming W., Qin X. The characteristic of explosion under mine gas and spontaneous combustion coupling //The 6th International Conference on Mining Science & Technology//Procedia Earth and Planetary Science 2009.- V1.- P. 186–192.
3. Захаренко Д.М., Амельчугов С.П., Ведерников В.И. Особенности противопожарной защиты объектов топливно-энергетического комплекса Восточной Сибири. // Материалы Международной конференции «Сопряженные задачи механики и экологии», Томск, 1998.
4. Киселев Я. С., Киселев В. Я., Амельчугов С. П. Условия самовозгорания восточных углей // Пожаровзрывобезопасность. - 1992. - №3. - С. 7-21

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ИЗ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ФОРСУНКИ

Кузнецов В.А.[1), 2)], Шебелев А.В. [1), 2)], Ануфриев И.С. [2)], Минаков А.В. [1), 2)]
[1)] Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия
[2)] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В настоящее время в мире активно проводятся исследования перспективных суспензионных альтернативных топлив для производства энергии, которые состоят из воды, измельченного угля или горючего отхода его переработки, химических добавок, а также отходов нефтепереработки. Такие топлива называют [1–3] органоводоугольными (ОВУТ).

Эффективность работы пневматической форсунки для распыла органоводоугольного топлива (ОВУТ) определяется организацией газовых потоков. Для управления процессом распада жидких топлив, получения зависимостей угла раскрытия факела и дисперсного состава топлива от геометрических характеристик форсунки необходимы экспериментальные и расчетные исследования. Однако вплоть до настоящего времени не было выполнено систематических экспериментальных и численных исследований гидро-газодинамических процессов, сопровождающих работу форсунки.

В Институте теплофизики РАН предложена пневматическая форсунка [4, 5], основанная на использовании свойств пристенных и кумулятивных струй жидкости и газа и эффекта Коанда, отвечающая основным требованиям, предъявляемым к форсункам для ВУТ. Для дальнейшего широкого промышленного использования данного типа форсунок необходимо определить характеристики распыла и горения суспензионного топлива. Определяющую роль в эффективности работы пневматической форсунки играет организация газовых потоков. Для исследования структуры газожидкостных потоков предложенной пневматической форсунки необходима разработка эффективной и достоверной численной методики для описания распыла жидких топлив в перспективных горелочных устройствах.

В работе представлена верификация расчетной методики моделирования газового потока при истечении из пневматической форсунки на основе экспериментальные данные полученных в ИТ СО РАН. Для описания турбулентного течения рассматривались URANS, RANS/LES, LES модели турбулентности. Сравнительный анализ показал хорошее качественное и количественное согласие расчета и эксперимента, как для дозвукового, так и для сверхзвукового истечения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00594.

Список литературы

1. Горлов Е.Г., Серегин А.И., Ходаков Г.С. Условия реализации шламов угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий в виде суспензионного топлива // Химия твердого топлива. 2007. № 6.С. 51–57.
2. Патраков Ю.Ф., Федорова Н.И., Ефремов А.И. Композиционное водосодержащее топливо из низкосортных углей Кузбасса // Вестник Кузбасского ГТУ. 2006. № 3. С. 81–83.
3. Архипов В.А., Сидор А.М., Сурков В.Г. Исследование физико-химических и энергетических характеристик органо-водоугольных топлив // Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. 2013. № 5. С. 39–47.
4. Мальцев Л.И. Пневматическая форсунка. Патент на изобретение RUS 2346756 15.05.2007
5. Sergey Alekseenko, Igor Kravchenko, Leonid Maltsev.Combustion Technology for Water-fuel Mixtures // Proceedings of the 2012 International Conference on Thermal Treatment Technologies & Hazardous Waste Combustors, October 22-24, 2012, in New Orleans, LA. Paper No. 25. – 19 p.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПОДГОТОВКА ОБЬЕКТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА

Кулик А.В.[1)], Дорогов Е.Ю.[1)]
[1)]Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия.

При смене способа сжигания жидкого и газообразного топлива в топках энергетических и промышленных котлоагрегатов происходит изменение условий внутритопочного теплообмена. Особенно, изменение условия радиационного теплообмена заметно при переводе котлов с прямоточного на циклонно-вихревое сжигание (ЦВС) горючих топлив [1].

При переводе котлов на циклонно-вихревое сжигание мазута в предтопках ЦМКТ, изменение эмиссионных свойств факела и более равномерное заполнения светящимися газами топочного объёма приводит к снижению значений падающих тепловых потоков (рис 1).

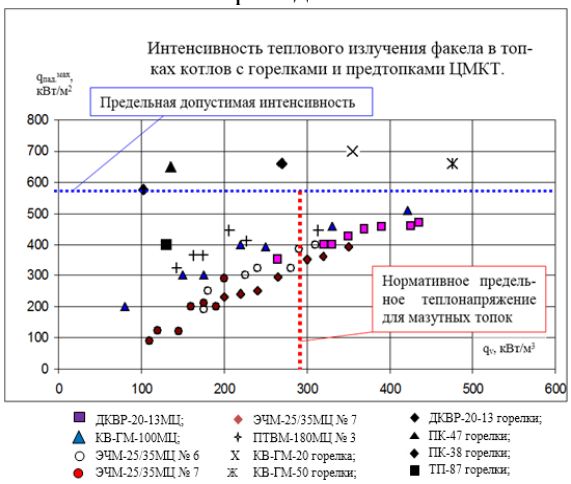


Рис. 1 Интенсивность теплового излучения факела [1].

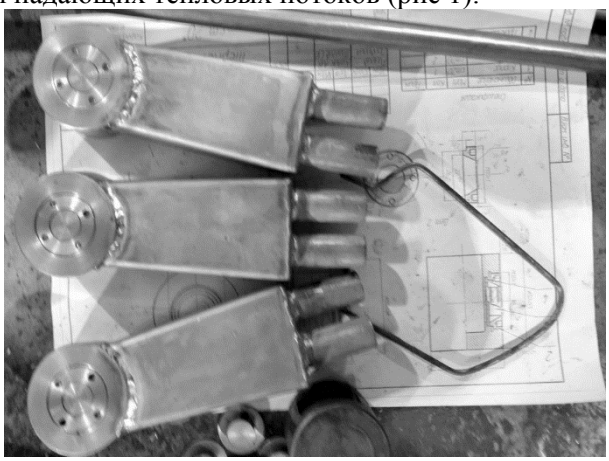


Рис. 2. Датчики теплового потока, установленные в головку термозонда.

Проведенные исследования [1] позволили внести изменения в тепловой расчет [2] котлоагрегатов, оснащенных предтопками ЦМКТ сжигающих топочный мазут.

В связи с переводом котлоагрегатов сжигающих мазут на сжигание природного газа как основного вида топлива, необходимо продолжить исследования внутритопочного теплообмена на котлах, оснащённых по технологии ЦВС для определения поправки и корректировки теплового расчета [2].

Объектом исследования определен водогрейный котел КВ-ГМ-116,3-150 ст. №5 КЦ №1 филиал «Приморская генерация». Методика исследований предусматривает проведение измерений температуры факела и газов по тракту котла, падающих и отраженных тепловых потоков. Основными первичными приборами являются пирометры, термопары, двухсторонние датчики термозондов (рис. 2).

Для получения опыта и проверки работоспособности первичных приборов в «горячих» условиях проведены базовые измерения на промышленном котле мощностью 3 МВт с форсировкой топочного объёма q_v = 300 кВт/м^3. Учитывая, наличие необходимых для проведения измерений лючков в качестве объекта был выбран водогрейный котёл УВКр-3,0. Выявленные при проведении замеров недостатки конструкции датчиков и зондов впоследствии были устранены.

Полученные результаты эксперимента позволили подготовить приборы, получить опыт выполнения замеров, дать рекомендации для котла УВКр-3,0 для организации более равномерного тепловосприятия поверхностями нагрева.

Список литературы

1. Дорогов Е.Ю., Исследование теплообмена в топках котлов с циклонными предтопками ДВГТУ, дисс. канд. техн. наук. -Владивосток, 2000 г.
2. Тепловой расчет котельных агрегатов. (Нормативный метод) издание 3-е, переработанное и дополненное. – НПО ЦКТИ, СПб, 1998. - 256 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДАВЛЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ ОБЛАКОМ ИНЕРТНЫХ ЧАСТИЦ

Лаврук С.А., Боченков Е.С.
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
г. Новосибирск, Россия

Противопожарная безопасность является одним из важнейших вопросов, возникающих на производстве. Представляют интерес также и вопросы снижения скорости гетерогенной детонации из-за присутствия в реагирующей смеси инертных частиц (зачастую это трактуется как подавление детонации). Таковыми могут быть и частицы горючего, имеющие значительную толщину оксидной пленки. В работах [1, 2] рассматривается подавление детонации за счет инертных газов, а также инертных частиц. Так в [1] рассмотрена задача подавления распространения детонации в водород-кислородной среде с помощью аргона, так и добавлением инертных частиц оксида кремния. В [2] исследовалась длина облака инертных частиц способная подавить газовую детонацию. [3] посвящена сравнению способов подавления детонации смесях различных газов. Определены критические объемные концентрации инертных частиц для каждой из смесей.

В работах [4, 5] рассматривался вопрос подавления детонации в плоском канале за счет облака инертных частиц. В [4] рассматривалось подавление плоской детонационной волны в канале, были определены предельные размеры облака для подавления и частичного срыва детонации. В [5] также были определены основные параметры облака инертных частиц оксида алюминия, позволяющие подавить ячеистую гетерогенную детонационную волну. Так же описана структура, которую формируют инертные частицы за фронтом детонационной волны. В работе [6] проведен учет межчастичных столкновений в модели. Получены структуры ударных волн, предсказанные ранее, а так же выявлено, что межчастичные взаимодействия не влияют на скорость распространения детонации, размер ячейки или параметры газовой фазы. Но учет столкновительной динамики изменяет структуру слоев инертных частиц, формирующуюся в следе ячеистой детонации.

Данная работа посвящена исследованию подавления детонационного горения стехиометрической смеси микро- и наночастиц алюминия и кислорода. Отличием от работ, описанных выше, заключается в переходе от кинетического к диффузионному режиму описания горения. Будет рассмотрено подавление детонации, как с помощью частиц микронного размера, так и с помощью субмикронных частиц оксида алюминия.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-69-00006.

Список литературы

1. Fedorov A.V., Tropin D.A., Bedarev I.A. Mathematical Modeling of Detonation Suppression in a Hydrogen–Oxygen Mixture by Inert Particles // Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2010, Vol. 46, No. 3, pp. 332–343.
2. Fedorov A.V., Tropin D.A. Determination of the Critical Size of a Particle Cloud Necessary for Suppression of Gas Detonation // Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2011, Vol. 47, No. 4, pp. 464–472.
3. Tropin D.A., Fedorov A.V. Mathematical modeling of detonation wave suppression by cloud of chemically inert solid particles // Combust. Sci. Technol., 2014, 186: 1690–1698.
4. Федоров А.В., Кратова Ю.В. Расчет распространения детонационной волны в газовзвеси алюминиевых и инертных частиц // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49, № 3. С. 88-101.
5. Федоров А.В., Кратова Ю.В. Взаимодействие волны гетерогенной детонации, распространяющейся в ячеистом режиме, с облаком инертных частиц // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50, № 2. С. 68-76.
6. Хмель Т.А., Федоров А.В. Моделирование распространения ударных и детонационных волн в запыленных средах при учете межчастичных столкновений // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50, №5. С. 53-62.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАТАЛИТИЧЕСКОГО ТЕРМОРАСПАДА NH_4NO_3 В ПРИСУТСТВИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Ларионов К.Б.[1], Мишаков К.Б.[2], Бауман Ю.И.[2]
[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
[2] Институт катализа СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В качестве основного окислителя большинства твердых ракетных топлив используется перхлорат аммония, продукты горения которого являются токсичными и экологически вредными [1]. По преодолению данной проблемы ведутся активные работы, направленные на поиск альтернативных решений для получения «зеленых» энергетических систем (ЭС). Потенциальной заменой перхлорату аммония, при разложении которого выделяется HCl [1], является нитрат аммония. В сравнении с перхлоратом аммония, NH_4NO_3 характеризуется плохой воспламеняемостью, низкой скоростью горения и гигроскопичностью [2].

Одним из современных решений по преодолению технологических барьеров для данных ЭС является использование активных оксидов металлов [3]. В работе [1] сообщается об использовании нанодисперсной каталитической системы на основе CuO, Fe_2O_3 и графена, в присутствии которой наблюдалось значительное ускорение процесса термического разложения NH_4NO_3.

Цель работы состояла в изучении особенностей процесса термораспада NH_4NO_3 при каталитическом воздействии малого количества углеродных нановолокон (УНВ), характеризующихся различной структурой и текстурными свойствами.

Для получения образцов УНВ применяли метод каталитического газофазного осаждения углерода [4]. Катализаторы представляли собой никелевые системы с добавками меди и молибдена.

УНВ вводили в состав образца механическим смешением. Порошок нитрата аммония (ГОСТ 22867-77) интенсивно смешивался в течение 5 мин с навеской УНВ. Массовая доля УНВ в полученной смеси составляла 5%.

Исследование процесса каталитического термораспада проводилось на синхронном термическом анализаторе Netzsch STA 449 F3 Jupiter (Германия). Навеску образца (12 мг) нагревали в корундовом тигле в интервале температур 25-1000 °C при скорости нагрева 5 °C/мин. В качестве газовой среды использовался аргон (скорость потока 60 мл/мин).

Результаты термического анализа показали, что введение УНВ во всех случаях приводит к заметному снижению температуры начала разложения NH_4NO_3 (на 30-40 °C). Эффективное ускорение процесса терморазложения нитрата аммония связано с наличием ярко выраженных восстановительных свойств добавляемого углеродного наноматериала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №16-19-10316)

Список литературы

1. Xu Z.-X., Xu G.-S., Fu X.-Q., Wang Q. The mechanism of nano-CuO and CuFe2O4 catalyzed thermal decomposition of ammonium nitrate // Nanomaterials and Nanotechnology, 2016, V.6.2.
2. Sinditskii V.P., Egorshev V.Y., Levshenkov A.I., Serushkin V.V. Ammonium nitrate: combustion mechanism and the role of additives // Propell, Explos, Pyrotech 2005 V.30 (4), P. 269–280.
3. Kohga M., Naya T. Thermal Decomposition Behaviors and Burning Characteristics of AN/RDX-Based Composite Propellants Supplemented with MnO2 and Fe2O3 // Journal of Energetic Materials V.33 (4), P.288-304.
4. Teo K.B.K., Singh C., Chhowalla M., Milne W.I. Catalytic synthesis of carbon nanotubes and nanofibers // Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology (2004), 1, P. 665-686.

ВЛИЯНИЕ ИНИЦИИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ $CU(CH_3COO)_2$ НА ПРОЦЕСС ОКИСЛЕНИЯ КАМЕННОГО УГЛЯ

Ларионов К.Б.[1)], **Мишаков К.Б.**[2)], **Болгова Д.Л.**[1)]
[1)] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
[2)] Институт катализа СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Повышение коэффициента использования топлива возможно за счет применения каталитического сжигания, которое оказывает существенное влияние на процесс горения [1]. Сравнительный анализ влияния оксидных добавок и их предшественников в виде нитратов и хлоридов металлов на процесс окисления углей показал, что добавки-предшественники способствовали большему снижению начальной температуры окисления летучих веществ и повышению скорости протекания реакции [2]. Механизм каталитического горения угля объясняется активацией реакционной способности топлива, происходящей в результате тесного контакта частиц угля с поверхностью катализатора [3].

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния инициирующей добавки $Cu(CH_3COO)_2$ (в количестве 5 мас. %) на процесс окисления каменного угля Аллардинского месторождения.

Эксперименты проведены с помощью синхронного термического анализатора Netzsch STA 449 F3 Jupiter (Германия) в одинаковых условиях при атмосферном давлении в окислительной среде (воздух) со скоростью потока 60 мл/мин. Образец массой ~25 мг подвергался нагреванию в корундовом тигле с перфорированной крышкой в интервале температур 25-600 °С при скорости нагрева 2,5 °С/мин.

По полученным экспериментальным результатам установлено, что модифицирование образца каменного угля добавкой $Cu(CH_3COO)_2$ приводит к значительному снижению начальной температуры окисления летучих соединений (ΔT_i = 78 °С), снижению температуры окончания процесса окисления (ΔT_f = 64 °С), сокращению времени прогрева образца начала активного окисления (Δt_e = 32 мин), а также к сдвигу процесса в область более низких температур.

Снижение температуры зажигания сопровождается увеличением средней скорости (Δw_{cp} = 0,023 %/мин) и снижением максимальной скорости (Δw_{max} = 0,09 %/мин) реакции протекания процесса окисления. При этом температура, соответствующая максимальной скорости окисления образца, уменьшилась (ΔT_{max} = 34 °С).

Температурная область окисления летучих соединений УК/Cu соответствует началу процесса разложения инициирующей добавки $Cu(CH_3COO)_2$. Оксид меди, образующийся в результате разложения ацетата меди, катализирует дальнейший процесс окисления угля.

Результаты проведенного исследования показали, что введение инициирующей добавки $Cu(CH_3COO)_2$ в состав каменного угля в количестве 5 мас. % оказывает положительное влияние на характер процесса окисления. Выявленные закономерности инициируемого окисления углей в присутствии ацетата меди могут быть в дальнейшем использованы при разработке более эффективных методов сжигания твёрдого топлива.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, в рамках реализации проекта №13.7644.2017/БЧ.

Список литературы

1. Пармон В.Н., Симонов А.Д., Садыков В.А., Тихов С.Ф. Каталитическое сжигание: достижения и проблемы // Физика горения и взрыва, – 2015, – Т.51, №2, – С. 5-13.
2. Zhao GW, Yu WQ, Xiao YH. Study on brown coal pyrolysis and catalytic pyrolysis // Adv. Mater. Res, – 2011, – V. 236-238, – P. 660-663.
3. Cheng J., Zhou F., Xuan X. Comparison of the catalytic effects of eight industrial wastes rich in Na, Fe, Ca and Al on anthracite coal combustion // Fuel, – 2017. – V. 187. – P.398-402.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ С УСТУПОМ

Лебедев А.Б.[1)], **Якубовский К.Я.** [1)], **Токталиев П.Д.**[1)]
[1)] Центральный Институт Авиационного Моторостроения, г.Москва, Россия

В работе проведено расчетное исследование нестационарных и квазистационарных режимов горения, а также условий их возникновения в исследовательской камере сгорания [1, 2], использующей в качестве топлива обедненную метановоздушную смесь. Несмотря на сравнительную простоту геометрии рассматриваемой камеры сгорания, представляющей собой канал с обратным уступом, в ней могут наблюдаться ряд характерных для полноразмерных камер сгорания, использующих обедненную топливовоздушную смесь нестационарных явлений, таких как срыв и проскок пламени. Таким образом, рассматриваемая камера сгорания, учитывая набор детальных экспериментальных данных [1], как по осредненным, так и по пульсационным характеристикам потока является удобным объектом для разработки, верификации и совершенствования методов математического моделирования турбулентного горения. В работе с использованием RANS/DES/LES подходов для режимов работы камеры сгорания со срывом и проскоком пламени проведен анализ влияния различных факторов, таких как точность постановки граничных условий и размерность используемой расчетной сетки, на погрешность получаемых локальных характеристик потока (профили осредненных и мгновенных скоростей и температур, пульсации статического давления, формы и положения фронта пламени) и интегральных характеристик (массовый расход, потери полного давления). В результате проведенных расчетов показано, что наиболее предпочтительным для моделирования горения заранее перемешанных смесей является использование гибридных RANS/LES методов, когда вблизи от стенки используются упрощающие предположения (модель WALE [3], модели RANS), а вдали от стенки используются метод крупных вихрей. На основе предложенной в [4] вычислительно экономичной методики расчета трехмерных нестационарных турбулентных течений при наличии гомогенного горения проведен анализ частотных характеристик процесса проскока пламени и переходных процессов, предшествующих режиму работы камеры сгорания с проскоком пламени. Показано, что предложенная методика хорошо воспроизводит частоты квазистационарных режимов с проскоком, для рассматриваемой камеры [1] и режима со средним значением α=1.22, f~50-60 Гц.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 16-01-00035 А.

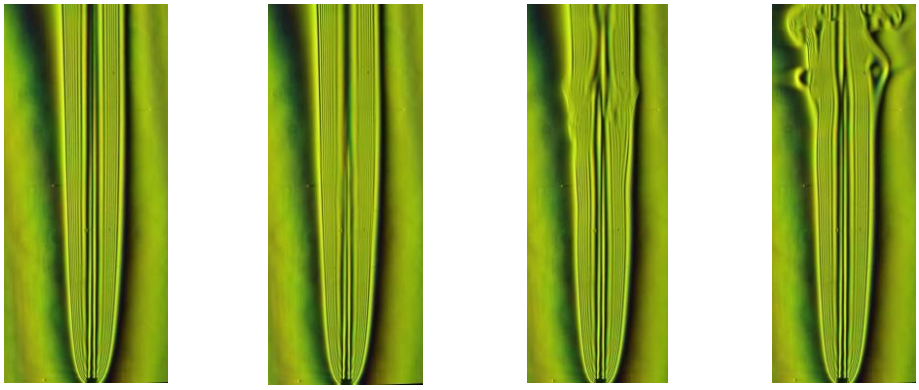
Список литературы

1. Dupoirieux F., Vincent A., Bertier N., Banh A. Numerical simulation of a premixed CH4-air burner for comparison of RANS and LES methodologies // Nonequilibrium processes in physics and chemistry, vol. 2. pp.147-163, 2016
2. Pudovikov D.E., Toktaliev P.D., Yakubovsky K.Ya. Detached eddy simulation of flow in a model low-emission combustion chamber // Non-Equilibrium Processes in Physics and Chemistry, vol.2, pp.225-235, 2016
3. Nicoud F., Ducros F. Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor // Flow, Turbulence and Combustion, 62 (1999), pp. 183-200
4. Лебедев А.Б., Якубовский К.Я., Токталиев П.Д. Расчетное исследование турбулентного гомогенного горения смеси метан/воздух методами RANS и LES в малоэмиссионной камере сгорания // Горение и Взрыв, т.10, №4, 2017, с.8-16

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ ЛАМИНАРНОГО ВОДОРОДНОГО ПЛАМЕНИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА СТРУЮ ТОПЛИВА

Леманов В.В., Лукашов В.В., Шаров К.А.
Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Рассматривается струйное ламинарное пламя водорода в смеси с инертным разбавителем в неподвижной атмосфере воздуха. Диапазон чисел Рейнольдса топливной смеси Re =1500…4000. В этих условиях в трубке (d=3 мм, L=550 мм), через которую подаётся топливо, происходит ламинарно- турбулентный переход, который начинается с образования вихревых пространственно локализованных структур [1]. При увеличении Re в моменты разрушения ламинарного течения начинают превалировать турбулентные пятна с характерным для развитой турбулентности спектром пульсаций. Такие изменения режима течения носят случайный характер. Их можно рассматривать как импульсные воздействия на горящую струю. На примере пропана было показано, что характер такого воздействия различен для присоединённого и отсоединённого пламени горения [2].



0143 0144 0145 0148

Рис. 1. Присоединённое пламя H2/CO2 в переходном режиме течения топливной струи, Re=2870, мольная доля водорода 90%. Видео: https://cloud.mail.ru/public/61K5/hizdqmigA

Как известно, свойства водорода сильно отличаются от теплофизических и химических свойств углеводородов – H2 имеет низкую плотность, высокие значения коэффициента диффузии и, как следствие, высокую скорость распространения пламени. Это не может не сказываться на различиях в реакции пламени на появление в топливной струе турбулентных пятен в переходном режиме течения в трубке. При горении разбавленного инертным газов водорода низкочастотные биения пламени (flikering) могут быть подавлены практически полностью. Пламя при этом может оставаться присоединённым. Прохождение ТП может сопровождаться образованием «дыр» в пламени – тёмных областей, показанных на Рис. 1 (кадр 0148), в которых горения по-видимому не происходит.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ грант № 17-08-00958.

Список литературы

1. Никитин Н. В., Пиманов В. О., Локализованные турбулентные структуры в круглой трубе //Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2015. – Т. 157, кн.3. – С. 111–116.
2. Леманов В.В., Лукашов В.В., Абдрахманов Р. Х., АрбузовВ. А., Дубнищев Ю. Н., Шаров К. А. Режимы неустойчивого истечения и диффузионного горения струи углеводородного горючего // ФГВ. –2018. – Т.54, № 3. – С. 21-27.

ФРАГМЕНТАЦИЯ И АГЛОМЕРАЦИЯ ПРИ СЖИГАНИИ БИОМАССЫ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Литун Д. С., Рябов Г. А., Долгушин И. А.
ОАО Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт (ОАО «ВТИ»), г. Москва, Россия

Показано, что при сжигании биомассы в кипящем слое важным является учет изменения размеров частиц за счет их фрагментации. Выполнен анализ современного состояния исследований процессов фрагментации. Показано, что наиболее существенной является первичная фрагментация - растрескивание и распад исходных топливных частиц на две и более частей из-за термических напряжений и увеличения давления в частицах при быстром нагреве на стадиях сушки и выхода летучих. Рассмотрены причины и характер растрескивания топливных частиц. Проанализированы количественные характеристики и критерии фрагментации частиц.

Показано, что самым простым критерием для оценки склонности различных топлив к фрагментации является критический диаметр частицы. Рассмотрены основные факторы, влияющие на первичную фрагментацию, включающие в себя размер частиц, скорость нагрева, температуру слоя, и характеристики топлива. Основные характеристики топлива, влияющие на первичную фрагментацию, включают в себя содержание летучих и пористость, влажность и зольность, склонность к набуханию или усадке частиц, а также состав органической части. Рассмотрены вопросы прогнозирования первичной фрагментации топлив. Приведены направления и методы исследований условий фрагментации биомассы. Даны результаты изучения специфических свойств плеелт из различных сырых матриалов.

Рассмотрены вопросы предварительной подготовки биомассы к сжиганию и получения из нее полезных продуктов. Торрефикация может быть использована в цепи топливоподготовки, для того что бы снизить затраты на ее хранение, транспортировку и дальнейшее сжигание. Оценены возможности включения в тепловую схему ТЭС узла торрефикации и определены условия ее эффективной работы. Результаты настоящего исследования буду использоваться в дальнейших работах по созданию новых установок с использованием биомассы.

Работы выполнены при поддержке российского фонда фундаментальных исследований.

ВЛИЯНИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР НА СМЕШЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ ЗАКРУЧЕННОЙ СТРУИ

Лобасов А.С. [1),2)] Дулин В.М. [1),2)] Маркович Д.М. [1),2)]
[1)] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2)] Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Для стабилизации пламени в камерах сгорания часто организуют закрученный поток [1,2]. Закрутка потока интенсифицирует турбулентный тепломассоперенос и увеличивает общую эффективность перемешивания смеси и горение, за счёт формирования крупномасштабных вихревых структур в слое смешения струи. Более того, для течений со степенью закрутки выше определенного критического значения имеет место явление распада вихревого ядра струи, часто характеризующееся нестационарной динамикой потока на начальном участке. Экспериментальные исследования структуры течения, процессов турбулентного переноса и вклада крупномасштабных вихревых структур в перемешивание, необходимы, в том числе, для верификации современных методов численного моделирования закрученных турбулентных потоков.

Работа посвящена экспериментальному исследованию когерентных структур и особенностей переноса на начальном участке турбулентных закрученных струй (Re = 5000) при совместном использовании методов анемометрии по изображениям частиц и плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции. В работе исследованы струи с различной степенью закрутки потока: прямоточная струя, слабо закрученная струя в отсутствие центральной зоны рециркуляции, два различных случая сильно закрученных струй с распадом вихревого ядра и образованием зоны рециркуляции. Для оценки вклада когерентных структур в турбулентный перенос и перемешивание выполнено разложение ансамбля пульсаций полей скорости методом главных компонент. На рис.1 показаны примеры мгновенных распределений скорости и концентрации пассивной примеси для прямоточной и сильно закрученной струй. Контурные линии визуализирую крупномасштабные вихревые структуры и соответствуют положительным значениями Q-критерия (разница квадратов тензоров завихренности и скоростей деформации).

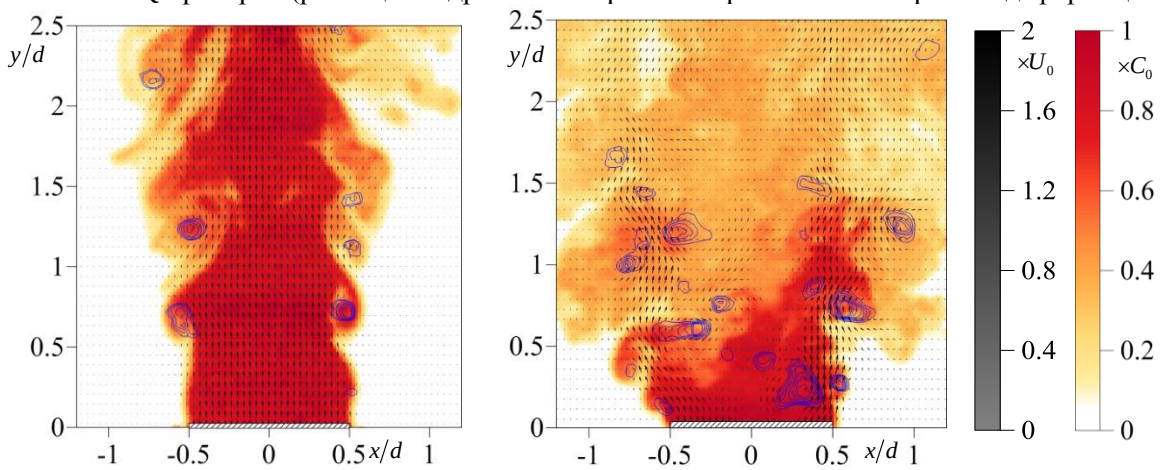


Рис. 1. Распределения мгновенной скорости и концентрации пассивной примеси для прямоточной (слева) и сильно закрученной (справа) турбулентной струи. Контурные линии визуализируют крупномасштабные вихревые структуры.

Работа поддержана РФФИ (грант 16-08-01236).

Список литературы

1. Gupta, D. Lilley, N. Syred. Swirl Flows – Abacus Press, Kent, 1984.
2. R. Weber, J. Dugué. Combustion accelerated swirling flows in high confinements // Progress in Energy and Combustion Science – 1992. – V. 18. - P. 349–367.

ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ НА ФАКЕЛ ПЛАМЕНИ

Лобода Е.Л.[1)], Агафонцев М.В.[1)], Рейно В.В.[2)], Климентьев А.С.[1)]
[1)] Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, г. Томск
[2)] 2 Институт оптики атмосферы СО РАН им. В.Е. Зуева, Россия, г. Томск

При диффузионном горении наблюдаются многократные изменения температуры во времени [1]. Это связано с турбулентным режимом течения в пламени, переносом газообразных продуктов разложения и горения. Применение методов термографии позволяет производить измерения и контроль без внесения возмущений в исследуемую среду. Согласно [1], в спектре пульсаций температуры в пламени присутствуют характерные частоты, обусловленные режимом течения, переносом и размером микрообъемов, в которых происходит горение. В [2] представлена модель пламени, где предполагается, что в результате турбулентности фронт пламени искривляется и превращается в комбинацию ламинарных фронтов, разделяющих зоны несгоревшей и полностью сгоревшей смеси. Движение этих зон сопровождается интенсивными пульсациями температуры и концентрации горючих компонентов. При достаточно интенсивной турбулентности возникает дробление фронта пламени [3], в результате чего горение происходит в отдельных микрообъемах.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований поля температуры в пламени при воздействии на него пульсациями давления малой амплитуды с частотами пульсации до 10 Гц.

Оценка масштабов турбулентности в пламени с применением термографии для разных видов топлив подробно изложена в [1]. Этиловый спирт, масса которого варьировалась от 10 до 30 г, сжигался в емкости диаметром 0.15 м. Горение происходило на свободной поверхности. В качестве регистрирующего оборудования применялся тепловизор JADE J530SB с узкополосным фильтром с полосой пропускания 2.5 - 2.7 мкм. Выбор фильтра произведен на основе анализа спектра излучения пламени [4]. Генератором пульсаций давления служил низкочастотный динамик 25ГД26 с мягким подвесом на который подавался синусоидальный сигнал, сформированный генератором сигналов специальной формы Г628, предварительно усиленный при помощи усилителя LV 103. Расстояние от источника колебаний до пламени составляло 0,3 м.

Установлено, что при появлении внешнего воздействия в виде пульсаций давления малой амплитуды снижалась высота факела пламени и появлялись изменения в спектре изменения температуры. Очевидно изменение амплитуды колебаний температуры на характерных частотах, которые хорошо видны при отсутствии внешних воздействий. При этом в результате воздействия колебаний внешнего давления изменяется спектр пульсации температуры в пламени. Следует отметить, что воздействие с частотой более 5 Гц вызывают появление локальных амплитудных максимумов в спектре изменения температуры с частотой воздействия.

Список литературы

1. E.L. Loboda, O.V. Matvienko, V.P. Vavilov, V.V. Reyno In-frared thermographic evaluation of flame turbulence scale // Infrared Physics&Technology, 72 (2015), 1-7 p. doi: 10.1016/j.infrared.2015.07.001
2. Damkölhler G. Der Einfiuss der Turbulenz auf die Flam-mengeschwindigkeit in Gasgemischen // Zs. Elektrochem. 1940. V. 46. P. 601.
3. P. Libby and F. A. Williams, Turbulent Reacting Flows. Academic Press Inc., 1994. pp. 1–43.
4. 6. Е.Л. Лобода, В.В. Рейно, М.В. Агафонцев Выбор спектрального интервала для измерения полей температуры в пламени и регистрации экранированных пламенем высоко-температурных объектов с применением методов ИК – диагностики // Известия высших учебных заведений. Физика, 2015. Т. 58, No 2. С. 124 – 128. DOI: 10.1007/ s11182 - 015 - 0493 – x.

ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ПЛАМЕНИ ПРИ ДИФФУЗИОННОМ ГОРЕНИИ ТОПЛИВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ

Лобода Е.Л.[1)], Ануфриев И.С.[2)], Агафонцев М.В.[1)], Копьев Е.П.[2)], Шадрин Е.Ю.[2)], Рейно В.В.[3)], Луценко А.С.[1)], Лобода Ю.А.[1)]

[1)] Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, г. Томск
[2)] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, г. Новосибирск
[3)] Институт оптики атмосферы СО РАН им. В.Е. Зуева, Россия, г. Томск

Физико-химические процессы, связанные с горением и распространением пламени в различных технологических устройствах и при природных пожарах, реализуются, как правило, в условиях турбулентности [1]. Разные участки фронта пламени переносятся вместе с газом с различными скоростями, которые складываются из осредненной и пульсационной составляющих. В результате фронт пламени приобретает сложную форму, хаотически искривляется, площадь поверхности пламени возрастает. Турбулентное горение представляет собой нестационарный процесс турбулентного смешения продуктов сгорания со свежей смесью и воспламенение ее вследствие повышения температуры. В этих условиях закономерности ламинарного распространения пламени теряют силу. Решающими факторами становятся турбулентные пульсации и связанная с ними интенсивность турбулентного перемешивания. В зависимости от масштаба турбулентности и величины турбулентных пульсаций возможны различные механизмы горения в турбулентных потоках [2].

В данной работе в качестве горючих материалов использовались жидкие углеводородные топлива (бензин, керосин, дизельное топливо) и растительные горючие материалы (смесь полевых горючих материалов, хвоя кедра, древесина сосны, древесина кедра). Интенсивность ИК-излучения пламени и распределение температуры регистрировались при помощи тепловизора JADE J530SB с узкополосным оптическим фильтром (спектральный интервал 2.52.7 мкм). Регистрация гидродинамической структуры пламени была осуществлена с применением PIV-системы «Полис» в ИТ СО РАН (И.С. Ануфриев, Е.П. Копьев, Е.Ю. Шадрин). В качестве трассеров, по аналогии с [3], использовались частицы оксида кремния, образующиеся при добавлении небольшого количества силиконового масла в зону горения.

Аналогично обработке термограмм [4] была проведена статистическая обработка размеров температурных неоднородностей в пламени и крупных вихревых областей на трассерных PIV-изображениях, поддающихся идентификации и измерению.

Анализ полученных экспериментальных данных говорит о приемлемом согласовании результатов измерений размеров температурных неоднородностей в пламени, полученных при помощи термографии, и размеров завихрений в облаке трассеров (оксида кремния) на PIV-изображениях.

Список литературы

1. Lewis, B. and G. Elbe, Combustion, Flames and Explosions of Gases. 3 ed. 1987: Academic Press.
2. Warnatz J. Combustion / J. Warnatz, U. Maas, R.W. Dibble. – Berlin: Springer, 1999. – 300 p.
3. S. V. Alekseenko, I. S. Anufriev, M. S. Vigriyanov, et al. Steam-Enhanced Regime for Liquid Hydrocarbons Combus-tion: Velocity Distribution in the Burner Flame // Thermophys. Aeromech. 21 (3), 393–396 (2014).
4. E.L. Loboda, O.V. Matvienko, V.P. Vavilov, V.V. Reyno, Infrared thermographic evaluation of flame turbulence scale // Infrared Physics & Technology 72 (2015) 1–7. http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2015.07.001

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В ПРИСТЕННОМ ДИФФУЗИОННОМ ПЛАМЕНИ

Лукашов В.В., Терехов В.В
Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Прогнозирование распределения теплового потока на поверхности в ламинарных и турбулентных реагирующих течениях является одной из принципиальных задач, возникающих при проектировании энергоустановок. К настоящему времени имеется семейство моделей, позволяющих оценить тепловой поток на стенке в реагирующем пограничном слое. Оценки, основанные на пленочной теории [1, 2] содержит ряд существенных допущений. В работах [3, 4] проведена верификация указанных подходов с помощью численного моделирования ламинарного пограничного слоя с фронтом пламени около поверхности тонкой пленки жидкого топлива. Установлены условия, в которых теория [1, 2] неприменима. Следует отметить, что испарение и горение в этих работах предполагает прямую связь между тепло- и массообменом на стенке, что отличается от условий вдува через стенку, характерных для задач пористой теплозащиты. В [5] предложена корреляция для теплового потока в ламинарном пограничном слое с химической реакцией на проницаемой поверхности. В [6] экспериментально и численно показано, что при некотором значении параметра вдува среднее по длине значение теплового потока в стенку имеет максимум. Предложена аналитическая оценка для определения максимального теплового потока при горении в зависимости от интенсивности вдува.

Несмотря на очевидный интерес к этой задаче турбулентный режим течения в реагирующем пограничном слое остаётся недостаточно исследованным. В данной работе рассматривается пористая пластина, обтекаемая потоком воздуха так, что образующийся пограничный слой является развитым турбулентным. Через пластину вдувается смесь водорода с азотом с контролируемым равномерным по длине расходом. Часть тепла, выделяющегося в результате горения, которая передается стенке есть величина, подлежащая определению. В опытах проводились измерения температуры стенки при вариации интенсивности вдува, степени разбавления топлива и скорости набегающего потока (до 20 м/с). Исходя из баланса тепла на стенке, тепловой поток определялся по заданному расходу топливной смеси и измеренной температуре стенки. Численное моделирование проводилось в условиях проведенных экспериментов и дополняло их.

Анализ полученных результатов показал возможность использования пленочной теории в определенных режимах. Существенное отклонение от последней наблюдается в окрестности передней кромки пластины вследствие особенностей течения и, в случае высоких скоростей набегающего потока, смещения фронта пламени вниз по потоку, что ранее наблюдалось [4] для ламинарного режима течения. Также проведено сопоставление с теоретической моделью работы [6], зависимость от режима течения в которой неявным образом входит через коэффициенты теплоотдачи нереагирующего течения.

Работа выполнена за счет средств, полученных от ФАНО России (гос.рег. № 01201350445).

Список литературы

1. Emmons H. The film combustion of liquid fuel// Math. Mech. – 1965. – V.36. – P. 60–71.
2. Сполдинг Д.Б. Горение и массообмен – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
3. Raghavan V., Rangwala A.S., Torero J.L. Laminar flame propagation on a horizontal fuel surface: Verification of classical Emmons solution // Combustion theory and modeling. – 2009. – V.13, N1. – P.121-141.
4. Singh A. V., Gollner M. J. Estimation of local mass burning rates for steady laminar boundary layer diffusion flames // Proc. of the Combustion Institute. – 2015. – V.35. – P. 2527–2534.
5. Frank G., Pfitzner M. Investigation of the heat transfer coefficient in a transpiration film cooling with chemical reactions // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 2017. – V. 113. – P. 755–763.
6. В.В. Лукашов, В.В. Терехов, К. Ханъялич, Теплообмен в пограничном слое на проницаемой пластине при вдуве и горении, Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – V. 20. N6. – P.705-712.

ОСОБЕННОСТИ СРЫВА ПЛАМЕНИ ПРИ ВДУВЕ СТРУИ РАЗБАВЛЕННОГО ИНЕРТНЫМИ ГАЗАМИ ВОДОРОДА В ПОПЕРЕЧНЫЙ ПОТОК ВОЗДУХА

Лукашов В.В., Терехов В.В.
Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Струйная подача топлива имеет широчайшее распространение в различных типах горелочных устройств. Горению турбулентных струй в различных условиях посвящено огромное количество работ. Это обусловлено и фундаментальными вопросами взаимодействия турбулентных пульсаций и химического реагирования.

Одним из важных аспектов в общей проблеме горения струй является определение условий отсоединения и срыва пламени. Несмотря на существенный прогресс до настоящего времени нет единого описания таких условий. Это обусловлено отсутствием единой теории процесса, многофакторностью задачи, сложностью экспериментальных подходов и др. В особенности, это касается горения струй топлива, вдуваемых поперечно потоку окислителя, для которых характерна сложная структура течения [1] и неоднозначное поведение зависимостей, определяющих условия срыва пламени [2]. Также следует отметить существенное отличие условий, в которых происходит срыв пламени водорода от углеводородных топлив [3].

В тоже время, последние достижения в разработке экспериментальных диагностик и численных методов открывают новые перспективы в исследованиях. Так, в работах [1,2] представлены детальные экспериментальные данные о структуре пламени при горении смеси H2/N2 в поперечном потоке, полученные с использованием высокоскоростной OH визуализации и PLIF измерений. Условия стабильного горения струйного пламени в неподвижном воздухе для водорода и смесей водорода с углеводородами (CO2, CH4, C3H8) исследовались в [3]. В работе [4] для обобщения экспериментально полученных данных по условиям срыва пламени в поперечном потоке воздуха были предложены полуэмпирические методы

В настоящей работе представлены результаты исследования структуры течения и условий, определяющих погасание пламени, при горении струи водорода, разбавленного различными газами. Полученные визуализации и данные PIV измерений позволили получить детальную картину течения и, в частности, проследить динамику образования спиральных вихрей в пламени. Показано, что простейшие модели срыва пламени [4] в данных условиях имеют весьма ограниченную применимость. Представлены результаты влияния степени разбавления водорода углекислым газом (или гелием) на погасание факела в поперечном потоке воздуха в широком диапазоне концентраций и скоростей струи. Установлено, что существует несколько областей значений концентрации разбавителя, в которых наблюдаются качественные отличия в поведении исследуемых условий срыва в зависимости от скорости потока окислителя.

Список литературы

1. Steinberg A.M., Sadanandan R., Dem C., Kutne P., Meier W. Structure and stabilization of hydrogen jet flames in cross-flows // Proc. Combustion Institute. – 2013. – V.34. –P.1499–1507.
2. Sullivan R., Wilde D., David R.D.R., Seitzman J. M., Lieuwen T.C. Time-averaged characteristics of a reacting fuel jet in vitiated cross-flow // Combust. and Flame.– 2014. – V.161. – P.1792–1803.
3. Wu Y., Lu Y., Al- Rahbi I.S., Kalghatgi G.T. Prediction of the liftoff, blowout and blowoff stability limits for pure hydrogen and hydrogen/ hydrocarbon mixture jet flames // Intern. J. of Hydrogen Energy. – 2009. – V.34. – P.5940 – 5945.
4. Баев В.К., Бажайкин А. Н. Уточнение критериального описания стабилизации пламени при горении газовых струй // ФГВ.- 2014.- N50, 2.- С. 3–8.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕВОДА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОТЛА НА НЕПРОЕКТНОЕ ТОПЛИВО

Мальцев К.И. [1)], **Гиль А.В.** [1)], **Лебедь Д.В.** [2)]
[1)] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
[2)]АО «ДГК», Филиал «Приморская генерация», г. Владивосток, Россия

В последнее время многие ТЭС вынуждены сжигать топливо ухудшенного качества. Это связано с тем, что по действующим нормам проектирования и строительства ТЭС располагаются вблизи угольных месторождений и рассчитываются на использование определенных углей с учетом их запасов и теплотехнических свойств. В течение срока эксплуатации ТЭС происходит изменение теплотехнических характеристик проектного угля или исчерпание его запасов [1].

Использование непроектного угля приводит к работе в нерасчетных режимах, как основного, так и вспомогательного оборудования ТЭС, что может негативно сказываться на работе всей станции [2].

Для оценки перевода котлов на непроектное топливо необходимо уделить особое внимание к теплотехническим характеристикам замещающего угля, а также к прогнозированию проявления свойств угля при сжигании в топочной камере [3].

В настоящее время с помощью численных исследований топки котла возможно провести оценку перевода котла на непроектное топливо.

В работе проведены поверочные расчеты котла БКЗ-210-100Ф на непроектном топливе, и по полученным данным проведено численное исследование с использованием пакета прикладных программ FIRE 3D.

В качестве проектного топлива для данного котельного агрегата является уголь Артемовского месторождения марки 3Б. За непроектные приняты липовецкий уголь марки Д и ургальский марки Г.

Предварительно на основании аналитического анализа приведенных характеристик топлив отмечено, что непроектные топлива могут рассматриваться в качестве замещающих.

Также проведены поверочные расчеты на номинальную пониженные нагрузки, составляющие 75 и 50 % от номинальной паропроизводительности. Их результаты показали уменьшение температуры на выходе из топки с уменьшением нагрузки.

Значения КПД котла при сжигании рассматриваемых непроектных углей достаточно близки, а зависимости $\eta_k=f(D)$ качественно схожи. Во всех случаях они имеют максимум в диапазоне D=75 %.

Численный анализ аэродинамической структуры потоков в топочном объеме при организации сжигания непроектных углей отражает стабильность вихревого движения во всем объеме топочной камеры, и является характерной для тангенциальной компоновки горелочных устройств. Топливо выгорает практически полностью, значение СО на выходе из топки близко к нулю.

В заключении следует отметить, что анализ состава топлива показал схожесть теплотехнических характеристик проектного и рассматриваемых непроектных углей. Выполненные расчетные исследования показали возможность работы котлов БКЗ-220-100Ф на рассматриваемых непроектных углях.

Список литературы

1. Кожуховский И.С., Эдельман В.И., Говсиевич Е.Р. и др. Проблемы монополизма поставщиков твердого топлива на рынках энергетических углей // Теплоэнергетика. – 2006. №5. – С. 45-49.
2. Супранов В.М., Изюмов М.А., Росляков П.В. Исследование возможности работы котла ТПЕ-208 энергоблока №1 Смоленской ГРЭС на непроектных углях // Теплоэнергетика. - 2011. № 1. – С. 44-54.

Гиль А.В. Применение численного моделирования топочных процессов для практики перевода котлов на непроектное топливо: монография / А.В. Гиль, А.В. Старченко, А.С. Заворин; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск: SST, 2011. – 181 с.: ил. – Библиогр.: с. 162-172.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ВОЛН ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗА В ИНЕРТНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Манжос Е.В.[1)], **Какуткина Н.А.** [1)], **Коржавин А.А.**[1)], **Рычков А.Д.** [2)], **Сеначин П.К.** [3)]
[1)] Институт химической кинетики и горпения СО РАН, г. Новосибирск
[2)] Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск
[3)] Алтайский государственный технический университет, 656038, г. Барнаул.

Проведено численное моделирование нестационарного процесса фильтрационного горения газов (ФГГ) – инициирования волн ФГГ нагретым участком пористой среды. Рассмотрен процесс формирования волны горения. Установлено наличие пределов зажигания волн ФГГ по некоторым параметрам системы. Определена предположительная природа пределов зажигания.

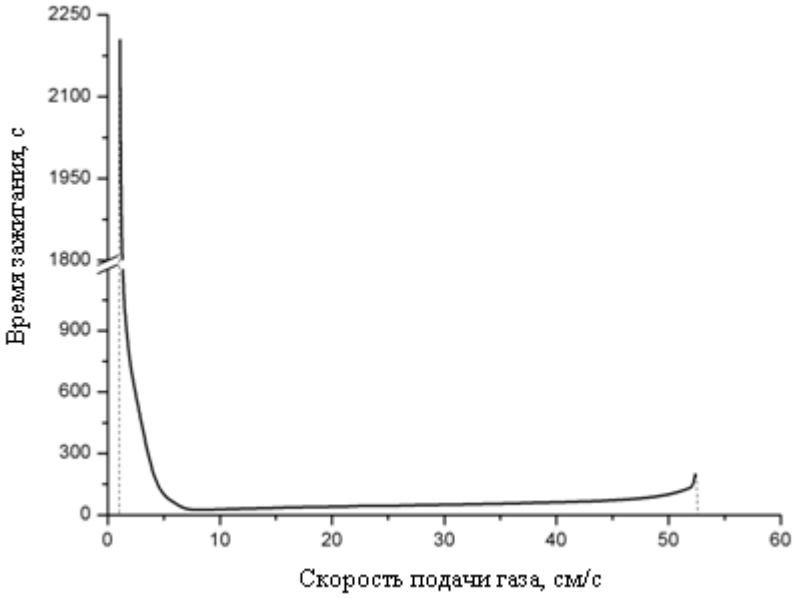


Рис. 1. Зависимость времени зажигания волны ФГГ от скорости подачи газа

Список литературы

1. Теория фильтрационного горения: общие представления и состояние исследований/ Алдушин А.П., Мержанов А.Г. // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988.
2. Лаевский Ю.М., Бабкин В.С., Фильтрационное горение газа// Распространение тепловых волн в гетерогенных средах / Ю.Ш.Матрос. – Новосибирск: “Наука”, 1988.
3. Добрего К.В., Жданок С.А. Физика фильтрационного горения газов. Минск: Национальная Академия наук Беларуси. Институт тепло-массообмена им. Лыкова А.В., 2002.
4. Футько С.И., Жданок С.А. Химия фильтрационного горения газов. Минск: Беларуская навука. 2004.
5. Моделирование нестационарных процессов фильтрационного горения газа. Какуткина Н.А., Рычков А.Д. Физика горения и взрыва. 2010. Т.46. №3. С. 44–51.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ПЛАЗМЕННО-ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЕ

Мессерле В.Е. [1,2], Устименко А.Б. [2,3]
[1] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2] Институт проблем горения МОН РК, г. Алматы, Казахстан
[3] НИИ экспериментальной и теоретической физики КазНУ им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

Одной из перспективных технологий воспламенения является плазменная термохимическая подготовка пылеугольного топлива к сжиганию (ПТПС) с использованием плазменно-топливных систем (ПТС), представляющих собой муфелизированную пылеугольную горелку с плазмотроном [1,2]. Технология ПТПС заключается в нагреве аэросмеси (угольная пыль + воздух) электродуговой плазмой до температуры выхода летучих угля и частичной газификации коксового остатка. Тем самым в ПТС из исходного угля получают высокореакционное двухкомпонентное топливо (горючий газ + коксовый остаток) заданного состава. При его смешении с воздухом в топке котла двухкомпонентное топливо воспламеняется и устойчиво горит без дополнительного высокореакционного топлива (мазут или газ), традиционно используемого для растопки котлов и стабилизации горения пылеугольного факела.

Данная работа посвящена численному исследованию прямоточной ПТС с помощью программы PlasmaKinTherm [3], совмещающей кинетику выделения летучих и окисления углерода коксового остатка с термодинамическим подходом к расчету плазменных термохимических превращений в газовой фазе продуктов первичной деструкции угля.

Численные исследования плазменного воспламенения высокозольного Экибастузского каменного угля выполнены для прямоточной цилиндрической ПТС. Экибастузский каменный уголь зольностью 40%, выходом летучих 24%, влажностью 5.8% имеет удельную теплоту сгорания 4000 ккал/кг. Расход угольной пыли составлял 1000 кг/час, ее начальная температура – 27°C, внутренний диаметр ПТС - 0.2 м, длина ПТС – 3 м.

Исследовано влияние мощности плазмотрона на температуру, скорость и состав продуктов ПТПС. Расчет процессов воспламенения и горения угля выполнен для следующих значений мощности плазмотрона: 20, 40, 60, 80 и 100 кВт. Найдено, что воспламенение угольных частиц в ПТС обеспечивается при мощностях плазмотрона 40 – 100 кВт, тогда как при мощности плазматрона 20 кВт температура газа по длине канала практически не увеличивается, оставаясь на уровне 110°C, что явно недостаточно для воспламенения топлива. Например, температура воспламенения каменного угля превышает 350°C. Влияние увеличения мощности плазмотрона на температуру газа проявляется в смещении максимума температур к плазменному источнику, расположенному в начале канала ПТС. Отметим, что максимальные значения температур газа изменяются в узком интервале 1940 – 1975°C. Это связано со значительным превышением тепловыделения от реакций окисления летучих угля и углерода тепловой мощности плазмотрона. В частности, относительная тепловая мощность плазмотрона, равная отношению мощности плазмотрона к выделенной в объеме ПТС тепловой мощности полученного топлива варьируется от 5 до 13% для мощностей плазмотрона 40 – 100 кВт, соответственно.

Сравнение расчетов с результатами стендовых исследований и опытно-промышленных испытаний процессов плазменного воспламенения Экибастузского угля показало их удовлетворительное согласие и подтвердило правомерность принятых при разработке модели допущений, что позволяет использовать модель и программу PlasmaKinTherm для проектирования плазменно-топливных систем. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан (проекты AP05130731 и AP05130031).

Список литературы

1. Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B., Lavrichshev O.A. Plasma preparation of coal to combustion in power boilers // Fuel Processing Technology. – 2013. – V. 107. – P. 93–98.
2. Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B. Plasma Assisted Power Coal Combustion in the Furnace of Utility Boiler: Numerical Modelling and Full-Scale Test // Fuel. – 2014. – V. 126. – P. 294-300.
3. Messerle A.V., Messerle V.E., Ustimenko A.B. Plasma Thermochemical Preparation for Combustion of Pulverized Coal // High Temperature. – 2017. – V. 55, No. 3. – P. 352–360.

ПОЛУЧЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ГАЗА ПЛАЗМЕННОЙ ГАЗИФИКАЦИЕЙ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ

Мессерле В.Е. [1,2], Моссэ А.Л. [3], Устименко А.Б. [4,5], Баймулдин Р.В.[4]
[1] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2] Институт проблем горения МОН РК, г. Алматы, Казахстан
[3] Институт тепло-массообмена им.А.В.Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь
[4] НИИ экспериментальной и теоретической физики КазНУ им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан
[5] ТОО Плазматехника R&D, г. Алматы, Казахстан

В настоящей работе представлены результаты термодинамического анализа и экспериментов по получению высококалорийного синтез-газа плазменной газификацией углеродсодержащих твердых отходов (УТО). Расчеты плазменной газификации УТО выполнены с использованием программы TERRA. Максимальный выход синтез-газа при плазменной газификации УТО в воздушной и паровой средах достигается при температуре 1600К. При воздушно-плазменной газификации УТО может быть получен высококалорийный синтез-газ с концентрацией 82.4% (CO – 31.7%, H_2 – 50.7%), а при паро-плазменной газификации - с концентрацией 94.5% (CO – 33.6%, H_2 – 60.9%). Удельная теплота сгорания синтез-газа, полученного при воздушной газификации составляет 3410 ккал/кг, а при паровой – 4640 ккал/кг. При оптимальной температуре (1600 К) удельные энергозатраты на воздушную газификацию УТО составляют 1.92 кВт ч/кг, а на паровую газификацию – 2.44 кВт ч/кг. Этот высококалорийный газ может быть использован в качестве рабочего тела газо-турбинных и газо-поршневых установок для генерирования электроэнергии.

Экспериментальные исследования газификации УТО выполнены на установке, основными элементами которой являются высокоресурсный плазмотрон постоянного тока номинальной мощностью 70 кВт и реактор периодического действия производительностью по УТО до 30 кг/ч [1]. Процесс плазменной газификации брикетированных или пакетированных отходов осуществляется в реакторе при среднемассовой температуре до 1600 К. В состав экспериментальной установки кроме реактора с плазмотроном входят системы электроснабжения и управления плазмотроном, а также системы газо- и водоснабжения реактора с плазмотроном, и система очистки отходящих газов. Установка снабжена системой отбора газообразных и конденсированных продуктов процесса газификации УТО для проведения их анализа.

Время полного цикла переработки УТО составляет 30 мин. В качестве газифицирующего агента использовался плазмообразующий газ - воздух с расходом 12 кг/ч. Под воздействием воздушного плазменного факела органическая часть УТО газифицировалась, а неорганическая часть плавилась и скапливалась в зоне шлакообразования реактора.

Получен газ следующего состава, об.%: CO – 26.5, H_2 – 44.6, N_2–28.9. Расхождение между экспериментом и расчетом по составу синтез-газа не превышает 16%. В газообразных и конденсированных продуктах плазменной газификации УТО вредных примесей не выявлено.

Экспериментально установлено, что в плазменном реакторе камерного типа при оптимальной температуре удельные энергозатраты на воздушную газификацию УТО составляют 1.92 кВт ч/кг, а на паровую газификацию – 2.44 кВт ч/кг. Технология плазмохимической газификации углеродсодержащих отходов и установка для ее реализации представлены на ЭКСПО-2017 (Астана) [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан (ПЦФ BR05236507 и BR05236498).

Список литературы

1. Messerle V.E., Mosse A.L., Ustimenko A.B. Processing of biomedical waste in plasma gasifier // Waste Management. – 2018. – V. 79. – P. 791–799.
2. Мессерле В.Е., Моссэ А.Л., Устименко А.Б. Плазмохимическая переработка углеродсодержащих отходов с получением энергетического газа. Энергия будущего: инновационные сценарии и методы их реализации: материалы Всемирного Конгресса инженеров и ученых (19-20 июня, 2017, Астана, Казахстан). Под общ. ред. акад. Н.А. Абыкаева, Б.Т. Жумагулова. - Т.2. – Алматы, 2017. – С. 226-233.

FUEL ADDITIVES FOR EFFICIENCY IMPROVING OF SOLID FUEL INCINERATION

Messerle V.E.[1,2], Paskalov G.[3], Umbetkaliev K.A.[2], Ustimenko A.B.[2,4]
[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia
[2] Combustion Problems Institute, Almaty, Kazakhstan
[3] Three Hats LLC, Nevada, USA
[4] Institute of Experimental and Theoretical Physics, Almaty, Kazakhstan

Fuel additives based on light ethers increase the efficiency of combustion of liquid fuels. In this paper, the effect of such fuel additives on the combustion efficiency of solid fuels on the example of combustion of Ekibastuz coal was studied. Experiments were carried out as following. On warming and getting required temperature (900oC) of the combustor wall plasma torch was turned off. Thereafter pulverized coal and air were fed to the combustor with consumption 10 and 70 kg/h correspondingly. The gaseous products exit the gas and slag separation chamber and flow into the cooling chambers. Then gaseous products are exhausted to ventilation. Duration of the experiments was 1 hour. That is quite enough for all meters fulfilment and testing of the material and heat balance of the coal combustion. The dust of Ekibastuzski bituminous coal was used in the experiments. The sieve analysis of it revealed that mean size of the coal dust particles was 75 μm. It corresponds to the sieve residue R90=25% characterising milling finesse.

As a result of the coal combustion carbon conversion degree Xc and mass-averaged temperatures Tav were revealed. After starting-up and adjustment work two test experiments on the coal combustion in air and in oxygen-enriched air were carried out. A complex of numerical and experimental studies of high-ash coal incineration in a specially designed combustion chamber with coal consumption of up to 10 kg/h, air flow up to 62 kg/h, and oxygen flow up to 20 kg/h allowed estimating the effectiveness of the fuel additives Omstar -DX1 and Open Flame [1]. During the tests 28 adjustment experiments and 26 serial comparative tests coal burning without the use of additives and by using additives of different weight ratio additive: carbon (0 - 5 ml/kg of coal) were conducted. As a result of commissioning tests consumption of coal and oxidant flow (air + oxygen) required for complete coal burning-out in the compact experimental combustion chamber were identified. The adjustment tests have shown that the fuel additives increase the flame temperature at the exit of the combustor and reduces the concentration of unburnt carbon in the ash and slag of combustion products by 1-2%. Research results show that increasing the concentration of the additive Omstar -DX1 to 1.5 ml/kg of coal increases the temperature of the wall of combustion chamber, and therefore the flame, but has little effect at change in the measured concentrations of the gaseous products of combustion (SO2, NO, CO, CO2). At concentration of the additive 2 ml/kg of coal a slight decrease of SO2, CO, CO2, and a noticed decrease in the concentration of NO were recorded. The additive is beginning to have a significant impact on the efficiency of burning low-grade coal from 2.5 ml/kg of coal. The greatest influence of the additive on the effectiveness of coal combustion was recorded at a concentration of the additive Omstar -DX1 5 ml/kg of coal. For control tests concentration of both additives (Omstar -DX1 and Open Flame) was chosen 2.5 ml/kg of coal. In the framework of the tests of burning low-grade coal, both additives showed a similar efficacy. The degree of carbon conversion (Xc), which characterizes the completeness of burnout coal, is quite high when using both additives. Xc varies in the range of 95.1 - 96.9%. Tendency to increase the degree of coal conversion with increasing concentration of additives is revealed. From the experiments it follows that the use of Omstar -DX1 and Open flame fuel additives results in a significant increase in the efficiency of burning low-grade coal while reducing NOx and SO2 emissions. So, there is an increase in the completeness of coal combustion, which is manifested in an increase in the concentration of CO2 by 25%, and a decrease in the concentration of CO by 89%. In the process of coal combustion, the concentration of nitrogen oxides decreases by 47% and sulfur oxides by 5%. Taking into account the positive results of the tests of efficiency of the fuel additives in combustion of low-grade high-ash coal, we consider it expedient to test their effect on burning high-grade coal in test-bench conditions, and then go to the industrial testing fuel additives in thermal power plants.

The scientific work was supported by Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan in the form of grants (AP05130731 and AP05130031).

References

1. Morton Z. Fainman. Fuel Additive. USA Patent #4920691, May 1, 1990.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПАДА ПЛЕНКИ КЕРОСИНА В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ НИЗКОНАПОРНОЙ ФОРСУНКИ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ ОБЪЕМА ЖИДКОСТИ

Мингалев С.В., Гомзиков Л.Ю., Сипатов А.М., Абрамчук Т.В.
АО «ОДК-Авиадвигатель», 614010, г. Пермь, пр. Комсомольский, 93

Особенностью разработки современных двигателей является переход к использованию низконапорных форсунок, в которых топливо подается под небольшим давлением. Распад струи топлива в этом случае происходит в результате взаимодействия с высокоскоростным потоком воздуха. Это приводит к тому, что место первичного распада струи на капли и их вторичного дробления смещается в зависимости от конструктивных особенностей камеры сгорания и конкретного режима, на котором она работает. Помимо этого, также меняются и конечные размеры капель. Переход к использованию низконапорных форсунок потребовал разработки подходов, учитывающих первичный распад пленки топлива и вторичное дробление капель.

В настоящей работе исследовались особенности моделирования образования облака капель керосина методом объема жидкости в проточной части форсунки (рис. 1) в трех постановках: квазидвухмерной осесимметричной (размеры ячеек сетки – 25, 12.5, 6.25, 3.125, 1.5625, 0.78125 мкм), в секторе в 5^0 (25, 12.5, 6.25 мкм) и в трехмерной полной постановке (50 и 25 мкм). Течение на входе в расчетную область считалось осесимметричным во всех трех случаях. Через входы 1 и 2 подавался закрученный около оси симметрии воздух (плотность 13.2 кг/м^3). Вблизи стенки через вход 2, движется пленка керосина (плотность 788 кг/м^3).

Исследование в трехмерной полной постановке показало, что при уменьшении размера сетки количество образующихся струек керосина, срывающихся с пленкообразующей поверхности, увеличивается с примерно 30 до примерно 70. При этом радиус основания одной струйки уменьшается со 150-200 мкм до 75-100 мкм, т.е. их размеры оказываются сопоставимы с размерами ячеек. Это показывает, что получить достоверное значение для размеров капель из этих расчетов не удастся.

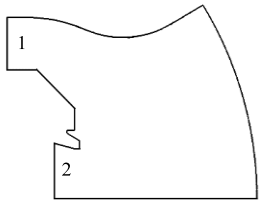


Рис.1. Геометрия задачи

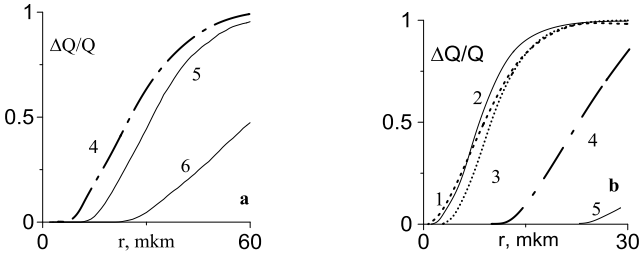


Рис. 2. Зависимость части полного массового расхода капель от максимального их размера в случае сектора размером 5^0 (a) и 2d геометрии (b) для сетки с размером 0.78125 (1), 1.5625 (2), 3.125 (3), 6.25 (4), 12.5 (5) и 25 (6) мкм

В случае расчета в секторе размером 5° при 50 мкм воспроизводится распад пленки на 72 струйки. При уменьшении размера ячейки распад пленки начинает происходить по более сложному сценарию, в котором присутствует образование струек керосина, а также истончение пленки с последующим отрывом её части. На рис. 2a показана зависимость части полного расхода керосина, которая формируется за счет капель с радиусом меньше заданного, от этого радиуса. Из рис.2a можно сделать вывод о том, что сетка ещё недостаточно мелкая и требуется дальнейшее её дробление, хотя в целом характер зависимости при уменьшении размера ячеек сетки от 12.5 до 6.25 мкм уже не меняется. Исследование на более мелкой сетке проводилось уже в квазидвухмерной осесимметричной постановке. Как следует из рис. 2b достигнуть пренебрежимо слабой зависимости от размеров ячеек удалось при размере ячеек порядка 1.5 мкм. При этом средний радиус капель оказался примерно равен 10 мкм, т.е. размер ячейки сетки необходимо было взять в 6 раз меньше, чем средний размер капель.

РАСЧЕТ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ВЗВЕСИ ПОРОШКА АЛЮМИНИЯ В ВОЗДУХЕ

Моисеева К.М., Крайнов А.Ю.
Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Работа посвящена расчету видимой и нормальной скорости горения порошка алюминия в воздухе. Целью расчетов являлось определение зависимости скорости горения аэровзвеси порошка алюминия от размера и массовой концентрации частиц алюминия.

Физико-математическая постановка задачи основывается на работах [1 – 3]. Предполагается, что в воздухе равномерно распределена взвесь порошка алюминия с начальными значениями массовой концентрацией частиц ρ_{kb} и радиуса частиц $r_{Al,0}$. На левой границе области расположен очаг зажигания. Правая граница области полагается бесконечно удаленной от источника зажигания. Скорость гетерогенной химической реакции на частицах описывается с учетом массоотдачи. Прочие допущения математической модели соответствуют работам [1 – 3]. Метод решения соответствует работе [1]. Математическая постановка задачи определяется системой уравнений, записанной в одномерной декартовой системе координат, и состоящей из уравнений неразрывности для газа, сохранения импульса и энергии для газа и частиц, баланса массы кислорода и частиц в смеси, уравнений счетной концентрации частиц и состояния газа.

В расчетах варьировался начальный радиус частиц алюминия и массовая концентрация порошка алюминия в воздухе. Расчеты были выполнены для монодисперсной и бидисперсной взвеси порошка. Целью расчетов являлось определение видимой и нормальной скорости горения порошка алюминия. На рис. 1 – 2 представлены примеры полученных результатов. Видно, что увеличение массовой концентрации порошка алюминия приводит к увеличению скорости горения аэровзвеси в плоскости. Увеличение радиуса приводит к уменьшению видимой скорости горения порошка.

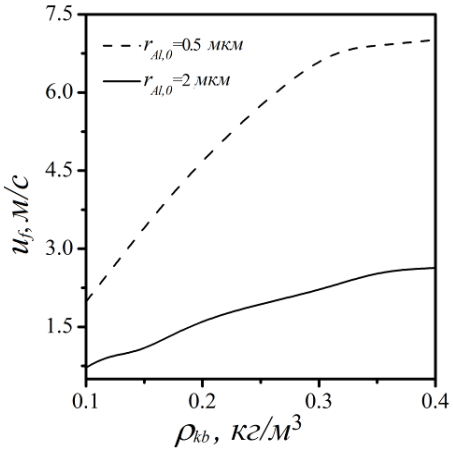


Рис. 1. Зависимость видимой скорости горения монодисперсной аэровзвеси порошка алюминия от начальной массовой концентрации порошка

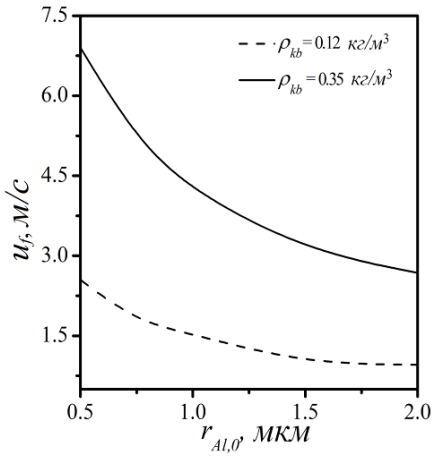


Рис. 2. Зависимость видимой скорости горения монодисперсной аэровзвеси порошка алюминия от радиуса частиц алюминия

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20011).

Список литературы

1. Моисеева К. М., Крайнов А. Ю. Численное моделирование искрового зажигания аэровзвеси угольной пыли// Физика горения и взрыва. – 2018. – Т. 54, № 2. – С. 61–70.
2. Беляев А. Ф., Фролов Ю. В., Коротков А. И. О горении и воспламенении частиц мелкодисперсного алюминия// Физика горения и взрыва. – 1968. – Т. 4, № 3. – С. 323–329.
3. Порязов В. А. Влияние дисперсности частиц алюминия на скорость горения металлизированных смесевых твердых топлив// Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2015. - №1 (33). – С. 96 – 104.

РАСЧЕТ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ АЭРОВЗВЕСИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

Моисеева К.М., Крайнов А.Ю.
Томский государственный университет, г. Томск, Россия

В настоящей работе на основе подходов и результатов [1 – 3] с использованием экспериментальных данных [4] решена задача о скорости распространении фронта горения по аэровзвеси угольной пыли. Целью исследования являлось определение влияния состава взвеси угольной пыли (размера и массовой концентрации частиц пыли во взвеси, а также содержания летучих компонент) на скорость распространения фронта горения по аэровзвеси.

Физико-математическая постановка задачи основывается на работах [1 – 3]. Предполагается, что в воздухе равномерно распределена взвесь угольной пыли с массовой концентрацией частиц ρ_{kb}, размером частиц r_k, содержанием летучих компонентов V^C; объемная доля частиц мала. На левой границе области расположен очаг зажигания толщиной x_0. Коэффициенты диффузии и теплопроводности газа зависят от температуры. На поверхности частиц протекает гетерогенная реакция первого порядка по кислороду. Скорость гетерогенной химической реакции на частицах описывается с учетом массоотдачи. Выход летучих компонентов из частиц задается реакцией первого порядка по закону Аррениуса. Выделившиеся летучие переходят в газ и способны к химическому реагированию с окислителем. Скорость гомогенной реакции между газообразными летучими и кислородом определяется реакцией второго порядка по закону Аррениуса (первой по кислороду и горючему). Учитывается тепловое и динамическое взаимодействие между частицами и газом. Математическая постановка задачи для заданных допущений определяется системой уравнений, записанной в декартовой системе координат.

Метод решения похожей задачи подробно описан в [3], где с использованием метода С. К. Годунова была решена задача о критических условиях искрового зажигания аэровзвеси угольной пыли. В настоящей работе решалась задача об определении скорости горения аэровзвеси угольной пыли, при этом начальное условие (очаг зажигания) задавалось таким образом, чтобы с одной стороны обеспечить достаточное количество энергии для зажигания аэровзвеси, с другой стороны не внести большого количества тепловой энергии в облако пыли. В расчетах варьировался размер частиц, $r_k = 5\cdot10^{-7} \div 5\cdot10^{-6}$ *м*, массовая концентрация взвеси частиц, $\rho_{kb} = 0.2 \div 0.4$ *кг/м*^{3} (соответствующая объемная доля $1.43\cdot10^{-4} \div 2.86\cdot10^{-4}$), процентное содержание летучих компонентов в частицах, $V^C = 0.1 \div 0.4$. Расчет каждого варианта продолжался до установления стационарного режима распространения пламени. Видимая скорость перемещения фронта горения определялась по изменению координаты x, в которой значение парциальной плотности окислителя ρ_{O2} составляло 0.01 от начального значения, $\rho_{O2} = 0.01\rho_{O2,b}$. Нормальная скорость горения определялась как разность между видимой скоростью горения аэровзвеси угольной пыли и скоростью движения газа.

Из расчетов было определено, что чем меньше размер частиц, тем выше видимая скорость распространения фронта горения. Увеличение процентного содержания летучих в частицах приводит к уменьшению видимой скорости распространения фронта горения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-33-60091 мол_а_дк.

Список литературы

1. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987.
2. Krainov A. Yu., Moiseeva K. M. Modeling of the flame propagation in coal-dust- methane air mixture in an enclosed sphere volume// Journal of Physics: Conference Series. – 2016 – V. 754, 052003.
3. Моисеева К. М., Крайнов А. Ю. Численное моделирование искрового зажигания аэровзвеси угольной пыли// Физика горения и взрыва. – 2018. – Т. 54, № 2. – С. 61–70.
4. Бойко Е. А. Реакционная способность энергетических углей: монография. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Мурко В.И.[1)], Баранова М.П. [2)]
[1)] ЗАО Научно–производственное предприятие «Сибэкотехника», Новокузнецк, Россия
[2)] ФГБОУ ВО «Красноярский ГАУ», Красноярск, Россия

Представлены результаты испытаний комплексной топливной присадки - интенсификатора процесса горения на угольном котле КВ-р-11.63-115. Зафиксировано повышение к.п.д. брутто котельного агрегата на 5,1% (абс.) при соответствующем снижении расхода условного топлива на выработку единицы тепловой энергии.

Применение интенсификатора позволило решить проблему очистки экранных труб от слоя натрубных отложений и изменению структуры образующегося при сгорании угля шлака, который стал более однородным и без очагов агломерации [1].

Результаты работы котла на разных мощностях представлены в таблице.

Таблица 1. Показатели эффективности сжигания угля без присадки и с присадкой при работе котла на разных мощностях

Теплопроизво-дительность, Гкал/ч	Параметры работы котла (с присадкой/без присадки)	к.п.д. брутто по режимной карте, %			
	Потери с мех.недожогом, q4, %	Содержание горючих, %	к.п.д. брутто, %		
		В шлаке	В золе уно		
2-3	10.7 / 20.8	31.4 / 46.2	49.9 / 60.1	63.0 / 60.0	62.0
3-4	9.6 / 18.6	30.2 / 44.6	45.2 / 60.0	61.8 / 60.0	64.7
4-5	5.9 / 8.6	18.2 / 24.4	43.5 / 53.4	68.8 / 68.1	65.2
5-6	7.0 / 9.0	18.8 / 25.3	46.1 / 53.5	71.4 / 69.1	65.0
6-8	6.8 / 10.1	17.8 / 29.0	47.1 / 51.2	75.2 / 70.1	64.4

Список литературы

1. Мурко, В.И. Результаты испытаний топливной присадки на котле со слоевым сжиганием угля / В.И. Мурко, В.И. Карпенок, В.И. Федяев, Д.А. Черных // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2017, 10 (8) 993‑999.
2. Б.С. Белосельский. Применение присадок многофункционального действия к топочным мазутам, сжигаемым на электростанциях // (МЭИ-ТУ) "Новое в российской электроэнергетике" - № 10, 2005 г.
3. Coal combustion catalyst. Coal-CC919L (Liquid) // Report TDS paper.- 2007. – p. 7.
4. Smyrniotis Chris R. Slag inhibition success utilizing targeted in-furnace injection at a PRB coal burning utility boiler // World of Coal Ash (WOCA) Conference "Science, Applications and Sustainability, Lexington, Ky, Apr. 11-15, 2005: Proceedings. Lexington (Ky): Univ. Kentucky Cent. Appl. Energy Res.; Lexington (Ky): Amer. Coal Ash Assoc.. 2005, p. 35-57.
5. Cheng Jun, Zhou Jun-hu, Liu Jian-zhong, Fan Hong-yu, Cao Xin-yu, Li Zhen-yu, Cen Ke-fa, Zhongguo dianji gongcheng xuebao // Institute for Thermal Power Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027 - Proc. Chin. Soc. Elec. Eng.. 2002. 22, N 9, p. 128-131.
6. Жуйков А.В., Растопка котлов средней мощности при конвективном нагреве угольной пыли/ А.В. Жуйков, В.А. Кулагин, М.П. Баранова, Д.О. Глушков// Теплоэнергетика – 2016. – № 12. – С. 42 –47.

ГОРЕНИЕ ПЛЕНОК ЖИДКОГО ТОПЛИВА В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Намятов И.Г., Коржавин А.А.
Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Ранее был исследован механизм распространения пламени над поверхностью тонкой (около 5-10 мкм) пленки топлива, нанесенного на металлическую подложку. Было получено, что основным механизмом передачи тепла в предпламенную зону является кондуктивная передача тепла по подложке за счет ее высокой теплопроводности. В результате этого эффекта в предпламенной зоне испаряется топливо, которое, перемешиваясь с окислителем, создает горючую смесь, создавая тем возможность продвижения пламени вперед. Характерная величина скорости пламени в этом случае составляет около 2 см/с [1]. Скорость передачи тепла в подложку зависит от размеров и положения пламени в пространстве. В работе [2] изложено теоретическое исследование диффузионного горения над пленкой жидкого топлива. Рассчитаны длина и форма пламени, результаты теоретических расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

При изменении внешних условий (например, состав и давление атмосферы, другой материал положки) механизм и характер распространения пламени может изменяться. Были проведены эксперименты с подложками с низкой теплопроводностью. В этих условиях топливо перед пламенем не может прогреваться за счет теплопередачи по подложке. Другой механизм передачи тепла в предпламенную зону - эффект Марангони, движение жидкости за счет изменения силы поверхностного натяжения в градиенте температуры. Жидкость движется из горячей зоны в холодную, тем самым перенося тепловую энергию. Скорости распространения пламени над пленкой бутанола-1, нанесенного на полосу полиэтилентерефталата, толщиной 50 мкм, составляет 2,5 см/с. Экспериментально было показано, что жидкость под фронтом пламени движется с той же скоростью, что и пламя.

В работе [3] исследовалось распространение пламени над слоем жидкости в атмосфере обогащенной кислородом. Показано, что пламя над слоем н-бутанола, толщиной около 1 мм, может распространяться с высокой скоростью до 1 м/с и более. В наших экспериментах проводились измерения скорости распространения пламени по тонкой пленке топлив в атмосфере кислорода, в качестве подложек были использованы: медная фольга толщиной 40 и 60 мкм и стекло. Скорость пламени над пленками декана и бутанола-1, нанесенными на стекло составляла около 110 и 220 см/с, соответственно, что близко к результатам [3], не смотря на другую толщину слоя топлива. При использовании медной подложки толщиной 60 мкм величины скорости пламени были следующими: бутанол-1 – 185 см/с, декан – 110 см/м, ундекан – 62 см/с. При таких скоростях пламени влияние теплопроводности и теплоемкости подложки незначительно. Возможно, что в этом случае в жидком топливе образуются большие градиенты температуры, при которых, за счет эффекта Марангони, могут возникать высокие скорости движения жидкости, позволяющие обеспечить тепловой поток в предпламенную зону, достаточный для распространения пламени.

Список литературы

1. И.Г.Намятов, С.С.Минаев, В.С.Бабкин, В.А.Бунев, А.А.Коржавин. Диффузионное горение пленки жидкого топлива на металлической подложке. //ФГВ, 2000, т 36, No 5, с 12-21.
2. А. А. Коржавин, И. Г. Намятов. О форме пламени при диффузионном горении пленки жидкого топлива на подложке. // ФГВ, 2015, т. 51, N- 5, с. 3-12.
3. V.V. Zamashchikov, A.A. Korzhavin, E.A. Chinnov. Combustion of liquid fuel in the flat micro- and minichannels// International Journal of Heat and Mass Transfer 102:470-478 · November 2016, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.043

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОКСОВОГО ОСТАТКА ПАРОВОЗДУШНОЙ КОНВЕРСИИ УГЛЯ ДЛЯ ГАЗООЧИСТКИ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Никитин А.Д., Худякова Г.И., Осипов П.В., Рыжков А.Ф.
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

Активированный уголь (АУ) широко применяется в качестве сорбента для очистки газов и жидкостей в различных отраслях промышленности. На основе АУ промышленно освоена очистка дымовых, природных и синтез-газов от соединений серы. В стадии промышленных испытаний находятся технологии очистки дымовых газов тепловых электростанций от ртути. Для перспективных парогазовых установок с внутрицикловой газификацией угля (IGCC) разрабатывается очистка синтез-газа от соединений ртути и мышьяка при повышенных температурах. Очистка синтез-газа важна как с экологической точки зрения (уменьшение выбросов токсичных веществ), так и в технологическом аспекте – для предотвращения коррозии и увеличения срока службы газовой турбины. Отдельным направлением применения АУ является улавливание CO_2, что позволяет улучшать качество синтез-газа с одновременным получением чистого CO_2 для использования в промышленности.

Один из основных способов производства АУ – это частичная паровая конверсии угля. В результате реакций с паром в коксовом остатке образуется большое количество микропор. Применение паровоздушного дутья позволяет интенсифицировать процесс конверсии. За счет реакции с кислородом в коксовом остатке образуются мезо- и макропоры, которые увеличивают доступность микропор, что положительно влияет на сорбционные свойства. Целью данной работы является определение температурного диапазона применения косового остатка паровоздушной конверсии для очистки синтез-газа на IGCC.

Исследуемый коксовый остаток получен в результате частичной паровоздушной конверсии древесного угля в слоевом лабораторном реакторе при 900°С. Соотношение воздух–пар в дутье составляло 1:4. Для данной работы выбран остаток со степенью конверсии 0,5.

На первом этапе проведено исследование термической устойчивости коксового остатка в способных к химическому взаимодействию с ним компонентах синтез-газа (H_2O, CO_2 и H_2). Исследование проводилось на приборе термогравиметрического анализа NETZSCH STA 449F3. Навеска массой 30 г нагревалась до 950°С со скоростью 10°С/мин. Для получения полных данных о термической устойчивости дополнительно проведены опыты в инертной и окислительной средах (аргон и воздух).

В результате нагрева в инертной среде выявлена десорбция остаточного CO_2 в диапазоне температур от 450 до 600°С, составляющая 2% от начальной массы навески. Граница термической устойчивости исследуемого коксового остатка в окислительной среде находится около 380°С, в H_2O – 550°С, в CO_2 – 650°С, H_2 – 850°С. Таким образом, использование коксового остатка для горячей очистки синтез-газа возможно при температурах до 550–600°С.

Сравнение полученных кривых убыли массы показало наличие сорбции CO_2 в диапазоне температур до 250°С. Проведены дополнительные исследования, в ходе которых осуществлялся ступенчатый нагрев сухой навески от 25 до 650°С со скоростью 5°С/мин с изотермическими участками по 30 мин при 25, 100, 150 и 200°С. Полученные данные позволили определить емкость коксового остатка при сорбции CO_2 в различных температурных интервалах. Для интервала 25–100°С емкость составила 6% от массы навески, для интервала 100–200°С – 1,3%.

На втором этапе планируется определить поглощающую способность коксового остатка паровоздушной конверсии при очистке от серы и ртути. Планируется ступенчатый нагрев навески в приборе NETZSCH STA 449F3 от комнатной температуры до полученной температуры устойчивости при подаче H_2S и паров ртути в аргоне. На каждой ступени будет осуществляться выдержка в течение 30 мин. По полученным данным будет определена поглощающая способность для различных температурных диапазонов газоочистки и выбраны оптимальные температуры сорбции и десорбции подлежащих очистке веществ.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОРГАНОВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ С ДОБАВКАМИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

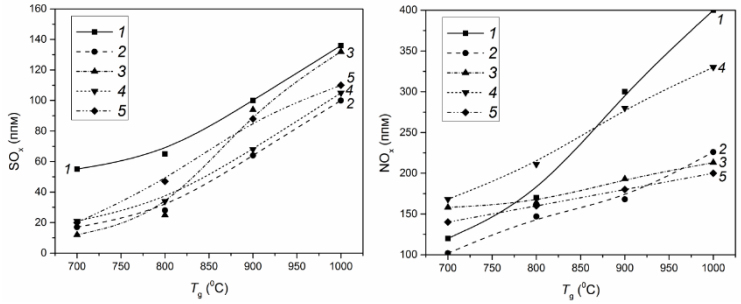
Няшина Г.С.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

В настоящее время в структуре энергопотребления посредством сжигания угля топлив производится более 39% объема мировой электроэнергии. Широкое использование ископаемого топлива привело к глобальному загрязнению окружающей среды и изменению климата, а также к проблемам экологической деградации и опасности для здоровья людей.

Для снижения экологической нагрузки сегодня проводится большое количество исследований в направлении смешения растительного и угольного топлива. Преимущества совместного сжигания угольного топлива с биомассой для производства энергии заключаются в использовании возобновляемых источников энергии с низким уровнем затрат, вовлечении в процессы генерации энергии неиспользуемых отходов.

Одним из перспективных направлений совместного использования растительного топлива и угля является создание на их основе водоугольных (ВУТ) и органоводоугольных (ОВУТ) топлив, внедрение которых обеспечит сбережение энергетических и материальных ресурсов, а также окружающей среды. В качестве угольной горючей составляющей могут использоваться низкосортные угли, угольные, отходы углеобогатительных фабрик – фильтр-кеки. Жидкие горючие компоненты ОВУТ – отработанные индустриальные масла, нефтяные шламы. В качестве растительных добавок ОВУТ могут использоваться наиболее типичные отходы сельскохозяйственной и деревообрабатывающей отраслей (опилки, кора, солома и другие).

Эксперименты показали (рис. 1), что концентрации основных антропогенных выбросов (NO_x и SO_x), полученных при сжигании ОВУТ с растительными компонентами лежат в одном числовом диапазоне равном 10–120 ппм для окислов серы и 15–300 ппм для оксидов азота, что до 3 раз ниже чем для угля, и до 2 раз ниже чем для ОВУТ без добавок. В процессе сжигания высвобождаются соединения металлов, присутствующих в большом количестве в растительных отходах. Соединения вступают в реакции с окислами серы и образуются вещества, которые остаются в угольной золе и вносят вклад в реакции удержания серы.



а *б*

Рис. 1. Экспериментальные зависимости концентраций SO_x (*а*) и NO_x (*б*) от температуры в камере сгорания при варьировании типа растительных отходов в суспензиях ОВУТ: 1 – фильтр-кек «К» 90%, отработанное турбинное масло 10%; 2 – фильтр-кек «К» 80%, отработанное турбинное масло 10%, лиственный и хвойный опад 10%; 3 – фильтр-кек «К» 80%, отработанное турбинное масло 10%, солома 10%; 4 – фильтр-кек «К» 80%, отработанное турбинное масло 10%, водоросли 10%; 5 – фильтр-кек «К» 80%, отработанное турбинное масло 10%, отходы подсолнечника 10%.

Таким образом, скомпенсировать присутствие жидкой горючей составляющей в суспензиях ОВУТ, снизив концентрации SO_x и NO_x, можно за счет добавления в состав даже небольшого количества (5–15 % масс) твердых растительных отходов агропромышленного комплексов. С учетом географических и экономических особенностей региона можно определить компонент из представленных для получения требуемых экологических показателей.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОЧНОГО ПРОЦЕССА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КОТЛОВ С КС-НТВ СЖИГАНИЕМ УГЛЯ

Обухов И.В., Обухов А.И.
ООО Инжиниринговая компания «ДВ-Энерго», г. Владивосток, Россия

Одним из перспективных решений, позволяющим обеспечить экономичное и надежное сжигание разномарочных углей является применение КС-НТВ технологии сжигания, сочетающей кипящий слой в нижней части топочной камеры, вихревой факел с горизонтальной осью вращения в надслоевом пространстве топки и дожигание крупных частиц топлива в слоевом режиме на узкой подвижной наклонной воздухораспределительной решетке [1]. Опыт эксплуатации КС-НТВ котлов показывает, их эффективной работы на различных по качеству углях (влажность 18…42 %, зольность 5…32%, теплотворная способность 7,08…23,97 МДж/кг) без изменения конструкции топочного устройства.

Проведенные ранее исследования теплообмена в топках КС-НТВ котлов показали [2] возможность решения, на основе данной технологии, задачи создания форсированного топочного устройства, с тепловым напряжением топочного объема до 500 кВт/м^3 , что является важным для минимизации металлоемкости и габаритов котельной установки. Установлено, что при сжигании павловского и бородинского углей в топках КС-НТВ котлов, при теплонапряжении топочного объема до 480 кВт/м^2 , максимальная величина падающих тепловых потоков и температуры газов на выходе из топки не достигают критических значений, при которых появляется шлакование радиационных поверхностей нагрева, фестона и пароперегревателя. Основным фактором, ограничивающим дальнейшее повышение тепловой нагрузки топки, является рост механического недожога.

С целью изучения условий горения угля и разработки конструктивных решений по улучшению выгорания топлива проведено исследование газового состава топочной среды и натурное исследование аэродинамики топок котлов КЕ-25-225-БФ и КВТФ-29-150 при холодных продувках и в огневых условиях.

Измерения скорости при холодных продувках осуществлялись с помощью трубки Прандтля и чашечных анемометров, укрепленных на длинных жезлах. Измерения скорости дымовых газов при работе котла под нагрузкой осуществлялись при помощи охлаждаемого трехточечного цилиндрического зонда с головкой диаметром 0.04 м, длиной жезла 4 м, тарировочный коэффициент центрального отверстия - 0.965, суммарный коэффициент центрального и бокового отверстия - 0.9, и дискового зонда диаметр диска 0,08 м, ширина 0,04 м, длина жезла 2 м. Для отбора газов для анализа его состава применялся газоотборный водоохлаждаемый зонд с четырьмя каналами для отбора газов.

В результате проведенных исследований получены поля скоростей и концентраций газовой фазы в топках котлов, определены границы характерных зон факела. На основании полученных данных разработаны технические рекомендации, реализация которых позволила повысить полноту выгорания топлива. Проведенные исследования использованы при разработке конструкции нового котла мощностью 40 МВт.

Список литературы

1. Обухов И. В. //Разработка и внедрение технологии КС-НТВ сжигания угля для котлов малой и средней мощности / И. В. Обухов, Д. Е. Целяк, И. В. Коломеец. // Тезисы докладов VIII Всероссийской конференции Горение твердого топлива. - Новосибирск. 2012. Изд-во института теплофизики СО РАН, 2012 – с. 95.
2. Обухов И. В. //Экспериментальное исследование теплообмена при сжигании угля в КС-НТВ топках./ И.В.Обухов, Д.Е. Целяк, В. М Дьячек, А. И.Обухов// Тезисы докл. IX Всерос. Конф. с междунар. участием Горение топлива: теория, эксперимент, приложения. – Новосибирск: Изд-во института теплофизики СО РАН, 2015 – с. 105.

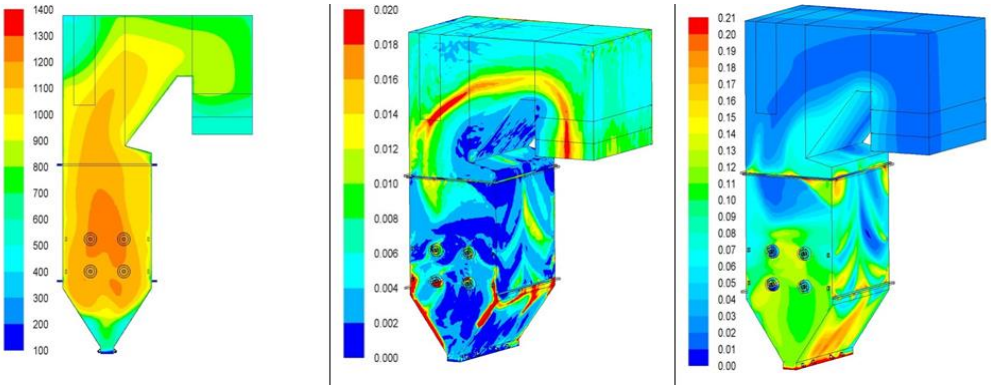
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТОПОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФАКЕЛЬНОМ СЖИГАНИИ УГЛЯ В ТОПКЕ КОТЛА ПК-38 НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Орлик Е.В.[1)], **Межов Е.А.**[1)], **Цепенок А.И.**[1)], **Кврившвили А.Р.**[2)]
[1)] ООО «ЗиО-КОТЭС», г. Новосибирск, Россия
[2)] АО «Подольский машиностроительный завод», г. Подольск, Россия

В 2016 и 2017 годах АО «Подольский машиностроительный завод (АО «ЗиО»)» совместно с ООО «ЗиО-КОТЭС» реализовали проекты реконструкции котлов ПК-38 №3А, 4Б «Назаровской ГРЭС» с повышением нагрузки до номинальной 270 т/ч, что потребовало реализации целого ряда технических решений [1]:

- перевод на газовую сушку топлива с установкой дымососов рециркуляции газов с отбором газов из конвективной шахты при сохранении существующих молотковых мельниц;
- замена существующих гравитационных сепараторов мельниц на новые инерционные сепараторы с регулируемой тониной помола топлива;
- установка новых вихревых горелок в два яруса на боковых стенах топочной камеры по встречной схеме, а также сопел пристенного и нижнего дутья;
- установка дополнительного пакета пароперегревателя - топочных ширм;
- демонтаж верхнего куба трубчатого воздухоподогревателя; установка новых аппаратов паровой обдувки ширм и водяной обдувки топки.

Отработка конструкции топочно-горелочных устройств и режимов горения, а также оценки по эмиссии NOx проводились при активном использовании трехмерного CFD-моделирования. На стадии моделирования оптимизировались топливно-воздушные балансы топочно-горелочных устройств и их конструктивно-компоновочные решения по условиям обеспечения минимальной температуры на выходе из топки, равномерного поля температур по сечению топки, минимального механического недожога и выбросов оксидов азота.



Поле температур, концентрация дискретной фазы и объемная доля O_2

По результатам реализации проекта выбросы оксидов азота при номинальной нагрузке котла составляют 350…470 мг/нм^3 (в зависимости от содержания кислорода в аэросмеси), тогда как до реконструкции уровень загрязнений NOx достигал 800 мг/нм^3. Улучшение топочного процесса позволило снизить температуру газов на выходе из топки до $T''_т \leq 1060°C$ при сохранении механического недожога топлива q4 ~ 0,6 %, что сняло проблему чрезмерного шлакования ширмовых и конвективных поверхностей топки.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ ИЗОМЕРНЫХ МЕТИЛОВЫХ И ЭТИЛОВЫХ ЭФИРОВ НА СТРУКТУРУ ПЛАМЕНИ МОДЕЛЬНОГО ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

Осипова К.Н.[1),2)], Шмаков А.Г.[1),2)], Большова Т.А.[1)]

[1)] Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, Новосибирск, Россия

[2)] Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Ввиду истощения запасов нефти и необходимости сокращения вредных выбросов двигателей особенно актуальной задачей является поиск альтернативных источников топлива. Использование биотоплива позволяет решить эти проблемы. К биотопливу относят спирты и биодизель. Основным преимуществом биодизеля перед спиртами является то, что его использование не требует существенного изменения конструкции двигателей. Биодизель состоит из метиловых и этиловых эфиров жирных кислот. Однако биодизель на основе этиловых эфиров является более привлекательным, так как полностью получается из возобновляемых компонентов, поскольку используемый для производства этиловых эфиров этанол также получается из растительного сырья.

Цель работы состоит в изучении влияния добавки изомерных этиловых и метиловых эфиров – этилпентаноата (EPe) и метилгексаноата (MHe) - на химическую структуру пламени модельного дизельного топлива.

В качестве модельного дизельного топлива использовалась смесь н-гептан/толуол в соотношении 7/3 по объему. Добавка EPe или MHe в смесь с н-гептан/толуол составляла 50% по объему. Для стабилизации ламинарных пламен предварительно перемешанных смесей использовалась плоская горелка типа Бота-Сполдинга. Эксперименты по структуре пламени проводились при давлении 1 атм. В работе изучалась структура трех богатых (φ=1.6) пламен смесей: н-гептан/толуол/O_2/Ar, MHe/н-гептан/толуол/O_2/Ar, EPe/н-гептан/толуол/O_2/Ar. Для получения информации о структуре пламен применялся метод зондовой молекулярно-пучковой масс-спектрометрии с мягкой ионизацией электронным ударом, метод хромато-масс-спектрометрии и микротермопарный метод.

В исследованных пламенах были идентифицированы и измерены профили концентраций более 30 соединений, в том числе впервые были измерены пиковые значения концентраций «тяжелых» полициклических ароматических соединений, являющихся основными прекурсорами сажи.

Моделирование структуры пламен проводилось с помощью программы PREMIX из программного пакета CHEMKIN-II. Входными данными для моделирования являлись экспериментально измеренные профили температуры. Для моделирования структуры пламен смесей н-гептан/толуол и MHe/н-гептан/толуол использованы химико-кинетические механизмы, взятые из литературы. Для смеси EPe/н-гептан/толуол такой механизм был составлен впервые в данной работе.

Сопоставление экспериментально измеренных и рассчитанных профилей концентраций дало достаточно хорошее согласие для большинства соединений. На основе анализа химико-кинетических механизмов окисления топлив были определены реакции, дающие наибольший вклад в образование прекурсоров сажи. Также нужно отметить, что для корректного описания процессов образования и расходования «тяжелых» полициклических ароматических углеводородов механизмы требуют дальнейшей существенной доработки.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СХЕМЫ ТРУБЫ РИЙКЕ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

Павлов Г.И., Кочергин А.В., Ахметшина А.И., Никитин М.А.
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия

Труба Рийке является объектом исследования для многих научных работников. Это устройство весьма привлекательно и с практической точки зрения [1]. Авторами работы предложена усовершенствованная схема трубы Рийке, которая составляет основу опытно-промышленной установки по переработке изношенных автомобильных шин [2]. Техническая схема установки приведена на рис. 1. Установка состоит из двух основных частей: из цилиндрической трубы и реактора. Реактор (7) включает в себя пусковое горелочное устройство, продуктами сгорания которого поджигаются шины (6), и в дальнейшем, горение резинотехнических отходов происходит без сопровождения внешним источником тепловой энергии. В реакторе начинается бурное выделение горючих газов. Часть пиролизных газов сгорает за счет воздуха, поступаемого в реактор через аэродинамические клапаны. Тепло, выделяемое при горении этих газов достаточно для поддержания в реакторе требуемой температуры для разложения резины. Основная часть пиролизных газов поступает в цилиндрическую трубу, в которой сгорает в вибрационном режиме. Воздух для горения подсасывается со стороны нижнего среза трубы. Стенки трубы охлаждаются водой.

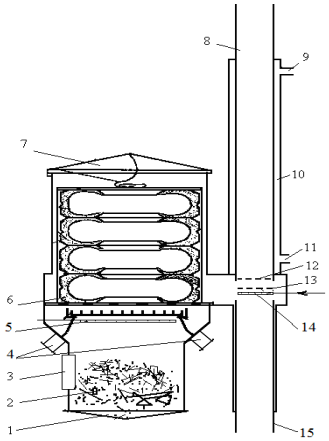


Рис. 1. Установки для переработки изношенных шин в инертную крошку/

После удаления летучих компонентов, отработанные шины и отходы резинотехнических изделий становятся хрупкими и легко разрушаются на отдельные фрагменты под механическим воздействием, источником которого служит виброустройство (4). Твердая фракция с металлическим кордом (2) скапливается в бункере (1). Образующаяся в результате переработки продукция может использоваться на полигонах при укреплении грунтов, в дорожном хозяйстве (например, в качестве наполнителя для дорожного покрытия) и т.д.

Список литературы

1. Павлов Г.И. Исследование физических принципов вибрационного слоевого горения в коаксиальной камере // Вестник КГТУ, №2. – Казань: КГТУ, 2003. –С.13-16.
2. Пат. 2539414 / Устройство для сжигания твердого топлива в пульсирующем потоке / А.В. Кочергин, Г.И. Павлов. А.И. Ахметшина, Р.Ф. Шакуров, М.И. Валишев. 20.01.2015.

СЖИГАНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЧ ЭНЕРГИИ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ОБОЛОЧЕК ИЗ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ОКИСИ КРЕМНИЯ

Пащенко С.Э., Пащенко С.С., Каляда В.В., Гартвич Г.Г., Косых А.М.

Новосибирский Государственный Университет, г. Новосибирск, Россия

Создание высокотемпературной оболочки из модифицированной окиси кремния толщиной менее 1 мкм позволяет резко изменить условия воспламенения и режим горения твердых топлив разного типа (брикеты из отходов древесина, хозяйственные отходы – солома, шелуха, торф, твердые ракетные топлива, предназначенные для утилизации). При обычном классическом розжиге твердого топлива, так и с применением СВЧ энергии.

Кроме теоретических предпосылок использования СВЧ-поля плюс высокотемпературная оболочка для процессов горения существуют и чисто практические выгоды. Применение СВЧ-плазменных технологий даст возможность отказаться от дополнительного использования мазута или природного газа, снизить неполноту сгорания угля и уменьшить уровни выбросов токсичных и канцерогенных веществ с дымовыми газами. При применении этого метода к твердым ракетным двигателям появляется возможность регулировать скорость горения топлива без модификации его состава или величины давления над поверхностью образца.

Описаны методы исследования инициирования горения на образцах твердого топлива с применением современного хромато-масс-спектрометра GCMS-QP2010NC Plus и универсального UGA-200 спектрометра с отбором образцов при атмосферном давлении. Что позволяет исследовать воздействие на топливо на ранних стадиях СВЧ прогрева с оболочками и без них. С использованием метода капиллярного захвата газо-аэрозольной пробы в реальном времени непосредственно из факела.

Исследование структуры оболочки на различных стадиях процесса ведется с помощью сканирующего электронного микроскопа с микрозондовой приставкой. Эта информация позволяет оптимизировать сам процесс создания оболочки и выбирать эффективные режимы теплового и СВЧ зажигания топлива.

Разработаны методы отбора аэрозолей и газовых составляющих за время от 1мс из зон котлов с горящим факелом с температурой до 2500°С. Что является важным для решения, например, вопросов образования шлакообразующих частиц или степени догорания металлических частиц в ракетных твёрдых топливах.

Следует отметить, что при использовании высокотемпературных оболочек для различного типа твердых топлив происходит частичное или полное уничтожение диоксинов и бенз(а)пиренов. На этапе сжигания при взаимодействии струи приповерхностного факела с нагретыми до 1450°С и более оболочками оксидов кремния, что и приводит к разложению этих токсинов.

Список литературы

1. Патент № 2282742 Способ сжигания твердого ракетного топлива. Пащенко С. Э., Зарко В. Е. опубликовано 27.08.2006
2. S.E.Pashenko, A.E. Osochenko, V.E. Zarko, A.S. Zharkov, V.I. Maryash, B.D. Oleinikov, M.G. Potapov, A.B. Vorozhtsov. «COAGULATION ESTIMATIONS FOR AEROSOL PARTICLE SIZE IN THE OMBUSTION CLOUD», Proceed. 34th Int. Annual Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, Report P 147, 14 pages (2003).
3. Патент № 2050534. Способ отбора проб аэрозолей из факела и струи при сжигании топлив и пиросставов / С.Э. Пащенко, Э.А. Ершов, В.В. Карасев. опубликовано 20.12.1995.

МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ТЕРМОЗАВИСИМОЙ ПЛЕНОЧНОЙ ОБОЛОЧКИ НА УГЛЯХ РАЗНЫХ МАРОК ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ УСЛОВИЙ ИХ ПЕРЕВОЗКИ, ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ

Пащенко С.Э.[1], Пащенко С.С.[1], Каляда В.В.[1], Зарвин А.Е.[1], Гартвич Г.Г.[1], Саломатов В.В.[2]

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

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

Описаны методы создания термозависимой пленочной оболочки путем нанесения жидкой фазы на поверхности угля [1]. При этом в качестве жидкой фазы используют модифицированное «жидкое стекло» с силикатным модулем 3,5. Пленку наносят толщиной не более 1 мкм. Для специальных задач можно произвести кратковременный нагрев пленки излучением до увеличения ее объема не более чем на 30%. Такая защитная плёнка позволяет избежать или резко уменьшить окисление угольного топлива при хранении на открытых складах и перевозке, смерзание при перевозке и перегрузке, и соответствующие сложности разгрузки, а также избежать самовозгорания и самонагревания угля в хранилищах около ТЭС.

Условия получения термозависимой оболочки для угольных предприятий: простота технологии нанесения пленок в условиях обогатительных фабрик и угольных карьеров; возможность нанесения пленок при зимней и летней температурах, то есть от минус 40 и до плюс 40 градусов Цельсия; неистираемость нанесенной пленочной оболочки, т.е. сохранения ее свойств во время транспортировки угля, хранения и начала кускового сжигания в котлах; возможность использования процесса горения угля с пленочной оболочкой не только в условиях так называемого СВЧ-горения [2], но и в котлах обычного типа, когда прогрев куска угля идет не изнутри (СВЧ), а снаружи (в обычных котлах с кусковым углём).

При загрузке в угольные котлы или в СВЧ-угольные котлы места загрузок выбирают с минимальным факельным горением, добиваясь прогрева угля с оболочкой в режиме минимального темпа нагрева для получения максимально длительной стадии выделения водорода из объема угля и его накопления в оболочке для осуществления процесса водородного горения.

Рассмотрены особенности применения метода для брикетного топлива, получаемого из угольных отвалов (Прокопьевск, Кемеровская область). Рассмотрены вопросы влияния на режимы зажигания и горения кускового топлива трещинообразования и их пассивирования высокотемпературными оболочками. Показана эффективность введения в жидкое стекло зародышеобразующих добавок в виде кластеров SiO_2 средним диаметром не более 90 нм, приготовленных непосредственно из исходного вещества, с выдержкой на воздухе не более 10 мин до введения в раствор для приготовления пленки.

Показаны возможности для экологичного горения кускового бурого угля путём создания оболочек разного типа. При этом повышенное содержанием воды в буром угле [3] предполагается использовать для эффективного инициирования OH – радикального механизма горения в факелах замкнутых микротрещин.

Список литературы

1. Патент №2595344 Способ создания термозависимой угольной пленочной оболочки. Пащенко С.Э., Пащенко С.С. опубликовано: 27.08.2016
2. Патент № 2514826 Способ СВЧ-градиентной активации угольного топлива с использованием защитной плёнки. Пащенко С.Э., Алексенко С.В., Пащенко С.С., Каляда В.В., Саломатов В.В. опубликовано: 10.05.2014
3. Технический отчёт. Проведение опытного сжигания бородинского бурого угля на котле ТПЕ-214 энергоблока СТ. №2 Новосибирской ТЭЦ-5 АО «СИБЭКО» Шифр: 6П-18/ПНО ООО «ЗиО-КОТЭС». 2018

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЕКТЫ: ИНСТРУМЕНТАРИЙ ОЦЕНКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВЛИЯНИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Пляскина Н.И.[1),2)]
[1)] Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН
[2)] Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Россия обладает значительным потенциалом энергосбережения, вовлечение которого в хозяйственный оборот позволит существенно сократить потребление энергетических ресурсов, повысить энергетическую безопасность страны и значительно сократить нагрузку на окружающую среду. По оценкам экспертов потенциал энергосбережения России составляет 40–47% современного энергопотребления, при этом капиталоемкость энергосбережения в 2 раза ниже в сравнении с приростом объемов производства топливно-энергетических ресурсов. Особенностью современного этапа развития является увеличение роли экологически чистых энергоресурсов. В 2003 г. под эгидой ЕЭК ООН подготовлен международный проект «Голубой коридор» [1], основная цель которого – расширение спектра использования природного газа в качестве альтернативного моторного топлива. Лидером газомоторного рынка в России является ПАО «Газпром», активно реализующий энергосберегающие проекты. В работе исследовано влияние на окружающую среду экологического проекта ПАО «Газпром» - переход на альтернативное моторное топливо - природный газ.

Используемый инструментарий основан на адаптации модели межотраслевого баланса (МОБ) как «проекции» МОБ на топливно-энергетический комплекс и предположении, что основное количество выбросов парниковых газов осуществляется при сжигании ископаемого топлива. В качестве индикатора эффективности внедрения экологических проектов рассматривается коэффициент углеродоемкости - количество выделяемого диоксида углерода на единицу конечного продукта отрасли [2]. Преимуществом моделей межотраслевого баланса является возможность провести сравнительный анализ влияния отраслей на окружающую среду и определить мультипликативный эффект реализации энергосберегающих проектов.

Модельные расчеты проведены на реальной экономической информации – таблицах «Затраты-Выпуск» матрицы МОБ Российской Федерации в разрезе 22 агрегированных отраслей. Выделено 3 вида первичной энергии: продукты нефтегазовой промышленности, уголь, горючие сланцы и торф. Определены прямые, косвенные и полные выбросы диоксида углерода по агрегированным отраслям. Следует отметить, что при реализации экологического проекта ПАО «Газпром» значения коэффициентов углеродоемкости уменьшились по всем агрегированным секторам в пределах 0,49 - 2,86%. Наибольшую нагрузку на окружающую среду оказывают «Угольная», «Электро- и теплоэнергия», «Продукты нефтегазовой промышленности». В масштабах страны количество выделяемого диоксида углерода сократилось на 1 млн. тонн, причем равномерно во всех отраслях вследствие относительно равных темпов замещения традиционных видов топлива природным газом. Значительное снижение выбросов наблюдается в секторе «Продукты нефтегазовой промышленности», что обусловлено большими темпами перехода техники ПАО «Газпром» на природный газ. Использование природного газа в транспорте позволяет существенно сократить нагрузку на окружающую среду: уровень токсичности отработанных газов снижается в 3–5 раз при уменьшении стоимости альтернативного по сравнению с дизельным топливом в 1,5–2 раза.

Список литературы

1. Проект «Голубой коридор». Итоговый доклад: Европейская экономическая комиссия, ООН: Нью-Йорк и Женева, 2003 г. сайт: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2003/sc1/ENERGY-2003-08r.pdf
2. Пляскина Н.И., Мошкин Н.П., Гречина Е.О. Инструментарий оценки экологической эффективности энергосберегающих проектов // Эколого-экономические проблемы развития регионов и стран (устойчивое развитие, управление, природопользование) РОЭЭ-2017: материалы 14-й Междунар. науч.-практ. конф. Российского общества экологической экономики. Петрозаводск, Респ. Карелия, Россия. 3-7 июля 2017 г. / Карельский науч. центр Рос. акад. наук, ин-т экон. - Петрозаводск, 2017. - С. 215-220.

СКРИНИНГ ОТЕЧЕСТВЕННОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ, ПОДХОДЯЩЕГО ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТВЁРДОГО БИОТОПЛИВА

Подгорбунских Е.М. [1)], **Бычков А.Л.** [1)], **Денькин А.И.** [2)], **Ломовский О.И.** [1)]
[1)] Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2)] Институт физиологии, биохимии и питания сельскохозяйственных животных, г. Боровск, Россия

Проблема истощения ископаемых минеральных и нефтяных запасов достаточно широко стоит перед современным обществом. Одним из направлений обеспечения энергетической безопасности выступает перевод существующих и перспективных процессов химической промышленности на возобновляемые источники энергии. Так источниками для получения компонентов твёрдого биотоплива могут выступать различные виды лигноцеллюлозного сырья [1], включающие биомассу произрастающих в регионе растений, отходы сельского и лесного хозяйства.

Цель данной работы заключалась в определении наиболее подходящего вида растительного сырья, подходящего для получения компонентов твёрдого биотоплива, с точки зрения теплоты сгорания.

Теплота сгорания тесно связана с химическим составом лигноцеллюлозного сырья. При проведении элементного анализа образцов биомассы и искусственных смесей, моделирующих биотопливо с различным содержанием самого теплотворного компонента – лигнина, было установлено, что увеличение доли полифенольной части растительного сырья приводит к увеличению содержания углерода [2], что обеспечивает возрастание теплоты сгорания.

Содержание неорганической части (зольности) для травянистых растений варьируется в широких пределах и может достигать 20 %, что объясняет невысокие значения теплотворной способности. Высокая зольность растительного сырья обуславливает снижение эксплуатационных характеристик топливных брикетов на их основе, а также накладывает необходимость разбавления низкозольной добавкой [3].

Рисовая лузга характеризуется максимальным содержанием неорганической части (16,9 %) из рассмотренных образцов, что объясняет рекордно низкую теплоту сгорания (16,2 МДж/кг), определенную с помощью калориметрической бомбы, в сравнении даже с низколигнифицированным модельным сырьём (17,4 МДж/кг).

Минимальным значением зольности обладает лузга кедровых орехов (менее 1 %) и теплотой сгорания, равной 20,9 МДж/кг, что позволяет рассматривать данное сырьё в качестве перспективного сырья для получения твёрдого биотоплива или низкозольной добавки при производстве топливных гранул.

Максимальной теплотой сгорания среди травянистых растений обладает лузга подсолнечника (25,7 МДж/кг), сопоставимой с показателями высоколигнифицированных модельных образцов (26,9 МДж/кг), что связано с высоким содержанием экстрактивных веществ (28,6 %). Среди отходов лесозаготовок наибольший интерес представляет кора лиственницы с теплотой сгорания 22,7 МДж/кг и повышенным содержанием экстрактивных веществ (20,3 %) при относительно небольшом содержании лигнина, равном 24 %.

На основании анализа химического состава и сравнения теплоты сгорания различных видов растительных отходов можно сделать вывод, что теплотворная способность определяется не только содержанием полифенольной компоненты, но и в значительной мере зависит от зольности и содержания экстрактивных веществ в растительных материалах.

Список литературы

1. Godin B., lamaudiere S., Agneessens R., Schmit T., Goffart J.-P. Chemical composition and biofuel potentials of a wide diversity of plant biomasses // Energy and Fuels. – 2013. – V. 27. – P. 2588-2598.
2. Бычков А.Л., Денькин А.И., Тихова В.Д., Ломовский О.И. Расчёт теплоты сгорания лигноцеллюлозы на основании данных элементного анализа // Химия растительного сырья. – 2014. – № 3. – С. 99-104.
3. Ушаков Д.Е., Карелин Д.В., Бычков А.Л., Коробейничев О.П., Шмаков А.Г. Получение топливных брикетов из растительной биомассы // Химия твёрдого топлива. – 2017. – № 4. – С. 46-50.

ТЕРМОМЕХАНОХИМИЧЕСКАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ПОЛИМЕРНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ

Попов В.И
Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

Методы механохимической, термической активации и микропомола являются практическими средствами повышения уровня энергетических характеристик топлива полимерной микроструктуры [1]. Горение частиц топлива является базовым принципом его факельного горения. [2]. Скорость воспламенения и горения частиц топлива, их время выгорания зависят от внешних и внутренних характеристик системы, включая размер частиц, химическую активность топлива, температурный фактор, время релаксации [3]. Изменяя состав топлива относительно этих характеристик, горения можно целенаправленно задавать массовую скорость горения частиц топлива, реактивную тягу высоконапряженных двигателей внутреннего сгорания топлива. Полученные закономерности относительно времени выгорания частиц топлива позволяют оценить размеры камер сгорания, связать их со скоростью протекания химических реакций и полнотой выгорания частиц топлива. В области чисел *We* и *De* порядка единицы на воспламенение и горение полимерного топлива оказывают влияние запаздывающие локально-неравновесные (релаксационные) явления переноса в частице топлива, влияющие на диффузионную подвижность выгорающих компонент, которая контролирует скорость химических реакций. Интенсивность горения, время выгорания частицы топлива зависит от частоты релаксации, от макропараметров механоактивации – соотношения упругого и диссипативного рассеяния тепловой энергии.

В рамках локально-неравновесной статистической термодинамики исследуется проблема интенсификации воспламенения и горения частиц топлива полимерной микроструктуры методами механохимической, термической активации и микропомола как средства повышения уровня энергетических характеристик топлива. Представлены зависимости времени выгорания механохимически активируемой частицы топлива от частоты релаксационных явлений переноса возбужденных микроструктурных состояний, от радиуса частицы, температурного фактора, энергии термической активации, энтропийного предэкспоненциального множителя для константы скорости реакции, компенсирующей температурные энергетические затраты. Показано, что интенсивностью горения можно управлять механической активацией выгорающей частицы (повышением частоты релаксации), ее размером (микропомолом), плотностью, температурным и стерическим фактором, устанавливающим эффект релаксационно-поляризационного запаздывания явлений переноса. Существенную роль в интенсификации процесса горения оказывают внутренние локально-неравновесные процессы переноса в частице топлива, в частности, диффузионная подвижность ее выгорающих компонент, которая контролирует скорость химических реакций. Выделены области изменения внешних и внутренних характеристик выгорающей системы, когда на время горения частицы топлива существенную роль играет механоактивационное уменьшение времени релаксации, размер частиц (микропомол), энергия активации (критерий Аррениуса) или температурный фактор.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по Соглашению о субсидии № 14.607.21.0150 (Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI60716X0150)

Список литературы

1. A.P Burdukov, V.I. Popov, V.A Faleev, Study of mechanically activated coal combustion // Thermal Science. 2009. V.13. N1. P.127.
2. М.В. Бекстед, У.Лианг, К.В.Паддуппаккам, Математическое моделирование горения одиночной алюминиевой частицы, (обзор). Физика горения и взрыва, 2005, N6. С.15-33.
3. В.И. Попов, Диффузионно-релаксационная модель факельного горения топлива. *Химия твердого топлива.* 2007. №4. С. 39 – 49.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ЗАМОРОЖЕННОЙ ВОДЯНОЙ СУСПЕНЗИИ БИДИСПЕРСНОГО ПОРОШКА АЛЮМИНИЯ

Порязов В.А.[1)] Крайнов А.Ю.[1)], Крайнов Д.А.[1,2)]
[1)]Томский государственный университет, г. Томск, Россия
[2)]Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Разработана физико-математическая модель горения водяной замороженной суспензии бидисперсного порошка алюминия, состоящего из наноразмерного порошка алюминия и порошка алюминия микронных размеров. Представлены результаты расчета скорости горения в зависимости от массовой доли крупной фракции частиц в составе бидисперсного порошка.

Модель горения замороженной в воде смеси порошков алюминия нано- и микронных размеров строится на основе модели [1]. Основные предположения: линейная скорость горения замороженной водяной суспензии нано-дисперсного порошка алюминия определяется скоростью испарения воды с поверхности. При горении замороженной водяной суспензии порошка алюминия в волне прогрева перед поверхностью испарения воды происходит разогрев льда до температуры плавления, его плавление, разогрев слоя воды до температуры кипения и на поверхности жидкости происходит испарение воды. Вместе с парами воды в газовую фазу выносятся частицы алюминия, и в газовой фазе происходит их реагирование с парами воды. Для моделирования горения замороженной водяной суспензии би-дисперсного порошка алюминия использовалась модель горения летучих горючих веществ А.Ф. Беляева [2]. Частицы алюминия в составе топлива представляют собой шарики, и они распределены в объеме льда равномерно. Пары воды реагируют с частицами алюминия. Продуктом реакции является окисел алюминия, остающийся на поверхности частицы алюминия и водород. Скорость горения наноразмерных частиц алюминия определяется на основе модели высокотемпературного окисления наноразмерной частицы алюминия. В ней учитывается постепенный разогрев частицы в окружающем газе, образование слоя окисла на поверхности частицы и диффузия окислителя через слой образующегося окисла. Окисный слой представляется в виде шарового слоя, покрывающего расплавленный алюминий частицы. На границе между окислом и расплавом алюминия идет гетерогенная химическая реакция. Скорость тепловыделения в этой реакции определяется скоростью подвода массы окислителя диффузией через слой окисла. Скорость горения микронных частиц алюминия описывается на основе экспериментальных данных. Воспламенение микронных частиц алюминия происходит при достижении ими заданной температуры. Теплообмен между частицами и газом происходит по закону Ньютона. Частицы движутся под действием силы трения со стороны газа. Горение происходят в изобарических условиях, давление не зависит от расстояния до поверхности горения.

Результаты расчета скорости горения замороженной водяной суспензии бидисперсного порошка алюминия, состоящего из наноразмерного порошка алюминия и порошка алюминия микронных размеров, от массовой доли частиц микронных размеров хорошо соответствуют экспериментальным измерениям [3].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20011).

Список литературы

1. Порязов В.А., Крайнов А.Ю. Математическое моделирование горения замороженной суспензии нанодисперсного алюминия // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т. 52, № 2. – С. 60-66.
2. Беляев А.Ф. О горении нитрогликоля // В сб. Теория горения порохов и взрывчатых веществ. М.: Наука, 1982. – С. 10-34.
3. Connell T.L., Risha G.A., Yetter R.A., Yang V., Son S.F. Combustion of bimodal aluminum Particles and ice mixtures // International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion. – 2012. – Vol.3, № 11. – 259–273.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Порязов В.А.[1)] Крайнов А.Ю.[1)], Крайнов Д.А.[1,2)]
[1)]Томский государственный университет, г. Томск, Россия
[2)]Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Разработана физико-математическая модель нестационарного горения металлизированного смесевого твердого топлива (СТТ). Предположения математической модели: СТТ состоит из смеси перхлората аммония (ПХА), бутилкаучука (БК) и порошка алюминия. ПХА при нагревании распадается путем последовательности химических реакций с экзотермическим эффектом. Продуктами этих реакций является газ. Газообразные продукты разложения ПХА появляются на последней стадии последовательности реакций необратимого распада ПХА по достижении глубины полупревращения ПХА равной 0.99. Химическая реакция распада ПХА имеет первый порядок и зависит от температуры по закону Аррениуса. Распределение зерен ПХА и частиц алюминия в объеме топлива равномерное. Теплофизические характеристики твердой фазы не зависят от температуры и определяются компонентным составом СТТ. Горючие компоненты в составе СТТ это порошок алюминия и связка (БК). Связка при разогреве испаряется с поверхности горения с известной величиной теплоты испарения. Частицы алюминия разогреваются, плавятся, выходят на поверхность, агломерируют с частично накапливающимся на поверхности расплавом алюминия, и отрываются от поверхности в виде капель расплава алюминия с заданной величиной среднего диаметра, и уносятся потоком газообразных продуктов от поверхности твердого топлива. В газовой фазе полупродукты разложения ПХА и пары бутилкаучука вступают в химическую реакцию. В газовой фазе протекает экзотермическая химическая реакция первого порядка по закону Аррениуса, конвекция и диффузия реагентов. Величина давления над поверхностью горящего СТТ не зависит от координаты, и может зависеть от времени. Учитывается расширение газа при его нагревании. Молекулярная масса газовой фазы принимается постоянной величиной, параметры состояния газа подчиняются уравнению состояния идеального газа. Воспламенение частиц алюминия происходит при достижении частицей заданной температуры. Горение частиц алюминия в газовой фазе описывается согласно экспериментальным данным. Теплообмен между частицами и газом происходит по закону Ньютона, движение частиц определяется действием сил трения со стороны газа. Из-за малой объемной концентрации частиц в газе влиянием движения частиц на движение газа пренебрегается. Не учитывается также взаимодействие частиц друг с другом в газовой фазе.

Математическая модель горения СТТ состоит из уравнения теплопроводности, записанного для твердой фазы, и уравнения для скорости разложения ПХА. В газовой фазе процессы описываются уравнениями сохранения энергии газа и частиц алюминия, сохранения импульса, сохранения массы газа, массы частиц, числа частиц алюминия, выгорания окислителя в газовой фазе, движения частиц в потоке газа, уравнения состояния газа. На поверхности горения СТТ ставятся условия сопряжения в виде равенства потоков массы и энергии (граничные условия четвертого рода) с учетом испарения связки и выхода с поверхности капель алюминия.

Результаты расчета зависимости стационарной скорости горения СТТ на основе ПХА с добавлением порошка алюминия от давления хорошо согласуются с экспериментальными данными зависимости скорости от давления. Представлены результаты расчета нестационарной скорости горения при увеличении и уменьшении давления. Получены переходные режимы в зависимости от скорости и величины изменения давления, совпадающие с описанными в научной литературе, в том числе погасание при резком сбросе давления.

В настоящей работе использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 8.2.09.2018 Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ПРЯМОТОЧНЫХ ГОРЕЛОК

Прохоров В.Б., Киричков В.С., Чернов С.Л.
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,
г. Москва, Россия

Ужесточение нормативов по выбросам вредных веществ в атмосферный воздух заставляет все большее внимание уделять технологии сжигания топлива. Концентрация оксидов азота в дымовых газах на котлах, работающих на твердом топливе, в большинстве случаев превышает величины, регламентированные ГОСТом [1]. Самое значительное превышение по выбросам NO_x имеет место на котлах с жидким шлакоудалением (ЖШУ).

Возможность воздействия на аэродинамику топки при использовании вихревых горелок, являющихся горелками индивидуального действия, на мощных котлах сильно ограничена. При использовании прямоточных горелок, которые являются горелками коллективного действия, появляется возможность значительного воздействия на аэродинамику зоны активного горения. При рациональной компоновке прямоточных горелок и сопл и применении ступенчатого сжигания можно обеспечить значительное снижение образования оксидов азота, механического недожога частиц твердого топлива и не допустить возможности шлакования экранной системы [2].

Основной проблемой использования прямоточных горелок является необходимость исследования аэродинамики каждого конкретного топочного объема различных энергетических котлов. Для проверки работоспособности разработанной схемы сжигания и ее эффективности проводились исследования на физической модели топки котла и математической модели экспериментального стенда топки для случая течения изотермической жидкости (комнатного воздуха). Это позволяет сопоставить результаты исследований с использованием двух различных методов [3]. В дальнейшем для выбранной схемы проводились тепловые расчеты на математической модели с учетом вихревого горения.

Задача данных исследований заключается в исключении зон высокого динамического давления факела на экранные поверхности нагрева и в обеспечении рассредоточения ядра факела по ширине и высоте топки со своевременным подводом вторичного и третичного воздуха в зону активного горения топлива. Эффективное ступенчатое сжигание топлива позволит снизить образование топливных оксидов азота. Удлиненная траектория движения продуктов сгорания снижает вероятность образования термических оксидов азота, особенно в условиях локального присутствия продуктов недожога. Расположение вертикальных вихрей большого диаметра в нижней части топки, позволит эффективно использовать поверхности нагрева холодной воронки, снизит температуру продуктов сгорания и уменьшит содержание горючих в золе уноса. На основании исследований разработаны схемы сжигания твердого топлива на паровых котлах при наличии большого числа горизонтальных и вертикальных вихрей, что должно способствовать эффективному сжиганию топлива при низких выбросах оксидов азота.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10463 от 12.05.2016).

Список литературы

1. ГОСТ Р 50831-95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования – М.: Издательство стандартов, 1996. – 24 с.
2. Архипов А.М., Липов Ю.М., Прохоров В.Б. Использование прямоточных горелок и сопл в топках котлов: инновационный опыт МЭИ – М.: Издательство МЭИ, 2013. – 240 с.
3. Prokhorov V.B., Chernov S.L., Kirichkov V.S., Kaverin A.A. Investigation of a Boiler’s Furnace Aerodynamics with a Vortex Solid Fuel Combustion Scheme on Physical and Mathematical Models // Problemele Energeticii regionale. – 2018. – V. 1 (36). – P. 1–11.

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ВИХРЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ

Пузырёв Е.М., Голубев В.А., Пузырев М.Е.

ООО «ПроЭнергоМаш-Проект», г.Барнаул, Россия

Вихревые течения наиболее распространены в природе, например, возникают в пристенных зонах торможения потока из-за градиента скорости или за телами при их обтекании. В большинстве случаев вихревые течения не устойчивы. Крупные вихри рассыпаются, генерируя в потоке турбулентность и передавая кинетическую энергию образующимся более мелким, вплоть до полного затухания самых мелких вихрей из-за действия вязкости. Удлиненные вихри при замыкании на границы раздела сред или при самозамыкании могут образовывать более устойчивые структуры. Так длинные пристенные вихревые нити дробятся и самозамыкаются, образуя более устойчивые кольцевые вихри либо образуют замкнутые на стенку вихри подковообразной формы.

Области приложений вихрей чрезвычайно широки, многообразны. Вихри применимы к технологиям сжигания, прежде всего твердых измельченных топлив, так как вихри генерируют интенсивное турбулентное перемешивание и центробежные силы, выделяющие частицы из зон искривления потока продуктов сгорания. Собственно вихрь легко формируется в объёме топки, путем тангенциального, не радиального, направления дутья и поэтому на сегодня создано достаточно много топок вихревого типа. Это топки А.А. Шершнева, пылеугольные топки с угловым расположением горелок, низкотемпературные топки (НТВ топки), топки ЦКТИ, топки МЭИ, циклонные предтопки – А.Ф. Кнорре, А.Н. и К.А. Штым и др., использующие вихревые схемы проточного типа с винтовыми потоками.

С другой стороны, рассматриваемые технологии и топочные устройства с использованием вихрей не позволили реально достичь явных преимуществ в надежности, экономичности, экологичности, универсальности по топливам (всеядности), приемлемости для усовершенствования и модернизации типовых котлов. Циклонные предтопки, топки ЦКТИ, МЭИ и др., с миниатюрными зонами активного горения (ЗАГ) и высокими теплонапряжениями в них используют удаление шлака в жидком виде характеризуются высокими вредными выбросами, шлакованием и низкой надежностью. Топки А.А. Шершнева, НТВ, ВИР и др. имеют повышенный мехнедожог, низкую экономичность, износ и др.

Наша компания выбрала комплексный подход использования преимуществ вихревых течений, закономерности которых были выявлены и изучены при стендовых исследованиях, моделировании и опытно-промышленных испытаниях. Была показана возможность удержания частиц с глубоким выжиганием из них горючих при заполнении топки достаточно произвольной формы низкотемпературным вихрем с интенсивными, но равномерно распределенными тепловосприятиями, процессами горения и тепло- массопереноса в ЗАГ, работающей с высокими объёмными теплонапряжениями.

Данные разработки были применены при создании нового класса топок гибридного типа, вихревых топок «Торнадо». Это топки имеют слоевое сжигание части топлива и вверху заполнены вращающимся потоком мелкого горящего топлива, обеспечивая стабилизацию воспламенения и горения, как факела, так и слоя.

Топки «Торнадо» пример удачной разработки. На сегодня они имеют большой класс модификаций по типам топлив и широкий типоразмерный ряд. Выполнены разработки топок «Торнадо» для энергетических котлов, которые допускают установку дополнительных двусветных экранов и поэтому могут использоваться и в установленных котлах, в том числе газомазутных и с жидким шлакоудалением, с их переводом на нерасчетные более дешевые топлива, включая антрациты, петрококс и др.

Список литературы

1. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2003. - 504 с.

РАЗРАБОТКА И ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КОТЛОВ С ТОПКАМИ «ТОРНАДО»

Пузырев М.Е., Голубев В.А., Смыкалов Д.С., Платов И.В.
ООО «ПроЭнергоМаш-Проект», г.Барнаул, Россия

Топки «Торнадо» являются удачной реализованной и защищенной авторскими правами разработкой Компании «ПроЭнергоМаш». Это топки гибридного типа. Гибридность заключается в том, что топки имеют слоевое сжигание крупной части дробленого топлива, самостабилизирующееся низкотемпературное горение в вихре над слоем мелкого топлива, летучих и уноса, а также вихревое дожигание выхлопа. Схема обеспечивает взаимную стабилизацию воспламенения и горения в вихре и в слое. При этом слой не только стабилизирует горение в вихре, но, как показали испытания котлов, наряду с дожиганием выхлопа, существенно повышает их экологические характеристики.

Конструктивно гибридность топок «Торнадо» выражается в том, что топки выполняются как комбинация вихревого топочного устройства с системой дожигания выхлопа и слоевой топки. Вихревое топочное устройство вписывается в топочный объём котла и его вид согласуется с конструкцией собственно котла при некотором учете свойств применяемого топлива и включает три типа топок: с вертикальной осью вращения вихря и имеющие горизонтальную ось вращения радиальные и дубль топки. Конструкция слоевой части топок «Торнадо» выбирается, как и в типовых котлах, в соответствии со свойствами и станционной схемой подготовки применяемых топлив, а также включает системы подачи топлива и золоудаления. На основе этого подхода был разработан и применен широкий класс слоевых топок согласованных с вихрем, обеспечивающий сжигание практически любых топлив:

- тангенциально направленная подача топливовоздушной струи эжектором или горелкой, с колосниковым устройством и системой золоудаления, 3 модификации;
- различные механизированные колосниковые устройства, до 16 модификаций;
- топки кипящего слоя, 3 модификации.

Использование вихревых топок для сжигания растительных отходов и лузги позволило решить ряд трудностей, связанных со шлакованием. Несмотря на низкую зольность растительных отходов, их минеральная часть, из-за большого содержания калия, оказалась сильно шлакующей. В вихревых топках, благодаря их изотермичности, возможности увеличения экранированной поверхности и интенсификации конвективного теплообмена устанавливается низкотемпературный режим горения, способствующий уменьшению шлакования.

Создан ряд оригинальных конструкций с горизонтальным и вертикальным расположением вихря при различной компоновке пережимных экранов, обеспечивающих, вне зависимости от топлива, низкотемпературный режим горения: как для высококалорийных топлив за счет более интенсивного тепловосприятия и увеличенной поверхности, либо интенсивную сушку за счет циркуляции раскаленных топочных газов через зону ввода низкокалорийного топлива.

Котлы с вихревыми топками введены используются на ряде крупяных и маслоэкстракционных заводов для сжигания лузги. Они сжигают низкосортные угли, торф, щепу и низкокалорийные коро-древесные отходы без подсветки. Работа спроектированных котлов показала хорошие результаты по стабильности топочного процесса и экологическим показателям. Опробовано пылеугольное сжигание в вихревой топке.

Использование вихревых топок «Торнадо» имеет большие перспективы, например, [1] они могут применяться для реконструкции существующих энергетических котлов. При этом топки допускают установку дополнительных двусветных экранов и поэтому могут использоваться в установленных котлах, в том числе газомазутных и с жидким шлакоудалением, с их переводом на нерасчетные более дешевые топлива, включая антрациты, нефтяной коксик и др. Дожигание провала допускает загрубление помола с соответствующим снижением пожаро- и взрывоопасности и эксплуатационных затрат в пылесистеме.

Список литературы

1. Пузырёв Е.М. Голубев В.А., Пузырев М.Е. Разработка вихревых топок для энергетических котлов. Энергетик, 2017. №4 с.44-47

СИСТЕМЫ БЕЗМАЗУТНОГО РОЗЖИГА ДЛЯ КОТЛОВ УГОЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Разин В.А., Белоруцкий И.Ю., Буров В.Ф., Линдт В.В.
ООО «ЗиО-КОТЭС», г. Новосибирск, Россия

В настоящее время мазут является дорогостоящим топливом, стоимость которого превышает стоимость угля в 3-4 раза, требующим наличия и функционирования на каждой ТЭЦ мощного мазутного хозяйства. Для повышения стабильности факела в пылеугольных котлах применяется совместное сжигание углей с мазутом, что неэкономично и зачастую приводит к возрастанию мех. недожога топлива, сажистым отложениям на конвективных поверхностях нагрева. Как следствие, снижается КПД котлов, повышаются выбросы оксидов азота, серы и канцерогенной пятиокиси ванадия, которая в основном содержится в мазуте и, соответственно, ухудшаются эколого-экономические показатели ТЭС. Совместное сжигание твердого и жидкого топлива приводит к высокотемпературной коррозии поверхностей нагрева и сокращению срока службы оборудования. Таким образом, для исключения указанных негативных факторов существуют экономические и технологические предпосылки к переходу на безмазутные технологии сжигания углей.

В работе представлены основные технические решения по оснащению СБР пылеугольных станций «Иркутскэнерго» на примере ТЭЦ-10, ТЭЦ-11, Ново-Зиминской ТЭЦ, Ново-Иркутской ТЭЦ, Шелеховского участка Ново-Иркутской ТЭЦ с котлами 210÷500 т/ч с установкой систем безмазутного розжига и подсветки.

На сегодняшний день основными технологиями, применяемыми для инициации горения при безмазутной пылеугольной растопке, являются: плазменная технология, электрохимическая технология, муфельная технология, технология микропомола угля.

Для всех СБР независимо от типа технологии инициации горения при растопке необходимо наличие готовой угольной пыли. Получение размолотого и подсушенного угля (пыли) в период растопки является одной из основных задач при проектировании СБР.

Общим, для всех рассмотренных котлов предлагаемым решением является прокладка вдоль котельного цеха коллектора–воздухопровода горячего воздуха, обеспечивающего возможность пуска и разворота одной-двух пылесистем растапливаемого котла.

Для обеспечения котлов угольной пылью, в зависимости от схемы подачи её в котел, модернизируются системы пылеприготовления с установкой вспомогательного оборудования. Рассмотрены пылесистемы с прямым вдуванием и промбункером пыли.

Для всех типов котлов, указанных станций «Иркутскэнерго» разработаны возможные решения по организации их безмазутного розжига и выполнены расчеты котлов и пылесистем при работе на пусковой нагрузке (до 30% $Д_{ном}$).

С целью проверки возможности воспламенения угольной пыли при безмазутной растопке приведены результаты 3D-моделирования процессов горения в муфельном предтопке (горелке), оборудованном системой предварительного электронагрева.

По предложенным решениям проведена предварительная экономическая оценка и анализ целесообразности внедрения СБР. В работе определено, что СБР даёт преимущество в части значительного снижения условно-постоянных затрат, связанных с отказом от использования мазута и обслуживания мазутного хозяйства. Однако, в отличие от новых станций, на которых мазутное хозяйство может не строиться, для существующих станций «Иркутскэнерго» внедрение СБР требует значительных капитальных вложений, которые могут быть компенсированы в перспективе до 20 лет и более. При этом для вновь строящихся станций, ввиду возможности отказа от строительства мазутного хозяйства, эффективность внедрения СБР значительно выше. В любом варианте разработанная СБР позволяет исключить использование мазута, как для растопки, так и для подсветки факела на пониженных нагрузках до $0{,}3Д_{ном}$ в широком диапазоне используемых углей.

ИЗМЕНЕНИЕ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА СЛОЯ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА РАБОТУ КОТЛОВ С ЦКС

Рябов Г. А., Фоломеев О. М.
ОАО Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт (ОАО «ВТИ»), г. Москва, Россия

При сжигании твердых топлив в котлах с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) важным является обеспечение большой кратности циркуляции частиц по контуру топка – циклон – система возврата. Высокий расход циркулирующих частиц определяет равномерность поля температур по высоте топки, обеспечивает выравнивание температур по сечению слоя, что особенно важно для крупных котлов с ЦКС с сечением топки 200 и более м^2. Кроме того, при наличии зольных теплообменников большой расход циркулирующего материала приводит к росту температуры возврата частиц в топку. Расход частиц определяется прежде всего размерами частиц и скоростью газа. Частицы, участвующие в циркуляции, должны иметь скорость витания ниже скорости газа. Скорость витания определяется размерами частиц (средним диаметром по поверхности) плотностью частиц и физическими свойствами газа. Расход частиц, уносимых из слоя, зависит от массы слоя. Таким образом, для увеличения циркуляции необходимо иметь в слое максимально возможное количество частиц, способных циркулировать. Для котлов с ЦКС такие частицы находятся в диапазоне размеров 0,1 – 0,3 мм.

Размер циркулирующих частиц определяется эффективностью улавливания в циклоне, чем она выше, тем меньше средний размер частиц. Считается, что хорошо работающий котел с ЦКС имеет средний размер циркулирующих частиц менее 0,2 и даже 0,15 мм. Другим фактором, определяющим фракционный состав материала слоя, является эффективный отвод донной золы, что особенно важно для высокозольных топлив. Наиболее крупные фракции с поверхности решетки должны хорошо удаляться. Уголь, поступающий в топку, может измельчаться за счет фрагментации и истирания. Этот процесс крайне сложен и во много зависит от свойств угля и золы. Он требует обязательного опытного сжигания, по результатам которого выбирается требуемые размеры частиц после дробления.

На первом в России крупном котле с ЦКС блока № 9 Новочеркасской ГРЭС имеются проблемы с излишне крупным составом материала слоя. В докладе приведены характеристика состава топлива, материала слоя и циркулирующей золы. Сделана оценка расхода циркулирующего материала. Приведены основные характеристики работы котлы, включая поля температур. Особое внимание уделено режимам с добавкой известняка и изменению химического и фракционного состава потоков золы.

Приведена упрощенная модель расчета изменения состава золы после пуска котла. Она учитывает исходный состав песка и подаваемого угля. Расчет ведется для определения удельного выноса частиц из слоя. Эффективность улавливания рассчитывается по зависимостям ВТИ и корректируется учетом зарубежных данных и результатов опытов. По опытным данным введены коэффициенты долей частиц различных фракций в слое и удаляемой донной золе. По результатам расчетов показано, что для имеющегося фракционного состава топлива количество крупных фракций со временем возрастает. Добавка известняка приводит к росту долей фракций с размерами 0,1 – 0,2 мм. Наилучшие результаты получаются при подаче угля с размерами менее 0,5 мм.

ГИДРОДИНАМИКА СВЯЗАННЫХ МЕЖДУ СОБОЙ РЕАТОРОВ В СИСТЕМАХ ПИРОЛИЗА ПЛАСТИКА И БИОМАССЫ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ПОЛУЧЕНИЕМ КОМПОНЕНТОВ МОТОРНЫХ ТОПЛИВ

Рябов Г. А., Фоломеев О. М., Долгушин И. А.
ОАО Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт (ОАО «ВТИ»), г. Москва, Россия

Нарастающий интерес к возобновляемым энергетическим ресурсам в мире связан с неуклонным ростом энергопотребления, а также с ростом выбросов парниковых газов в атмосферу. Использование отходов производства, прежде всего различных видов биомассы, с выработкой тепла и электроэнергии является важной задачей энергосбережения. При этом замещается ископаемое топливо, в большинстве случаев удается снизить вредные выбросы в атмосферу. Выбросы CO_2 при сжигании биомассы не учитываются в соответствии с Киотским протоколом. В последнее время встала серьезная проблема утилизации бытовых отходов, в частности отходов из пластика (бутылки и так далее). Поэтому разработка технологий утилизации отходов и биомассы с одновременным производством тепла и энергии является одной из главных мер по борьбе с выбросами парниковых газов.

Возрастает интерес к наиболее полному использованию биомассы и отходов производств с применением технологий пиролиза и газификации. Они направлены на получение полезных продуктов в виде генераторного газа (синтетического газа) с возможностью дальнейшей его переработки в жидкие топлива, в том числе в моторные топлива высокого качества. Наиболее калорийный газ (15...20 МДж/м^3) может быть получен путем паровой газификации и пиролиза. Паровая газификация и пиролиз реализуются в виде двухстадийного процесса в двух реакторах с псевдоожиженным слоем. Генераторный газ может также использоваться для получения моторных топлив (процесс Фишера-Тропша), так как отношение концентраций водорода и моноксида углерода близко к оптимальному (1,5 – 2,5).

Важным для эффективной работы таких установок является такая организация процесса, чтобы расход циркулирующего между реакторами материала был очень высоким, а сама система перетоков работала надежно. Эта задача также крайне важна для подобных систем со сжиганием топлив в химических циклах с оксидами металлов – носителями кислорода. При сжигании в химических циклах задача усложняется наличием относительно легких твердых частиц в потоке оксидов металлов.

Исследование гидродинамики связанных между собой реакторов выполнено на холодной модели. В докладе приведено описание установки, методов измерений а также обоснование условий моделирования. Даны результаты определения полей массовых потоков частиц в реакторе с циркулирующим кипящим слоем в том числе для бинарных смесей частиц. Приведены данные по изменению давлений во всех элементах системы связанных между собой реакторов, которое сравнено с расчетными значениями. Даны результаты влияния концентрации потока на сопротивление циклона и эффективность улавливания частиц. Показано, что для бинарных смесей частиц в определенном диапазоне долей легких фракций возможно использование разработанных ранее зависимостей.

Работа выполнена в рамках намеченного совместного исследования ученых стран БРИКС (Китай, Россия и ЮАР).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫГОРАНИЯ КОКСОВОГО ОСТАТКА УГОЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ

Саломатов Вл.В.[1,2], Саломатов Вас.В.[1]

[1] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2] Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Новосибирская область обладает уникальными запасами высококачественного антрацита (Ultra High Grade) Листвянско-Горловского месторождения с общим геологическим ресурсом ~ 7 млрд т. Таких антрацитовых месторождений в мире всего три. Добываемый открытым способом в ЗАО «Сибантрацит» уголь расходуется следующим образом: ~ 20% идет на технологические нужды, а ~ 80% представляют собой низкореакционные отсевы размером до 13 мм [1]. Наиболее эффективное использование отсевов антрацита – энергетическое. Институтом теплофизики СО РАН совместно с Центральным котло-турбинным институтом разработана и использована технология сжигания отсевов антрацита в кипящем стационарном слое как наиболее простая в организации, позволившая реконструировать и модернизировать физически устаревшие паровые и водогрейные котлы [2]. Затраты на модернизацию составили ~10% от стоимости строительства новых котлов. Используя эти наработки, ЗАО «Сибантрацит» осуществил реконструкцию котлов собственной котельной, где в течение ряда лет применяются антрацитовые отсевы.

Дальнейшее совершенствование технологии такого сжигания с учетом ужесточенных требований по экологии, энергоэффективности, экономики, безопасности и др., что в свою очередь, невозможно без детализации процессов термоподготовки и горения антрацитовых частиц. Известно [3, 4], что горение твердого топлива в общем случае включает ряд стадий: прогрев, подсушка, выход летучих, зажигание и выгорание кокса. Самой продолжительной является стадия выгорания коксового остатка. В докладе с помощью асимптотических процедур построены аналитические решения по выгоранию коксовой части антрацитовой частицы и выполнен расчет горения частиц антрацита размером 100 мкм и меньше (представленный размер для факельного процесса) и 12 мм и больше (характерный размер для сжигания в кипящем слое). В первом случае горение идет в кинетическом режиме, а во втором – в диффузионном режиме. Реализованы модели «жесткого» золового каркаса, а также «с сегрегирующей» золой. Сравнение результатов по расчету времени выгорания коксового остатка антрацитовой частицы с экспериментальными данными В.И.Бабия из ВТИ [3] показало, что оно составляет в общем балансе времени для частицы 100 мкм при температуре газовой среды в 1600К 98,6%, а для частицы 12 мм при температуре дымовых газов в 1273К 99,9%. Эти результаты подтверждают положение, что время выгорания коксового остатка является наиболее длительным и занимает практически все время, требуемое для полного горения угольной антрацитовой частицы.

Работа выполнена за счет средств гранта РФФИ, № 17-08-44020 а

Список литературы

1. «Сибирский антрацит»: металлургия обновленная и энергетика. // http://idea.ru/creative/page/news-16144
2. Саломатов В.В., Мацнев В.В. и др. «Создание котельной установки с топкой кипящего слоя для сжигания отсевов сибирского антрацита» // Отчет по НИР ИТ СО РАН - НПО ЦКТИ – Новосибирск-Санкт-Петербург. 1996. - 127 с. № ГР 02200310967
3. Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. – М.: Энергоатомиздат. – 986. – 256 с.
4. Хзмалян В.М. Теория топочных процессов. – М.: Энергоатомиздат. – 1990. – 352 с.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ ПРИ ДЕТОНАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Сатонкина Н.П.[1), 2)]

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

Изучение кинетики химических реакций при детонации конденсированных взрывчатых веществ затруднено в силу агрессивности исследуемой среды. Высокие значения давления (десятки ГПа) и температуры (тысячи градусов), а также малые времена процесса (мкс) сильно ограничивают круг подходящих для исследования методик. В данной работе предлагается результат диагностики детонации через электропроводность.

На схеме высокого разрешения нами получен профиль электропроводности при детонации RDX, HMX, PETN, BTF, TNT с разной начальной плотностью. Типичный профиль электропроводности при детонации взрывчатых веществ с умеренным содержанием углерода приведен на рис. 1. На распределении ярко выделяется область повышенных значений, которую мы ассоциируем с зоной химической реакции. Как показано в работах [1,2], максимальное значение σ_{max} определяется содержанием всего углерода, а в точке перегиба значение σ_{CJ} объясняется так называемым свободным углеродом.

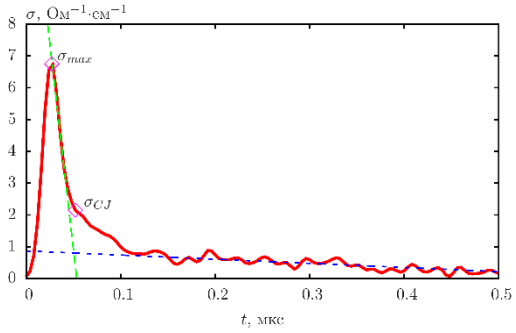


Рис.1. Профиль электропроводности при детонации RDX с плотностью 1.7~g/cm^3, σ_{max} – максимальное значение, σ_{CJ} – электропроводность в точке Чепмена-Жуге. Показана процедура определения особенности на графике $\sigma(t)$.

Традиционно считается, что дополнительное выделение энергии за плоскостью Чепмена-Жуге при детонационном разложении ВВ вызвано образованием частиц свободного углерода на заключительных стадиях детонационного разложения. Наши результаты не подтверждают такой механизм детонации ВВ. Нами показано, что первичная конденсация углерода происходит внутри зоны реакции вблизи фронта на временах меньше десятка нс. А так называемый свободный углерод является результатом реакций окисления углеродных наноструктур.

Список литературы

1. Satonkina N.P. The Dynamics of Carbon Nanostructures at Detonation of Condensed High Explosives // Journal of Applied Physics. – 2015.– V. 118. – P. 245901.
2. Сатонкина Н.П. Связь электропроводности при детонации конденсированных взрывчатых веществ с содержанием в них углерода // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т. 52, № 4. – С. 129-134.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГОРЕНИЯ ОДИНОЧНЫХ ДРЕВЕСНЫХ ЧАСТИЦ В ИНЕРТНОМ КАНАЛЕ

Свищев Д.А.[1], Козлова М.А. [1), 2)]
[1)] ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия
[2)] Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

В процессах газификации твердого топлива встречаются различные условия реагирования твердых частиц с газообразным окислителем. При газификации в плотном слое дутье реагирует не с рабочим топливом, а с полукоксом или коксовым остатком [1]. Для кипящих слоевых процессов характерно интенсивное перемешивание топливных частиц. Скорость газа в окислительной зоне реактора составляет 0,5-2,5 м/с для пузырькового слоя и 4-6 м/с для циркулирующего кипящего слоя [2]. Скорость движения газа при поточной газификации составляет 15-30 м/с, однако частицы топлива размером 20-80 мкм движутся в данных условиях вместе с потоком [3]. Относительная скорость твердой и газообразной сред оказывается сравнительно невысокой.

В работе исследуется процесс нестратифицированной обращенной газификации, характеризующейся отсутствием зоны пиролиза в слое. В данном процессе рабочее топливо, не претерпевшее термического воздействия, реагирует с интенсивным потоком фурменного дутья, скорость которого составляет 20-80 м/с в устье каждой из фурм. Подобные условия конверсии отличают данный процесс от других процессов газификации.

Для исследования механизма нестратифицированного процесса была создана методика и стенд, позволяющие испытывать режимы горения одиночных частиц. Переход от слоя к индивидуальной частице упрощает эксперимент и процедуры получения экспериментальных данных. Основным недостатком опытов с одиночной частицей является отсутствие окружения из других частиц, формирующих слой. Стоит предположить, что окружающие частицы значительно увеличивают интенсивность горения друг друга из-за увеличения турбулентной составляющей процессов тепло- и массообмена (например, при исследовании горения частиц графита в кипящем слое, наблюдался значительный рост числа Шервуда с увеличением размеров частиц инертного материала [4]).

В работе приводятся результаты исследования горения одиночных частиц. В экспериментах варьировались параметры процесса, а также использовался инертный канал для приближения конверсии индивидуальной частицы к условиям конверсии частиц в слое.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00774.

Список литературы

1. Reed T.B. Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems. 2nd ed. – Golden Colorado: Biomass Energy Foundation Press, 1998. – 140 p.
2. Basu P. Combustion and gasification in fluidized beds. – CRC Press, 2006. – 473 p.
3. Gräbner M. Industrial Coal Gasification Technologies Covering Baseline and High-Ash Coal. – Wiley, 2014. – 365 p.
4. Hayhurst A.N., Parmar M.S. Measurement of the mass transfer coefficient and Sherwood number for carbon spheres burning in a bubbling fluidized bed //Combustion and Flame. – 2002. – Т. 130. – №. 4. – С. 361-375.

ПЛАНИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГОРЕЛОК С НИЗКИМИ ВЫБРОСАМИ ОКСИДОВ АЗОТА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДИАГРАММ ПРЕДЕЛОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГАЗОВ

Сидоркин В.Т.[1], Тугов А.Н.[2], Берсенев К.Г.[1]
[1] ENTEH Engineering AS, Estonia
[2] ВТИ, Москва, Россия

На образование «термических» и «быстрых» оксидов азота при горении газов важное влияние оказывают адиабатическая температура фронта пламени, адиабатическая температура продуктов сгорания смеси, а также коэффициент избытка воздуха в исходной смеси. Указанные параметры в свою очередь связаны с исходным составом газо-воздушной смеси и содержанием в ней инертных компонентов. Смеси любого состава можно позиционировать на триангулярной диаграмме пределов воспламенения горючих газов. Дополнив диаграмму расчетными значениями адиабатических температур и коэффициентов избытка воздуха, можно получить наглядный инструмент для планирования режимов работы газовых горелок с низкими выбросами оксидов азота.

Влияние температуры и коэффициента избытка воздуха на образование оксидов азота неравнозначно, как правило, влияние температуры более сильное. Обе вышеназванные температуры в свою очередь достаточно сильно зависят от забалластированности смеси инертными компонентами. Рассматриваются четыре варианта комбинаций состава смеси с вариациями пропорций компонентов (см. Рис.1) – чистый горючий газ в чистом воздухе (a), чистый горючий газ в забалластированном воздухе (b), забалластированный горючий газ в чистом воздухе (c) и забалластированный горючий газ в забалластированном воздухе (d). Приведены расчетные и экспериментальные данные, иллюстрирующие предложенный подход.

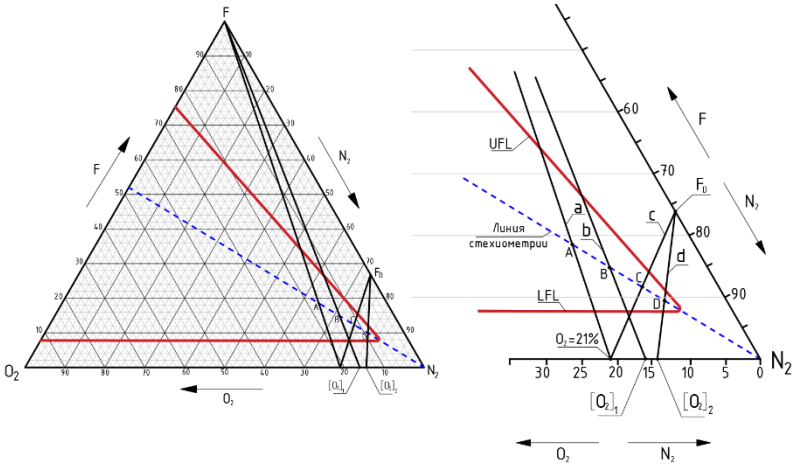


Рис. 1 – Схема позиционирования процессов горения газов в триангулярной диаграмме пределов воспламенения.

Список литературы

1. Coward H.F. and Jones G.W. Limits of flammability of gases and vapors. Bureau of Mines, Bulletin 503, 1952
2. Zabetakis M.G. Flammability characteristics of combustible gases and vapors. Bureau of Mines, Bulletin 627, 1965.
3. Zlochower I.A., Green G.M. The limiting oxygen concentration and flammability limits of gases and gas mixtures. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2009, No. 22, pp. 499-505.
4. ГОСТ 12.1.044-89 Пожароопасность веществ и материалов. 1989.
5. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980
6. Тугов А.Н., Верещетин В.А., Сидоркин В.Т., Берсенев К.Г. и др. Мероприятия для снижения выбросов оксидов азота на котле Е-135-3,2-420ДГ при сжигании газообразных продуктов сланцепереработки//Электрические станции, 2018, №5

ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МАЛОЭМИССИОННЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД

Сипатов А.М., Назукин В.А.
АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Россия

Трёхмерное численное моделирование является неотъемлемой частью процесса проектирования газотурбинных двигателей (ГТД), поскольку оно позволяет ускорить и удешевить процесс создания новых или модернизации существующих изделий.

В настоящее время в АО «ОДК-Авиадвигатель» выполняется разработка двигателя большой тяги ПД-35, на котором для удовлетворения перспективным экологическим требованиям ИКАО планируется установить камеру сгорания со сжиганием бедной топливовоздушной смеси. В мире подобная технология реализована только двумя компаниями – GE и Rolls-Royce. Разработка камеры сгорания ПД-35 ведётся в кооперации с предприятиями ОДК, привлечением отраслевых институтов (ЦИАМ, ВИАМ), а также Самарского университета и ИТ СО РАН. Не менее амбициозной задачей является разработка малоэмиссионных камер сгорания (МЭКС) для газотурбинных установок мощностью 10...25 МВт, в которых также реализуется бедное горение.

Реализация данных проектов сопровождается комплексом научных и технических задач, связанных с необходимостью обеспечения требуемых качества распыла топлива и его перемешивания с воздухом, распределения воздуха между элементами камеры сгорания, теплового состояния стенок жаровой трубы, предотвращением срыва пламени или его проскока во фронтовое устройство. Также необходимо обеспечить возможность управления распределением топлива для отстройки от режимов неустойчивого горения.

Решение представленных проблем не может быть выполнено без активного использования численного моделирования процессов, происходящих в камере сгорания, в частности, наибольшее распространение получили следующие виды расчётов:

холодные продувки отдельных элементов камеры сгорания и всей конструкции в целом, которые позволяют определить распределение расхода воздуха между элементами КС, потери полного давления;

распыл жидкого топлива из форсунки, перемешивание газообразного топлива с воздухом внутри фронтовых устройств, необходимые для обеспечения требуемого распределения топлива на выходе из фронтового устройства;

моделирование горения с учётом реакций образования вредных веществ, радиационного теплообмена, распыла топлива, которое используется для определения областей стабилизации пламени, полей температуры газа вблизи стенок и на выходе из КС, источников генерации NOx;

сопряженный теплообмен (CHT) для анализа теплового состояния элементов конструкции фронтового устройства и жаровой трубы.

Для увеличения эффективности применения численного моделирования используются как коммерческие (IOSO), так и собственные программные продукты, позволяющие выполнять оптимизационныхе расчёты. Непрерывно ведется работа по совершенствованию существующих и разработке новых методик для более достоверного описания процессов, протекающих в камерах сгорания ГТД.

МЕХАНОХИМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ БУРОГО УГЛЯ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОЙ И ЗОЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Скрипкина Т.С.[1)], **Бычков А.Л.**[1), 2)], **Ломовский О.И.**[1)]
[1)] Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2)] Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Бурый уголь является перспективным источником гуминовых кислот, являющихся ценными биологически активными веществами, несущими ряд важных функций в биосфере [1]. Однако, по причине высоких констант устойчивости комплексов гуминовых кислот со многими металлами, процесс отделения органического вещества угля осложнен: вместо гуминовых кислот на выходе получаются их соли – гуматы металлов. При этом бурые угли часто содержат редкоземельные металлы, отделение которых также является целесообразным [2].

Целью работы являлась разработка твердофазной механохимической технологии обработки бурого угля, приводящей к увеличению выхода гуминовых кислот и разрушению их комплексов с металлами.

Механохимическую обработку бурого угля Итатского месторождения проводили в лабораторной мельнице-активаторе АГО-2 в присутствии твердого щелочно-окислительного реагента – перкарбоната натрия. В результате обработки увеличивается выход гуминовых кислот (с 24 до 70 %), при этом зольность гуминовых кислот уменьшается с 7 до 2 %, а содержание свободных карбоксильных и фенольных групп увеличивается на 103% и 55%, соответственно [3]. На рис. 1 представлены ИК-спектры гуминовых кислот, выделенных из бурого угля до и после обработки.

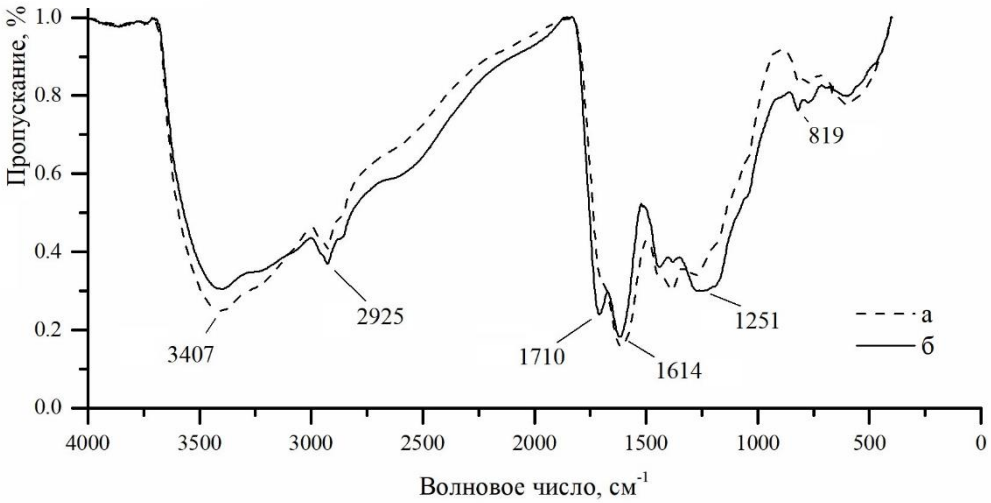


Рис. 1. ИК-спектры гуминовых кислот, выделенных из бурого угля до (а) и после (б) обработки.

Выраженная полоса 1710 см$^{-1}$ у образца после механохимической обработки свидетельствует об освобождении карбоксильных групп гуминовых кислот, которые у образца до обработки являются связанными.

Список литературы

1. Орлов, Д.С. Химия почв. - М.: МГУ, 1992. - 259с.
2. Маслов С. Г., Трофимов А. Б., Арбузов С. И. Исследование распределения минеральных примесей в окисленных бурых углях Итатского месторождения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2010. – Т. 316. – №. 3.
3. Skripkina, T.S., Bychkov, A.L., Tikhova, V.D., Smolyakov, B.S., Lomovsky O.I. Mechanochemically oxidized brown coal and the effect of its application in polluted water // Environmental Technology & Innovation, V.11, 2018, p. 74-82.

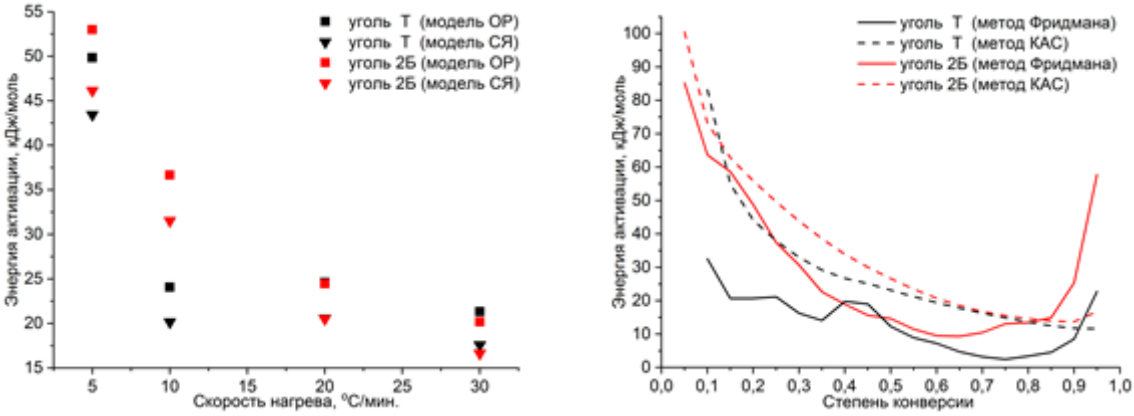
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ НАГРЕВА НА ЗАЖИГАНИЕ УГЛЯ

Слюсарский К.В.[1)], **Коротких А.Г.**[1)]
[1)] Томский политехнический университет, НОЦ им. И.Н.Бутакова, г. Томск, Россия

Термический анализ является одним из наиболее распространенных методов описания процессов конверсии твердого топлива [1], результаты которого широко применяются при моделировании данного процесса [2], несмотря на существенные отличия параметров процесса зажигания в камере анализатора и реальном энергетическом оборудовании. Одним из таких параметров является скорость нагрева топлива [3]. В данной работе были исследованы кинетические параметры для двух процессов – окисления образца угля в камере термического анализатора и высокоинтенсивного нагрева лучистым потоком CO_2-лазера.

Исследовались образцы каменного угля марки Т и бурого угля марки 2Б. Результаты технического и элементного анализа состава исследованных топлив приведены в [4]. Термический анализ проводился с помощью термического анализатора Netzsch STA 449 F3 Jupiter в среде воздуха в температурном диапазоне от 50 до 1000 °С при скоростях нагрева 5, 10, 20 и 30 °С/мин. исследования по лазерному зажиганию проводились при плотностях потока излучения от 100 до 200 Вт/см^2 с помощью установки, описанной в [4].

Полученные в результате термического анализа зависимости энергии активации от скорости нагрева и конверсии для моделей объемного реагирования (ОР) и сжимающегося ядра (СЯ) приведены на рис. 1, также как и зависимости энергии активации от конверсии, полученные методами Фридмана и Киссинджер-Акахира-Саноуза (КАС). Значения энергии активации для процессов лазерного зажигания углей составили 22,1 и 17,4 кДж/моль для каменного и бурого углей, соответственно, что близко к соответствующим значениям при скорости нагрева 30 °С/мин или степени конверсии 0,4-0,5 по методу Фридмана или 0,8-0,9 по методу КАС.



а) б)

Рис. 1. Энергии активации от скорости нагрева (а) и конверсии (б).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, в рамках реализации проекта №13.7644.2017/БЧ.

Список литературы

1. Slyusarskiy K.V., Larionov K.B., Osipov V.I., Yankovsky S.A., Gubin V.E., Gromov A.A. Non-isothermal kinetic study of bituminous coal and lignite conversion in air and in argon/air mixtures // Fuel. – 2017. – V. 191. – P.383-392.
2. Tabet F., Gökalp I. Review on CFD based models for co-firing coal and biomass // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2015. – V. 51. – P. 1101-1114.
3. Larionov K.B., Yankovskii S.A., Tolokol'nikov A.A., Gubin V.E., Matveev A.S. Composition of Synthesis Gas Produced by Intraformation Electrophysical Gasification of Coals at Different Heating Rates // Chem. Petrol. Eng. – 2017. – V. 55. – P. 255-259.
4. Korotkikh A., Slyusarskiy K.V., Sorokin I.V. Studying solid fuel ignition by CO2-laser // MATEC Web Conf. – 2017. – V. 115. – P. 03003.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

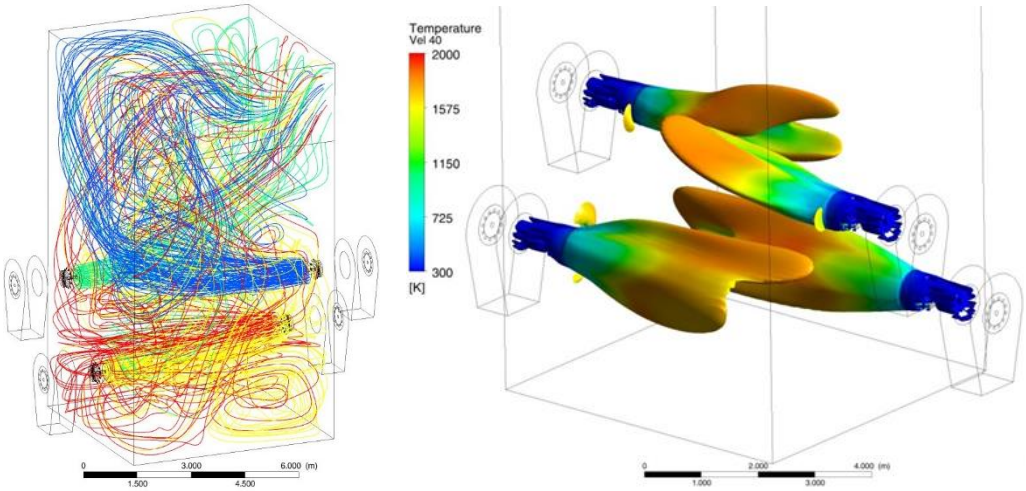
Соболев В.М.[1], Шиндер Ю.К.[2], Лупуляк С.В. [2], Фролов А.С. [2]
[1] ООО «НТО «ЭКОТОП», г. Санкт-Петербург, Россия
[2] Институт прикладной математики и механики СПбГПУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Основные технико-экономические показатели работы и экологической безопасности теплоэнергетического оборудования в значительной степени зависят от их конструктивных характеристик. Для эффективной проверки и улучшения этих показателей при проектировании прямоточно-вихревых горелок «Экотоп» типа ГМПВ-40 было выполнено математическое моделирование турбулентного диффузионного факела метана в топочном пространстве.

Расчетная сетка состояла из 5.5 млн. конечных объемов. В качестве модели турбулентности использовалась мо-дель сдвиговых напряжений SST, в качестве модели горения – модель дробления вихрей, в качестве модели излучения – модель дискретного переноса.

В связи с отсутствием стационарного решения были проведены нестационарные расчеты. Были получены такие характеристики, как структура вихревых потоков, длины факелов и характер их взаимодействия, а также образование загрязняющих веществ.

Структура вихревых потоков представлена на рис. 1а линиями тока, окрашенными по горелкам, из которых они исходят. Длины факелов представлены на рис. 1б окрашенными по температуре изоповерхностями 5% массовой доли метана.



а) Структура вихревых потоков б) Длины факелов

Рис. 1. Результаты численного моделирования.

Математическая модель была верифицирована по опытным данным, полученным после внедрения горелок. Так, средняя температура лопатки составила 350 и 450 °С для расчетов и опытных данных соответственно. Количество образующегося оксида азота NO составляло 62 и 70–85 мг/мм^3 для расчетов и опытных данных соответственно.

Таким образом, применение математической модели позволило на этапе проектирования получить адекватную картину развития факела, а также оценить показатели работы горелок.

Список литературы

1. Turns S.R. An Introduction to Combustion. McGraw Hill, 2000.
2. Kuo K.K. Principles of Combustion. Wiley, 1986.
3. Соболев В.М., Снегирев А.Ю., Лупуляк С.В. и др. Моделирование турбулентного диффузионного факела прямоточно-вихревой горелки // Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену РНКТ-4 (Москва, 23-27 октября 2006 г.), Т.3. – М.: МЭИ, 2006, С. 316-319.

ЗАЖИГАНИЕ ГРУППЫ ЧАСТИЦ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОГО НАГРЕВА

Сыродой С.В.[1], Кузнецов Г.В. [1], Саломатов В.В. [2]
[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия
[2] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Процессы зажигания частиц натуральных твердых топлив (например, древесной биомассы или угля) в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов, протекают, как правило, в непосредственной близости друг от друга [1-2]. При этом стоит отметить, что степень влияния этого воздействия на характеристики и условия зажигания частиц древесной биомассы пока не изучено. По этой причине цель настоящей работы – анализ влияния взаимодействия группы частиц на характеристики и условия их зажигания.

Проведены экспериментальные исследования закономерностей зажигания, частиц древесины (кедра) кубической формы (размером δ=3 мм) по методике [3]. Систематическая погрешность определения основных измеряемых параметров (T_g, t_{ign}) составляла не более 5 %. Доверительный интервал определения t_{ign} при доверительной вероятности 0.95 не превышал 16 %.

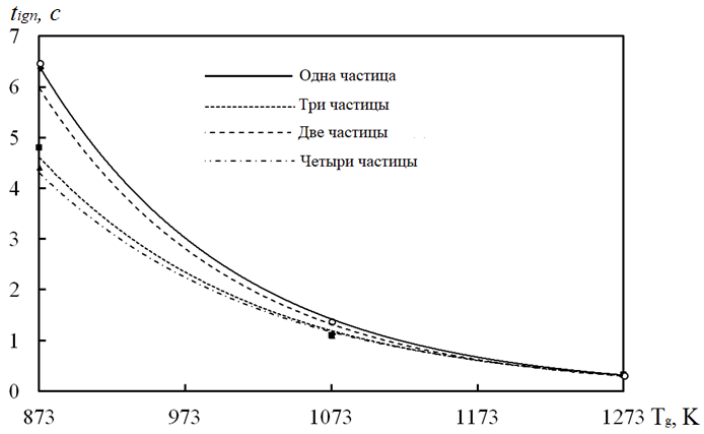


Рис.1. Зависимость времени задержки воспламенения частиц древесной биомассы в условиях высокотемпературного радиационно-конвективного нагрева

На рис. 1 представлены зависимости времени задержки воспламенения частиц древесной биомассы кубической формы (размером $d=0.4\cdot10^{-3}$м) от температуры внешней среды при различных их концентрациях в зоне высокотемпературного нагрева.

Анализ зависимостей показывает, что при температурах внешней среды до 1173К увеличение концентрации частиц в зоне высокотемпературного нагрева приводит к снижению времен задержек воспламенения. Это, скорее всего обусловлено повышением концентрации горючих газообразных продуктов пиролиза в зоне воспламенения. При температурах внешней среды T_g>1173К число частиц не влияет на значение t_{ign}. Проведено обоснование физического механизма процесса.

Список литературы

1. Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. // М.: Энергоатомиздат, 1986 - 208 с.
2. Померанцев В.В. и др. Основы практической теории горения Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 312 с.
3. S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, A.V. Zhakharevicha, N.Y. Gutareva, V.V. Salomatov. The influence of the structure heterogeneity on the characteristics and conditions of the coal–water fuel particles ignition in high temperature environment. Combustion and Flame. – 2017. –V.80. – p.196–206.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПЫЛЕВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В РАЙОНАХ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ РАЗЛИЧНЫЙ ВИД ТОПЛИВА (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

Таловская А.В., Язиков Е.Г., Филимоненко Е.А., Шахова Т.С.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Выбросы объектов теплоэнергетики являются мощными антропогенные источниками поступления в атмосферный воздух пылевых (твердых) частиц, содержащие опасные для здоровья человека химические элементы. Исследование состава и распределения пылевых выбросов от объектов теплоэнергетики возможно с использованием снежного покрова. В данной работе представлена сравнительная оценка аэротехногенной нагрузки в окрестностях городских ТЭЦ и котельных в сельских поселениях, отличающихся видом топлива (уголь, газ, нефть, дрова) и технологическими параметрами, на основе изучения снежного покрова.

Проводился отбор проб в окрестностях сельских угольных, газовых, дровяных и нефтяных котельных Томской области. В г. Томске исследования были в окрестностях ГРЭС-2 (газ, уголь Кузнецкого бассейна), г. Северск – ТЭЦ (уголь Кузнецкого бассейна), г. Кемерово – ГРЭС (коксовый газ, уголь Кузнецкого бассейна), г. Омска – ТЭЦ-5 (уголь Экибастузского бассейна), г. Мыски – Томь-Усинская ГРЭС (уголь Кузнецкого бассейна). Анализ макро-и микроэлементного состава проб твердой фазы снега выполнялся масс-спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) в ХАЦ «Плазма» (г. Томск), инструментальным нейтронно-активационным анализом, атомно-абсорбционной спектроскопией (метод пиролиза) в МИНОЦ «Урановая геология» (ТПУ). Выполняли анализ минерально-фазового состава проб рентгеноструктурным анализом и определение техногенных частиц сканирующей электронной микроскопией.

Выявлена зависимость уровня пылевой нагрузки и суммарного показателя загрязнения от вида используемого топлива, тепловой и энергетического мощности изучаемых объектов. Определены элементы-индикаторы в составе твердых частиц снегового покрова, представляющие особую экологическую опасность, в окрестностях городских и сельских объектов теплоэнергетики с учетом вида используемого топлива и технологических параметров. Установлены высокие уровни накопления U, Th, ряда элементов 1, 2 и 3 класса опасности, редкоземельных элементов в пробах в районах расположения угольных городских и сельских объектов теплоэнергетики. Уровни накопления элементов зависят от технологических параметров исследуемых объектов и расположенных рядом других источников загрязнения. Br, Sb, Hg, Zn можно определить, как элементы, отражающие техногенное воздействие газовых котельных, Sr, Ca, Na – дровяных котельных, V, Ni, Zn – нефтяных котельных.

В пробах определили присутствие техногенных частиц в форме сульфатов Ba, сульфидов As, фосфатов La, Ce, Nd, различных интерметаллических соединений, оксидов U, Fe, Ni, Ag в зависимости от района исследования. Размер частиц менее 10 мкм, что указывает на их способность проникать в респираторные органы человека.

В окрестностях разных объектов теплоэнергетики выявлены общие и различные элементы-индикаторы, техногенные образования в твердой фазе снега, отражающие технологические параметры котельных, геохимические особенности используемого топлива и зольных выбросов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-45-700184р_а.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОЗДАНИЮ ГЛУШИТЕЛЯ ШУМА ДЛЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО КЛАПАНА КАМЕРЫ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ

Теляшов Д.А., Павлов Г.И., Накоряков П.В., Суховая Е.А.

Казанский национальный исследовательский технический университет – КАИ. им. А.Н. Туполева. г. Казань, Россия

Энергетическая эффективность работы источников теплоты является одним из основных критериев при создании новых теплогенерирующих устройств и модернизации существующих. Традиционные методы повышения энергоэффективности, используемые в теплоэнергетике, не всегда приводят к желаемым результатам и зачастую являются высокозатратными. Необходимо искать другие пути повышения энергоэффективности тепловых устройств. В конце прошлого века как в РФ, так-и за рубежом начали выпускать принципиально новые теплоэнергетические установки, работающие по принципу пульсирующего горения [1,2,3]. К основным преимуществам этих установок следует отнести низкую металлоемкость и полноту сгорания. Сравнение характеристик пульсирующего и факельного горения приведено в Таблице 1.

Таблица 1. Сравнение характеристик пульсирующего и факельного горения

Сравниваемая характеристика	Факельное (дефлаграционное) горение	Пульсирующее (вибрационное) горение
Интенсивность горения, кВт/м^3	100 - 1000	10000 - 50000
Полнота сгорания, %	80 - 96	96 - 98
Конвективный коэффициент теплопередачи, Вт/м^{2}К	50 - 100	100 - 500
Химический недожог, %	0 - 3	0 - 1
Механический недожог, %	0 - 15	0 - 5

Выделение химической энергии из углеводородных топлив происходит в камере пульсирующего горения (КПГ). Перспективны КПГ, которые работают без тяго-дутьевых устройств. Воздух для горения в такие камеры поступает самовсосом через клапаны. На современных КПГ используются аэродинамические (АК) и механические клапаны (МК). Механический клапан сложнее по конструкции, но надежнее в работе. Аэродинамический клапан конструктивно прост, но критичен к конкретным условиям. В представленной работе приведены результаты сравнительного анализа механического и аэродинамического клапанов. Выявлены условия работы АК совместно с глушителем шума, при которых КПГ работает устойчиво в широком диапазоне расходных характеристик. Разработаны рекомендации по созданию глушителя шума. Исследована его эффективность. Установлено, что предложенный глушитель шума не нарушает работу камеры пульсирующего горения и не снижает его технические характеристики.

Список литературы

1. Северянин В.С. Пульсирующее горение способ интенсификации теплотехнических процессов: Дис. док. техн. наук: 05.14.04 / В.С. Северянин - Защищена 05.06. 1987; Утв. 25.12.1987; ТН № 007346.- Саратов, 1987. - 431с.
2. http://aeromach.ru/technology_pulse_combustion (дата обращения 28.04.2018).
3. Быченок В.И. Теплоэнергетика рабочего процесса в аппаратах пульсирующего горения: Дис. док. техн. наук: 05.14.04 / В.С. Северянин - Защищена 2004 – Воронеж, 2004. – 339 с.

О ПЕРСПЕКТИВАХ РАЗВИТИЯ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МЕТОДОВ В РАЗРАБОТКАХ ГАЗО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Тесленко В.С.

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

На основе поиска путей эффективного использования углеводородных ресурсов России рассматриваются принципиально новые идеи и методы сжигания газов непосредственно в воде.

Рассматриваются три подхода к разработке принципиально новых методов применения природного газа, в основе которых закладываются методы сжигания газов непосредственно в воде:

- Разработки тепловых генераторов на основе методов импульсно-циклического сжигания природного газа непосредственно в воде, беспламенное сжигание, без промежуточных теплообменников.
- Разработки «безвинтовых» водных двигатель-движителей на основе импульсно-циклического сжигания природного газа непосредственно в воде на тяговой стенке транспортного средства.
- Разработка технологий экологически безопасного сжигания (взрывания) газовых зарядов для вскрытия ледовых покровов на реках в периоды весенних паводков. Газо-взрывное вскрытие льда на реках на порядки более щадящее для водной фауны, более эффективное чем «луночное» взрывания бризантных ВВ так как может обеспечивать «ковровое» взрывание льда, на порядок дешевле тротила, позволяет создание автоматизированных систем взрывания ледового покрова и заторов на реках.

Список литературы

1. V.S. Teslenko, A.P. Drozhzhin, R.N. Medvedev, I.S. Batraev. In-water gas combustion in linear and annular gas bubbles // Thermophysics and Aeromechanics, 2014. Vol. 21. No. 4. pp. 479-488,
2. R.N. Medvedev, A.P. Drozhzhin, V.S. Teslenko. Thrust generation by pulse combustion of gas in a submerged chamber // International Journal of Multiphase Flow, 2016, Vol. 83, pp. 232–238.
3. V.S. Teslenko, A.P. Drozhzhin, and R.N. Medvedev. In-water gas combustion for thrust production // Thermophysics and Aeromechanics, 2017, Vol. 24, No. 4. Pp. 583-591,

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДИНАМИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА ПЫЛИ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Титов Д.А., Григорьев К.А., Лузин П.М.
ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова», г. Санкт-Петербург, Россия

Подготовка угольной пыли к сжиганию в энергетических котлах является важным этапом, который влияет на эффективность и экологические показатели котельных установок. Развитие технологий сжигания твёрдого топлива обусловливает потребность в совершенствовании оборудования пылеприготовительных систем. Сепараторы пыли являются важным звеном в системе пылеприготовления.

Разработка отечественного динамического сепаратора для систем пылеприготовления ТЭС позволяет восполнить пробел в технике получения пыли тонкого помола и освоения ступенчатых технологий сжигания твёрдого топлива в российской энергетике.

Сегодня разработку новых образцов техники невозможно представить без использования компьютерного моделирования. Вычислительный эксперимент позволяет обосновать технические решения при модернизации действующих установок и создании новых конструкций на стадии проектирования.

Для численного исследования конструктивных особенностей, гидродинамики и процессов сепарации топлива разработана расчётная модель динамического сепаратора на основе программного продукта ANSYS-Fluent.

Верификация модели на экспериментальных данных, полученных сотрудниками ОАО «НПО ЦКТИ» при исследовании опытно-промышленного образца динамического сепаратора второго поколения на воркутинском каменном угле и сотрудниками ОАО «ВТИ» при испытании пилотного образца динамического сепаратора третьего поколения на кузнецком каменном угле, показала, что модель адекватно описывает гидродинамику двухфазного потока в сепараторах. Расхождение расчёта с экспериментом находится в пределах погрешности опыта.

Вычислительный эксперимент позволил выявить особенности гидродинамики аппаратов и показал, что динамический режим по сравнению со статическим режимом улучшает структуру дискретной фазы на выходе из сепаратора (снижает максимальный размер частиц δ_{max} и приближает коэффициент полидисперсности пыли n к оптимальным значениям) и позволяет существенно понизить значения контрольного показателя качества пыли (полного остатка на сите 90 мкм).

Предложенная математическая модель была использована при расчётном обосновании модернизации инерционного сепаратора мельницы-вентилятора (предназначенной для измельчения лигнита) на ТЭЦ Косталац Б в Сербии, а также при разработке динамического сепаратора для валковой мельницы горизонтального типа (предназначенной для выработки цементной пыли) для АО «Ахангараншифер» в Узбекистане и динамического сепаратора для угольной мельницы типа XRP для заказчика в Индии.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ И СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ С ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ СТАБИЛИЗАТОРОМ ПРИ АЗИМУТАЛЬНОЙ ПОДАЧЕ ТОПЛИВА

Третьяков В.В., Свириденков А.А., Токталиев П.Д., Семенев П.А.
Центральный Институт Авиационного Моторостроения, г. Москва, Россия

В работе расчетным и экспериментальным образом проведено исследование характеристик течения в камере сгорания газотурбинного двигателя с газодинамическим стабилизатором. Идея использования газодинамических стабилизаторов связана с возможностью управления рабочим процессом в камерах сгорания путем регулирования размеров зон обратных токов (ЗОТ) за стабилизатором в зависимости от режима работы камеры. Это регулирование осуществляется поперечной подачей воздушных струй в основной закрученный поток. В настоящей работе исследуется влияние способа подачи топлива с боковой поверхности стабилизатора на мелкость распыливания и распределение капельножидкого топлива в следе за стабилизатором. Варьируемыми параметрами в проведенном исследовании являлись закрутка основного воздушного потока на выходе из завихрителя $S_w=V_\varphi/V_z$, интенсивность вдува поперечных струй $V_j= V_r/V_0$ и скорость впрыска топлива V_f., здесь V_0, V_φ, V_z и V_r среднерасходная скорость воздушного потока через завихритель, вращательная, продольная и радиальная компоненты скорости соответственно.

В экспериментальной части работы проведены измерения характеристик поля течения и факелов распыливания жидкого топлива методами теневой фотографии и PIV (Particle Image Velocimetry). В расчетной части исследования проведено численное моделирование многофазного течения в объеме камеры сгорания с использованием как уравнений Рейнольдса, так и нестационарных отфильтрованных уравнений Навье-Стокса (метод отсоединенных вихрей [1]). Вычислительная процедура также была дополнена моделями распада топливной струи и вторичного дробления капельножидкой фазы топлива [2].

Результаты проведенных исследований показали, что вдув топлива под углом к оси стабилизатора приводит к изменению распределения скоростей в следе за газодинамическим стабилизатором. Противоположная закрутка расширяет факел распыливания, что приводит к перераспределению большей доли расхода топлива к периферии факела и вызывает уменьшение продольной компоненты скорости капель. Распределение размеров капель по радиусу факела распыливания при подаче топлива вдоль и против направления воздушного потока, и перпендикулярно к нему оказались близкими для рассмотренных режимов течения стабилизатора. По данным эксперимента и расчета, основное дробления капель осуществляется на расстояниях до 10 мм от торца стабилизатора. При этом максимальные размеры капель в факеле распыливания на этом расстоянии составляют приблизительно 80 мкм. Далее, вниз по потоку происходит частичное вторичное дробление капель, так что на периферии топливного факела размеры капель составляют около 60 мкм. Результаты численного моделирования также показали, что основная часть капельножидкого топлива находится в пределах 40 мм по радиусу от оси стабилизатора и 50 мм от его торца вдоль оси симметрии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 17-01-00213.

Список литературы

1. Shur S., Spalart P., Strelets M., Travin A. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilites // International Journal of Heat and Fluid Flow, vol.29, iss.6, pp.1638-1649, 2008
2. Sviridenkov A.A., Toktaliev P.D. and Tretyakov V.V. Modeling of atomization and distribution of drop-liquid fuel in unsteady swirling flows in a combustion chamber and free space // 2018 J. Phys.: Conf. Ser. 980

ВОЗБУЖДЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ФРОНТА ГОРЕНИЯ В ПЛОСКОМ КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ ВОЛНАМИ ЭНТРОПИИ

Трилис А.В.
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Академик Б.В. Войцеховский был первым, кто предложил сжигать горючую смесь в режиме непрерывной детонации с помощью поперечных вращающихся волн. Он реализовал данную идею на практике в канале кольцевой камеры сгорания, в который смесь подавалась радиально из центра к периферии. В настоящее время процесс непрерывной вращающейся, или спиновой, детонации является наиболее перспективным для создания двигателей нового поколения, использующих энергию горения топлива в детонационном режиме.

В работах [1,2] было проведено моделирование начального (линейного) этапа развития процесса непрерывной спиновой детонации в плоско-радиальной кольцевой камере сгорания [3,4] и исследована модовая устойчивость цилиндрического фронта горения в радиально расходящемся потоке горючей смеси. Были получены квазисобственные частоты (реальные части определяют частоты колебаний, а мнимые части квазисобственных частот определяют развитие колебаний во времени) акустических колебаний и окружных вращающихся волн возмущения фронта горения. Инкремент определялся по формуле:

$$\gamma = \mathrm{Im}(\omega_{kl}), \tag{1}$$

где ω_{kl} – квазисобственная частота, k – угловой (окружной) номер моды, l – радиальный номер моды.

В работах [1, 2] также было показано, что при отсутствии в системе подачи горючей смеси возмущений давления или возмущений радиальной скорости существуют *неустойчивые* моды акустических колебаний и волн с положительными инкрементами (1). При условии же постоянства расхода в системе подачи потока горючей смеси фронт горения является устойчивым, а инкременты (1) для всех мод – отрицательны.

В настоящей работе проведено исследование модовой устойчивочти цилинрического фронта горения при наличии волн энтропии в системе подачи горючей смеси. Показано, что в данном случае даже при условии постоянного расхода в системе подачи существует дискретное множество квазисобственных частот и соответствующих мод колебаний и волн с положительными инкрементами (1), для которых фронт горения является неустойчивым.

По результатам исследования можно заключить, что за распространение поперечных окружных детонационных волн в кольцевом канале отвечает развитие по времени окружных волн неустойчивости цилиндрического фронта горения.

Список литературы

1. Трилис А.В. Моделирование поперечных детонационных волн в плоскорадиальном кольцевом канале // Сибирский физический журнал. – 2017. – Т. 12, № 2. – С. 60 – 65.
2. Трилис А.В., Сухинин С.В., Васильев А.А. Устойчивость цилиндрического фронта пламени в кольцевой камере сгорания // Сибирский журнал индустр. математики. – 2017. – Т. 20, № 4. С. 67 – 79.
3. Войцеховский Б.В. Спиновая стационарная детонация // ПМТФ. – 1960. – № 3. С. 157 – 164.
4. Михайлов В.В., Топчиян М.Е. К исследованиям непрерывной детонации в кольцевом канале // ФГВ. – 1965. – Т. 1, № 4. – С. 20 – 23.

ВЛИЯНИЕ ИНЕРТНЫХ ЧАСТИЦ НА ВРЕМЕНА ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ РЕАГИРУЮЩИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Тропин Д.А., Боченков Е.С.
Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Реагирующие газовые смеси могут легко воспламениться от малых источников зажигания. Это обуславливает потребность в нахождении путей предотвращения воспламенения смеси. В нашей предыдущей работе [1] было показано, что инертные частицы могут увеличивать время задержки воспламенения и предотвращать воспламенение смесей водород/силан/воздух. В данной работе изучено влияние инертных частиц на воспламенение водородо-воздушной смеси.

На (рис. 1) приведены расчетные зависимости времени задержки воспламенения смеси $2H_2 + Air$ в присутствии инертных частиц SiO_2 диаметрами 100 нм, 1 мкм и 10 мкм от температуры за фронтом УВ.

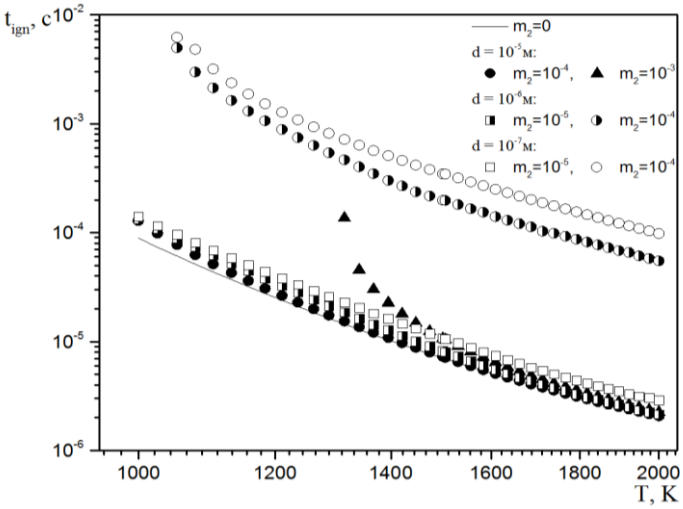


Рис. 1. Зависимость времени задержки воспламенения смеси $2H_2 + Air$ с частицами SiO_2 от температуры за фронтом отраженной УВ.

Из (рис. 1) видно, что увеличение объёмной концентрации частиц и уменьшение диаметра частиц приводит к увеличению времени задержки воспламенения смеси и в некоторых случаях к обрыву зависимостей при определённой температуре, называемой предельной температурой воспламенения смеси($T_{\lim}$) следующие: 1316 К, 1030 К, 1032 К для следующих параметров частиц: $d = 10^{-5}$ и $m_2 = 10^{-3}$, $d = 10^{-6}$ и $m_2 = 10^{-4}$, $d = 10^{-7}$ и $m_2 = 10^{-4}$, соответственно

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект №16-08-00778-а).

Список литературы

1. Тропин Д.А., Боченков Е.С. Влияние инертных частиц на пределы воспламенения смесей водород/силан/воздух // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XII Всероссийской конференции молодых ученых (Новосибирск - Шерегеш, 16 - 22 марта 2018 г.) / под ред. В.В. Козлова. - Новосибирск, 2018. -С. 144-145.

ВЛИЯНИЕ АНТИПИРЕНА ТФФ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ПММА.

Трубачев С.А.[1),2)], **Коробейничев О.П.** [2)], **Терещенко А.Г.** [2)], **Ху Я.** [3)], **Вэнг К.** [3)]
[1)] Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия
[2)] Институт Химической Кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[3)] Институт Науки и Технологий Китая, г. Хэфэй, Китай

Одна из наиболее важных задач в современном мире – разработка методов снижения воспламеняемости горючих материалов. Естественное горение является очень сложным процессом. Одним из эффективных способов снижения горючести полимеров – это добавка антипиренов в их состав. Исследование распространения пламени по поверхности полимеров с добавками антипиренов представляет интерес с точки зрения разработки методов борьбы с пожарами.

В данной работе исследовался полимер полиметилметакрилат (ПММА), обладающий относительно простым механизмом горения и не образующий углеродистого каркаса. В качестве антипирена, вводимого в состав литого и экструдированного ПММА для снижения его горючести, использовался трифенилфосфат (ТФФ). Для определения эффективности добавки было изучено её влияние на различные характеристики горения полимера. Из экспериментальных данных получено, что с увеличением содержания антипиренов уменьшается скорость распространения пламени (рис. 1), массовая скорость горения для ПММА полученного как методом горячего прессования (литой), так и методом экструзии. Также с помощью Pt-PtRh10% термопары с толщиной проволоки 50 мкм, закреплённой на системе трёхмерного позиционирования были получены поля температуры в пламени. По полученным температурным профилям расчитан кондуктивный тепловой поток из пламени на поверхность образца. С помощью аналогично закреплённого микрозонда найдено пространственное распределение компонентов в газовой фазе при горении ПММА и ПММА-ТФФ в газовой фазе. Определены следующие вещества: N_2, O_2, CO_2, CO, $C_5H_8O_2$ (мономер ПММА), H_2O, C_2H_4, C_3H_6. С помощью термогравиметрического анализа получена кинетика термического разложения исследуемых образцов в инертной и воздушной среде.

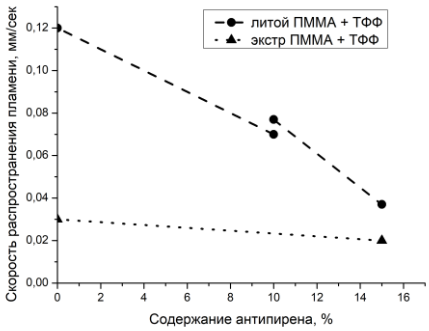


Рис. 1. Зависимость скорости распространения пламени для исследованных образцов от массового содержания антипирена в пластинах ПММА.

Трифенилфосфат ингибирует реакции в газовой фазе, уменьшая максимум температуры в пламени и тепловой поток из пламени. В случае экструдированного ПММА выявлен двухстадийный механизм термического разложения образца, где первая стадия относится к низкотемпературному выходу ТФФ в газовую фазу. По полученным данным сделан вывод, что уменьшение тепловыделения в газовой фазе в большей мере определяет уменьшение скорости горения образца, чем изменение кинетики пиролиза.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант №16-49-02017).

СЖИГАНИЕ ТКО В МИРЕ И РОССИИ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Тугов А.Н.
ОАО «ВТИ», г. Москва, Россия

В 2016г. в мире работало более 2200 предприятий для термической переработки твердых коммунальных отходов (ТКО) общей мощностью 300 млн т отходов в год. В период с 2011 по 2015г. введено в эксплуатацию более 280 таких предприятий суммарной мощностью около 80 млн т ТКО/год. Ожидается, что к 2025г. будет построено еще 600 новых заводов мощностью около 170 млн т/год.

Для термического обезвреживания ТКО используют технологии, основу которых составляют процессы сжигания, пиролиза и газификации. Однако для энергетического использования ТКО, в первую очередь на ТЭС, наиболее освоенным, экономически обоснованным и, соответственно, повсеместно реализуемыми технологиями термической переработки твердых коммунальных отходов считаются их сжигание в слоевых топках на механических колосниковых решетках, а в ряде случаях – в топках с кипящим слоем.

Основные закономерности сжигания ТКО в этих установках изложены в [1].

В России в настоящее время предприятий, на которых энергопотенциал ТКО преобразуется в электроэнергию, всего три. Это введенный в 2001 г. после реконструкции московский спецзавод №2 (МСЗ №2), на котором установлены три турбоагрегата электрической мощностью 1,2 МВт каждый, МСЗ № 4 (год пуска 2005 г., установленная электрическая мощность 12 МВт) и МСЗ № 3 (введен в эксплуатацию в 2007 г., установленная электрическая мощность 11 МВт).

Для дальнейшего развития предприятий для энергетической утилизации ТКО в настоящее время в России принят ряд законодательных документов, в соответствие с которыми уже в ближайшее время запланирован ввод в эксплуатацию четырех заводов в Московской области и одного в Казане.

Однако строительство этих объектов связано с определенными рисками. Их мощность по переработке ТКО (550-700 тыс. т в год), с точки зрения логистики, выбрана крайне не удачно. Для перевозки указанных объемов ТКО потребуется большое количество мусоровозов с доставкой отходов на большие расстояния, с плечами доставки даже больше, чем до ныне существующих свалок. Установленная электрическая мощность заводов приведена для теплоты сгорания ТКО 9,1 МДж/кг. ТКО с такой высокой теплотой сгорания в России не было и на ближайшую перспективу не ожидается. Выбранная единичная мощность заводов 550-700 тыс. т ТКО в год не является базовой (масштабируемой) для внедрения по всей России. Данные показатели в принципе не характерны для данного рода проектов. За рубежом большинство из них реализуется в диапазоне около 250-360 тыс. тонн ТКО отходов в год.

Следует отметить, что ранее на основании результатов выполненных расчетно-аналитических и экспериментальных исследований, а также анализа опыта эксплуатации зарубежных и отечественных предприятий установлено, что в России наиболее рациональным решением для термической переработки ТКО является ТЭС производительностью 360 тыс. т ТКО в год, с установленной электрической мощностью 24 МВт. В [1] изложены принципиальные технические решения, которые могут быть взяты за основу при разработке проекта для конкретной площадки. Экспертные оценки показывают, что только в России целесообразен уже в ближайшее время ввод в эксплуатацию, по крайней мере, 34 таких ТЭС в 22 городах.

Список литературы

1. Тугов А. Н. Энергетическая утилизация твердых коммунальных отходов на ТЭС. – М.: ОАО «ВТИ», 2017.– 178 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОСОПЛОВЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ФОРСУНОК ПРИ СЖИГАНИИ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Упский М.В., Штым К.А., Мокрин С.Н.
Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

Основой эффективной работы таких устройств как жидкотопливные горелки, скруббера, циклонные предтопки, является организация оптимального распыла жидкости, согласованного с аэродинамикой закрученного потока газа или воздуха. Одним их основных узлов для распыливания жидкости являются форсунки различных модификаций. Исследования различных типов форсунок, проводимые на кафедре "Теплоэнергетики и теплотехники", показали высокую эффективность эксплуатации центробежных многосопловых форсунок. Их факел является результатом сложения расположенных особым образом в пространстве единичных факелов [1, 2, 3, 4]. С целью решения инженерной задачи по созданию алгоритма расчета оптимальной многосопловой форсунки были проведены исследования для нахождения связи расходных характеристик форсунок с их основными геометрическими параметрами (диаметр шнека, диаметр сопла, количество заходов шнека и др.), определены диаграммы плотности орошения, а также получен дисперсный состав жидкостного факела при различных условиях.

Для обработки результатов исследований моделей использовать зависимость числа Eu от числа Re для обобщения накопленного материала по расходным характеристикам многосопловых центробежных форсунок при разных количествах сопел, диаметрах шнеков и диаметрах выходных сопел. У всех форсунок данного типа различной производительности при их проектировании соблюдалось геометрическое подобие шнеков, угла наклона канала по отношению к оси шнека и конической вихревой камеры.

Так как рассматриваемые процессы, зависят от большого количества факторов, то необходимо проведение большого количества детальных исследований на стендах и промышленных образцах. При этом огромное значение имеет визуализация процесса распыливания, изучение этапов развития односопловых и многосопловых факелов во взаимодействии с воздушным потоком. В настоящее время большое распространение в мире при исследовании динамичных процессов приобретает высокоскоростная видеосъемка [5]. В лаборатории кафедры в кампусе ДВФУ проводятся исследования эффективности распыла форсунок на стенде, основным элементом которого является сверхпроизводительная высокоскоростная камера Fastcam SA-Z с максимальной частотой до 480000 кадров в секунду.

Использование разработанного стенда позволило уточнить результаты экспериментов с применением метода голографического исследования путем нанесения координатной сетки на полученные изображения и повысить надежность и эффективность сжигания жидкого топлива на котлах с циклонно-вихревыми предтопками.

Список литературы

1. Штым А.Н., Пинькевич В.В. Исследование циклонного предтопка с комбинированным вводом воздуха при сжигании мазута. – В кн. Теплоэнергетика. Труды ДВПИ, т. 90. Владивосток, 1974.
2. Штым А.Н., Штым К.А. Модернизация паровых и водогрейных котлов с установкой циклонных предтопков для сжигания мазута и газа. Энергетик №10, 2010, с. 25-28.
3. Штым А.Н., Штым К.А., Дорогов Е.Ю. Котельные установки с циклонными предтопками//Владивосток. Издат. дом Дальневост. федерал. ун-т. 2012. 421 с.
4. Упский В.А., Упский М.В., Штым К.А. Исследование и внедрение многосопловых центробежных форсунок. Сб. С.111-112.
5. Kodai Kato, Soichiro Suzuki, Taku Kudo, Soichiro Kato, Masahiro Uchida, Akihiro Hayakawa, Hideaki Kobayashi. Effects of Cross-flow on Liquid Sheet Break-up and Droplet Diameters of Two-dimensional Air-blast Atomizer in High Pressure Environment. Twelfth International Conference of Flow Dynamics. October 27-29, 2015, Sendai, Miyagi, Japan.

ОСОБЕННОСТИ ОКИСЛЕНИЯ ПРОПАНА И ПРОПЕНА В СРЕДЕ АРГОНА, ДИОКСИДА УГЛЕРОДА И ВОДЯНОГО ПАРА ПРИ ПОВЫШЕННОМ ДАВЛЕНИИ

Федяева О.Н., Артамонов Д.О., Востриков А.А.
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Сжигание топлив в теплоносителе повышает энергоэффективность и экологическую чистоту производства тепловой и электрической энергии [1,2]. Очевидно, что для разработки новых технологий, основанных на сжигании различных видов топлив в водяном паре или сверхкритической воде, необходимо выявить особенности горения индивидуальных соединений в этих средах. Горение водорода, метана и изобутана в среде азота, диоксида углерода и водяного пара исследовано нами ранее [3−5]. Цель данной работы – выявить особенности окисления пропана и пропена в среде аргона, диоксида углерода и водяного пара в условиях высокой плотности реагентов.

Эксперименты проведены в условиях равномерного (1 К/мин) нагрева трубчатого реактора при недостатке кислорода (0.75 от стехиометрического количества, необходимого для полного окисления), плотности топлива ≈ 0.25 моль/дм^3 и степени разбавления ≈ 60% мол. Исходя из временных зависимостей прироста температуры реакционных смесей, вызванного тепловыделением при окислении топлива, обнаружено, что температура самовоспламенения пропена на ≈ 50 К ниже, чем пропана, во всех разбавителях. Показано, что в среде аргона окисление пропана, в отличие от пропена, реализуется по механизму цепно-теплового взрыва. По данным масс-спектрометрического анализа, в составе продуктов окисления пропена преобладали метан, метанол, ацетальдегид, ацетон и уксусная кислота.

Установлено, что в среде CO_2 продолжительность окисления пропана в 2.5 раза больше, чем пропена. Существенных различий в составе продуктов окисления пропана и пропена не обнаружено. В обоих случаях наблюдается низкая степень превращения топлива, что согласуется с результатами окисления изобутана и объясняется высокой плотностью CO_2 и наличием V−V резонансов в системе CO_2/углеводороды [5].

При окислении топлива в среде H_2O процесс протекает на фоне испарения воды и, как следствие, увеличения теплоемкости и теплопроводности реакционной смеси. При этом часть тепла, выделяемого при окислении топлива, расходуется на испарение воды. В результате, на фоне почти полного потребления кислорода максимальный прирост температуры реакционной смеси не превышает 16 К. Высокая степень превращения топлива в среде водяного пара может быть вызвана не только химическим участием молекул H_2O в элементарных реакциях, но колебательным возбуждением молекул O_2 по механизму резонансного V−V обмена с молекулами H_2O [3,5]. В целом, из полученных результатов следует, что динамика окисления углеводородов в среде аргона, диоксида углерода и водяного пара зависит не только от химической структуры топлива, но и от природы разбавителя.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-29-06005).

Список литературы

1. Queiroz J.P.S., Bermejo M.D., Mato F., Cocero M.J. Supercritical water oxidation with hydrothermal flame as internal heat source: Efficient and clean energy production from waste // J. Supercrit. Fluids – 2015 – V. 96 – P. 103–113.
2. Vostrikov A.A., Dubov D.Yu., Sokol M.Ya., Fedyaeva O.N. Partial and complete oxidation of brown coal in a supercritical water-oxygen fluid under conditions of counterflowing reactant streams // Russ. J. Phys. Chem. B – 2016 – V. 10 – P. 1256–1263.
3. Vostrikov A.A., Fedyaeva O.N., Shishkin A.V., Tretyakov D.S., Sokol M.Ya. Features of low temperature oxidation of hydrogen in the medium of nitrogen, carbon dioxide, and water vapor at elevated pressures // Int. J. Hydrogen Energy. doi:10.1016/j.ijhydene.2018.04.105. (In Press).
4. Vostrikov A.A., Fedyaeva O.N., Shishkin A.V., Sokol M.Ya., Kolobov F.I., Kolobov V.I. Partial and complete methane oxidation in supercritical water // J. Eng. Thermophysics – 2016 – V. 25, No 4 – P. 474−484.
5. Vostrikov A.A., Fedyaeva O.N., Shishkin A.V., Artamonov D.O., Sokol M.Ya. Features of low-temperature oxidation of isobutane in water vapor and carbon dioxide with increased density of reagents // J. Eng. Thermophysics –2017 – V. 26, No 4 – P. 466−475.

ПРИВЕДЕННАЯ МОДЕЛЬ ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ И ДВУМЕРНАЯ СТРУКТУРА ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В БОГАТЫХ СМЕСЯХ МЕТАНА С ОКИСЛИТЕЛЕМ

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

Рассмотрены смеси вида $CH_4+a_1O_2+a_2N_2+a_3Ar+a_4H_2O$. Предлагаемая модель является дальнейшим развитием предложенной ранее модели химической кинетики детонационного сгорания метановых смесей [1, 2] на случай переобогащенных горючим составов. Модель является двустадийной (период индукции и зона основного тепловыделения). Константы Аррениусовской формулы для расчета периода индукции полагаются известными.

Реальные многостадийные процессы, проходящие во время периода индукции, заменяются брутто-реакцией, которая удовлетворяет следующим условиям.

1. Рост температуры (и, соответственно, суммарное тепловыделение химических реакций) к моменту окончания периода индукции много меньше максимально возможного теплового эффекта, соответствующего полной рекомбинации продуктов реакции. Это гарантирует, что тепловой эффект брутто- реакции будет существенно меньше и теплового эффекта в плоскости Чепмена-Жуге детонационной волны.

2. Во время периода индукции происходят химические реакции, связанные с появлением и ростом количества активных центров и развалом молекул метана. К моменту окончания периода индукции все молекулы метана успевают разложиться.

3. При превышении общего количества атомов углерода над общим числом атомов кислорода, атомы углерода, которым не хватает атомов кислорода для образования CO, в конце периода индукции находятся в свободном состоянии (газообразном или конденсированном (в виде микрочастиц сажи); это зависит от температуры смеси).

Концентрации реагирующих компонент во время периода индукции рассчитываются по явным алгебраическим формулам в зависимости от доли периода индукции, соответствующей текущему моменту времени. Знание химического состава позволяет легко рассчитать молярную массу и термодинамические параметры смеси.

В зоне основного тепловыделения молярная масса газа рассчитывается с помощью одного обыкновенного дифференциального уравнения. Показатель адиабаты, внутренняя энергия смеси и тепловой эффект рассчитывались по явным алгебраическим формулам в зависимости от молярной массы, давления и температуры.

Константы модели имеют четкий физический смысл. Она проста, обладает высокой точностью, и позволяет существенно сократить объем численных расчетов по сравнению с детальными кинетическими схемами. Модель согласована со вторым началом термодинамики и удовлетворяет принципу Ле-Шателье.

Модель использована для двумерного численного расчета параметров и структуры волны газовой детонации в богатых смесях метана с окислителем. Проведенные расчеты воспроизводят нерегулярную ячеистую структуру со всеми ее основными особенностями, наблюдаемыми в эксперименте. Рассчитанные размеры детонационных ячеек хорошо соответствуют эксперименту и расчетам по общепринятой аналитической модели Васильева-Николаева.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 17-03-01351-а).

Список литературы

1. 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.
2. Trotsyuk A.V., Fomin P.A., Vasil’ev A.A. Numerical study of cellular detonation structures of methane mixtures // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2015. – Vol. 36. – P. 394-403.

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ВВОДА ТОПЛИВОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ГАЗОПРОНИЦАЕМУЮ НАСАДКУ РАДИАЦИОННОЙ ГОРЕЛКИ

Цой К.А.[1)], **Кравчук А.А.** [1)]
[1)] Кафедра теплоэнергетики и теплотехники Инженерной школы Дальневосточного федерального университета, г. Владивосток, Приморский край, Россия

Повышение эффективности процессов теплопередачи в топочных устройства и конвективных теплообменниках является одной из перспективных задач современного котлостроения [1]. Как показали экспериментальные исследования [2,3], применение радиационных горелочных устройств с газопроницаемыми твердотельных насадками (далее - ГТН) из NiAl интерметаллидов являются одним из путей повышения технических и экологических характеристик котлов.

Первоначальная геометрия и структура ГТН были принята в первом приближении: высота цилиндрической части 15 см; диаметр цилиндрической и сферических частей 10 см; соотношение полной высоты к диаметру H/D = 2; толщина стенки 0,7 см; осредненный размер поры 225 мк; пористость 50%.

Для выявления оптимальных параметров сжигания топлива в пористой насадке было проведено многоточечное (порядка 46 замеров) термозондирование её наружной поверхности с одновременным точечным отбором продуктов сгорания для газового анализа.

Из проведенных замеров следует вывод, что оценку технологической и экологической эффективности горелочного устройства можно произвести исходя из температуры на его поверхности. Для рассматриваемой пористой насадки со средней толщиной стенки 10 мм, повышение температуры на поверхности выше 630 ^{o}C влечет за собой интенсивное образование оксидов азота NOx, а снижение ниже 600 ^{o}C – химическое недогорание моноксида углерода CO. Таким образом был экспериментально определен оптимальный температурный режим для данной насадки по температуре на поверхности в диапазоне 600-630 ^{o}C.

Таким образом, закрученный неравномерный поток воздуха от центробежного вентилятора создает высокий градиент температур на поверхности пористой насадки, следовательно, необходимо устройство для выравнивания поля скоростей внутри неё.

Основным критерием изменения геометрии ГТН второго поколения было увеличения соотношения высоты к диаметру, а также толщины стенки и размера пор.

Также, подводящее устройство было заменено с прямого ввода газовоздушной смеси на ввод через сопло, который одновременно выступает в роли смесеобразователя. Геометрические характеристики исследуемого ГТН второго поколения: высота цилиндрической части 30 см; диаметр цилиндрической и сферических частей 10 см; соотношение полной высоты к диаметру H/D = 3,5; толщина стенки 1,5 см; осредненный размер поры 270 мкм; пористость 50%.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что внесенные изменения позволили уменьшить градиент температуры на поверхности с 63% до 7,5%, а также снизить выбросы загрязняющих веществ CO и NOx в целом по насадке до 70 мг/нм^3 и 60 мг/нм^3 соответственно.

Список литературы

1 Aldushin A.P., Merzhanov AG, Filtration combustion theory: general concepts and state of research // Distribution of heat waves in heterogeneous environments. Novosibirsk: Nauka. - 1988. - 9-52.
2. Kirdyashkin, A., Guschin, A. N., Maznoy, A. S., Minaev, S. S., & Palesskiy, F. S. (2014). Combustion-synthesized porous Ni-Al materials for radiative porous burners. In Advanced Materials Research. (Vol. 1040,442-447).
3. 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 (98) 277-284

ФОРМИРОВАНИЕ ГРАФА НОВОСТЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНЖИНИРИНГА С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА (AI). ЗНАЧИМОСТЬ, ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ

Черноскутов А.С.

Обработка информации из новостных публикаций касается инвестиций, строительства, авторитетных мнений, общих перспектив развития энергетики в России и за рубежом, а также новых технологий, типов оборудования и научно-технических разработок. Структурированная обработка такой информации по мнению автора дает новые возможности и является необходимой потребностью инжиниринга, соответствующей нарастающей информатизации современного общества. Система такой обработки требует в первую очередь привлечения внимания к стратегии энергетической отрасли и создания структуры взаимодействия внутри предприятия. Информационные технологии служат хоть и необходимым, но все же вторичным инструментом в дополнение к вышеуказанным задачам.

В докладе приведены основные параметры системы и результаты применения с 2013 года, позволившие автору сделать некоторые выводы и определить вектор ее развития. Приведен краткий обзор новостных источников и общая классификация отраслевых новостных потоков.

РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ В СИСТЕМАХ Ti-C, Ti-B, Ti-Si С ИЗБЫТКОМ ТИТАНА

Чумаков Ю.А.[1)], **Князева А.Г.** [2)]
[1)] Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, г. Томск
[2)] Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, г. Томск

Синтез материалов в режиме горения находит широкое применение энергетике и технике. В экспериментальных работах не всегда возможно выявить и объяснить причины различных режимов распространения реакционной зоны в процессах синтеза горением. Для этого необходимо привлекать математическое моделирование процессов, происходящих в смесях порошков, начиная со стадии инициировании реакции. В настоящей работе исследуется математическая модель процесса инициирования реакции для трех порошковых смесей *Ti-C, Ti-B, Ti-Si*. Модель соответствует следующим условиям. Образец представляет собой цилиндр радиуса *r* (рис.1), состоящий из двух слоев порошковых насыпок. Полагаем, что слой 1 (воспламенитель) – стехиометрическая смесь порошков титана *Ti* и кремния *Si*, толщина насыпки равна *l*. Второй слой толщиной *L* (поджигаемая смесь) – смесь порошков с избытком титана: 1) титана *Ti* и углерода *C* (сажи); 2) титана *Ti* и бора *B*; 3) титана *Ti* и кремния *Si*. Так как титан во второй смеси представлен в избытке, он полностью не расходуется в реакции. Считаем, что химические превращения в первом реакционном слое описываются суммарными реакционной схемой типа «реагент – продукт реакции»: $5Ti+3Si \rightarrow Ti_5Si_3$. Для второго слоя учитываем детальную кинетику, которая включает 11 реакций для системы *Ti-Si*, 5 реакций для *Ti-B* и 9 реакций *Ti-C*.

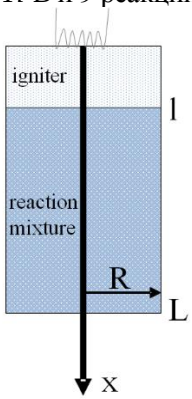


Рис. 1. Иллюстрация к постановке задачи

В уравнении энергии учитываем теплопотери в окружающую среду за счет конвекции (если синтез осуществляется в атмосфере инертного газа) и за счет теплового излучения. Инициирование реакции осуществляется искровым разрядом воспламенительной смеси на границе x=0. Поскольку структура композита нам заранее не известна, в расчетах используются эффективные свойства, которые рассчитываются по правилу смеси. Все частные модели реализованы численно.

Расчеты показали, что в зависимости от массового соотношения исходных компонентов (реагентов) и характера влияния слоя продукта, накапливающегося в результате реакции, возможны несколько вариантов распространение волны горения в прессовках после перехода волны горения от воспламенителя. 1. Инициированная искрой в воспламенителе стационарная волна горения после перехода через границу раздела смесей «воспламенитель-реакционная смесь» вновь устанавливается после незначительных колебаний. 2. Возможно установление колебательного режима волны горения с резкими максимумами и минимумами температуры и скорости реакционного фронта; в некоторых случаях (при низких значениях параметров торможения и для смеси реагентов близкой к стехиометрической) наблюдаются неустойчивости. 3. Возможен особый тип колебательного режима с торможением и последующим резким ускорением фронта реакции. 4. Наконец, в нестехиометрической смеси реагентов с избытком титана, который полностью не расходуется в реакции, после инициирования реакции волной от воспламенителя вследствие недостатка химического тепловыделения возможно замедление реакционной волны и последующее прекращение реакции.

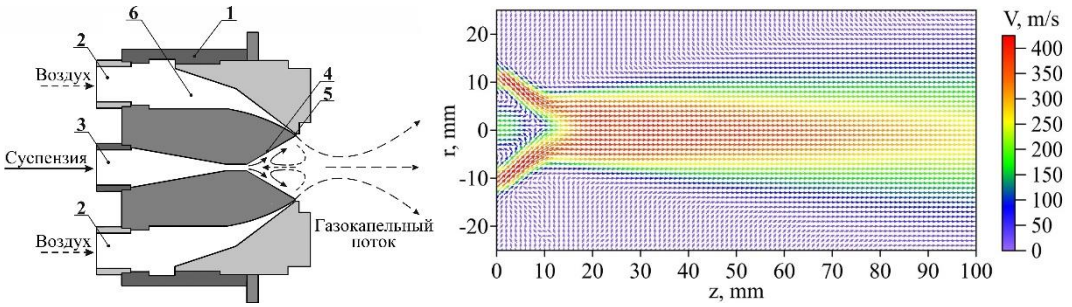
Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 17-19-01425.

PIV-ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ГАЗОВОГО ПОТОКА ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ИЗ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ФОРСУНКИ ДЛЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Шадрин Е.Ю., Ануфриев И.С., Мальцев Л.И., Шарыпов О.В.
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В настоящее время одним из перспективных видов топлива для теплоэнергетики являются водоугольное топливо (ВУТ) [1, 2]. Использование данного вида топлива обуславливает необходимость создания эффективных устройств для распыла – форсунок, удовлетворяющих ряду технических требований. Поскольку ВУТ является высокоэрозионным продуктом, то форсунки, используемые для сжигания ВУТ, не должны содержать узких каналов для предотвращения их запирания и последующих сбоев в работе, а также должны генерировать высокоскоростной поток для эффективного дробления суспензии.

Авторами статьи предложена пневматическая форсунка [3], основанная на использовании свойств пристенных и кумулятивных струй жидкости и газа и эффекта Коанда, отвечающая основным требованиям, предъявляемым к форсункам для ВУТ (рис.1-а). Распыление достигается в результате взаимодействия возвратной высокоскоростной газовой струи и потока жидкости с формированием тороидального вихря. Определяющую роль в эффективности работы пневматической форсунки играет организация аэродинамики. В данной работе экспериментально исследована структура однофазного газового потока (канал для подачи жидкости (3) заглушен) предложенной пневматической форсунки при различных режимных параметрах.



(а) (б)

Рис. 1. (а) Схема пневматической форсунки: корпус (1); каналы для подачи газа (2) и жидкости (3); диффузорное сопло (4); кольцевое сопло (ширина 0.8 мм, диаметр 28 мм) (5); газовая камера (6); (б) Поле средней скорости (при избыточном давлении в газовой камере P_0 = 0,3 МПа)

Измерения поля скорости течения осуществлялись методом particle image velocimety (PIV). Показано, что во всем исследованном диапазоне избыточного давления воздуха в форсунке (0,05-0,3 МПа) вблизи оси симметрии сходящаяся кольцевая струя переходит в сосредоточенную и формирует прямую и возвратную кумулятивную осевые струи (рис.1-б). При работе жидкотопливной форсунки наличие такого возвратного течения будет способствовать эффективному разрушению струи жидкости и формированию мелкодисперсного двухфазного потока. При избыточном давлении воздуха в форсунке 0,1 МПа на выходе из сопла формируется звуковая кольцевая сходящаяся струя, при дальнейшем увеличении давления истекающая струя становится сверхзвуковой, достигая 500 м/с.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-38-00153-мол_а).

Список литературы

1. Ходаков Г.С. Водоугольные суспензии в энергетике // Теплоэнергетика. 2007. № 1. С. 35–45.
2. Долинский А.А., Халатов А.А. Водоугольное топливо: перспективы использования в теплоэнергетике и жилищно-коммунальном секторе // Промышленная теплотехника. 2007. Т. 29, № 5. С. 70–79.
3. Мальцев Л.И. Пневматическая форсунка. Патент РФ № 2346756. Зарегистрирован 20.02.2009.

ИЗУЧЕНИЕ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ГАЗОКАПЕЛЬНОГО ПОТОКА ПРИ РАСПЫЛЕНИИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ПАРОВОЙ СТРУЕЙ

Шадрин Е.Ю.[1)], Ануфриев И.С.[1)], Копьев Е.П.[1)], Шарыпов О.В.[1)], Лещевич В.В.[2)]
[1)] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2)]Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Белоруссия

Проблема эффективного диспергирования жидких углеводородных топлив (в т.ч. высоковязких) является одной из ключевых при проектировании горелочных устройств. Распыление топлива, подаваемого через форсунку, как правило, приводит к коксованию, что снижает надежность оборудования. В данной работе исследуется перспективный способ распыла свободно натекающего топлива струей перегретого водяного пара [1]. Отличительной особенностью данного способа является то, что топливо и распыляющая среда (несущая фаза) – водяной пар, предварительно не смешаны друг с другом: пар подается из форсунки в виде струи, на которую натекает жидкое топливо, тем самым формируя мелкодисперсный газокапельный поток. Поскольку нет контакта топлива с форсункой, то не происходит коксование ее поверхностей, что предотвращает сбои в работе. Такая схема распыла топлива имеет перспективы практического использования.

С использованием метода IPI (Interferometric particle imaging) [2] исследован дисперсный состав газокапельного потока при распылении дизельного топлива струей перегретого водяного пара (диаметр форсунки 0.5 мм). Метод основан на регистрации расфокусированных образов капель с помощью цифровой камеры при освещении их лазерным источником. Согласно теории рассеяния Ми, свет, отраженный и двукратно преломленный сферической поверхностью капли, создает на образах капель интерференционные полосы, частота которых пропорциональна диаметру капли. Цифровой анализ полученных изображений позволяет определить положение и размеры капель, взвешенных в потоке. Данный метод позволяет измерять частицы с размерами от 10 мкм.

В экспериментах использовалась IPI-система «ПОЛИС» (ООО «Сигма-Про», г. Новосибирск), основными элементами которой являются: CCD камера Видеоскан 4021 (с разрешением 2048x2048 пикселей, частотой съемки до 1,25 Гц, временем экспозиции 28 мс); макрообъектив SIGMA 105mm F2.8 DG MACRO; блок оптического сжатия для уменьшения образов капель по одной координате; длинноходовый транслятор Edmund 59-336 для перемещения камеры; программное обеспечение ActualFlow с пакетом IPI Kit.

Измерения проведены при различных режимных параметрах (варьировались: температура пара в диапазоне 150-550°C при давлении до 6 атм, расход пара 100-600 г/ч и топлива 300-600 г/ч). В результате проведения экспериментов найдены оптимальные значения параметров пара и топлива, при которых достигается наименьший преимущественный размер капель в потоке (20-30 мкм), необходимый для эффективного сжигания распыленного жидкого топлива.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-58-00025-Бел_а).

Список литературы

1. Патент РФ на изобретение № 2450207, Горелочное устройство. Опубликовано 10.05.2012, приоритет от 28.10.2010, патентообладатель ИТ СО РАН. Автор: Вигриянов М.С.
2. Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М. Интерферометрический метод измерения диаметров капель // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18. № 1. С. 1-13.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ИМПАКТНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ ЗАКРУЧЕННОЙ СТРУИ С ГОРЕНИЕМ

Шараборин Д.К.[1,2)], **Толстогузов Р.В.**[1,2)], **Дулин В.М.**[1,2)], **Маркович Д.М.** [1,2)]
[1)] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2)] Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Одной из конфигураций горения вблизи охлаждаемой твердой поверхности является горение в струе, натекающей на преграду. Примером применения такой конфигурации может быть интенсивный нагрев объектов в процессе плавления. Для стабилизации горения предварительно перемешанной смеси, в струе организуется закрутка потока, обеспечивающая широкий диапазон соотношений топливо-окислитель для безуносного горения. Однако, структура потока импактных закрученных струй, особенно при горении, практически не изучена. Целью данной работы являлось исследование структуры потока и особенностей химического реагирования при взаимодействии закрученной струи с импактной поверхностью с использованием современных бесконтактных методов.

Струя организована профилированным соплом (выходной диаметр d = 15 мм) с установленным внутри лопаточным завихрителем. Из сопла поступала предварительно перемешанная пропановоздушная смесь с частицами диоксида титана размером 0.5 микрон, окружающий струю воздух также был засеян с использованием дыма. Плоской преградой являлось основание металлической цилиндрической ёмкости с циркулирующей внутри водой при температуре 98°C, диаметр поверхности 30 см. Измерение полей мгновенной скорости проводилось методом анемометрии по изображениям частиц (particle image velocimetry, PIV) в стереоскопической конфигурации. Для регистрации пространственного распределения радикалов OH и HCHO в реагирующем потоке использовали метод плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (planar laser induced fluorescence, PLIF).

В работе проведена визуализация и выявлены характерные режимы горения импактного закрученного пламени. Были получены реализации поля мгновенной и средней скорости, пространственное распределение радикала OH и HCHO для характерных режимов горения в случае закрученного импактного пламени при различных расстояниях от сопла до импактной поверхности, значениях числа Рейнольдса, коэффициентов избытка топлива и степенях закрутки потока. На рис. 1 представлен пример поля мгновенной скорости и распределение локальной интенсивности флуоресценции радикала OH и HCHO в турбулентном (Re = 5000) пропановоздушном пламени, коэффициент избытка топлива φ = 0.7, степень закрутки S = 1, расстояние от сопла до поверхности 30 мм. Следует отметить, что формальдегид присутствует не только вблизи фронта пламени, где достигает максимальной интенсивности флуоресценция радикала OH, а также в обширной пристенной области и внутри центральной зоны рециркуляции.

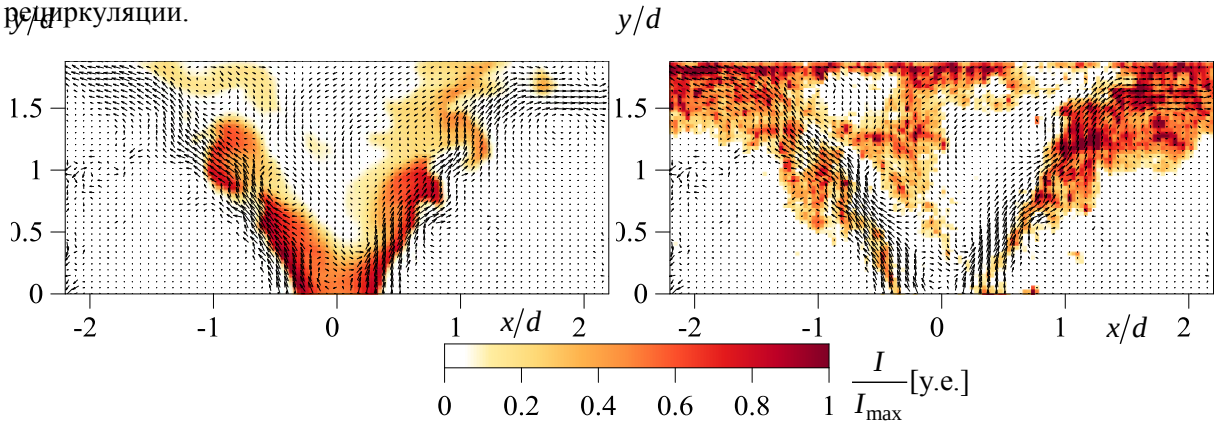


Рис. 1. Поле мгновенной скорости и распределение локальной интенсивности флуоресценции OH* (слева) и HCHO (справа) в импактной закрученной струе (S = 1, Re = 5000, φ = 0.7).

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 16-19-10566).

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

Шарина И.А., Перепечко Л.Н., Домаров П.В.
Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Плазменная технология газификации органического материала признана одной из наиболее экологически безопасных технологий переработки и уничтожения техногенных отходов [1]. Исследования и разработки в этой области ведутся в мире с конца прошлого века, однако до сих пор их широкое промышленное использование не реализовано. Основная научно-техническая проблема, возникающая при практической реализации плазменной газификации органического сырья – высокие удельные энергозатраты. Единственной компанией, имеющей базовые коммерческие заводы является Westinghouse Plasma Corp. (США).

Анализ научно-технической информации позволяет определить перспективы развития технологии [2-6]. Согласно выполненному анализу, основные направления прикладных исследований связаны с уменьшением удельных энергозатрат, увеличением ресурса работы электродов, увеличением калорийности получаемого синтез-газа.

Лидером по исследованиям в области плазменной переработки отходов является Китай, вырвавшийся вперед в последнее десятилетие и обогнавший США и Россию, занимающихся этой темой уже более сорока лет.

Представленный на рис. 1 график динамики патентования в мире свидетельствует о росте прикладных исследований плазменной переработки техногенных отходов.

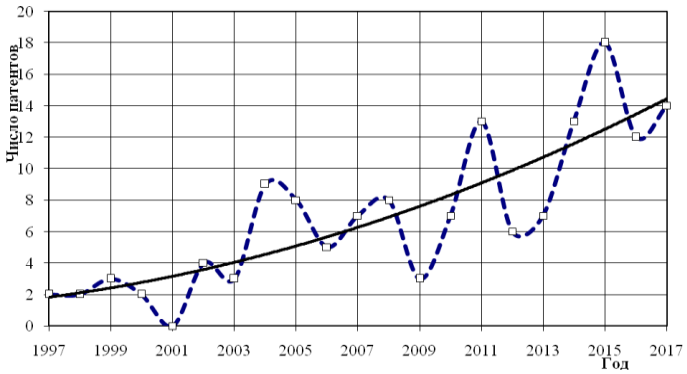


Рис.1. Динамика патентования в области плазменной переработки отходов.

Список литературы

1. Шарина И.А., Перепечко Л.Н., Аньшаков А.С. Перспективы использования плазменной технологии для переработки/уничтожения техногенных отходов // Эко. – 2016. – № 12.
2. Алексеенко С.В., Перепечко Л. Н., Тугов А.Н. Утилизация твердых бытовых отходов в Новосибирской области: научно-технические разработки и современное состояние // Вестник НГУ. – 2013. – Том 13. Вып. 4. – с. 16-26.
3. Тугов А.Н., Москвичев В.Ф. О целесообразности использования плазменных технологий для термической утилизации ТБО //Твёрдые бытовые отходы. – 2014. – № 9. – С.44-47.
4. Чередниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки.- – Новосибирск, 2008. – 602 с.
5. Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Радько С.И., Урбах А.Э., Фалеев В.А. Генератор плазмы водяного пара для газификации твёрдых топлив / // Теплоэнергетика. – 2013. – № 12. – С. 29-32.
6. Рутберг Ф.Г. Плазмохимические методы переработки. Газификация и пиролиз отходов. В кн. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Тематический том XI – 5 «Прикладная химия плазмы», 2006.

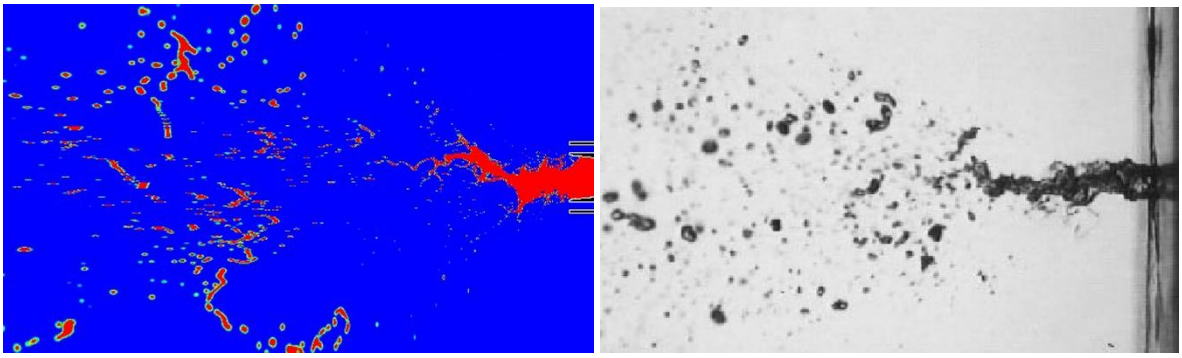
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРВИЧНОГО РАСПЫЛА ЖИДКОГО ТОПЛИВА ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ИЗ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ФОРСУНКИ

Шебелев А.В. [1), 2)], **Кузнецов В.А.**[1), 2)], **Минаков А.В.** [1), 2)]
[1)] Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия
[2)] Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Распыливание жидкости широко применяется в современной технике. Чрезвычайно важное место распыливание занимает в энергетике, при сжигании жидких топлив. Способы сжигания весьма разнообразны. Однако для всех способов обязательной является стадия распыливания топлива, ибо оно, многократно увеличивая суммарную поверхность контакта сред, усиливая теплообмен измельченного топлива с газовой средой и улучшая перемешивание частиц горючего с окислителем, существенно способствует интенсификации процесса горения.

Огромное значение распыливания жидкости для решения широкого ряда технических задач привело к созданию большого количества всевозможных конструкций форсунок, отвечающих специфическим требованиям решаемых задач. Организация газовых потоков играет определяющую роль в эффективности работы пневматической форсунке. В связи с этим стоит задача разработки эффективной и достоверной численной методики для описания распыла жидких топлив в перспективных горелочных устройствах.

Для верификации расчетной методики моделирования первичного распыла с помощью VOF метода была рассмотрена следующая задача [1]. Вода подается по центральному каналу. Воздух по кольцевому каналу. В экспериментах скорость воды варьировалась в диапазоне от 0,15-1,5м/с. Скорость воздуха от 15 до 250 м/с. На рисунке 1а представлен результат расчета в виде мгновенного распределения объемной доли жидкости в расчетных ячейках.



а) расчет б) эксперимент

Рис. 1. Мгновенная визуализация распада струи жидкости.

Результаты расчетов показывают приемлемое согласие с экспериментом по основным характеристикам распыла и могут быть очень полезны для оценок, поскольку позволяют качественно верно определять структуру двухфазного потока, параметры и форму капель, скорость и направление их движения чего принципиально невозможно получить другими методиками.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00594.

Список литературы

1. Lasheras J.C., Villermaux E., Hopfinger E.J. Break-up and atomization of a round water jet by a high-speed annular air jet – J. Fluid Mech. (1998), vol. 357, pp. 351–379.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ВИХРЕВОГО ПЛАМЕНИ ЛАЗЕРНЫМ ПРОСВЕЧИВАНИЕМ И ПРИЕМОМ СОБСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Шерстобитов М.В., Сазанович В.М., Цвык Р.Ш.

Институт оптики атмосферы СО РАН, г.Томск, Россия

В последние годы все большее внимание привлекают когерентные структуры, к которым, в частности, относятся различного вида смерчи и закрученные потоки [1-3]. Движение среды в струе имеет турбулентный характер, исследования которого еще не завершены [4]. Для исследования флуктуаций показателя преломления могут быть применены оптические методы, основанные на просвечивании турбулентного потока лазерным излучением [5] и приеме собственного излучения. В работе был исследован вопрос о высотной зависимости спектров флуктуаций интенсивности лазерного пучка, просвечивающего вихревое пламя - модель огненного смерча (МОС) и собственного излучения МОС.

Генерация МОС (Рис.1а.) осуществлялась при воздействии восходящего закрученного воздушного потока, на факел пламени в неподвижной емкости. Поток создавался вращающейся крыльчаткой, а в качестве топлива использовался этанол. Рассчитывались спектральные функции вида *f*W(f) (W(f)* – спектральная плотность сигнала от временной последовательности пульсаций интенсивности лазерного пучка, *f* - частота). На рис. 1б представлены примеры расчета спектральных функций *f W(f)* флуктуаций интенсивности лазерного пучка (на высоте 10 и 48 см) и собственного излучения пламени, (на высоте 48см).

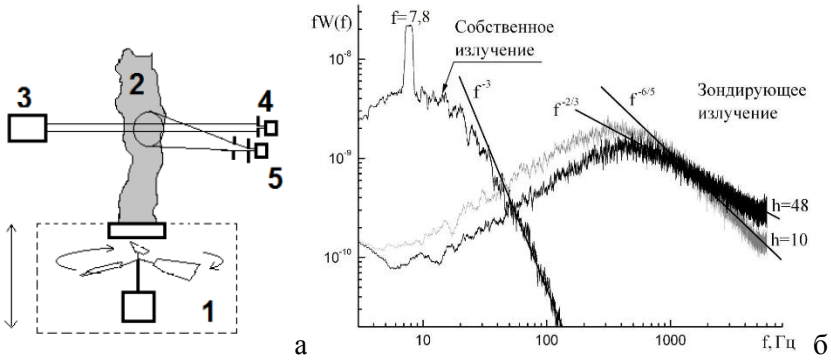


Рис. 1. а-схема эксперимента: 1-мотор с крыльчаткой, 2-МОС,3-лазер, 4.5-ФЭУ; б-пример *f W(f)*

Для спектральных функций определялась частота максимума (Гц), коэффициент наклона (касательной) в lg/lg масштабе в высокочастотной области и ордината *fmax*W(fmax)* в относительных единицах. Установлен высотный ход упомянутых значений спектральных функций лазерного пучка и собственного излучения МОС.

Список литературы

1. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Изд. Института теплофизики СО РАН. 2003. 504 с.
2. Бубнов Б.М. Термическая структура и турбулизация торнадоподобных вихрей от локализованных источников тепла над вращающимся диском // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана, 1997. Т. 33. №4, С. 434-442.
3. А.М. Гришин, В.В. Рейно, В.М. Сазанович,М.В. Шерстобитов Некоторые итоги экспериментальных исследований огненных смерчей // Изв. ВУЗов. Физика.2011. № 12 С.14 -23
4. Д. Дорж, П.Ю. Худяков, Б.П. Жилкин Применение вейвлет-анализа для идентификации строения газовых факелов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика» 2014, том 14, № 4, С.5-10
5. Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В. Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат. 1988. 72с.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НЕРАВНОМЕРНОСТЕЙ В ТОПОЧНЫХ КАМЕРАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ

Шишканов О.Г
Национальный исследовательский институт (Московский энергетический институт),
г. Москва, Россия

Результаты экспериментальных исследований тепловых неравномерностей, возникающих в объеме топочных камерах энергетических котлов, при реализации технологии пылеугольного сжигания, представляют несомненный научный и практический интерес при решении задач повышения эффективности энергоиспользования органического топлива. В данной работе представлены обобщенные особенности распределения плотности падающих радиационных потоков, зафиксированные в ходе многочисленных натурных измерений. Эксперименты проводились в топочных камерах, при эксплуатации действующих котельных агрегатов различной производительности как с твердым, так и с жидким шлакоудалением: Е-160 Железногорской ТЭЦ, БКЗ-320 и ПК-10Ш Красноярской ТЭЦ-1, БКЗ-500 и БКЗ-420 Красноярской ТЭЦ-2, Е-670 и КВТК-100 Красноярской ТЭЦ-3 и Пп-2650-255 (2650 т/ч) Березовской ГРЭС. В опытах производились также измерения O_2, CO, CO_2, NO_x в уходящих газах. Влияние режимных параметров эксплуатации на характеристики топочных процессов исследовалось путем изменения расхода топлива, а также сочетания работающих пылесистем или пылепитателей.

Измерения плотности падающих на экраны топки радиационных потоков проводилось радиометрами полного поглощения конструкции ЦКТИ-Минского института теплофизики. При измерении состава дымовых газов (концентраций O_2, CO, CO_2, SO_2, NO_x) использовался газоанализатор КМ 9106 Quintox. Для регистрации режимных параметров использовалась штатная система управления и контроля.

Из основных результатов выполненных экспериментов можно отметить следующее. Уровень локальных тепловых неравномерностей, зафиксированный в топках с различными конструктивными особенностями (угловая и настенная компоновка тангенциальных горелок, фронтальная установка горелок котлов с твердым шлакоудалением, а также распределение потоков в камерах сгорания и дожигания котлов с жидким шлакоудалением) превышает аналогичные величины, рекомендованные в Нормативном методе проектирования котельных агрегатов. Причем последнее получено как по высоте, так и по ширине экранных поверхностей нагрева.

Причинами выявленного в ходе экспериментов превышения уровня тепловых неравномерностей служит эксплуатация котлов на меньшем количестве индивидуальных пылесистем прямого вдувания. Отметим, что последнее является штатным режимом эксплуатации оборудования, поскольку, как правило, одна из пылесистем находится в резерве или плановом останове из-за текущего ремонта.

Наличие тепловых неравномерностей, чем сопровождаются указанные режимы эксплуатации, опасны возможным шлакованием. Поскольку известно, что образование вторичных отложений начинает приобретать лавинообразный характер после даже небольшого превышения тепловых потоков и температур над безопасным уровнем.

Кроме того, выявленное при экспериментах 18÷20% превышение плотности падающего излучения при отключении горелок влияет на экологические показатели, а также способствует росту внутритрубных отложений в поверхностях нагрева, расположенных в обогреваемых зонах. Полученные экспериментальные данные служат основанием для дальнейших исследований, включая зональное моделирование теплообмена, направленных на совершенствование работы топочного оборудования, а также внесения соответствующих корректировок в проектные нормы.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ИНЕРТНЫХ И РЕАГИРУЮЩИХ ГАЗОВ В ВОДОРОДЕ НА СТРУКТУРУ И УСЛОВИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ДИФФУЗИОННОГО ПЛАМЕНИ ТОПЛИВНОЙ СМЕСИ

Шмаков А.Г.[1,2], Грек Г.Р. [3], Козлов В.В.[2,3], Литвиненко Ю.А.[3]
[1]Институт химической кинетики и горения им.В.В.Воеводского СО РАН,
г. Новосибирск, Россия
[2]Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия
[3]Институт теоретической и прикладной механики им. Христиановича СО РАН,
г. Новосибирск, Россия

Водород представляет интерес как экологически чистый и эффективный энергоноситель для двигателей внутреннего сгорания, микрогорелочных устройств, топливных элементов и других практических применений. Важным вопросом с точки зрения пожарной безопасности и проектирования микрогорелок является изучение условий устойчивого горения высокоскоростной микроструи H_2, истекающей в воздух. Ранее авторы изучили горение микроструи H_2, истекающей в воздух из тонкостенных металлических трубок с внутренним диаметром 0.25-3 мм со скоростью 100-1000 м/с [1]. Экспериментально установлено, что в определенном диапазоне скоростей потока H_2 пламя имеет сложную двухзонную структуру, так называемую «перетяжку» формы пламени. Первая зона, прилегающая к соплу, представляла ламинарное диффузионное пламя почти сферической формы. Вторая зона представляла турбулентное пламя конической формы. Было обнаружено, что при увеличении скорости струи H_2 размер первой зоны пламени монотонно уменьшался до критического значения, после чего происходило погасание пламени. В определенном диапазоне величин скорости потока H_2 горение возможно только во второй зоне (при воспламенении потока смеси водорода и воздуха вдали от сопла), но этот режим был неустойчивым, и небольшое увеличение скорости потока H_2 приводило к срыву пламени. Таким образом, ламинарное пламя в первой зоне стабилизировало горение струи H_2, поскольку оно приводило к повторному воспламенению во второй зоне после срыва пламени.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальных исследованиях особенностей диффузионного горения круглых микроструй смесей H_2 с CH_4, He, N_2 и O_2. Структура изученных пламен при диаметре сопла 0.5 мм была визуализирована с использованием шлирен-метода. Объемная доля CH_4, He, N_2 или O_2 в смеси с H_2 варьировалась от 0 до 80%, диапазон скорости потока топливной смеси на выходе сопла варьировался от 100 до 650 м/с. Обнаружено, что механизм и характеристики микроструй и эволюции пламени при диффузионном горении смеси H_2 с CH_4, He, N_2 или O_2 объясняются образованием зоны «перетяжки» пламени, также как в случае диффузионного горения микроструи чистого H_2.

Выявлено, что процесс диффузионного горения смеси H_2/CH_4 в круглой микроструе сопровождается постепенным отрывом турбулентного пламени при поддержании горения в зоне «перетяжки» пламени и, наконец, погасания пламени микроструи, которое коррелирует с процессом горения аналогичной микроструи чистого H_2. Обнаружено, что все вышеперечисленные режимы горения смеси H_2/CH_4 реализуются в значительно меньшем диапазоне скоростей микроструи (200-500 м/с), чем в аналогичной ситуации горения чистого H_2 (600-800 м/с). Показано, что при диффузионном горении смеси H_2 с CH_4 или He или N_2 или O_2 в круглой микроструе для стабилизации горения с ростом скорости микроструи необходимо увеличить долю H_2 (или уменьшить долю добавок) в смеси газов.

Работа выполнена при поддержке РНФ по гранту № 16-19-10330.

Список литературы

1. Kozlov V.V., Grek G.R., Korobeinichev O.P., Litvinenko Yu.A., Shmakov A.G., Features of diffusion combustion of hydrogen in the round and plane high-speed microjets (part II) // Int. J. Hydr. En. – 2016 – V. 41(44) – P. 20240–20249.

РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПЫЛИ ТОНКОГО ПОМОЛА ДЛЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ СТУПЕНИ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ТРЕХСТУПЕНЧАТОГО СЖИГАНИЯ

Штегман А.В., Сосин Д.В., Рыжий И.А., Ставская О.И.

ОАО "Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт" (ОАО "ВТИ"), Москва, Россия

В связи с ужесточающимися требованиями к экологичности энергетического оборудования необходимо применять технологические методы подавления оксидов азота. Наиболее перспективным методом является трехступенчатое сжигание, так как при его организации на действующих котлах, нет снижения КПД при достаточно высоких показателях по снижению NO_X.

В классическом понимании восстановительная ступень организуется за счет применения природного газа, но также имеется возможность использования пыли тонкого помола. На Черепетской ГРЭС успешно внедрена и налажена сотрудниками ОАО "ВТИ" система трехступенчатого сжигания с угольной восстановительной ступенью. Достигнуты показатели по КПД 93,2 % и концентрация оксидов азота 320 мг/нм^3.

Для дальнейшего тиражирования необходимо понять протекающий процесс и получить данные, которые можно использовать при проектировании аналогичных систем. При помощи пакета программ Ansys и Solid Works смоделирована работа котла ТПЕ-223 Черепетской ГРЭС для разных режимов, при этом особое внимание уделялось соответствию получаемых расчетных результатов результатам полученных в реальных опытах.

В качестве исходных данных брались результаты опытов на котлах ТПЕ-223 Черепетской ГРЭС, полученные в процессе режимной наладки, а также результаты особых испытаний, проведенных непосредственно для достижения цели настоящего доклада. Получены константы и энергии активации химических реакций на поверхности пыли ведущих к снижению оксидов азота, а также другие параметры топочного процесса, которые можно использовать для дальнейших расчетов при реконструкции других котельных агрегатов.

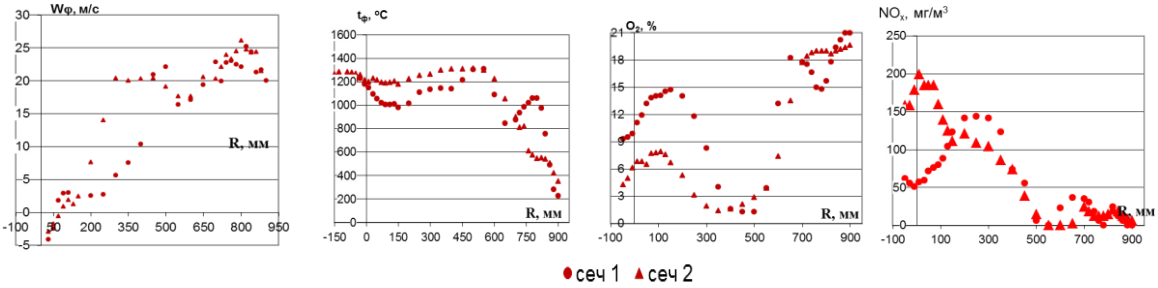
Необходимо продолжить исследования, так как пыль разных углей по-разному может влиять на процесс подавления оксидов азота. Возможно будут иметь место другие значения энергии активации и константы скорости химической реакции.

ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ И ГОРЕНИЯ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ

Штым К.А., Соловьёва Т.А., Лесных А. В.
Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

Преимущества циклонно-вихревого сжигания газообразного и жидкого топлив доказано большим количеством успешных внедрений котлов с циклонно-вихревых предтопков (ЦВП) на энергетических предприятиях Дальнего Востока [1, 2]. Подготовка одного из ЦВП под измерения, позволила провести детальные исследования формирования области смесеобразования и горения закрученного потока при работе котла. Нагрузка котла при исследованиях составляла 50 Гкал/ч, а на ЦВП [3] поддерживалась равной ≈25 Гкал/ч (номинальная мощность ЦВП составляет 65 Гкал/ч). При основном режиме работы в ЦВП распределение газа осуществляется комбинированно - через тангенциальные, аксиальные и торцевые вводы газа.

Области роста и падения температур смешивающихся сред (воздуха и газа) соответствуют зонам возрастания и убывания тангенциальной скорости смешенного потока и процессам горения, на что указывают не только значения температур потока, но и содержание кислорода, вступающего в реакцию горения, что отражено на рис. 1.



тангенциальная скорость температура факела содержание кислорода содержание NO_x

Рис. 1. Изменение параметров потока в ЦВП при горении газа

Изменение концентрации кислорода и температуры факела указывают зоны активного горения и области смешения воздуха и газа. По концентрации кислорода наиболее активное горение наблюдается на расстоянии от 200 до 600 мм от оси предтопка.

Рост концентрации оксидов азота в факеле наблюдается в области активного горения на расстоянии 150-500 мм от оси предтопка. Зона формирования NO_x смещена относительно области активного горения на 50-100 мм при относительно одинаковой температуре. Рост NO_x объясняется повышенной концентрацией свободного кислорода необходимого для реакции окисления термических оксидов азота. При этом концентрация оксидов азота в уходящих газах за котлом, приведённых к α=1,4 составила 83-110 мг/м^3 (нормативное значение 125 мг/м^3).

Анализ изменения концентрации кислорода при горении с сохранением низких температур в пристенной области подтверждает рациональность применения предварительного устройства смесеобразования – ЦВП.

Список литературы

1. Штым А. Н., Штым К. А., Дорогов Е. Ю. Котельные установки с циклонными предтопками - Владивосток: Изд. дом Дальневосточ. федер. ун-та, 2012. – 421 с.
2. Штым К. А. Совершенствование циклонно-вихревой технологии сжигания топлива : дис. – Сибирский федеральный университет, 2015. – 304 с.
3. Соловьёва Т. А. Совершенствование процесса сжигания природного газа в котельных установках с циклонными предтопками : дис. – Сибирский федеральный университет, 2017. – 149 с.

КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА В ЦИКЛОННОМ ПРЕДТОПКЕ

Щинников П.А., Овчинников Ю.В., Бойко Е.Е., Францева А.А.
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Особенностью сжигания водоугольных топлив является большое содержание влаги в них (в общем случае до 80 %). Это требует значительных затрат энергии на испарение, кроме того, образовавшийся пар принимает участие в паровой газификации коксового остатка с образованием горючих летучих в виде CO и H_2 [1].

Предлагается кинетическая модель горения тонко-дисперсной водоугольной суспензии (ТД ВУС), которая учитывает особенности топлива и позволяет получить конструктивные характеристики циклонного предтопка с определением зон испарения и горения топлива.

Приближенность моделирования процесса в циклонном предтопке обуславливается такими допущениями: квазистационарность процесса; постоянство теплоемкостей и коэффициентов теплоотдачи; изотермичность частиц топлива, однородность газовзвеси; инертность компонентов золы; учет определяющих химических реакций взаимодействия с окислителем; одномерность потока.

Термическим сопротивлением частиц топлива можно пренебречь, так как значение критерия Фурье $Fo = \frac{a \cdot \tau}{\delta^2} > 5$ и одновременно критерий Био $Bi = 0,5\frac{\alpha \cdot \delta}{\lambda} < 0,5$, где λ, α, *a*, τ, δ – коэффициенты теплопроводности, теплопередачи, температуропроводности, время, диаметр частиц топлива. Конвективно-кондуктивный теплообмен от газа к частице превалирует над переносом теплоты радиацией [2, 3], поэтому лучистая составляющая процесса может не учитываться, либо учитываться приближенно.

Такой подход позволяет провести аналитический анализ процесса и получить конечные выражения, пригодные для инженерных расчетов. Расчетный эксперимент (Таблица 2) показывает работоспособность модели.

Таблица 1. Результаты расчетов горения ТД ВУС на основе Кузнецкого угля марки ОС с соотношением твердой и жидкой фазы 2:3

Наименование параметра	Размерность	Величина
Тепловая мощность циклонного предтопка	кВт	50
Низшая рабочая теплота сгорания ТД ВУС	МДж/кг	13,8
Расход ТД ВУС	кг/с	0,0036
Диаметр канала горения	мм	60
Скорость смеси на оси канала горения	м/с	32
Коэффициент теплоотдачи конвекцией	Вт/м^{2}К	20
Критерий Bi	-	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Критерий Fo	-	230
Время реакции	с	1
Время выхода влаги	с	2

Список литературы

1. Овчинников Ю.В. Проблемы сжигания водоугольных топлив и предложения по разработке технологии сжигания / Ю.В. Овчинников, Е.Е. Бойко, Ф.А. Серант // Доклады АН ВШ РФ. – 2015. – №1 (26). – С. 85-93.
2. Калиненко Р.А., Левицкий А.А., Мирохин Ю.А., Полак Л.С. Математическая модель процессов пиролиза и газификации угля // Кинетика и катализ, 1978, т. 28, вып. 3, с. 723-729.
3. Померанцев В.В., Шестаков С.М., Дудукалов А.П., Усик Б.В. Проблема разработки теории горения твердого топлива. Сб. конф., Новосибирск, 1985, ч I, с. 22-32.

КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНОГО ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Щинников П.А., Овчинников Ю.В., Францева А.А., Бойко Е.Е.
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Предлагается модель процесса воспламенения и горения тонкодисперсного водоугольного топлива (ТД ВУС) в предтопке циклонного типа [1, 2]. Модель предназначена для формирования инженерного метода расчета состава и количества продуктов сгорания ТД ВУС и определения конструктивно-компоновочных характеристик собственно циклонного предтопка. Предтопок имеет зоны испарения влаги топлива, газификации и горения. Модель построена с использованием следующих основных допущений: квазистационарность процессов; постоянство теплоемкостей и коэффициентов теплоотдачи при средней температуре процессов; постоянство теплоемкостей и коэффициентов теплоотдачи при средней температуре процесса; изотермичность частиц топлива; представлении частиц топлива в виде водоугольной капли; инертность компонентов золы; одномерность потока. Кроме того в модели учитываются только определяющие процессы горения химические реакции, при этом температурным сопротивлением части топлива можно пренебречь, так как критерий Фурье $Fo < 5$, и одновременно критерий Био $Bi < 0,5$. Конвективно-кондуктивный теплообмен от газа к частице превалирует над переносом теплоты радиацией. Модель позволяет определить время выхода влаги из топлива (испарения), температуры газовзвеси, горения топлива, состав и объемы продуктов сгорания. Это дает возможность установить конструктивно-компоновочные характеристики собственно предтопка для разных режимов ведения процесса.

Список литературы

1. Овчинников Ю.В. Проблемы сжигания водоугольных топлив и предложения по разработке технологии сжигания / Ю.В. Овчинников, Е.Е. Бойко, Ф.А. Серант // Доклады АН ВШ РФ. – 2015. – №1 (26). – С. 85-93.
2. Boyko E.E., Reseach of spraying and inceneration ACLF in the boiler with cyclone furnace extansion / E.E. Boyko, Y.V. Ovchinnikov // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol.698: Electrical Engineering, Energy, mechanical Engeneering, EEM 2014. – P.664-667.

X Всероссийская конференция
с международным участием
ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА: ТЕОРИЯ,
ЭКСПЕРИМЕНТ, ПРИЛОЖЕНИЯ
ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ
6-9 ноября 2018 года
г. Новосибирск

ISBN 978-5-89017-060-6

Ответственные за выпуск

к.т.н. Е.Б. Бутаков,

Л.М. Чикишев

Подписано в печать 25.10.2018 г. Печать офсетная.

Бумага офсетная. Формат 60x84 1/8. Усл. Печ. 20 л.

Тираж180 экз. Заказ № 466

Отпечатано в типографии «Срочная полиграфия»

ИП Малыгин Алексей Михайлович

630090, Новосибирск, пр-т. Академика Лаврентьева, 6/1, оф. 104

Тел. (383) 217-43-46, 8-913-922-19-07