

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



**XI Всероссийская конференция
с международным участием**

**ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА:
ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ, ПРИЛОЖЕНИЯ**

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

9–12 ноября 2021 года
Новосибирск

Спонсор ООО «ЗиО-КотЭС»

Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: Сб. тезисов докладов XI Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 9–12 ноября 2021 г. – Новосибирск: ИТ СО РАН, 2021. – 172 с.

ISBN 978-5-89017-069-9

Сборник содержит тезисы докладов XI 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.

© Институт теплофизики СО РАН, 2021

Оргкомитет

Сопредседатели:

Алексеев С.В., академик РАН, ИТ СО РАН

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

Заместители председателя:

Терехов В.В., д.ф.-м.н., ИТ СО РАН

Шарыпов О.В., д.ф.-м.н., ИТ СО РАН

Ученые секретари:

Бутаков Е.Б., к.т.н., ИТ СО РАН

Копьев Е.П., к.т.н., ИТ СО РАН

Члены оргкомитета:

Ануфриев И.С., д.т.н., ИТ СО РАН

Васильев А.А., д.ф.-м.н., ИГиЛ СО РАН

Дулин В.М., д.ф.-м.н., ИТ СО РАН

Козлов В.В., д.ф.-м.н., ИТПМ СО РАН

Лукашов В.В., к.т.н., ИТ СО РАН

Перепечко Л.Н., к.ф.-м.н., ИТ СО РАН

Прууэл Э.Р., д.ф.-м.н., ИГиЛ СО РАН

Терехов В.И., д.т.н., ИТ СО РАН

Цепенюк А.И., к.т.н., ООО «ЗиО-КОТЭС»

Шмаков А.Г., к.х.н., ИХКГ СО РАН

Шторк С.И., д.ф.-м.н., ИТ СО РАН

Программный комитет

Батаев А.А., д.т.н., НГТУ, Новосибирск

Batmunkh S., member of Mong.Acad. of Sci., Mongolian University of Sci. and Technol.,
Ulaanbaatar, Mongolia

Волков Э.П., академик РАН, ОАО «ЭНИН», Москва

Дектерев А.А., к.т.н., ИТ СО РАН, Красноярск

Елистратов С.Л., д.т.н., НГТУ, 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., академик РАН, ФИЦ УУХ СО РАН, Кемерово

Кавтарадзе Р.З., д.т.н., МГТУ, Москва

Квривишвили А.Р., к.т.н, ген. конструктор, АО («ЗиО») «Подольский машиностроительный завод», Подольск
Qi F., prof., Shanghai Jiao Tong University, China
Клименко А.В., академик РАН, МЭИ, Москва
Колмаков А.В., зам. ген. директора, ООО «СГК», Новосибирск
Коржавин А.А., д.т.н., ИХКГ СО РАН, Новосибирск
Коробейничев О.П., д.ф.-м.н., ИХКГ СО РАН, Новосибирск
Кочетков В.Н., к.т.н., КемНЦ СО РАН, Кемерово
Кузнецов Г.В., д.ф.-м.н., ТПУ, Томск
Левин В.А., академик РАН, МГУ, Москва
Лобода Е.Л., д.ф.-м.н., ТГУ, Томск
Markides C., prof., Imperial College London, UK
Мессерле В.Е., д.т.н., ИПГ КазНУ, Алматы, Казахстан
Минаев С.С., д.ф.-м.н., ДВФУ, Владивосток
Пенязьков О.Г., академик НАНБ, ИТМО НАНБ, Минск, Беларусь
Рыжков А.Ф., д.т.н., УрФУ, Екатеринбург
Серант Ф.А., д.т.н., ООО «ЗиО-КОТЭС», Новосибирск
Смирнов Н.Н., д.ф.-м.н., МГУ, Москва
Снегирев А.Ю., д.т.н., СПбПУ, Санкт-Петербург
Сон Э.Е., академик РАН, ОИВТ РАН, Москва
Стенников В.А. чл.-корр. РАН, ИСЭМ СО РАН, Иркутск
Стрижак П.А., д.ф.-м.н., ТПУ, Томск
Суслов Н.И., д.э.н., ИЭОПП СО РАН, Новосибирск
Сысолятин С.В., чл.-корр. РАН, ИПХЭТ СО РАН, Бийск
Тугов А.Н., д.т.н., ОАО «ВТИ», Москва
Фаворский О.Н., академик РАН, ОЭММПУ РАН, ЦИАМ, Москва
Федорук М.П., академик РАН, НГУ, Новосибирск
Филиппов С.П., академик РАН, ИНЭИ РАН, Москва
Фокин Н.И., гл. констр., ПАО «Силловые машины», ЛМЗ, Санкт-Петербург
Фомин В.М., академик РАН, ИТПМ СО РАН, Новосибирск
Фролов Д.В., к.т.н., РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
Фролов С.М., д.ф.-м.н., ФИЦ ХФ РАН, Москва
Nanjalic K., prof., TU, Delft, The Netherlands
Штым К.А., д.т.н., ДВФУ, Владивосток
Enkhsaruul B., prof., National University of Mongolia, Ulaanbataar, Mongolia
Яковлев В.А., д.х.н., ФИЦ ИК СО РАН, Новосибирск
Якуш С.Е., д.ф.-м.н., ИПМех РАН, Москва
Яновский Л.С., д.т.н., ЦИАМ, Москва

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕТАЛЬНОЙ КИНЕТИКИ РАСПАДА И ОКИСЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ АРАС, ПОДДЕРЖАННЫЕ КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКИМИ ВЫЧИСЛЕНИЯМИ

Быстров Н.С., Емельянов А.В., Еремин А.В., Яценко П.И.

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

Проблемы снижения вредных выбросов и увеличения безопасности процессов горения повышают интерес к новым видам топлив и химически активным добавкам и существенно увеличивают актуальность исследования детальной кинетики их пиролиза и окисления.

С точки зрения экспериментальных исследований этих процессов, так называемым «золотым стандартом» в химической кинетике является метод атомно резонансной абсорбционной спектроскопии (АРАС), основанный на регистрации резонансного поглощения на атомарных линиях в исследуемых реагирующих смесях [1, 2]. В ОИВТ РАН метод АРАС реализован в сочетании с высококачественной кинетической ударной трубкой, позволяющей проводить эксперименты в сильноразбавленных газовых смесях (до долей ppm) в диапазоне температур от 700 до 5000 К и давлении от 0.5 до 20 бар.

Таким образом, применение данного метода на длине волны 130,5 нм, соответствующей резонансной линии атомов кислорода, позволяет исследовать детальную кинетику окисления ряда перспективных биотоплив (пропанол, бутанол, диметиловый эфир, фуран), а также метана и ацетилена. Кроме того, использование метода АРАС на длине волны 183.0 нм, соответствующей резонансной линии атомарного йода, используется для изучения кинетики первичной мономолекулярной диссоциации галогенированных углеводородов CF_3I , C_3F_7I и C_3H_7I , широко используемых в различных отраслях промышленности.

По результатам АРАС измерений непосредственно из эксперимента могут быть определены константы скорости реакций окисления и диссоциации исследуемых соединений в широком диапазоне температур и давлений.

Анализ получаемых экспериментальных данных осуществляется в сочетании с теоретическими расчетами, выполняемыми по модели РРKM (Райса-Рамспергера-Касселя-Маркуса), на основе проводимых квантово-химических вычислений на уровне теории B3LYP/cc-pVTZ-PP, в результате которых определяются все необходимые параметры молекул и переходных комплексов – геометрия, частоты, энергии. По результатам этих вычислений для широкого диапазона температур также рассчитываются термодинамические функции соответствующих веществ, такие как энтропия, стандартная энтальпия образования и изобарная теплоемкость, а также термодинамика некоторых элементарных химических реакций. Дополнительно проводимый анализ чувствительности и ROP-анализ позволяет выделить наиболее важные химические процессы, влияющие на кинетику горения биотоплив.

В докладе приводится обзор результатов, проводимых в Лаборатории неравновесных процессов ОИВТ РАН исследований детальной кинетики распада и окисления различных углеводородных топлив и химически активных добавок методами АРАС, поддержанных квантово-химическими вычислениями и численными расчетами с использованием современных кинетических моделей.

Список литературы

1. V. Naudet, S. Abid and C.E. Paillard. A high temperature chemical kinetics study of the O_2 dissociation and the O atoms recombination by ARAS // J. Chim. Phys. 1999. V. 96, P. 1123–1145.
2. T. Varga, I. Zsély, T. Turányi, T. Bentz, M. Olzmann. Kinetic Analysis of Ethyl Iodide Pyrolysis Based on Shock Tube Measurements // J. Chim. Phys. 2014. V. 46, P. 295–304.

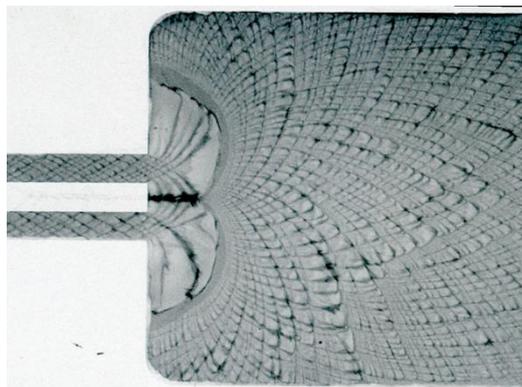
ВОЗБУЖДЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ИНИЦИАТОРАМИ**Васильев А.А.^{1,2}, Борискин А.А.², Васильев В.А.¹**¹ Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН, Новосибирск² Новосибирский государственный университет

E-mail: gasdet@hydro.nsc.ru

Для возбуждения процессов горения или детонации используются различные инициаторы: тепловые воспламенители, высокотемпературные струи активных радикалов, электрическая или лазерная искра, взрывающаяся проволочка, заряды конденсированного взрывчатого вещества и т.д. Каждый инициатор характеризуется своим специфическим пространственно-временным законом выделения запасенной энергии, а смесь – законом восприятия этой энергии внешнего инициатора и эстафетного запуска химической энергии смеси для формирования самоподдерживающейся волны. Согласованность этих законов приводит к режиму распространения самоподдерживающихся волн, а рассогласованность – к затуханию волн.

Для возбуждения волн горения принятым является термин критической энергии зажигания E_{fl} , а для возбуждения детонации – критической энергии инициирования ДВ E^* . Критические энергии традиционно выступают в качестве количественной характеристики при оценках пожаро или взрывоопасности горючих систем: чем меньше E^* , тем более опасна смесь. Между классическими режимами горения и детонации могут существовать многочисленные нестационарные режимы распространения волн со скоростями от низкоскоростных величин, характерных для ламинарного пламени до гиперзвуковых скоростей, присущих стационарной ДВ. В этом широчайшем диапазоне особое место занимает режим перехода горения в детонацию (ПГД), представляющий одну из важнейших нерешенных проблем теории горения и детонации. Величины критических энергий для горения и детонации отличаются на много порядков – для воспламенения типичные величины E_{fl} составляют миллиджоули, а вот для детонации величины E^* доходят до мегаджоулей. Потому одна из важнейших задач возбуждения детонации – уменьшение критических энергий за счет оптимизации пространственно-временных параметров возбуждающего импульса от внешнего инициатора.

В данной работе представлены результаты исследований возбуждения различных нестационарных волн с помощью методики дифракционного инициирования. Суть методики состоит в том, что исследуемая смесь возбуждается в объеме (или в зазоре) струей горячих и активных продуктов, подводимых к объему смеси с помощью дополнительного формирующего устройства. Совокупность газодинамических и кинетических явлений при переходе их формирующего устройства в исследуемый объем смеси получил название дифракции. Методика дифракционного реинициирования оказалась удобной при проведении исследований в лабораторных условиях и широко используется во многих лабораториях. В данной работе исследованы режимы и условия инициирования волн детонации, наиболее сложных для моделирования, а именно расходящихся волн со сферической и цилиндрической симметрией. Обсуждены основные результаты. Типичная фотография эффективного возбуждения многофронтной детонации разносеными инициаторами по сравнению с сосредоточенным приведена на нижеприведенном рисунке.



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ АЛЮМИНИЯ В ПВР

Завершинский И.П.¹⁾, Порфирьев Д.П.^{1,2)}

¹⁾ Самарский университет, г. Самара, Россия

²⁾ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Самара, Россия

В [1] описан плазменно-вихревой реактор, в котором используется реакция гидратации металлических микропорошков в разряде в парах воды. Кинетическая схема плазмохимических реакций в разряде в водяных парах в присутствии металлических микро- и наночастиц включает значительное число реакций [2]. Оценки, подтвержденные моделированием средствами молекулярной динамики, [3] показывают, что поверхностный слой оксида алюминия малых частиц при нагревании быстро разрушается, поэтому на данном этапе, было сделано допущение, что твердые частицы почти мгновенно испаряются. В свою очередь, кинетическая схема химических реакций, идущих в газовой фазе [4] в разряде в водяных парах, учитывает, что оксид алюминия Al_2O_3 не существует в газовой фазе и разлагается на суб-оксиды [5]. Кинетическая схема, использованная в работе, включала как механизм окисления алюминия, так и субмеханизм для сред H_2-O_2-Ar и H_2 -воздух [3]. На основе решения системы усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса были изучено трехмерное многокомпонентное течение в плазменно-вихревом реакторе, сопровождающееся окислением подаваемого алюминия.

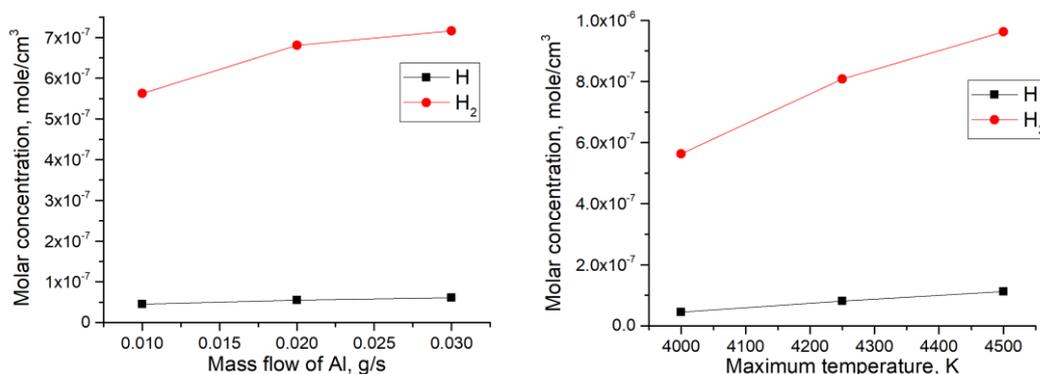


Рис. 1. Зависимости максимальной молярной концентрации атомарного и молекулярного водорода от массового расхода алюминия и максимальной температуры в разрядной области.

Для замыкания системы применялась модель турбулентности SST $k-\omega$. Расчеты проводились с варьирующимися мощностью источника тепловыделения, который моделировал нагрев смеси в разрядной области, и массовой долей подаваемого алюминия. В рамках использованной схемы продемонстрировано увеличение максимальной концентрации как атомарного, так и молекулярного водорода при усилении нагрева и увеличении концентрации металла.

Работа поддержана Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания вузам и научным организациям в сфере научной деятельности, проект № FSSS-2020-0014.

Список литературы

1. Klimov A., Bitiurin V., Tolkunov B. et al. Hydrogen Plasma Flow Creation for MHD Power Generation. AIAA Paper 2011-3285. 2011.
2. Словецкий Д. И. Механизмы химических реакций в неравновесной плазме [Текст]/ Д.И. Словецкий. – М.: Наука, 1980. – 313 с.
3. Starik, A.M. Numerical analysis of nanoaluminum combustion in steam // Combustion and Flame. – 2014. – V. 161. – P. 1659–1667.
4. Beckstead, M.W. Numerical Simulation of Single Aluminum Particle Combustion (Review) // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2005. – V. 41. – P. 622–638.
5. Huang, Y. Effect of particle size on combustion of aluminum particle dust in air // Combustion and Flame. – 2009. – V. 156. – P. 5–13.

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ГОРЕНИЯ МИКРОСТРУЙ ВОДОРОДА

Козлов В.В.^{1,2)}, Литвиненко М.В.¹⁾, Литвиненко Ю.А.^{1,2)}, Шмаков А.Г.^{2,3)}

¹⁾ Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²⁾ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

³⁾ Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН,
г. Новосибирск, Россия

В докладе представлены результаты цикла экспериментальных исследований структуры и характеристик развития механизма диффузионного горения водорода дозвуковых и сверхзвуковых круглых и плоских микроструй [1].

Показаны особенности горения данных течений в зависимости от изменений начальных условий на срезе сопла, скорости их истечения и горения водорода в смеси с другими газами. Обнаружено новое явление при горении микроструи водорода, связанное с образованием так называемой «области перетяжки пламени» и явление «запирание» микроструй при истечении в трансзвуковой области.

Список литературы

1. Г. Р. Грек, В. В. Козлов, М. В. Литвиненко, Ю. А. Литвиненко, А. Г. Шмаков Физические механизмы горения микроструй водорода // Новосиб. гос. ун-т. — Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. — 374 с.

ОСОБЕННОСТИ РАСПЫЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТР-КЕКА КАМЕННОГО УГЛЯ

Кузнецов Г.В., Стрижак П.А., Волков Р.С.

Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Экспериментально исследованы основные характеристики струй водоугольных суспензий после распыления форсункой. Одной из существенных экологических проблем угольной отрасли настоящего времени являются отходы процессов углеобогащения – фильтр-кеки, ежегодный объем накопления которых ~900 млн. т. Их использование в качестве компонентов перспективных топлив является актуальной задачей [1]. В этой связи, все эксперименты, выполненные для решения поставленных задач, проведены с суспензиями, основным компонентом которых является кек длиннопламенного каменного угля.

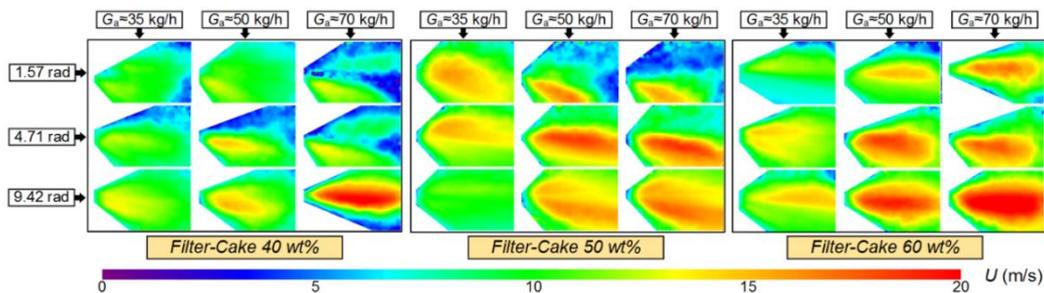


Рис. 1. Типичные поля скорости движения капель при различных значениях массовых расходов воздуха ($G_a=35\text{--}70$ кг/ч), углах поворота распылительного устройства ($\varphi=1.57\text{--}9.42$ рад), а также концентрациях кека в суспензии (40–60% масс.).

Максимальные скорости капель регистрировались в нижней части струи, минимальные – в верхней. Отличие между скоростями движения достигали значений 5–10 м/с. При этом средние значения скорости капель, а также поля скорости (рис. 1) существенно отличались для разных расходов воздуха (G_a) и варьируемых углов поворота распылительного устройства (φ).

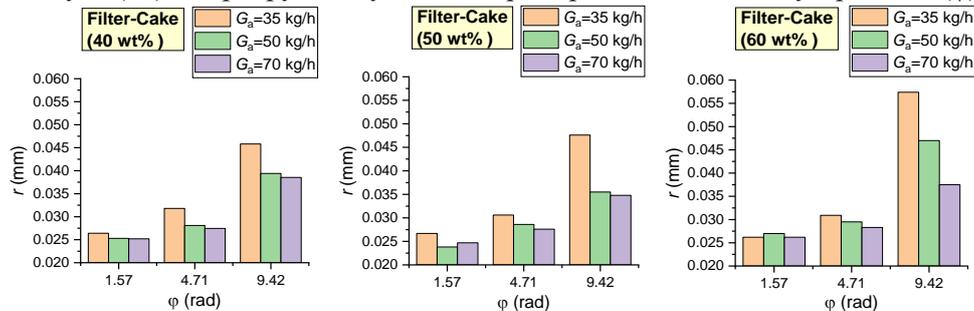


Рис. 2. Средние радиусы капель в струе при различных расходах воздуха ($G_a=35\text{--}70$ кг/ч), углах поворота распылительного устройства ($\varphi=1.57\text{--}9.42$ рад), а также концентрациях кека в суспензии (40–60% масс.).

Увеличение концентрации кека в суспензии (40–60%) способствует росту среднего размера генерируемых капель на 5–7%. Увеличение угла поворота распылительного устройства (4.71–9.42 рад) приводит к росту среднего радиуса капель в струе на 40–80%. Рост массового расхода воздуха через форсунку при угле поворота распылительного устройства $\varphi \approx 1.57$ рад практически не влияет на размеры генерируемых форсункой капель.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ (контракт № 13.1902.21.0014).

Список литературы

1. Vershinina K.Y., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Recovery of waste-derived and low-grade components within fuel slurries // Energy. – 2019 – V. 183. – P. 1266–1277. DOI: 10.1016/j.energy.2019.07.031.

**МОДЕЛЬ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПЛОТНЫХ
РЕАГИРУЮЩИХ ГАЗОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ ВЗРЫВА****Прууэл Э.Р.**

Институт гидродинамики им. М.А. Ларентьева СО РАН

Разработана модель уравнения состояния позволяет проводить расчеты равновесных термодинамических параметров плотных реагирующих газов и флюидов с учетом межмолекулярных взаимодействий. Протестированный диапазон параметров составляет по температуре от 100 до 10 000 К и до давлений 100 ГПа. Базовыми параметрами для задания условий являются плотность, температура и химический элементный состав исследуемой смеси. Для этих условий вычисляется равновесный химический состав, давление, внутренняя энергия, теплоемкости, показатель адиабаты и скорость звука. В расчетах учтена возможность образования следующих химических компонент: Ar, Ne, He, Kr, N₂, N, O₂, O, H₂, H, H₂O, OH, NH₃, CO, CO₂, CH₄, NH₃, NO; конденсированных компонент углерода и Al₂O₃.

Для построения уравнения состояния используются методы молекулярной динамики и статистической физики. При этом, вещество рассматривается как набор точечных объектов (молекул) взаимодействующих с центральным парным потенциалом в форме $\exp(-r/r_0)$. Дополнительно молекулы обладают внутренними степенями свободы, энергия которых зависит только от температуры. Для определения давления и полной энергии системы численно решается задача движения небольшого ансамбля частиц (NVT ансамбль из 50-100 молекул), при этом внутренняя энергия системы вычисляется как суммы кинетических энергий молекул и потенциальной энергии взаимодействия, давление вычисляется по теореме о вириале. Подбор параметров парных потенциалов взаимодействия осуществлялся из условий наилучшего соответствия экспериментальным данным: таблицам термодинамическим величин Американского института стандартов, ударным адиабатам сжиженных газов, сжатию в алмазных наковальнях и параметрам детонации конденсированных взрывчатых веществ.

На основе модели разработан программный комплекс (<http://ancient.hydro.nsc.ru/chem>), позволяющий определять равновесные термодинамические параметры смесей газов при заданной плотности и температуре, рассчитывать ударные и детонационные адиабаты. Для построения ударной адиабаты, численно решается нелинейное уравнение Гюгонио в переменных плотность и температура, при этом, все необходимые параметры (давление и удельная внутренняя энергия) вычисляются описанным выше методом. Параметры детонации определяются из условий Чепмена-Жуге – на ударной адиабате с энерговыделением находится точка с условиями $D=u+c$, где D – скорость фронта, u – массовая скорость, c – равновесная скорость звука.

К РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЙ СНИЖЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА В ЭНЕРГЕТИКЕ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Рыжков А.Ф.¹⁾, Богатова Т.Ф.¹⁾, Тугов А.Н.²⁾, Масленников Г.Е.¹⁾,
Осипов П.В.¹⁾, Никитин А.Д.¹⁾

¹⁾ Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

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

Переход к низкоуглеродной экономике, наряду с разработкой технологий снижения удельного потребления углеводородов, включает создание новых промышленных систем улавливания и утилизации техногенного CO₂ (CCUS).

В докладе на основании разработанного метода скрининг-анализа в рамках системы LCA (Life Cycle Analysis – оценка жизненного цикла) рассмотрены интегральные характеристики основных технологий утилизации CO₂ от энергетических производств в зависимости от уровня технологической зрелости и рыночной привлекательности. Проведена классификация потенциальных потребителей CO₂ по основным наиболее чувствительным параметрам электрогенерации: объемам, давлению и чистоте в зависимости от параметров процессов и типов ТЭС.

Выявлено, что основным препятствием на пути радикального решения проблемы углеродного следа рассматриваемых направлений является трудноустраняемое несоответствие объемов рынков производителей и потребителей, а также технологическая и технико-экономическая нецелесообразность глубокого улавливания CO₂ в реакторных процессах.

Известные подходы к смягчению проблемы углеродного следа от энергетических и промышленных источников с технологической готовностью к коммерциализации входящих в них (небиологических) процессов в пределах 10–15 лет соответствуют трем моделям развития, направленным:

- на депонирование S-CO₂ в природных аккумуляторах (M1);
- на применение CO₂ в качестве сырья для химических производств с ограниченным временем жизни вновь созданного продукта (M2);
- на химическое поглощение CO₂ твердыми материалами основного состава с получением термодинамически устойчивого продукта с неограниченным временем жизни (M3).

На примерах из энергетики, газовой промышленности и ЖКХ последовательно рассматриваются возможности снижения углеродного следа в продукте за счет снижения удельного потребления углеводородов и за счет минерализации CO₂ из дымовых газов с помощью местных искусственных материалов и золошлаковых отходов огнетехнических производств.

Ожидаемое повышение КПД парогазовых установок с внутрицикловой газификацией угля с 50–51% до 52–52,5% за счет применения паровоздушного дутья и оптимизации режима работы газогенератора и горячей сероочистки позволит снизить расход угля и образование CO₂ на 3–4%, что эквивалентно снижению выбросов CO₂ на 2,4 Мт/год для блока ПГУ мощностью 500 МВт.

При переходе в черной металлургии от доменного процесса к процессу прямого восстановления железа из руды восстановительным газом, полученным в результате конверсии природного газа, возможно сокращение выбросов CO₂ в 3–4 раза (с 1,7–2,2 т до 0,5–0,6 т CO₂ / т железа).

Принимая небольшую степень конверсии щелочных и щелочно-земельных оксидов – 30% и CO₂ – 23%, которые соответствуют данным по работе пилотной установки карбонизации угольной золы, мы получили, что для улавливания CO₂ из дымовых газов ПГУ на природном газе потребуется 0,1–0,2 кг золы ТКО на кг дымовых газов. Удельный выход золы уноса при сжигании ТКО составляет 20–80 кг/т, из этого вытекает потребность в колоссальном количестве исходного сырья для минерализации даже небольшого объема CO₂. Учитывая ограниченность поступления ресурсов ТКО и лома бетона от реновации жилья, можно оценить степень улавливания CO₂ из дымовых газов ТЭС на уровне 2%.

СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА ПОЛИДИСПЕРСНЫХ СМЕСЕЙ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**Смирнов Н.Н., Тюренкова В.В., Никитин В.Ф.**¹⁾ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва²⁾ Федеральный научный центр «Научно-исследовательский институт системных исследований Российской Академии Наук», Москва

Задача разработки алгоритмической компоновки и подбора программ для расчета многомасштабных процессов и горения набирает актуальность с каждым годом в связи с интенсивным развитием как вычислительных методов и моделей, так и с увеличением современных возможностей суперкомпьютерных вычислений.

Практическая применимость разрабатываемых вычислительных моделей и методов охватывает проблемы энергетики, двигателестроения, взрыво-пожаробезопасности, а также интенсификации добычи полезных ископаемых с применением методов термохимического воздействия на пласт.

Основными проблемами, возникающими в процессе моделирования, являются: а) многомасштабность, не позволяющая проводить моделирование всех задействованных процессов на единых даже масштабируемых сетках; б) жесткость и большая размерность системы дифференциальных уравнений для описания химической кинетики, решение которой может занимать 80% процессорного времени.

Возможность решения проблем в части многомасштабности видится в применении подходов многоуровневого моделирования, при котором детальное решение задачи более мелкого масштаба обрабатывается и вносится в качестве элемента модели более крупного масштаба. Для решения проблемы сокращения времени интегрирования уравнений многостадийной химической кинетики актуальным трендом является применение нейросетевых подходов и методов в рамках разрабатываемых вычислительных моделей.

Исследование различных моделей газокапельного взаимодействия позволило оценить роль различных воздействий на поведение ударной волны: механические потери, тепловые потери, испарение капель, распыление, воспламенение и сжигание паров топлива.

Было продемонстрировано, что при попадании ударной волны в область, заполненную аэрозолем, скорость волны уменьшается. Наиболее интенсивное снижение скорости происходит, когда учитываются только сопротивление и теплопередача, наименее интенсивное снижение скорости волны – когда учитывается только сопротивление.

Учет испарения приводит к меньшему снижению скорости ударной волны по сравнению с учетом только тепловых и механических потерь. Причина в следующем: испарение приводит к образованию дополнительного объема газа за ударной волной, который поддерживает ее распространение.

Учет распыления капель приводит к более быстрому снижению скорости ударной волны по сравнению с учетом термомеханического взаимодействия и испарения. Объяснение этого факта заключается в следующем: распыление капель приводит к образованию новой свободной поверхности, что увеличивает обмен импульсом и энергией между газом и конденсированной фазой; мелкие капли замедляются и нагреваются намного быстрее, таким образом, увеличивая потери импульса и энергии в потоке газа, что приводит к замедлению ударной волны.

При учете горения после некоторого периода замедления в аэрозоле скорость ударной волны увеличивается до 1500-1700 м/с, что соответствует воспламенению газовой смеси и переходу дефлаграции в режим детонации.

Переход дефлаграции в детонацию происходит в режиме перегрузки (режим сильной детонации, характеризующийся повышенной скоростью и давлением) с последующим замедлением до самодостаточной стационарной скорости режима Чепмена-Жуге.

Эффективным способом повышения быстродействия вычислительного моделирования являются параллельные вычисления на многопроцессорных супер-ЭВМ. Простейшая модель ускорения расчетов при применении параллельных алгоритмов вычислений показывает ограничен-

ность возможности ускорения при подключении дополнительных процессоров, а именно, ускорение расчетов при выполнении параллельных вычислений по отношению к последовательному алгоритму обычно определяется из соотношения, выражающего закон Амдала, который иллюстрирует ограничение роста производительности вычислительной системы с увеличением количества вычислителей. Джин Амдал сформулировал закон в 1967 году, обнаружив простое по существу, но непреодолимое по содержанию ограничение на рост производительности при распараллеливании вычислений. В случае, когда задача разделяется на несколько частей, суммарное время ее выполнения на параллельной системе не может быть меньше времени выполнения самого длинного фрагмента. Согласно этому закону, ускорение выполнения программы за счет распараллеливания ее инструкций на множестве вычислителей ограничено временем, необходимым для выполнения ее последовательных инструкций.

Однако, если мы примем во внимание обменные процессы между процессорами и памятью и пересылки данных между различными разделами памяти, количество которых возрастает с увеличением параллельных процессов исполнения алгоритма, то закон Амдала нуждается в модификации, которая показывает, что неограниченное возрастание параллельных нитей приведет к снижению эффективности ускорения.

ДИФФУЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ В НЕВЕСОМОСТИ

Снегирев А.Ю.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

АНО «ПожароВзрывоБезопасность», Санкт-Петербург, Россия

Практическая значимость исследования газофазного горения в невесомости заключается в оценке пожарной опасности в условиях космического полета, определении горючести материалов и выработке оптимальной стратегии подавления пламени. Кроме того, отсутствие деформации поля скорости, вызванной гравитационной конвекцией, открывает недоступную в наземных условиях возможность для изучения устойчивости газофазного пламени, его состояний близких к пределам погасания и его нестационарной динамики после потери устойчивости.

В данной работе приводится обзор исследований диффузионного горения газов, выполненных в течение последних десятилетий на орбитальных космических станциях и при свободном падении в испытательной башне.

Подробно анализируются условия и результаты завершеного в 2021 г. космического эксперимента «Фламенко» (BRE), выполнявшегося в рамках международной программы АСМЕ (Advanced Combustion via Microgravity Experiments). Интерпретация результатов эксперимента дается на основании численного моделирования, выполненного российской группой участников эксперимента (рис. 1).

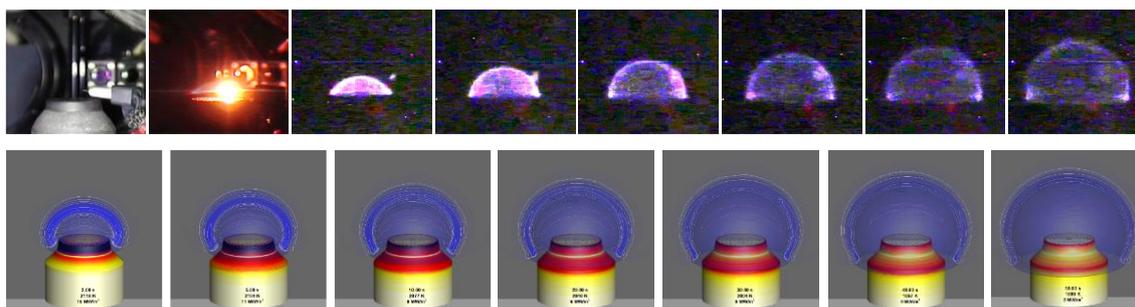


Рис. 1. Формирование и рост диффузионного пламени в невесомости: сверху – космический эксперимент «Фламенко» (BRE), внизу – численное моделирование (зона реакции в газе и тепловой поток на поверхности горелки).

Основным результатом данного космического эксперимента является демонстрация радиационного механизма погасания диффузионного пламени и динамики нестационарного тройного пламени, формирующегося после потери устойчивости [1-3].

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 20-08-00478.

Использованы вычислительные ресурсы СКЦ «Политехнический» (СПбПУ).

Список литературы

1. A. Snegirev, E. Kuznetsov, E. Markus, P. Dehghani, P. Sunderland, Transient dynamics of radiative extinction in low-momentum microgravity diffusion flames, Proceedings of the Combustion Institute 38:3 (2021) 4815–4823, <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.06.110>.
2. Кузнецов Е.А., Снегирев А.Ю., Маркус Е.С. Радиационное погасание ламинарного диффузионного пламени над плоской пористой горелкой в условиях невесомости. Численное моделирование // Физика горения и взрыва, 2020, Т. 56, №4, С. 26–45, <https://doi.org/10.1134/S0010508220040036>.
3. Снегирев А.Ю. Тепловое излучение. Основы теории и методы расчета. Учебное пособие. – Санкт-Петербург, ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – 177 с. (ISBN 978-5-7422-7213-7), <https://elibrary.spbstu.ru/dl/2/i21-53.pdf/view>.

ТЭК АЗИАТСКОЙ РОССИИ: НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И НОВАЯ ПАРАДИГМА РАЗВИТИЯ

Суслов Н.И.¹⁾, Крюков В.А.¹⁾, Крюков Я.В.¹⁾, Чурашев В.Н.¹⁾

¹⁾ Институт экономики и организации промышленного производства, г. Новосибирск, Россия

К числу важнейших проблем экономики обширных территорий азиатской России относится [1] необходимость ускорения технологического развития, сжатия инновационного цикла, означающее существенное уменьшение периода между появлением новых знаний и созданием технологий, продуктов и услуг. Сохраняющаяся на значительном уровне роль производства сырья и энергии в структуре добавленной стоимости негативно влияет на устойчивость динамики социально-экономического развития. В решении указанных проблем особенно важна роль ТЭК.

В докладе обсуждаются достигнутый уровень, проблемы развития энергетики РФ с акцентом на ТЭК азиатской России и подходы к их решению в аспекте встраивания в переживающую бурный процесс актуализации повестку энергоперехода. Эти вопросы ставятся не только с позиции возможностей добычи, технологий переработки и освоения рынков, но также под углом степени соответствия отечественных энергетических производств формируемой парадигме ESG (Environment, Sustainability, Governance): в какой степени они способны обеспечить устойчивое развитие обширных малоосвоенных территорий.

Мы демонстрируем, что задержки в развитии на Востоке страны таких сфер, как предоставление научно-производственных сервисных услуг на, а также специализированного машиностроения для глубокой комплексной переработки топливно-энергетических ресурсов значительно снижает шансы достижения как устойчивости социально-экономического развития экономики, так и решения задач снижения углеродоемкости в рамках обширной территории. Авторы исходят из того, что развиваемая в настоящее время ESG парадигма является составляющей более широкого подхода к решению проблем социально-экономического развития в современную эпоху - SDG (Sustainability Development Goals), принятого ООН в 2015 году.

Ключевое значение в достижении поставленных задач имеет формирование процедур и подходов институциональной настройки системы государственного регулирования и управления процессов освоения и использования колоссального энергетического потенциала Востока страны. При этом крайне необходимо обеспечение адекватных механизмов использования отдачи от экспортно-ориентированных поставок энергоресурсов для финансирования проектов, направленных на изменение структуры всей экономики азиатской России. Авторы считают, что наблюдаемый в настоящее время рост спроса на отечественные первичные энергоресурсы на рынках Китая и Азиатско-Тихоокеанского Региона в целом не следует рассматривать как устойчивый долгосрочный тренд и всецело ориентироваться на него при принятии и реализации долгосрочных решений структурного характера. По этой причине для повышения устойчивости развития ТЭК востока России и всего комплекса экономики территории необходимо обеспечение развития проектов, основанных на связанности и взаимодействии различных секторов и регионов.

Для анализа и обоснования развития социально-экономических систем территорий Азиатской России возрастает важность разработки методологии и комплекса средств пространственного анализа и прогнозирования социально-экономического развития и взаимодействия экономики регионов Азиатской России друг с другом, а также с другими регионами страны и мира. Сложные природно-климатические условия, слабая освоенность обширных территорий, наличие изолированных социально-экономических и технических объектов ставит дополнительные задачи по обеспечению надежности функционирования систем. Развиваемые авторами методы и алгоритмы предназначены для использования в рамках проводимых исследований по формированию и выбору вариантов эффективного, устойчивого развития критически важных секторов экономики восточных районов РФ.

**ДЕТОНАЦИОННЫЙ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЬ ДЛЯ ГАЗИФИКАЦИИ
ПРОМЫШЛЕННЫХ И КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ
СИЛЬНО ПЕРЕГРЕТЫМ ВОДЯНЫМ ПАРОМ**

**Фролов С.М., Сметанюк В.А., Садыков И.А., Силантьев А.С., Шамшин И.О.,
Аксенов В.С., Авдеев К.А., Фролов Ф.С.**

Федеральный исследовательский центр химической физики
им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, г. Москва

В [1, 2] нами предложен новый (детонационный) способ получения сильно перегретого водяного пара (СПП) при атмосферном давлении. Такой пар образуется в импульсно-детонационном пароперегревателе (ИДП) за счет циклической детонации тройной газовой смеси горючее–окислитель–водяной пар, причем СПП дополнительно получается, как продукт детонации горючего. В качестве горючего может использоваться водород, энергетический газ ($\text{CO} + \text{H}_2$), природный газ, пропан и др., а в качестве окислителя – кислород, воздух или обогащенный кислородом воздух. В [3] показано, что циклическая детонация тройных смесей пропан–кислород–водяной пар и метан–кислород–водяной пар позволяет получать СПП с температурой выше 2000°C при атмосферном давлении, причем продукты детонации стехиометрической тройной смеси могут состоять в основном из СПП (80%) и CO_2 (20%). При обработке промышленных, коммунальных и токсичных отходов (например, угольных отходов, лигнина, древесных опилок, пищевых отходов, летучей золы и др.) таким сильно перегретым водяным паром можно добиться полной конверсии органической составляющей отходов в газовую смесь CO и H_2 [5], которую в дальнейшем можно использовать как в качестве энергетического газа для ИДП и производства тепла/электричества, так и в качестве сырья для производства синтетических моторных топлив (например, из отходов угольной промышленности). В связи с высокой привлекательностью рассматриваемой идеи, встает вопрос о ее практической реализации.

В данной сообщении приведены результаты экспериментов по газификации гомогенных органических отходов (отходы кофейных машин, древесные опилки, Байкальский лигнин) сильно перегретым водяным паром, полученным детонационным способом. Разработана и испытана лабораторная установка (ЛУ) (рис. 1) с газификацией до 11 кг/час отходов в горючий газ. Максимальная рабочая частота ИДП 5 Гц. В лабораторной установке определены параметрические области существования детонации для тройных смесей метан–кислород–водяной пар при разных коэффициентах избытка горючего и разбавлениях водяным паром. Максимальное содержание водяного пара, при котором возможна детонация, оказалось близким к 40%(об.). Степень газификации отходов близка к 100% (минеральный остаток на уровне 3–4%). Содержание горючего газа в продуктах газификации: до 75%.

Кроме лабораторной установки разработана и изготовлена экспериментальная установка по газификации отходов с производительностью до 100 кг/час (рис. 2а), работа на которой начнется в ближайшее время. Разработке установки предшествовали многовариантные трехмерные газодинамические расчеты двухфазного течения в проточном реакторе, предназначенном для газификации/обезвреживания отходов с помощью СПП, получаемого детонационным способом. В окончательном варианте установки использована схема подачи сильно перегретого водяного пара в сферический реактор двумя встречными импульсно-периодическими сверхзвуковыми струями (рис. 2б). Вместе со струями в реактор выбрасываются порции частиц отходов, подаваемые дозаторами частиц. Частицы отходов, поступив в реактор, вовлекаются в мощное вихревое движение. Циркулируя в реакторе, частицы отходов периодически попадают в высокотемпературные зоны в центральной области реактора, где происходит их термическая деструкция и газификация. Периодические сильные ударные волны, сопровождающие подачу сверхзвуковых струй СПП, предотвращают агломерацию частиц, циркулирующих в реакторе, а также их седиментацию и стратификацию в поле силы тяжести. По истечении начального переходного периода в реакторе устанавливается квазистационарный рабочий процесс, при котором все средние параметры (давление, температура СПП и др.) остаются постоянными: с одной стороны, с каждым детонационным выстрелом в реактор поступают новые порции СПП и частиц, а с другой стороны, из реактора через выхлопной патрубок непрерывно вытекают продукты газификации и

выносятся частицы. Задача состояла в подборе таких значений определяющих параметров, которые обеспечат продолжительное пребывание частиц в вихревых зонах с температурой выше 2000°С. С помощью расчетов получено представление о структуре течения в реакторе и определены основные характеристики рабочего процесса. На рис. 2в показаны основные элементы экспериментальной установки: ИДП и реактор.

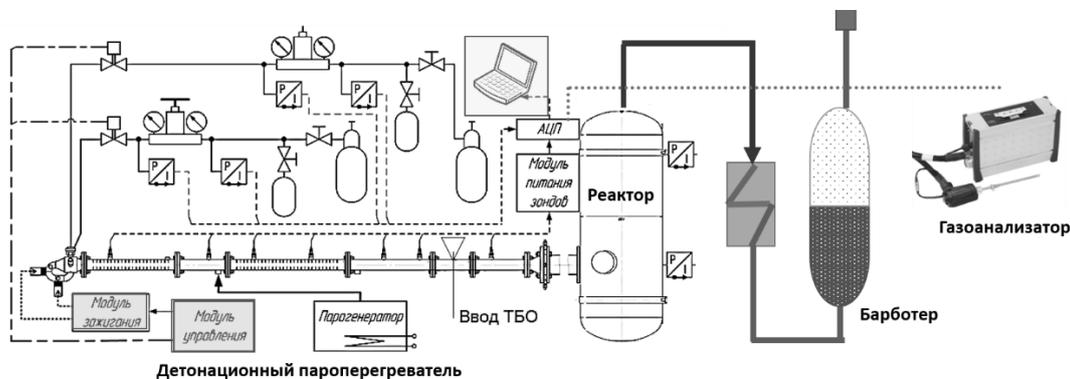


Рис. 1 Лабораторная установка.

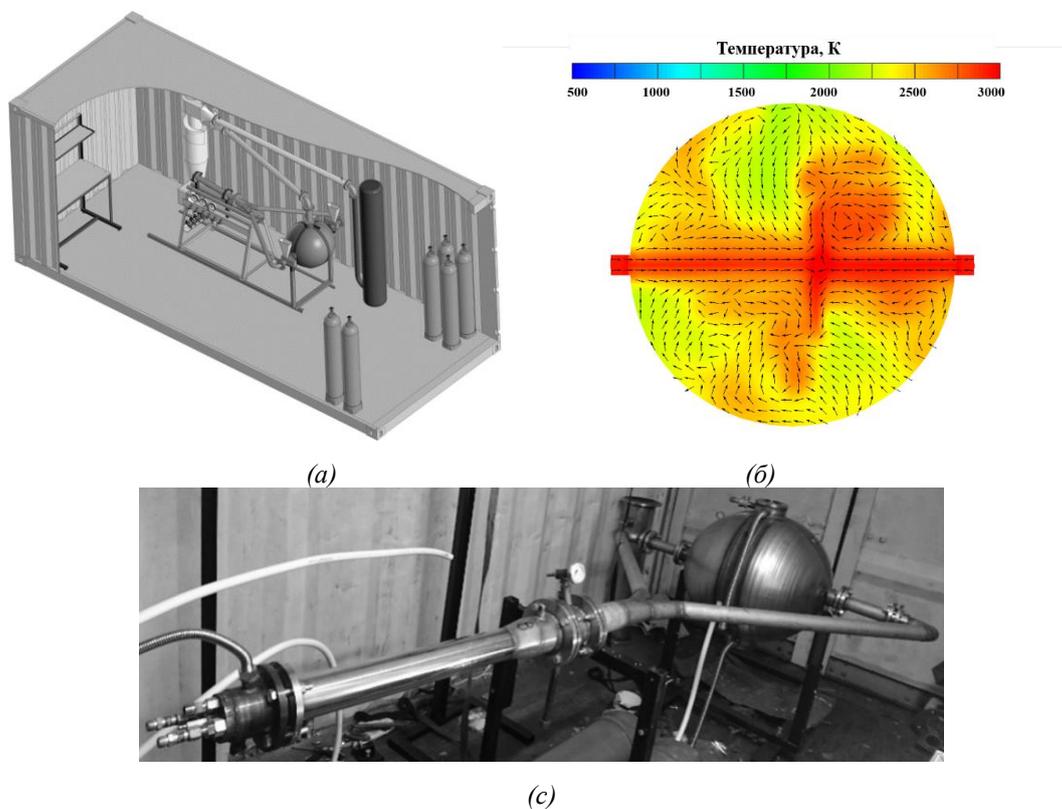


Рис. 2 Экспериментальная установка: (а) общий вид, (б) детонационный пароперегреватель и реактор.

Работа частично выполнена при поддержке Минобрнауки России по госконтракту № 05.607.21.0304 (идентификатор контракта RFMEFI60719X0304).

Список литературы

1. Frolov S.M., Smetanyuk V.A., Avdeev K.A., Nabatnikov S.A. Patent of Russian Federation No. 2686138 dated 24.04.2019. Priority dated 26.02.2018.
2. Frolov S.M., Smetanyuk V.A., Nabatnikov S.A. Patent of Russian Federation No. 2683751 dated 01.04.2019. Priority dated 24.05.2018.
3. Frolov S. M., Smetanyuk V. A., Shamshin I. O., Sadykov I. A., Koval' A. S., Frolov F. S. // Production of highly superheated steam by cyclic detonations of propane and methane-steam mixtures with oxygen for waste gasification. Applied Thermal Engineering, 2021, Vol. 183, Part 1, p. 116195. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116195.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И МОДЕРНИЗАЦИИ КОТЕЛЬНОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Цепенюк А.И.¹⁾, Квривишвили А.Р.²⁾

¹⁾ ООО «ЗиО-КОТЭС», г. Новосибирск, Россия

²⁾ ПАО «Подольский машиностроительный завод» (ПАО «ЗиО»), г. Подольск, Россия

Статья посвящена обзору проектов, выполненных с применением CFD-моделирования:

1. котельное оборудование ТЭС;
2. технологическое и котельно-вспомогательное оборудование ТЭС;
3. технологическое оборудование металлургических производств.

В разделе 1 по проектам котельного оборудования представлены основные технические решения по системам сжигания новых и модернизированных котлов Е-240-13,6-560КТ (Приморская ТЭС), БКЗ-75 (Кызылская ТЭЦ, ТЭЦ Дархан), Е-220-13,8-560БТ (Красноярская ТЭЦ-1) и др., технико-экономические и экологические показатели по результатам испытаний. Показана целесообразность выполнения многовариантных расчетов (CFD-моделирования) на различных режимах работы оборудования, числе и сочетании работающих мельниц (для угольных котлов), неравномерности раздачи сред по горелкам и соплам. Выполнение данных исследований позволяет на этапе разработки оборудования минимизировать риски доводки оборудования после монтажа и наладки, повысить устойчивость технико-экономических и экологических показателей работы котлов к изменению режимов работы, выпустить предварительные режимные карты до проведения наладочных работ и заранее выявить нерекондуемые режимы работы.

В разделе 2 описаны задачи, решаемые CFD-моделированием при разработке систем безмазутного розжига (СБР) применительно к котлам типа ПК-24 (ТЭЦ-10 «Байкальская Энергетическая Компания») и ПК-10 (Красноярская ТЭЦ-1). Показана целесообразность применения CFD-моделирования запыленных потоков при модернизации или строительстве газоочистного оборудования, а также CFD-моделирование в динамике вентиляторов сухих градирен на предмет воздействий потоков воздуха на опорные металлоконструкции.

В разделе 3 представлены примеры применения CFD-моделирования для модернизации узлов металлургических печей цинкового производства, а также по влиянию нерасчетных режимов работы печей медного производства на увеличение количества внеплановых остановов основного и вспомогательного оборудования.

В заключительной части описаны перспективы развития прикладных исследований для заводов-изготовителей, энергокомпаний, промышленных предприятий. Прикладные исследования наиболее интересны заводам-изготовителям, разрабатывающим высокотехнологичное оборудование и/или серийные образцы, а также в проектах, имеющих высокие штрафы за недостижение гарантийных показателей. Для энергокомпаний и иных промышленных предприятий (металлургия и пр.) наибольший интерес вызывают задачи, направленные на уменьшение времени простоя оборудования, сроков ремонтов, а также (в редких случаях) улучшение экологических показателей энергетических и технологических объектов, находящихся в черте крупных городов.

**ХИМИЯ И КИНЕТИКА РЕАКЦИЙ ГОРЕНИЯ И ОКИСЛЕНИЯ
АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ****Шмаков А.Г.¹⁾, Коробейничев О.П.¹⁾, Осипова К.Н.^{1,2)}, Князьков Д.А.¹⁾, Дмитриев А.М.¹⁾**¹⁾ Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск, Россия²⁾ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Интерес к альтернативным топливам связан как с проблемой истощения запасов углеводородов, так и с проблемой образования загрязняющих веществ при их сжигании. В настоящее время кислородсодержащие углеводороды (спирты, эфиры, кетоны и др.) рассматриваются как альтернатива углеводородным топливам ввиду того, что они могут производиться из возобновляемых ресурсов. Также некоторые вещества, например, муравьиная кислота, аммиак, рассматриваются как химические носители водорода. Химико-кинетические механизмы окисления этих соединений необходимы для предсказания различных параметров этих топливных систем в широком диапазоне условий. Целью данной работы являлось получение новых экспериментальных данных по структуре пламени оксида пропилена, смесей муравьиной кислоты с водородом, а также окисления смесей муравьиной кислоты с водородом, смесей аммиака с водородом в реакторе струевого перемешивания, в широком диапазоне соотношений топливо/окислитель при атмосферном давлении.

На основе полученных экспериментальных данных по структуре стабилизированных на плоской горелке пламен смесей $C_3H_6O/O_2/Ar$, $HCOOH/H_2/O_2/Ar$ различного стехиометрического состава проведена проверка и анализ имеющихся в литературе химико-кинетических механизмов окисления C_3H_6O и $HCOOH$. Также механизмы окисления $HCOOH$ и NH_3 были протестированы сопоставлением с экспериментальными данными окисления смесей $HCOOH/H_2/O_2/Ar$, $NH_3/H_2/O_2/Ar$ в реакторе струйного перемешивания. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных показало, что большинство механизмов окисления C_3H_6O и $HCOOH$ с хорошей точностью описывают структуру стабилизированных на плоской горелке пламен, в то время как окисление этих топливных смесей в реакторе струйного перемешивания описывается механизмами с различной точностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2020-806 (Контракт № 13.1902.21.0014).

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА
В ПРЯМОТОЧНЫХ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ****Якуш С.Е., Рашковский С.А.**

Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, г. Москва, Россия

Прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердом топливе (ПВРДТТ) обладают рядом эксплуатационных преимуществ по сравнению с аналогичными двигателями на жидком топливе, включая простоту конструкции и высокую степень готовности. Решение задач совершенствования ПВРДТТ, обеспечения устойчивости горения и требуемых характеристик требует развития соответствующих вычислительных моделей, позволяющих описать протекающие при горении взаимосвязанные процессы, включая пиролиз твердого топлива и генерацию газообразного горючего, его смешение с потоком окислителя в канале заряда, собственно процесс турбулентного горения, существующие нелинейные обратные связи.

В докладе рассмотрены вычислительные аспекты построения расчетной модели для численного моделирования горения в канале заряда ПВРДТТ сложной формы. В качестве примера рассмотрена модель турбулентного горения при использовании в качестве топлива ПММА, пиролиз которого приводит к вдуву с поверхности горения мономера ММА, горение которого описывается глобально-кинетической схемой [1]. Для учета геометрии канала заряда, который может включать стабилизатор горения в виде уширения для создания рециркуляционной зоны, используется метод погруженных границ, позволяющий осуществлять расчеты на фиксированной декартовой сетке. Данный метод позволяет эффективно учитывать также изменение формы заряда в процессе выгорания. Приведены примеры численных расчетов, демонстрирующих возможность устойчивого горения и возникновения неустойчивости с периодическим срывом пламени, либо с полным погасанием. Представлены основные положения аналитической теории, описывающей механизм стабилизации горения в канале заряда [2]. Продемонстрирован процесс неравномерного выгорания заряда, в котором локальная скорость регрессии переменна по длине и зависит от характеристик течения горячего газа и соответствующих тепловых потоков.

В качестве одного из способов повышения скорости регрессии в последнее время активно рассматриваются легкоплавкие топлива, на поверхности которых возникает жидкий слой, с которого в поток срываются капли расплава. Приведены примеры численных расчетов плавления парафина при обтекании потоком горячего, проведенных методом VOF (Volume-of-Fluid). Исследовано влияние температурной зависимости вязкости расплава на интегральную и локальную скорость регрессии, продемонстрирован периодический срыв расплава в поток при возникновении волн в жидком слое [3].

В заключение сформулированы наиболее актуальные вопросы численного моделирования горения в ПВРДТТ, включая необходимость более детального учета явлений на поверхности, в особенности для легкоплавких композиций, а также моделирования сверхзвуковых внутренних течений в канале заряда и процессов горения топлива на основе детальных кинетических схем.

Список литературы

1. Bedir H., T'ien J.S. A computational study of flame radiation in PMMA diffusion flames including fuel vapor participation // 27th Symp. Combust. – The Combustion Inst. – Pittsburgh PA, 1998. – P. 2821–2828.
2. Рашковский С.А., Милехин Ю.М., Федорычев А.В., Якуш С.Е. Механизм стабилизации горения в канале заряда твердого топлива в прямоточном воздушно-реактивном двигателе // Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах. – 2020. – Т. 490, № 1. – С. 51–56.
3. Rashkovskiy S.A., Yakush S.E. Numerical simulation of low-melting temperature solid fuel regression in hybrid rocket engines // Acta Astronautica. – 2020. – Vol. 176. – P. 710–716.

ДОКЛАДЫ

ПОЛУНАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ НА АТМОСФЕРУ

Агафонцев М.В.^{1,2)}, Касымов Д.П.^{1,2)}, Лобода Е.Л.^{1,2)}, Рейно В.В.²⁾, Луценко А.В.^{1,2)},
Перминов В.В.¹⁾, Орлов К.Е.¹⁾, Мартынов П.С.^{1,2)}, Старосельцева А.А.¹⁾, Лобода Ю.А.^{1,2)}

¹⁾ Томский государственный университет, г. Томск, Россия

²⁾ Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск, Россия

Природные пожары на лесных и лесостепных территориях происходят ежегодно во всем мире. Их возникновение зачастую является следствием хозяйственной деятельности человека или природных явлений (грозы, сухие грозы). Крупные природные пожары способны привести к чрезвычайным ситуациям и даже к катастрофическим последствиям не только для биогеоценозов, но и для человека. Для предупреждения катастрофических сценариев развития пожаров огромное значение имеет их раннее обнаружение, которое у удаленных районах крайне затруднено. Очевидно, что продукты горения при природных пожарах попадают в атмосферу, оказывают влияние на атмосферные процессы, ее характеристики и способны переноситься на значительные расстояния от места пожара. Представляет интерес использовать этот факт в целях раннего обнаружения очагов природных пожаров (лесных, степных и торфяных).

Моделирование природных пожаров осуществлялось на территории Базового экспериментального комплекса (БЭК) Института оптики атмосферы СО РАН. Измерение термодинамических характеристик в пламени производилось с применением методов ИК термографии, а оценка характеристик турбулентности – по методике [1]. Для регистрации метеопараметров и оценки флуктуаций показателя преломления применялись метеостанции АМК-03. Анализ газового и аэрозольного составов атмосферы производился с применением мобильных измерительных комплексов [2], а параметры турбулентности в конвективной колонке над зоной горения регистрировались при помощи пассивной системы оптического мониторинга [3].

Оценка масштабов турбулентности в пламени фронта пожара показала, что в нем преобладают масштабы $b=20-80$ см. Анализ турбулентности атмосферы в конвективной колонке над очагом горения с применением пассивного оптического метода и при помощи измерений флуктуации скорости звука показал, что структурная характеристика показателя преломления C_n^2 многократно возрастает от фоновых значений во время проведения эксперимента, что является следствием тепловыделения в зоне горения и диссипации турбулентных структур в пламени.

При проведении экспериментов зарегистрирован рост температуры воздуха, от 2 до 5 градусов, рост горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра.

Установлено, что в результате горения растительных горючих материалов при проведении эксперимента на 2 порядка от фоновых значений возрастает концентрация в воздухе NO_2 , NO , SO_2 , в 20 раз увеличивается концентрация CO . Также зарегистрирован рост концентрации метана, который вызван тем, что не весь образовавшийся в зоне пиролиза метан успевает вступить в химическую реакцию во фронте пожара. Рост концентрации CO_2 вполне ожидаем и является одним из характерных признаков природного пожара.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-71-10068).

Список литературы

1. Loboda E.L., Matvienko O.V., Vavilov V.P., Reyno V.V. Infrared thermographic evaluation of flame turbulence scale // Infrared physics and technology. 2015. Vol. 72. P. 1–7.
2. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Покровский Е.В., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Посты для мониторинга парниковых и окисляющих атмосферу газов // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 1. С. 53–61.
3. Afanasiev A.L., Banakh V.A., Marakasov D.A. Passive Optical Monitoring of Wind Conditions and Indication of Aircraft Wakes Near Airport Runways // Atmospheric and Oceanic Optics, 2019, Vol. 32, No. 5, pp. 506–510.

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОГО ЗАЖИГАНИЯ МИКРОЧАСТИЦ УГЛЕЙ

Адуев Б.П.¹⁾, Нурмухаметов Д.Р.¹⁾, Крафт Я.В.¹⁾, Исмагилов З.Р.^{1,2)}

¹⁾ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

²⁾ Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН», г. Новосибирск, Россия

В наших предыдущих работах [1–4] установлено, что при зажигании частиц углей размером $d \leq 63$ мкм лазерными импульсами ($\tau=120$ мкс, $\lambda=1064$ нм) в ряду метаморфизма от бурого до антрацита можно выделить три стадии зажигания, для которых характерны определенные плотности энергии лазерного излучения (пороги зажигания) $H_{cr}^{(1)}$, $H_{cr}^{(2)}$ и $H_{cr}^{(3)}$.

Первая стадия зажигания наблюдается при плотности энергии лазерного излучения $H_{cr}^{(1)}$, при которой свечение образца можно зарегистрировать электронными приборами. При этом над образцами наблюдается пламя высотой ~ 1 мм. Продолжительность первой стадии зажигания совпадает с длительностью импульса лазера в режиме свободной генерации и повторяет его пиковую структуру. Установлено, что при воздействии с плотностью энергии $H_{cr}^{(1)}$ на поверхности частиц углей зажигаются реакционно-активные микровыступы с размерами ≥ 1 мкм.

На второй стадии зажигания плотность энергии лазерного излучения $H_{cr}^{(2)}$ достаточна для нагрева поверхности частиц углей до температуры, при которой уже во время лазерного импульса начинается выход и зажигание летучих веществ (CO , H_2 , H_2O , CO_2), углеродных частиц или смол. Во временном интервале ~ 1 мс после воздействия лазерного импульса в результате развития термохимических реакций в частицах углей наблюдается выход тех же продуктов, что и во время воздействия лазерного импульса. Над образцами углей наблюдается пламя высотой 3–4 мм.

При достижении плотности энергии лазерного излучения значения $H_{cr}^{(3)}$ в образцах углей начинается третья стадия зажигания, которая включает вторую стадию зажигания. Появляется дополнительный механизм термохимических реакций, который дает вклад в пламя во временном интервале до 10 мс. При этом над образцами наблюдается пламя высотой 3–4 см. Спектры свечения пламен на третьей стадии зажигания описываются формулой Планка, т.е. свечение связано с горящими углеродными частицами.

В теоретических работах [5] показано, что алифатическая часть макромолекулы угля разрушается при более низких температурах, чем ароматическая часть. В связи с этим мы предполагаем, что на второй стадии зажигания происходит инициирование термохимических реакций в алифатической части макромолекулы угля. На третьей стадии зажигания плотность энергии лазерного излучения достаточна для инициирования термохимических реакций в ароматической части макромолекулы угля. Эта модель поддерживается наблюдаемыми спектрами свечения на третьей стадии зажигания.

Список литературы

1. Aduев B.П., Kraft Y.V., Nurmukhametov D.R., Ismagilov Z.R. Ignition of different grades of coal by laser pulses in the free-running mode // *Chemistry for Sustainable Development*. – 2019. – Vol. 27, No. 6. – P. 549–555.
2. Aduев B.П., Nurmukhametov D.R., Kraft Y.V., Ismagilov Z.R. Ignition of different metamorphic grade coals by free-running laser pulses // *Optics and Spectroscopy*. – 2020. – Vol. 128, No. 3. – P. 429–435.
3. Aduев B.П., Nurmukhametov D.R., Kraft Y.V., Ismagilov Z.R. The ignition energy characteristics and glow kinetics of the flames of dispersed coal particles of different ranks under the action of laser pulses // *Chemistry for Sustainable Development*. – 2020. – Vol. 28, No. 6. – P. 535–543.
4. Aduев B.П., Nurmukhametov D.R., Kraft Y.V., Ismagilov Z.R. Glow spectral characteristics of the hard coal particles surface during the action of laser pulses in the free generation mode // *Optics and Spectroscopy*. – 2020. – Vol. 128, No. 12. – P. 2008–2014.
5. Niksa S., Kerstein A.R. The distributed-energy chain model for rapid coal devolatilization kinetics. Part I: Formulation // *Combustion and Flame*. – 1986. – Vol. 66, No. 2. – P. 95–109.

КОМПЛЕКСНЫЕ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С КОММУНАЛЬНЫМИ И ПРОМЫШЛЕННЫМИ ОТХОДАМИ

Алексеев С.В., Перепечко Л.Н.

Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В Стратегии научно-технологического развития России обозначены следующие вызовы для общества, государства и науки, которые требуют безотлагательного решения: исчерпание возможностей экономического роста, основанного на экстенсивной эксплуатации сырьевых ресурсов; возрастание антропогенных нагрузок на окружающую среду, риски для жизни и здоровья граждан. Опросы показывают, что отходы, наряду с глобальным потеплением и нехваткой чистой воды, вызывают наибольшие опасения у населения и специалистов. Всего в мире образуется около 25 млрд тонн отходов в год [1].

Институт теплофизики СО РАН в 2020 году выступил инициатором и координатором предложения на разработку комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла (КНТП) по теме «Комплексные системы обращения с коммунальными и промышленными отходами» [2]. Комплексная программа включает в себя 5 технологических направлений и 13 проектов, они перечислены ниже.

4. Цифровые технологии: интеллектуальное (цифровое) управление комплексными системами обращения с отходами и технологическими процессами переработки отходов (цифровые платформы): автоматическая сортировка ТКО на основе нейронных сетей.
5. Термическая переработка ТКО и других органических отходов: плазменная газификация; пиролиз с твердым теплоносителем для получения электроэнергии, тепла и полезных продуктов из отходов лесопромышленного и с/х комплексов; сжигание и газификация топлив в циркулирующем кипящем слое для переработки отходов добычи и обогащения углей; совместное сжигание органосодержащих отходов с ископаемыми топливами; энергетическая утилизация ТКО; технология низкоэмиссионного сжигания жидких горючих отходов.
6. Технологии сушки, измельчения и классификации твердых коммунальных и промышленных отходов: производство RDF из органической части ТКО; комплексная переработка отвалов рудообогатительных фабрик.
7. Каталитические и биотехнологии: каталитическое окисление иловых осадков коммунальных и промышленных очистных сооружений; использование микроорганизмов для переработки твердых коммунальных отходов.
8. Модульные энерготехнологические комплексы: технологии рекультивации полигонов твердых коммунальных отходов с производством строительных материалов и вторсырья; модульные комплексы для электроснабжения установок по переработке ТКО за счет сжигания низкокалорийного топливного газа собственного производства

В результате будут разработаны перспективные отечественные технологии полного инновационного цикла по переработке и утилизации твердых и жидких коммунальных и промышленных отходов и рекультивации полигонов ТКО; осуществлено максимальное вовлечение отходов во вторичное использование или безопасное разложение; полный отказ от захоронения отходов на полигонах; рекультивация земель под полигонами; импортозамещение технологий по переработке и утилизации ТКО.

Список литературы

1. Алексеев С.В. Преобразование отходов в энергию. Десять прорывных идей в энергетике на следующие десять лет. Ассоциация по развитию международных исследований и проектов в области энергетики «Глобальная энергия», 2020 г., [Электронный ресурс] <https://globadenergyprize.org/ru/10-proryvnyh-idej-v-energetike-na-sledujushhie-10-let/>
2. Сайт КНТП <https://kntp.ntr.ru/landing#instructions>

УДК

**ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМПЛЕКС РФЯЦ-ВНИИТФ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЙ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ОПАСНЫМ ФАКТОРАМ
ИСТЕЧЕНИЯ, ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ
ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ**

**Аникин Н.Б., Безгодков Е.В., Давлетчин Ю.Ф., Мошкин Д.Л., Никифоров М.В.,
Пасюков С.Д., Попов И.А., Тараканов А.А., Тяктев А.А., Уфимцев Ю.С.,
Ушков А.В., Фролов Д.В., Симоненко В.А.**

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск
E-mail: e.v.bezgodov@vniitf.ru, v.a.simonenko@vniitf.ru

Для валидации коммерческих и научных программных средств, предназначенных для обоснования водородной безопасности при проектировании объектов водородной энергетики, а также для формирования корреляций и зависимостей в качестве исходных данных для разработки нормативных документов в области использования водородной энергии в РФЯЦ-ВНИИТФ создается исследовательский комплекс. В настоящее время в состав комплекса входит семь установок и стендов, к 2023 году планируется ввести в эксплуатацию еще пять.

В стендах и установках, расположенных как в открытом пространстве, так и в утепленных ангарах, проводятся экспериментальные исследования по изучению:

- распространения струйных истечений и пожаров-струй водородосодержащих газовых смесей (ВГС), истекающих из сосудов высокого давления до 700 атм;
- формирования взрывоопасных облаков и критических условий для воспламенения ВГС в ограниченных пространствах в условиях работы естественной и принудительной вентиляции;
- концентрационных пределов ускоренных пламен ВГС и условий распространения пламен вверх и вниз, в том числе в узких каналах;
- проливов криогенного водорода на водную и твердую поверхности;
- характеристик горения однородных и стратифицированных ВГС;
- параметров распространения пламени при переходе между объемами и проверки масштабных эффектов.

В докладе приведено описание исследовательских установок, средств измерения и регистрации, технологического оборудования, входящих в их состав, а также приведен краткий обзор результатов измерений, полученных в экспериментах.

МИКРОВЗРЫВНАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ КАПЕЛЬ В УСЛОВИЯХ БЛИЗКИХ К ТОПЛИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

Антонов Д.В., Стрижак П.А.

Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Под микровзрывной фрагментацией принято понимать кратковременный распад родительской многокомпонентной капли, вызванный взрывным кипением внутренних водяных капель, при котором происходит образование мелких вторичных фрагментов размерами от нескольких десятков до сотен микрометров [1, 2]. Наиболее типичными компонентами в известных работах [3] являются: вода в качестве химически инертного компонента; дизельное топливо, керосин, биодизель в качестве горючих компонентов.

Для приближения к реальным условиям топливных технологий важным является переход от подвешенных капель топливных эмульсий к свободно падающим в разогретом воздухе [3]. Эксперименты по регистрации процессов микровзрывной фрагментации топливных эмульсий в свободном падении при высокотемпературном нагреве проведены с использованием экспериментального стенда, представленного в [3]. Изучены времена задержки зажигания многокомпонентных и однородных капель топлив в зависимости от температуры греющей среды (рис. 1).

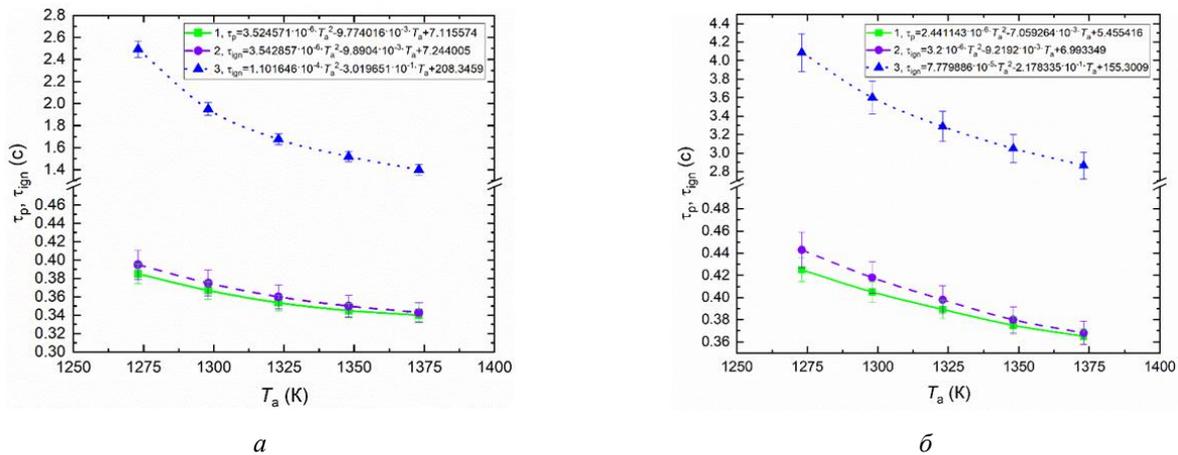


Рис. 1. Сравнение времени задержки микро-взрывного распада (1) и времени задержки зажигания (2) вода/горючая жидкость (объемная концентрация воды 10%) и однородных капель горючей жидкости (3) ($R_{d0} \approx 0.842$ мм): а – на основе Дизельного топлива; б – на основе рапсового масла.

Достаточно хорошо видно, что микро-взрывной распад существенно интенсифицирует зажигание вследствие кратного уменьшения размеров фрагментов. При этом особенно заметным становится, что даже небольшая доля вводимого низкокипящего компонента (воды) способствует существенной интенсификации микровзрывного распада и зажигания, несмотря на рост количества энергии, расходуемой на эндотермические фазовые превращения.

Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП-447.2021.1).

Список литературы

1. Ithnin A.M., Noge H., Kadir H.A., Jazair W. An overview of utilizing water-in-diesel emulsion fuel in diesel engine and its potential research study // J. Energy Inst. – 2014. – V. 87. – P. 273–288.
2. Sazhin S.S., Bar-Kohany T., Nissar Z., Antonov D.V., Strizhak P.A., Rybdylova O. A new approach to modelling micro-explosions in composite droplets // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2020. – V. 161. 120238.
3. Antonov D.V., Kuzhetsov G.V., Strizhak P.A., Rybdylova O., Sazhin S.S. Micro-explosion and autoignition of composite fuel/water droplets // Combust. Flame. – 2019. – V. 210. – P. 479–489.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕНИЯ ГЕПТАНА В ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТРУЕ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА

Ануфриев И.С., Копьев Е.П., Садкин И.С., Мухина М.А.

Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В работе экспериментально исследованы характеристики горения гептана в присутствии перегретого водяного пара. Определена полнота сгорания гептана в условиях паровой газификации и измерен газовый состав равновесных продуктов сгорания, охлажденных до комнатной температуры, а также температура и газовый состав по фронту пламени. Показано, что присутствие перегретого водяного пара обеспечивает высокую полноту сгорания и снижает выбросы оксидов азота в сравнении с воздушным сжиганием, а организация сжигания жидкого топлива в высокоскоростной струе пара обеспечивает эффективное диспергирование и горение топлива при отсутствии форсунок и завихрителей.

Гептан, благодаря однородному составу (химическая формула: C_7H_{16}), позволяет выявить базовые зависимости показателей горения углеводородов от соотношения топливо-пар. Выявленные зависимости служат базой для развития теоретических основ применительно к топливам с более сложным составом.

Данная работа является частью цикла исследований по сжиганию жидких углеводородов в высокоскоростной струе перегретого водяного пара [1,2], направленного на создание научно-экспериментальной базы для создания энергоэффективного и экологически безопасного способа сжигания жидких углеводородных топлив (в том числе, некондиционных, загрязненных и низкокачественных жидких топлив).

Список литературы

1. Anufriev I.S., Kopyev E.P. Diesel fuel combustion by spraying in a superheated steam jet // Fuel Process. Technol.– Elsevier B.V., 2019.– Vol. 192.– P. 154–169.
2. Копьев Е.П., Ануфриев И.С., Шадрин Е.У., Лобода Е.Л., Агафонцев М. В., Мухина М.А. Studying the diesel flame structure in superheated water vapor jets by using IR thermography // Infrared Phys. Technol.– 2019.– Vol. 102.– P. 103028.

ПЛАЗМЕННО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Аньшаков А.С.²⁾, Алтферов А.И.¹⁾, Домаров П.В.²⁾, Фалеев В.А.²⁾

¹⁾ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

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

Исследование газификации органических отходов (ОО) связано с необходимостью решения экологических задач: сделать безопасными токсичные органические соединения путем их разложения на простые компоненты. Исследование направлено на разработку энергоэффективной и экологически чистой технологии полного уничтожения органических, в том числе, медицинских отходов, в частности, медицинских масок. В настоящее время во всем мире остро стоит задача утилизации и обезвреживания медико-биологических материалов, количество которых год от года увеличивается. В последнее время это связано с COVID-19 и массовым использованием одноразовых медицинских материалов – масок, халатов и т.д. Медицинские маски, халаты и респираторы изготавливаются из нетканых синтетических материалов (спанбонда). В качестве такого материала обычно используется мелтблаун, состоящий из полипропиленовых волокон. Такие материалы при неправильной утилизации будут разлагаться очень долго. Одним из эффективных путей решения этой проблемы является уничтожение отходов в электроплазменных печах.

Актуальность исследования связана с необходимостью уничтожения медицинских отходов в период пандемии коронавируса. В среднем в Новосибирской области образуется в год около 2,5 тыс. т медицинских отходов. По результатам собственных исследований, утилизация медицинских отходов, в основном, с помощью сжигания, или захоронения.

Соответствие экологических показателей технологического процесса мировым стандартам в предлагаемой работе достигаются высоким уровнем температур в реакционной зоне (выше 1300°C) и быстрой закалкой продуктов переработки, исключая появление вредных веществ (диоксинов или фуранов). Отходящие газы очищают с использованием вихревого скруббера, шлак остекловывают.

Данная технология безотходная. На выходе получают синтез-газ, пригодный в качестве дополнительного источника нагрева в камере печи, и инертный шлак, который может быть депонирован на полигоны 1-й категории (для инертных материалов).

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований плазменно-термической газификации ОО и их органической составляющей. Проведены исследования газификации при различных температурных режимах и выявлен оптимальный процесс газификации органических отходов.

Исследуемая плазменная технология для высокотемпературной утилизации органических, в том числе, медицинских материалов, является наилучшей альтернативой традиционно используемому огневому сжиганию по своим экологическим и экономическим показателям.

Работа выполнена в рамках гос. задания рег. № 121031800229-1.

Список литературы

1. Aliferov A I, Anshakov A S, Sinicin V A, Domarov P V, Danilenko A A // Journal of Phys.: Conf. Series. – 2016. – 754. 112002.
2. С.В. Алексеенко, А.С. Аньшаков, П.В. Домаров, В.А. Фалеев. Экспериментальная плазменная установка для газификации органических отходов с дискретной подачей их в газификатор // Теплофизика и аэромеханика. – 2019. – Т. 26, № 6. – С. 991 – 995.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ВЭМ ПРИ СБРОСЕ ДАВЛЕНИЯ

Архипов В. А., Басалаев С.А., Порязов В.А.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

При проектировании двигательных устройств на твердом топливе неизбежно возникает круг вопросов, связанных с расчетом нестационарных характеристик горения в переходных режимах. В частности, определение нестационарной скорости горения высокоэнергетических материалов (ВЭМ) при быстром изменении давления. Проблема измерения нестационарной скорости горения ВЭМ с высоким временным и пространственным разрешением до сих пор остается актуальной, несмотря на значительное количество предлагаемых методов [1, 2]. В настоящее время все большее внимание привлекают косвенные методы измерения нестационарной скорости, основанные на постановке и решении обратных задач внутренней баллистики [3].

В настоящей работе представлены методика и результаты, экспериментального исследования нестационарной скорости горения ВЭМ $u(t)$ при сбросе давления (скорость сброса порядка 115 МПа/с) для ВЭМ включающих энергетические добавки в виде порошков металлов (нанопорошок алюминия марки Alex, порошки алюминия марок АСД-4 и АСД-6, диборида алюминия и додекаборида алюминия). Для определения нестационарной скорости горения использовался метод, основанный на постановке и решении обратной задачи внутренней баллистики (ОЗВБ-метод). Экспериментальные исследования проводились на установке, схема которой представлена на рис. 1.

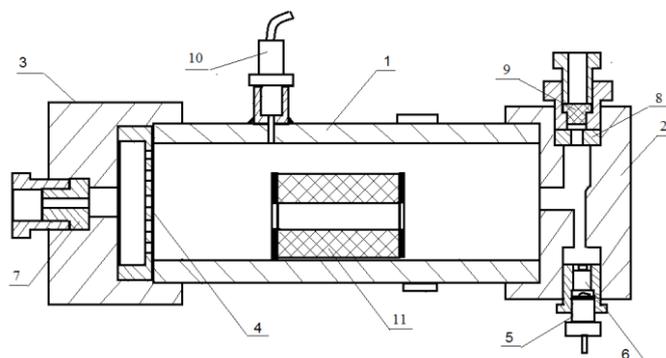


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 – камера сгорания; 2 – передняя крышка; 3 – задняя крышка; 4 – диафрагма; 5 – электрокапсюльный инициатор; 6 – воспламенитель; 7 – основное сопло; 8 – дополнительное сопло; 9 – сгорающая пробка; 10 – датчик давления; 11 – заряд исследуемого ВЭМ.

Анализ полученных результатов по нестационарной скорости горения выбранных композиций ВЭМ показал, что в период переходного процесса горения при скорости сброса давления 115 МПа/с зависимость $u(t)$ носит колебательный характер при этом отклонение $u(t)$ от квазистационарного горения может достигать 32% в зависимости от состава ВЭМ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10054).

Список литературы

1. Merkle C.L., Turk S.L., Summerfield M. Extinguishment of solid propellants by depressurization: Effect of propellant parameters // AIAA Paper. – 1969. – N 176. – P. 1–19.
2. Маршаков В. Н. Анализ повторного воспламенения пороха после спада давления с позиции очагово-пульсирующего механизма горения // Физика горения и взрыва. – 1991. – Т. 27, № 1. – С. 12–18.
3. Архипов В.А., Бондарчук С.С., Коротких А.Г. Сравнительный анализ методов измерения нестационарной скорости горения. II. Результаты исследования // Физика горения и взрыва. – 2010. – Т. 46, № 5. – С. 88–96.

РОЛЬ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СТРУКТУР В ПРОЦЕССЕ ГОРЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Бабук В.А., Будный Н.Л., Низяев А.А.

Балтийский государственный технический университет
«Военмех» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

Высокоэнергетические конденсированные системы (ВКС) представляют собой объекты, состоящие из отверженного полимера и дисперсных компонентов: окислителя и металлического горючего, как правило, алюминия. Основными проявлениями процесса горения ВКС являются формирование конденсированных продуктов горения, поставляемых в газовую фазу, и закон скорости горения.

Результаты экспериментальных работ позволили сделать вывод, что при горении ВКС возможно образование в поверхностном слое специфической структуры, которая получила название каркасного слоя (КС) [1]. Каркасный слой – это газопроницаемая объемная структура, состоящая из углеродистых элементов, металла и его оксида. Эту структуру можно рассматривать как промежуточную в процессе превращения конденсированной фазы в газовую. Свойства КС, а также возможность его образования зависят от условий горения и рецептурных факторов [2].

Осуществлено моделирование основных проявлений процесса горения применительно к ситуациям наличия и отсутствия КС.

I. Отсутствие КС

В данной ситуации агломерация металлического горючего не происходит, имеет место сгорание неагломерирующего металла в непосредственной близости от поверхности горящей ВКС. Разработано описание ряда явлений, составляющих этот процесс: воспламенение, гетерогенное и парофазное горение, фрагментация, формирование конденсированных продуктов сгорания.

Проведенный анализ позволил оценить явления в газовой фазе, определяющие подвод тепла к конденсированной фазе ВКС, и сделать вывод об определяющем влиянии кинетических факторов на интенсивность этого процесса.

II. Наличие КС

Присутствие каркасного слоя обеспечивает реализацию процесса агломерации, горение металла осуществляется как в пределах КС, так и на его поверхности. Создано описание процесса горения агломерирующего металла, обеспечивающего определение структуры и химического состава агломератов, а также дисперсности образующихся частиц высокодисперсного оксида.

Показана значительная роль диффузионных явлений, имеющих место в области, в которой происходит образование КС.

Результаты выполненной работы позволяют определить роль каркасного слоя в процессе горения ВКС и осуществить оценку в зависимости от характеристик этой структуры закона скорости горения и параметров конденсированных продуктов горения.

Список литературы

1. Babuk, V.A., Vasilyev, V.A., and Sviridov, V.V. «Formation of Condensed Combustion Products at the Burning Surface of Solid Rocket Propellant,» In: «Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics», ed. by V. Yang, T. B. Brill, and W. Z. Ren, Vol. 185, Progress in Astronautics and Aeronautics, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000, Chapter 2.21, pp. 749–776.
2. Бабук В.А. Свойства поверхностного слоя и закономерности горения металлизированных твердых топлив // Физика горения и взрыва. Т. 45, 2009, № 4, с. 156–165.

РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ СЛОЕВ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ НА ПОДЛОЖКЕ С КИСЛОРОДОМ И ПЕРХЛОРАТОМ НАТРИЯ

Баранышин Е.А., Кривошеев П.Н., Миронов В.Н., Пенязков О.Г.

Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

В последние годы к энергоемким горючим все чаще причисляют пористый кремний (pSi) – наноструктурированный материал, образующийся в ходе электрохимической обработки монокристалла плавиковой кислотой. При этом происходит формирование наноразмерных каналов, объем которых может достигать 75–80% исходного кристалла, а поверхность – 900 м²/г. Повышенное количество приповерхностных атомов приводит к снижению энергии активации гетерогенных реакций окисления, что обуславливает экстраординарную химическую активность пористого кремния [1]. Однако, только увеличенной межфазной поверхностью невозможно объяснить высокие скорости горения твердофазных композитов на основе pSi (так, в составах pSi-NaClO₄·H₂O они превышают 2 км/с [2]). При таких скоростях разобраться в закономерностях явления достаточно сложно, поэтому первоначально исследовались системы pSi-O₂, с давлением кислорода P до 33 бар, в которых горение происходило на три порядка медленнее. Анализ режимов горения и РЭМ-диагностика образцов после процесса, показали, что слой наноструктурированного кремния является, по сути, блоком плотно упакованных элементов твердотельного горючего (слоистой или иной структуры), который при $P \geq 15$ бар и подводе незначительного импульса энергии переводится за счет развития разрушающих структуру механических деформаций во взвешенное состояние с многократным увеличением поверхности и скачкообразным возрастанием массовой скорости горения. Такое поведение pSi обусловлено тем, что с одной стороны, он сохраняет первоначальную кристалличность, с другой – утончение стенок между соседствующими порами при формировании пористого слоя приводит к повышенной хрупкости кристаллического скелета. Поэтому импульсные термические напряжения, возникающие в процессе фронтального горения, распространяются по кристаллической структуре с низкими прочностными характеристиками и в случае локального превышения предела прочности при деформации пористого скелета дальнейшее его разрушение может развиваться лавинообразно, с разрывом упругих связей наноструктуры, сопровождающимся передачей импульса ее микрофрагментам, окисляющимся затем при аэрозольном горении.

В твердофазных композитах при инициировании горения происходит интенсивное образование в пористом слое газофазных продуктов разложения перхлората натрия (в основном O₂). Повышенное давление в порах и быстрое, в силу большой межфазной поверхности, окисление приповерхностных атомов Si приводят из-за хрупкости скелета к образованию и росту трещин и разрушению его микроструктуры (заметную роль при этом играет превышение мольного объема кристаллов SiO₂ над объемом кристаллов Si), при этом догорание фрагментов pSi происходит в газовой фазе, аналогично случаю систем pSi-O₂. При значительном энерговыделении в зоне реакции в монокристаллической подложке формируется волна сжатия, распространяющаяся вдоль образца со скоростью 8400 м/с, интенсивность которой по мере поступления в подложку энергии возрастает. Возможен сценарий, при котором суперпозиция возмущений в подложке может привести в области их пучности к локальному нарушению целостности пористого слоя и его самовоспламенению, т.е. к образованию многократно зарегистрированных предвестников – очагов горения перед фронтом физико-химического превращения композитов.

Список литературы

1. Spitzer D. Energetic nano-materials: Opportunities for enhanced performances // J. Phys. Chem. Solids. – 2010. – V. 71. – P. 100–108.
2. Golomako E.S., Krivosheyev P.N., Mironov V.N., Penyazkov O.G. Mechanisms of silicon combustion in the pSi-O₂ and pSi-NaClO₄·H₂O systems // Proc. of 27th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Beijing, China. 2019. 8 p.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ГРАФИТА В ВОДЯНОМ ПАРЕ

Барбин Н.М.¹⁾, Кобелев А.М.¹⁾, Терентьев Д.И.¹⁾, Алексеев С.Г.²⁾, Титов С.А.¹⁾

¹⁾ Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Россия

²⁾ Уральский научно-исследовательский институт ВДПО, г. Екатеринбург, Россия

Углерод в виде графита применяется в ядерных реакторах в качестве конструкционного материала и замедлителя нейтронов. Выбор графита для уран-графитовых реакторов обусловлен его высокой температурой плавления, хорошей механической прочностью, легкостью механической обработки, теплостойкостью, сравнительно низкой стоимостью [1–2].

В процессе эксплуатации реактора под действием нейтронного облучения в графитовой кладке активируются примеси, присутствующие в графите (доминирующие нуклиды – тритий, углерод-14, кобальт-60). Загрязнение графита ядерными материалами и продуктами деления происходит при инцидентах с просыпаниями топлива. Радиоактивность облученного графита также вызвана загрязнением поверхностей графитовых изделий продуктами активации продувочного газа [3].

В настоящее время в мире насчитывается 124 уран-графитовых реактора, общее количество накопленного облученного реакторного графита составляет около 260 тыс. тонн [4].

Целью работы является определение состава конденсированной и газовой фазы при горении радиоактивного графита в водяном паре. Задача работы состоит в проведении термодинамического моделирования горения радиоактивного графита в водяном паре в интервале температур от 423 до 2173 К.

Термодинамическое моделирование горения радиоактивного графита в водяном паре проведено в программном комплексе TERRA [5].

В таблице 1 представлены результаты термодинамического моделирования горения радиоактивного графита в водяном паре в интервале температур от 423 до 923 К.

Таблица 1. Распределение мольных долей соединений углерода в интервале температур от 423 до 923 К.

Температура, К	Соединения углерода, мол%			
	C(конд.)	CH ₄	CO	CO ₂
423	42,73195348	28,50926122	0,000507552	28,75818578
523	26,56088223	35,82608504	0,027073506	37,58583048
623	16,75184303	37,89606912	0,464255926	44,88762676
723	11,04002651	33,53187884	4,024488971	51,40332474
823	4,364684764	22,67032482	19,68423846	53,2804847
923	4,8045·10 ⁻³⁰	8,90561128	44,41912494	46,67510765

Список литературы

1. Клименков В.И. Поведение графита в кладках ядерных реакторов // Атомная энергия. – 1961. – Т. 10, № 5. – С. 447–460.
2. Гончаров В.В. Графит в реакторостроении // Атомная энергия. – 1957. – Т. 3, № 11. – С. 398–408.
3. Кондиционирование реакторного графита выводимых из эксплуатации уран-графитовых реакторов для целей захоронения. Российское атомное общество: URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2016/06/08/66585> (дата обращения 01.05.2021).
4. Проблемы обращения с облученным графитом при выводе из эксплуатации УГР. PРо Атом: URL: www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=9428 (дата обращения 01.05.2021).
5. Barbin N. M., Kobelev A. M., Terent'ev D. I., Alekseev S. G. Thermodynamic modeling of thermal processes involving chlorine, calcium, beryllium, nickel, and cesium radionuclides in the course of heating radioactive graphite in steam // Radiochemistry. – 2019. – Vol. 61, № 2 – PP. 192–197.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССОВ МИКРОВЗРЫВНОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ ГЕЛЕОБРАЗНЫХ ТОПЛИВ ПРИ ЗАЖИГАНИИ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

Беляев С.В., Глушков Д.О., Плешко А.О.

Национальный исследовательский томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Группа составов гелеобразного топлива приготовлена на основе маслonaполненных криогелей без добавления и с добавлением твердых мелкодисперсных горючих компонентов [1]. В качестве органического полимерного загустителя использован поливиниловый спирт (ПВС), концентрация которого в водном растворе составляла 10% мас. Частицы топлив (50% масло + 48% водный раствор ПВС + 2% эмульгатор; 35% масло + 30% угольная пыль + 33% водный раствор ПВС + 2% эмульгатор) массой 10 мг при нагревании в диапазоне температур 700–1000°C неподвижной воздушной среды воспламеняются в условиях микровзрывного диспергирования. В отличие от жидких однокомпонентных топлив инициирование горения происходит не в малой окрестности капли расплава, а в достаточно большой по размерам области [1], что оказывает положительный эффект на развитие последующего горения топлива и интенсификацию выгорания компонентов. Отличие механизмов зажигания исследованных гелеобразных топлив состоит в том, что в результате схлопывания пузырьков и диспергирования капли расплава второго топливного состава в высокотемпературную среду окислителя, вдуваются пары горючей жидкости и частицы угля, которые пропитаны этой жидкостью. Поэтому газофазное зажигание гелеобразного топлива, содержащего мелкодисперсные твердые частицы, происходит более интенсивно и достаточно равномерно в большой по размерам области [1].

При варьировании температуры разогретого воздуха в диапазоне 700–1000°C установлены скорости движения и размеры области выгорания мелкодисперсных фрагментов и парогазовой смеси после микровзрывного диспергирования капель расплавов топлив. В таких условиях для топливного состава без твердых включений средние скорости движения мелкодисперсных частиц после микровзрывного диспергирования и объемы области выгорания изменяются от 1,1 до 2,2 м/с (на 90–100%) и от 0,7 до 8,0 см³ (более чем в 11 раз). Для топливного состава с твердыми включениями аналогичные характеристики изменяются от 1,6 до 2,5 м/с (на 45–55%) и от 1,5 до 13,5 см³ (до 9 раз) в условиях микровзрывного диспергирования капель расплава гелеобразного топлива размеры области выгорания (диаметр около 15–25 мм) в 5–9 раз превышают начальные размеры частицы топлива (диаметр 2,8 мм). При этом мощность энерговыделения составляет около 190 Вт в объеме около 8 см³ при выгорании 10 мг гелеобразного топлива (против около 25 Вт в объеме около 1 см³ при более длительном по времени горении капли жидкого однокомпонентного топлива).

Впервые в рамках метода двухцветной пирометрии, реализованного с применением программно-аппаратного комплекса, состоящего из высокоскоростной видеокамеры, светодиодных прожекторов, ноутбука с коммерческим и оригинальным ПО, установлены температурные тренды пламени при горении одиночных частиц гелеобразных топлив. Вид этих трендов достаточно хорошо соответствует установленным механизмам зажигания и горения разных топливных составов, что обосновывает применимость метода бесконтактной регистрации температуры для изучения процессов горения перспективных высокоэнергетических материалов.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
№ 18-13-00031, <https://rscf.ru/project/18-13-00031>.*

Список литературы

1. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Nigay A.G., Yanovsky V.A., Yashutina, O.S. Ignition mechanism and characteristics of gel fuels based on oil-free and oil-filled cryogels with fine coal particles // Powder Technol. – 2020. – V. 360. – P. 65–79.

СОВМЕСТНОЕ СЖИГАНИЕ ПИРОЛИЗНОГО ГАЗА И СЛАНЦА НА КОТЛЕ ТП-101**Берсенева К.Г.¹⁾, Сидоркин В.Т.¹⁾, Тугов А.Н.²⁾, Мошников А.Н.³⁾, Верещетин В.А.²⁾**¹⁾ ENTEN Engineering AS, г. Кохтла-Ярве, Эстония²⁾ ОАО «ВТИ», г. Москва, Россия³⁾ ENEFIT Power, г. Нарва, Эстония

Необходимость решения задачи по совместному сжиганию газа и сланца была обусловлена особенностями производственного комплекса на Эстонской электростанции, который включает энергетические блоки по 200 МВт с котлами ТП-101 и пиролизные установки производства сланцевого масла, побочным продуктом которых является полукосовый газ [1]. В данной работе представлено описание реконструкции котла и приведены результаты режимов совместного сжигания.

Для обеспечения норм по выбросам NO_x и SO_2 в сланцевом режиме котел ТП-101 ранее был оснащен системой ступенчатого сжигания сланца и системой связывания SO_2 золой сланца и дополнительно подаваемой отожженной известью.

Суть данной реконструкции заключалась в замене во втором ярусе на фронтальной стене котла четырех (из восьми) сланцевых горелок на двухсекционные газовые горелки конструкции ВТИ-ЕНТЕН и в организации подачи в горелки вместе с воздухом на горение также и дымовых газов рециркуляции, отбираемых после установки десульфуризации.

Расход газа на каждую горелку составлял до $3200 \text{ м}^3/\text{час}$ при меняющейся калорийности пиролизного газа от 46 до $53 \text{ МДж}/\text{м}^3$. Содержание кислорода в смеси горячего воздуха (температура до 340°C) и дымовых газов рециркуляции (температура до 95°C) поддерживалось в диапазоне 14–17%. Коэффициент избытка воздуха поддерживался в диапазоне 0,75–0,85 в центральной части горелки и 0,65–0,75 в периферийной. Дожигание продуктов неполного горения газа (и сланца) осуществлялось за счет подачи дополнительного воздуха через восемь сопел острого дутья, расположенных (по четыре) выше второго яруса горелок на фронтальной и задней стенах топки. Содержание кислорода за топкой регулировалось в диапазоне 5–7%.

Доля газа в тепловом балансе котла менялась от 60 до 90%. Замещение сланца газом приводило к изменению температур по тракту котла, однако шесть впрысков котла позволяли удерживать температуру первичного и вторичного пара в допустимых пределах.

Выбросы оксидов азота на режимах совместного сжигания газа и сланца менялись в пределах от 130 до $180 \text{ мг}/\text{м}^3$, а в чисто газовом режиме составляли 60–80 $\text{мг}/\text{м}^3$. Такой низкий уровень NO_x был достигнут, несмотря на высокую температуру горячего воздуха, благодаря нескольким факторам [2] – конструкции горелок, глубокому балластированию воздуха дымовыми газами рециркуляции и организации двухступенчатого сжигания с большими недостатками окислителя на первой стадии.

Список литературы

1. Тугов А.Н., Отс А., Сийрде А., Сидоркин В.Т., Рябов Г.А. Разработка мероприятий по усовершенствованию технологий энергетической утилизации газообразных отходов сланцепереработки. – Теплоэнергетика. – 2016 – № 6. – С. 53–62.
2. Сидоркин В.Т., Берсенева К.Г., Тугов А.Н., Верещетин В.А. Образование оксидов азота при сжигании пиролизных газов в воздухе, сильно забалластированном дымовыми газами рециркуляции. – Теплоэнергетика – 2019. – № 1. – С. 65–74.

РАЗВИТИЕ МАЛОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВЕ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ГАЗИФИКАЦИЕЙ ТВЕРДОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА

Бойко Е.А., Страшников А.В.

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия

В Российской Федерации около 2/3 всей территории обеспечено децентрализованным энергоснабжением.

Тариф на электроэнергию от ДЭС составляет 25–45 руб./кВт*ч с максимумом до 150 руб./кВт*ч. Тариф на тепловую энергию, вырабатываемую на котельных составляет 3000–24000 руб./Гкал с максимумом до 70000 руб./Гкал. Затраты на субсидирование составляют до 100 млрд. рублей в год.

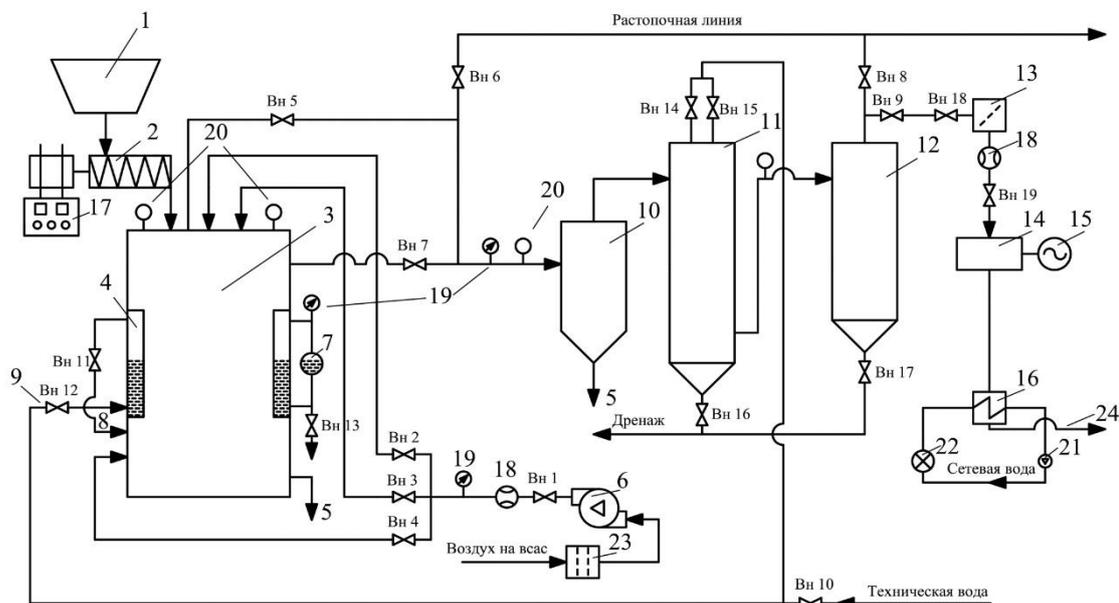


Рис. 1. Принципиальная схема когенерационной энергетической установки с газификацией твердого органического топлива. 1 – бункер сырого угля; 2 – шнековый питатель; 3 – газогенератор; 4 – водяная рубашка; 5 – зольник; 6 – дутьевой вентилятор; 7 – водоуказательное стекло; 8 – линия впрыска пара; 9 – линия подачи воды в водяную рубашку газогенератора; 10 – фильтр-золоуловитель циклонный; 11 – мокрый скруббер; 12 – влагоотделитель; 13 – фильтр тонкой очистки газа; 14 – двигатель внутреннего сгорания; 15 – электрогенератор; 16 – теплообменный аппарат; 17 – щит управления; 18 – счетчик ротационный; 19 – манометр; 20 – датчик температуры; 21 – сетевой насос; 22 – теплофикационный потребитель; 23 – воздушный фильтр; 24 – выхлоп отработавших газов.

Общий экономический эффект реализации мероприятий по замещению ДЭС и котельных когенерационными энергетическими установками составит 75–197 млрд. руб./год.

Список литературы

1. Бойко Е.А., Страшников А.В. Когенерационная энергетическая установка на основе газификации твердого органического топлива для нужд малой распределенной энергетики // Промышленная энергетика. – 2020. – № 2.
2. Бойко Е.А., Страшников А.В., Охремчук А.Е., Казанцев В.П. Патент РФ № 199402, кл. С10J 3/02. Двухрежимный газогенератор / Бюлл. № 25. Оpubл. 31.08.2020.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ АЛЮМИНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ДЕТОНАЦИИ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

**Бордиловский С.А.¹⁾, Караханов С.М.¹⁾, Микулянец Е.И.²⁾,
Пластинин А.В.¹⁾, Юношев А.С.^{1,2)}**

¹⁾ Институт гидродинамики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²⁾ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Эмульсионные взрывчатые вещества (ЭмВВ) нашли широкое применение в горнодобывающей промышленности, практически вытеснив композитные ВВ на основе тротила. Это вызвано хорошими эксплуатационными качествами ЭмВВ: возможность подготовки ВВ непосредственно на месте использования из компонентов, перевозка которых безопасна, пониженная токсичность продуктов детонации (ПД), легкое варьирование плотности и, соответственно, давления и скорости детонации за счет изменения массовой доли сенсibilизатора – полимерных, стеклянных микробаллонов, ценосфер или газовых включений. Добавление алюминия (Al) в состав ЭмВВ дает возможность регулировать температуру ПД. В литературе есть данные по измерению температуры ПД конденсированных ВВ [1] и влиянию Al на их скорость детонации и [2]. Данные по измерению температуры алюминизированных ЭмВВ единичны.

В данной работе на основе оконной методики проведено измерение яркостной температуры продуктов детонации ЭмВВ в полимерных оболочках с одновременной регистрацией давления на границе ЭмВВ – окно из оргстекла в предположении, что на границе ВВ – окно регистрируются параметры потока за фронтом детонационной волны и оптическая толщина слоя излучающих ПД мала. Диаметр зарядов 60 мм, высота 175 мм. Анализ температурных профилей, на образцах ЭмВВ (с исходной плотностью 0.5 г/см³) с добавкой Al и без нее в оболочке из ПВХ показывает, что яркостная температура продуктов при наличии Al в составе ЭмВВ падает с ≈2400 до ≈2100 К (рис.1). В дополнительном эксперименте, в котором Al в той же пропорции заменен на размолотое стекло, заведомо не участвующее в реакции, температура ПД понизилась еще больше и составила ≈1600 К. По-видимому, при данных условиях алюминий успевает частично прореагировать в зоне реакции ЭмВВ.

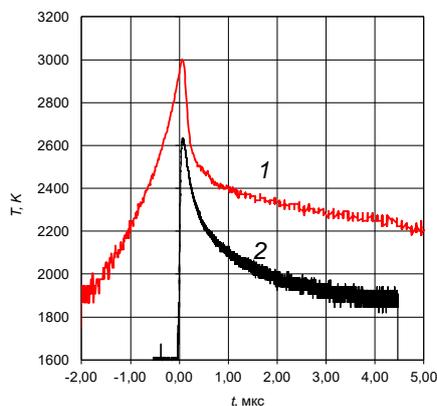


Рис. 1. Яркостная температура ЭмВВ: 1 – без Al, 2 – с добавкой 20% Al.

Список литературы

1. Гоголя М.Ф., Бражников М.А. Температуры продуктов детонации конденсированных веществ. 1. Твердые ВВ // Химическая физика. – 1994. – Т. 13, № 1. – С. 52 – 63.
2. Махов М.Н., Гоголя М.Ф., Долгобородов А.Ю. и др. Метательная способность и теплота взрывчатого разложения алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40, № 4. – С. 96 – 105.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФРОНТА ПЛАМЕНИ
В РАМКАХ «FLAMELET» МОДЕЛИ****Брызгалов О.В.^{1,2)}, Минаев С.С.^{1,2)}**¹⁾ Институт прикладной математики ДВО РАН, г. Владивосток, Россия²⁾ Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

В настоящее время разработка эффективных алгоритмов моделирования горения предварительно перемешанной смеси является актуальным вопросом. Численное моделирование горения с подробной химической кинетикой требует огромных вычислительных затрат. Есть необходимость применять более простые, но не теряющие физического смысла, упрощенные модели пламени. В случае, когда характерный масштаб внутренней структуры волны горения значительно меньше, чем характерный размер возмущений газового потока, разумно использовать упрощенное представление пламени, как границы между несгоревшим и сгоревшим газом. В этой модели предполагается, что поверхность пламени движется вдоль нормали с заданной скоростью, называемой нормальной скоростью горения. Значение скорости горения может быть оценено предварительным моделированием одномерного горения с учетом детальной кинетики химических реакций. В этом приближении поток газа определяется уравнениями, свободными от эффектов, связанными с тепловым расширением газа. Это приближение известно, как “flamelet” модель, и широко используется в моделировании динамического поведения фронта пламени в нестационарных и неоднородных по пространству потоках газа. В простейшем случае можно считать, что скорость волны горения постоянна и определяется только составом смеси.

Алгоритм основан на представлении сплошной среды как множества элементарных частиц, движущихся по фиксированным траекториям, соответствующих заданному полю течения. Каждая частица характеризуется пространственными координатами и двумя состояниями, соответствующими сгоревшему и несгоревшему газу. Фронт пламени рассматривается как поверхность, разделяющая два сорта частиц. Несгоревшая частица при достижении фронта пламени поджигается и становится вторичным источником горения, порождающим сферическую волну. Огибающая фронтов всех волн, порожденных горящими частицами, будет являться фронтом пламени в следующий момент времени. Данная модель распространения горения может быть описана на основе принципа Гюйгенса-Френеля, используемого в волновой оптике. В данной работе исследована зависимость точности модели от плотности частиц на примере свободно расширяющегося пламени, пламени бунзеновской горелки и пламени, стабилизированного около застойной зоны. Предложен алгоритм, позволяющий включить поправку, связанную с локальным изменением нормальной скорости от кривизны фронта пламени. Выполнено сравнение результатов численных расчетов с точными аналитическими решениями.

Работа выполнена при финансовой поддержке министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2020-80).

Список литературы

1. Зельдович, Я.Б. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе – М.: Наука, 1980. – 478 с.
2. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц / Р. Хокни, Дж. Иствуд – М.: Мир, 1987. – 640 с.

ЗАДЕРЖКА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОПЛИВА В ВОДОРОДНОМ ДИЗЕЛЕ**Бунев В.А.¹⁾, Коржавин А.А.¹⁾, Сеначин А.П.²⁾, Сеначин П.К.^{2,3)}**¹⁾ Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск, Россия²⁾ Алтайский государственный технический университет, г. Барнаул, Россия³⁾ Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Несмотря на то, что серийное производство водородных дизелей пока не освоено, интерес исследователей к проблемам его создания непрерывно растет. В России проблемами создания водородного дизеля активно занимаются специалисты МГТУ им. Н. Э. Баумана [1–5]. Одной из важных проблем оптимизации рабочего процесса дизеля является определение задержки воспламенения топлива экспериментальными методами или численным моделированием [6, 7].

Данная работа посвящена моделированию рабочего процесса водородного дизеля с целью определения задержки воспламенения топлива. В водородном дизеле топливо подается в камеру сгорания в газообразном виде (в отличие от традиционного жидкого дизельного топлива) также аппаратурой высокого давления впрыска (но меньшего чем в системе Common Rail) через форсунку с несколькими соплами (от 4 до 8) круглого сечения. Таким образом, после начала впрыска топлива в камере сгорания типа Гессельман образуется шатер из высокоскоростных свободных турбулентных струй (СТС) газового топлива. Впрыск топлива осуществляется непрерывно в течение всей фазы горения и поэтому его можно полагать квазистационарным.

Математическая модель процесса самовоспламенения топлива близка к нашей прежней модели [7]. Отличие состоит в том, что топливо газообразное, процесс самовоспламенения моделируется не макрокинетикой, а детальной кинетикой самовоспламенения водорода. Если рассматривать одну СТС, то непосредственно после начала впрыска топлива на ее периферии в результате поперечной диффузии образуются локальные объемы (ЛО) смеси топлива с воздухом различной стехиометрической концентрации. Чем меньше концентрация топлива, тем выше температура ЛО, и наоборот. ЛО конкурируют между собой в процессе самовоспламенения. Первый из воспламенившихся ЛО и определяет задержку воспламенения топлива.

Список литературы

1. Кавтарадзе Р.З. Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 238 с.
2. Кавтарадзе Р.З. Водородный дизель – двигатель будущего // Труды седьмой Российской национальной конференции по теплообмену. В 3-х томах. 2018 / Седьмая Российская национальная конференция по теплообмену, Москва, 22-26 октября 2018 года. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2018. – С. 15–19.
3. Кавтарадзе Р.З. Водородный дизель: проблемы и перспективы // Труды Юбилейной конференции Национального комитета РАН по тепло- и массообмену «Фундаментальные и прикладные проблемы тепло-массообмена» и XXI Школы-семинара под рук. А.И. Леонтьева. Том 1. – М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – С. 35–41.
4. Kavtaradze R.Z. Influence of the Rotational Charge Motion on the Processes of Nitrogen Oxide Formation and Nonstationary Heat Transfer in a Hydrogen Diesel // J. Machinery Manufacture and Reliability. 2018. Vol. 47. No. 1. P. 1–9.
5. Natriashvili T., Kavtaradze R., Glonti M. Improvement of ecological characteristics of the hydrogen diesel engine // Intern. I Automobile Scientific Forum (IASF-2017) «Intelligent Transport Systems». IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 315 (2018) 012018. P. 1–7.
6. Кавтарадзе Р.З., Цайлингер К., Цитцлер Г. Задержка воспламенения в дизеле при использовании различных топлив // ТВТ. 2005. – Т. 43. № 6. – С. 947–965.
7. Senachin A.P., Korzhavin A.A., Senachin P.K. Simulation of Fuel Ignition Delay in Diesel Engines with Various Fuel Feeding Systems // Procedia Engineering 150 (2016) 190–203 / International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016 / www.elsevier.com/locate/procedia.

НЕПРЕРЫВНАЯ МНОГОФРОНТОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ СМЕСИ МЕТАН – НАГРЕТЫЙ ВОЗДУХ В КОЛЬЦЕВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф.

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

В докладе представлены результаты по дальнейшему исследованию режимов непрерывной детонации смеси метан – воздух [1]. Эксперименты проведены в кольцевой камере сгорания (КС) диаметром $d_{c1}=503$ мм и длиной $L_c=780$ мм (ДК-500). Воздух с удельными расходами через щель на входе в КС $g_{\delta}=368 \div 1345$ кг/(с·м²) предварительно нагревался огнем в форкамере (ФК) от 600 до 1200 К при сжигании поступающей в ФК стехиометрической смеси водород-кислород. Коэффициент избытка метана составлял $\phi=1.15 \pm 0.1$. Коэффициент сужения потока на выходе КС $K_{ex}=1.74$. Истечение продуктов происходило в окружающую среду с давлением $p_a=10^5$ Па.

Результаты экспериментов. В ДК-500 при $K_{ex}=1.74$ для смеси метан – подогретый воздух при температуре воздуха $T_{*a}=(600 - 1200)$ К впервые реализованы режимы непрерывной многофронтной детонации (НМД) с одной парой ($n=2$) сталкивающихся поперечных детонационных волн (ПДВ) с частотой $f=1.2 \pm 0.1$ кГц. Фрагмент фоторегистрограммы НМД приведен на рис. 1, а основные параметры процесса представлены в табл. 1.

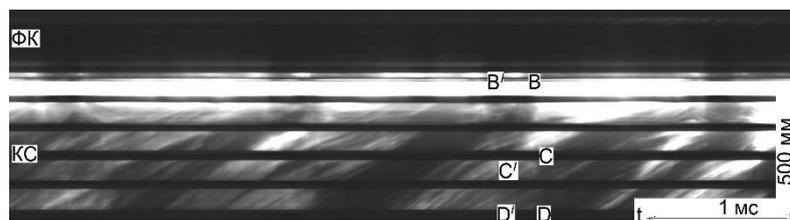


Рис. 1. Фрагмент фоторегистрограммы режима НМД смеси метан – подогретый воздух при $T_{*a}=600$ К ($G_a=13.36$ кг/с, $\phi=1.16$, $n=2$, $f=1.14$ кГц, $\langle D \rangle = 0.9$ км/с).

Таблица 1. Параметры НМД в ДК-500 при $K_{ex}=1.74$ смеси метан – подогретый воздух.

T_{*a} К	g_{δ} , кг/(с·м ²)	ϕ	f , кГц	n	$\langle D \rangle$, км/с	p_{c30}/p_a	Режим
600	1043→529	1.15→1.17	1.15→1.01	2	0.91→0.8	5.3→2.63	НМД
800	1244→444	1.18→1.21	1.24→1.16	2	0.98→0.91	6.1→2.4	НМД
1000	1288→509	1.14→1.17	1.34→1.30	2	1.06→1.03	5.9→2.67	НМД
1200	1218 →371	1.1 →1.11	1.31→1.29	2	1.03→1.02	5.58→1.84	НМД

По измеренным на выходе из КС статическим p_{c3} и давлениям торможения p_{c30} определены удельные импульсы при НМД в зависимости от расхода воздуха и температуры его подогрева. Выяснено, что с повышением температуры воздуха удельный импульс силы тяги уменьшается вследствие увеличения степени диссоциации продуктов. Максимальный удельный импульс с учетом энергии нагретого воздуха $I_{sp,t}=1630$ с получен при температуре воздуха в форкамере 600 К. Итак, в кольцевой камере ДК-500 с форкамерой при $K_{ex}=1.74$ для самой трудно детонирующей смеси метан – подогретый воздух впервые реализованы режимы НМД со сталкивающимися поперечными детонационными волнами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00270а.

Список литературы

1. Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф. Непрерывная детонация смесей CH_4/H_2 – воздух при варьировании геометрии кольцевой камеры сгорания // ФГВ.–2020. –Т. 56, № 5. – С. 49–56.

ДЕТОНАЦИОННОЕ СЖИГАНИЕ СМЕСИ АВИАЦИОННЫЙ КЕРОСИН – ВОЗДУХ В КОЛЬЦЕВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ ДИАМЕТРОМ 503 ММ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕЕ ГЕОМЕТРИИ

Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, 630090, Новосибирск, Россия

Исследования детонационного сжигания керосина в воздухе в проточных камерах сгорания (КС) представляют особый научный и практический интерес. Ранее детонационное сжигание холодного керосина и дизельного топлива впервые было реализовано и исследовано в КС плоско-радиальной геометрии диаметром $d_{c1}=204$ мм [1, 2], а в каналах кольцевой цилиндрической геометрии лишь при обогащении воздуха кислородом или керосина водородом [2, 3], а также добавкой в керосин изопропилнитрата [4].

Цель данной работы – в кольцевой цилиндрической камере диаметром $d_{c1}=503$ мм (ДК-500) реализовать и исследовать детонационные режимы сжигания авиационного керосина ТС-1 с холодным воздухом.

Расход воздуха изменялся в пределах $G_a=8.22-33.95$ кг/с, керосина – $G_f=1.39-2.05$ кг/с, коэффициент избытка горючего – $\phi=0.85-2.8$. В системе подачи горючего керосин барботировался воздухом. Реализованы режимы непрерывной многофронтной детонации (НМД) с двумя ($n=2$) встречными поперечными детонационными волнами, имеющими среднюю скорость вращения $\langle D \rangle=0.79-0.87$ км/с и частоту $f=1.0-1.1$ кГц, и четырьмя ($n=4$) волнами со средней скоростью вращения $1.02-1.22$ км/с и частотой $2.59-3.09$ кГц (рис. 1).

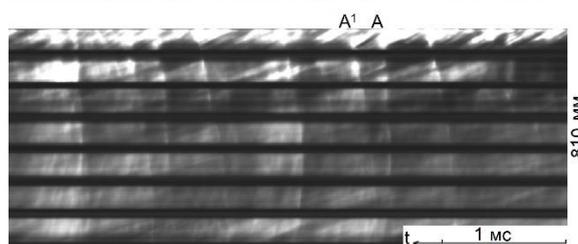


Рис. 1. Фрагмент фоторегистрограммы НМД гетерогенной смеси авиационный керосин-воздух:

$$G_a=31.23 \text{ кг/с}, \phi=0.88, n=4, f \approx 3.09 \text{ кГц}, \langle D \rangle \approx 1.22 \text{ км/с}.$$

Проведен анализ влияния расхода гетерогенной смеси керосин - воздух и геометрии камеры сгорания на область реализации детонационного режима. Показано, что при критическом истечении продуктов из КС ДК-500, увеличение ширины щели приводит к докритическому истечению воздуха в камеру, следовательно, снижению гидравлических потерь потока. Условия существования режимов детонационного горения керосина и удельный импульс определялись путем изменения плотности потока воздуха величиной его расхода, шириной кольцевых зазора подачи воздуха в КС и на выходе из нее, дисперсностью распыла керосина, а также изменением геометрии КС. Максимальное значение удельного импульса с учетом энергии сжатого воздуха в ресиверах составило около 1400 с.

*Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2020-806 от 29.09.2020.*

Список литературы

1. Быковский Ф. А., Митрофанов В. В., Ведерников Е. Ф. Непрерывное детонационное сжигание топливно-воздушных смесей // ФГВ. –1997. – Т. 33, № 3. – С. 120–131.
2. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
3. Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф. Непрерывная детонация смеси жидкий керосин-воздух с добавкой водорода или синтез-газа // ФГВ. – 2019. – Т.55, № 5. – С. 83–92.
4. Kindracki J. Experimental research on rotating detonation in liquid fuel-gaseous air mixtures // Aerospace Sci. Technol. – 2015. – V. 43. – P. 445–453.

ДЕТОНАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В МНОГОТОПЛИВНЫХ СМЕСЯХ**Васильев А.А.^{1,2}**¹ Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН, Новосибирск² Новосибирский государственный университет

E-mail: gasdet@hydro.nsc.ru

Корректное описание газодинамических процессов в реагирующих системах требует четкого представления о кинетических механизмах химических реакций при превращении исходной смеси в продукты реакции, в том числе – о составе промежуточных продуктов и их количестве. Важнейшими из кинетических параметров являются задержки воспламенения смесей и динамика процессов в зоне химических реакций.

Методики экспериментального определения кинетических параметров хорошо известны – ударные волны, датчики давления и ионизации, техника адиабатического сжатия, спектральные методы и т.д. В настоящее время накоплены массивы данных о кинетических параметрах смесей из индивидуального топлива с окислителем и инертным газом. В то же время существует огромная потребность в кинетических данных для горючих систем, в составе которых присутствуют несколько топливных компонент. Такие задачи в последние годы возникают в связи с ужесточением экологических требований на количество и состав вредных продуктов (оксиды азота и углерода, сажевые частицы и т.д.), а также в связи с постоянными усилиями по оптимизации топлив химическими методами и появлением новых топливных композиций (биотоплива, низкокалорийные материалы, различные промоторы и ингибиторы, мусороперерабатывающие технологии, и т.д.).

В данной работе проанализированы основные проблемы, касающиеся выбора кинетических данных для двухтопливных систем, в том числе – с сильно различающимися кинетическими параметрами для индивидуальных топлив. Следует отметить, что вплоть до настоящего времени кинетические расчеты с детальной схемой реакций (свыше 2000 уравнений для тяжелых углеводородов) все еще недостаточно хорошо согласуются с экспериментально измеряемыми параметрами даже для случая процесса низкоскоростного горения (например, по количеству образующихся промежуточных и конечных радикалов). Такие «несстыковки» позволяют вносить коррективы в коэффициенты детальной кинетической схемы и тем самым улучшать прогнозные возможности расчетных программ применительно к процессам горения. А для детонационных условий в силу их скоротечности экспериментальных данных о динамике промежуточных радикалов столь мало (некоторое исключение – измерения радикалов OH , H_2O , H_2O_2 ... в водородосодержащих горючих смесях), что попыток «улучшить» коэффициенты детальной кинетической схемы для условий детонации практически не известно.

Представлены данные о параметрах детонации в топливно-кислородных и топливно-воздушных смесях, состоящих из следующих двухтопливных композиций: $\text{CO} - \text{H}_2$ (синтез-газ), $\text{C}_x\text{H}_y - \text{C}$ (метано-угольная композиция), $\text{C}_x\text{H}_y - \text{H}_2$, $\text{C}_x\text{H}_y - \text{H}_2$... Эти компоненты характеризуются резко различающимися индивидуальными величинами предэкспоненциальных коэффициентов A и энергий активации E в формуле типа Аррениуса, что требует пересмотра традиционно используемого предположения о постоянстве этих коэффициентов при изменении концентрации топливного компонента в смеси. Предложен метод аппроксимации формулы для результирующей задержки воспламенения с переменными A и E для двухтопливных смесей. Результаты расчетов, оформленные в графическом и табличном виде как часть Банка детонационных данных горючих систем, показали хорошее соответствие с имеющимися экспериментальными данными детонационных характеристик этих систем.

Данное исследование поддержано грантом МинОбрНауки РФ, соглашение № 075-15-2020-806 от 29.09.2020.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОСФОРСОДЕРЖАЩИХ АНТИПИРЕНОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ ПО ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТУ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ: ПЛИФ И КАРС-СПЕКТРОСКОПИИ

Волков С.Ю.^{1,2}, Кобцев В.Д.², Кострица С.А.², Орлов С.Н.^{1,2}, Смирнов В.В.^{1,2}

¹) Институт Общей Физики РАН, г. Москва, Россия

²) Центральный институт авиационного моторостроения, г. Москва, Росси

Методами планарной лазерно-индуцированной флуоресценции (ПЛИФ) радикалов ОН и температурных измерений с помощью спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС) молекул N₂ исследовано влияние добавок различных концентраций трифенилфосфата (ТФФ) на характеристики пламени и его распространения вдоль поверхности образцов полиметилметакрилата (ПММА).

ПЛИФ измерения проводились в пламенах, распространяющихся вдоль поверхности образцов как при их горизонтальном, так и вертикальном расположении. КАРС измерения температуры проводились при горизонтальном распространении пламени.

Для ПЛИФ измерений радикалов ОН был выбран переход на частоте 31342.359 см⁻¹ в полосе X3/2(V=0) → A1(V=0), возбуждаемый узкополосным (с шириной линии 0.05 см⁻¹) перестраиваемым лазером на красителе с удвоением частоты. Контроль длины волны излучения лазера проводился измерителем длин волн, обеспечивающим точность $\Delta\lambda/\lambda \sim 10^{-8}$. КАРС спектрометр, собранный по схеме "BOXCARS", обеспечивал пространственное разрешение 1*0.1*0.1 мм³ и его лазеры накачки имели суммарную энергию выходного излучения на длине волны 512 нм около 15 мДж, и на стоксовой длине волны 609 нм примерно 6 мДж.

В результате проведенных измерений восстановлены распределения концентраций радикалов ОН как в чистых образцах ПММА, так и в образцах ПММА с добавками 10% и 20% ТФФ. Добавление ТФФ привело к снижению скорости горения, длины зоны пиролиза и теплового потока от пламени к поверхности полимера. Показано, что в пламени ПММА + 10% ТФФ наблюдается заметно меньшее количество радикалов ОН, ответственных за окисление топлива, чем в пламени ПММА. Это явление объясняется присутствием ТФФ, благодаря чему в газовой фазе фосфор участвует в рекомбинации радикалов ОН (и Н) с образованием НОРО и НОРО₂, что приводит к тушению пламени. Кроме того, добавление ТФФ способствует увеличению выхода сажи, но этот эффект не является доминирующим в механизме ингибирования. Используя ПЛИФ и КАРС измерения, были получены доказательства того, что снижение воспламеняемости ПММА с добавлением ТФФ связано с ингибированием газовой фазы продуктами разложения ТФФ, что приводит к снижению концентрации радикалов ОН в пламени.

С использованием КАРС спектроскопии зарегистрированы двумерные распределения температуры в пламени ПММА. Минимальное расстояние от поверхности образца, на котором проводились измерения температуры составило 1 мм. При горизонтальном расположении образцов ПММА с различными концентрациями ТФФ были получены распределения температур размерами до 20 мм по высоте и 40 мм по длине в сечении поперек фронта пламени. КАРС измерения температуры хорошо согласуются с проведенными термопарными измерениями.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГОРЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ ГАЗОГЕНЕРИРУЮЩИХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНЫХ ПОЛИАДЕРНЫХ N-ГЕТЕРОЦИКЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ И ПОЛИ-2-МЕТИЛ-5-ВИНИЛТЕТРАЗОЛА

Волкова Н.Н.¹⁾, Дашко Д.В.²⁾, Жолудев А.Ф.¹⁾, Казаков А.И.¹⁾, Кислов М.Б.¹⁾,
Набатова А.В.¹⁾, Яновский Л.С.^{1,3,4)}

¹⁾ Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Россия

²⁾ Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог», г. Санкт-Петербург, Россия

³⁾ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴⁾ Московский авиационный институт, Москва, Россия

Изучены закономерности горения твердых составов, содержащих высокоэнтальпийные полиазотистые соединения на основе системы фуразановых, фуоксановых и азипинового циклов (рис. 1) и поли-2-метил-5-винилтетразол (ПМВТ) в качестве активного связующего.

Для индивидуальных компонентов и составов с разным содержанием связующего определены скорости термического разложения в вакууме в температурном интервале 210,5–230,5°C и горения U в атмосфере азота в интервале давлений $P=1-6$ МПа. Ранее [1] было обнаружено, что скорость горения композиции из 1,1'-диоксид-7,7'-бис(трис([1,2,5] оксадиазола) [3,4-б: 3',4'-д: 3'',4''-ф] азефина) ($Az_2(O)_2$) и связующего ПМВТ при давлении 2 МПа превышает скорости горения отдельных компонентов. Синергизм достигает наибольшей величины при равной массовой доле компонентов. В настоящей работе показано, что данный эффект имеет место во всем интервале давлений 1 - 6 МПа, но с повышением давления его величина снижается (рис. 1).

Исследования кинетики тепловыделения при термическом разложении отдельных компонентов и прессованной композиции из 50% $Az_2(O)_2$ и 50% ПМВТ при 210,5–230,5°C показали, что в смеси имеет место взаимодействие компонентов на начальной стадии реакции, приводящее к восьмикратному росту начальной скорости распада смеси относительно скорости разложения ПМВТ и более чем четырехкратному - относительно скорости разложения $Az_2(O)_2$.

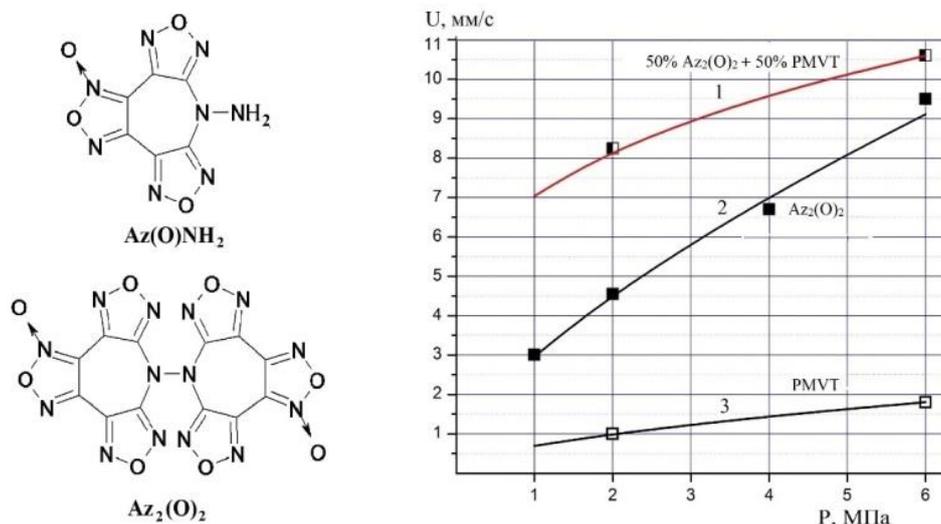


Рис. 1. Зависимости $U(P)$ для: смеси 50% PVMT+50% $Az_2(O)_2$ (1); $Az_2(O)_2$ (2) и PVMT (3).

Работа выполнена по темам Государственного задания: 0089-2019-0005, № гос. регистрации АААА-А19-119101690058-9 и 0089-2019-0017, № АААА-А19-119100800130-0.

Список литературы

1. N. N. Volkova, D. V. Dashko, A. F. Zholudev, M. B. Kislov, L. S. Yanovskii. Regularities of the high-temperature transformation of poly-2-methyl-5-vinyltetrazole and solid fuel compositions based on it in the nitrogen atmosphere // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – V. 1891. – N 012059.

МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ УГОЛЬНЫХ, НЕФТЯНЫХ И РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ В СОСТАВЕ ТОПЛИВНЫХ СУСПЕНЗИЙ

Вершинина К.Ю., Дорохов В.В., Романов Д.С., Стрижак П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

В работе изучены возможности применения методов многофакторного анализа [1] для оценки использования топливных смесей для нужд теплоэнергетики. В качестве объекта исследования рассмотрены высоковлажные композиционные топлива (разновидности водоугольных суспензий) на основе отходов разного происхождения. Комплексная оценка эффективности нетрадиционных топливных смесей [2] представляет особый интерес, поскольку эффективность утилизации отходов промышленности и сельского хозяйства может быть оценена по-разному в зависимости от приоритетов.

В исследовании рассмотрено шесть групп критериев (стоимость, энергетические характеристики, технологичность приготовления и хранения, распыление, фрагментация, выбросы), включающих совокупно 17 характеристик, определяемых экспериментально. В каждой группе рассчитывался интегральный показатель эффективности по методу взвешенных сумм. После этого вычислялся итоговый показатель, учитывающий все основные факторы. Анализ проводился для суспензий на основе воды, угольных шламов (фильтр-кеков), бурого и каменного углей. В качестве добавок применялись опилки, ореховая скорлупа, отработанное турбинное масло, крахмал, неонол, ксантановая и гуаровая камеди. Во всех шести группах критериев интегральный показатель варьировался в диапазоне 0.4–0.9. Наименьшие показатели итоговой эффективности (0.239–0.487) типичны для топлива «50% фильтр-кек длиннопламенного угля, 40% вода, 10% турбинное масло». Согласно проведенному анализу, наилучшими топливами могут считаться смеси на основе угольных шламов и воды. Их итоговая эффективность варьировалась от 0.447 до 0.727 при задании шести различных вариантов распределения приоритета. Результаты настоящего исследования могут быть использованы для обоснования целесообразности, анализа преимуществ и недостатков сжигания широкого перечня отходов в составе композиционных топлив.

Исследование поддержано грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2020-806 (договор № 13.1902.21.0014).

Список литературы

1. Kumar A. et al. A review of multi criteria decision-making (MCDM) towards sustainable renewable energy development // *Renew. Sustain. Energy. Rev.* – 2017. – V. 69. – P. 596–609.
2. Zhao Z. et al. Energy utilization of coal-coking wastes via coal slurry preparation: The characteristics of slurrying, combustion, and pollutant emission // *Energy.* – 2019. – V. 168. – P. 609–618.

ЗАЖИГАНИЕ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ ПРИ РАЗНЫХ ВИДАХ ТЕПЛООБМЕНА

Гайдукова О.С.¹⁾, Стрижак П.А.¹⁾, Мисюра С.Я.²⁾

¹⁾ Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

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

На сегодняшний день спрос на энергию растет, а запасы полезных ископаемых истощаются [1]. Альтернативные источники энергии позволяют решить эту проблему и обеспечить ресурсную безопасность и снабдить чистой энергией. Газовые гидраты являются одним из перспективных нетрадиционных источников энергии. Интерес в изучении газовых гидратов находит следующие направления: добыча природного газового гидрата, процесс производства газового гидрата, транспортировка и характеристики процесса горения и зажигания. Механизмы и характеристики горения газовых гидратов существенно отличаются от традиционных (жидких и твердых) видов топлива. Но только благодаря масштабным исследованиям такого вида топлива, можно добиться коммерциализации в больших энергетических масштабах.

Целью данной работы является экспериментальное и теоретическое исследование закономерностей зажигания горения гидратизированных топлив при разных видах теплообмена.

В ходе работы разработаны экспериментальные стенды для исследований процесса зажигания и горения гидратизированного топлива при конвективном, радиационном, кондуктивном и локальном нагреве горячей частицей. Экспериментально определены минимальные температуры начала зажигания топлива, времена задержки зажигания гидратизированного топлива при кондуктивном, радиационном и конвективном теплообмене.

В таблице 1 приведены экспериментальные данные по минимальной температуре достаточной для инициирования горения газового гидрата при разных схемах нагрева.

Таблица 1. Минимальная температура начала горения двойного газового гидрата для разных способов подвода энергии к образцу

	Кондуктивный нагрев	Радиационный нагрев	Нагрев металлической частицей
T_{\min}, K	903±10	943±20	1373±50

На рис. 1 представлены видеок cadры локального процесса зажигания газового гидрата горячей металлической частицей.

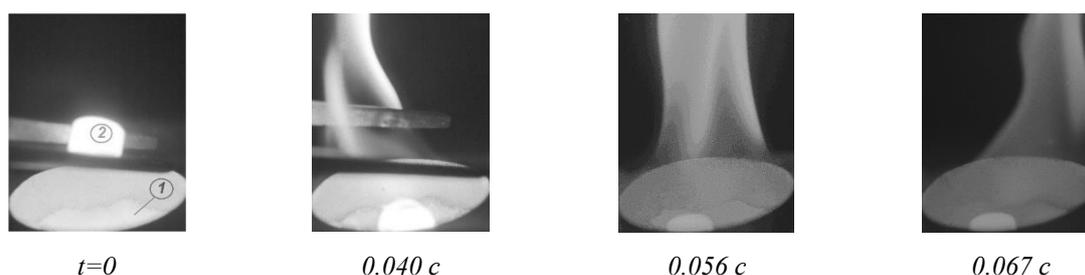


Рис. 1. Видеок cadры локального процесса зажигания газового гидрата горячей металлической частицей (1 – образец газового гидрата, 2 – горячая металлическая частица с температурой $T=1973 \text{ K}$).

Исследование поддержано грантом Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2020-806 (договор № 13.1902.21.0014).

Список литературы

1. Vujanović M., Wang Q., Mohsen M., Duić N., Yan J. Recent progress in sustainable energy-efficient technologies and environmental impacts on energy systems // Appl. Energy. 2021. – V. 283. Article number 116280.

ПЕРВИЧНЫЕ КОНДЕНСИРОВАННЫЕ ПРОДУКТЫ БОРСОДЕРЖАЩИХ ТОПЛИВ ПРИ ГОРЕНИИ В АРГОНЕ И ВОЗДУХЕГлотов О.Г.^{1,2)}, Замашников В.В.^{1,3)}, Сурудин Г.С.¹⁾, Белоусова Н.С.^{1,2)}¹⁾ Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН,
г. Новосибирск, Россия²⁾ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия³⁾ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Горение смесевых композиций с высокой массовой долей борсодержащего горючего в настоящее время вызывает повышенный интерес исследователей в связи с развитием ракетных прямоточных двигателей [1]. Типичная конфигурация прямоточного воздушно-реактивного двигателя – газогенераторная [2]. Внутри двигателя имеется твердотопливный газогенератор, поставляющий первичные продукты горения (ППГ) в камеру дожигания, в которую одновременно подается забортный воздух в качестве окислителя. Характеристики продуктов горения, поступающих в камеру дожигания, чрезвычайно важны с точки зрения эффективности сгорания горючего [3], а также необходимы для математического моделирования процессов в камере дожигания. В данной работе характеристики ППГ исследованы экспериментально с применением двух основных методик, а именно: Методика (1) – гашение и отбор ППГ в проточном сосуде высокого давления (бомбе) в спутном потоке инертного газа – аргона [4]. В этом случае гашение частиц осуществляется вблизи поверхности горения образца топлива и фактически определяются параметры частиц, выходящих с поверхности горящего топлива в газовую фазу. Методика (2) – сжигание образца топлива в бомбе с окнами в среде сжатого воздуха с регистрацией факела посредством видеосъемки со скоростью 1000 кадров в секунду. В этом случае регистрируются частицы, находящиеся на дистанции 6 – 15 см от образца и горящие в воздухе без принудительного гашения. Дополнительно производится отбор конденсированных продуктов горения в чашки, установленные на дне бомбы с окнами. С применением обеих методик исследованы топлива, содержащие около 37% бора, либо додекаборида алюминия, активное связующее и ПХА. Эксперименты проведены при давлении 1.2 и 2.4 МПа, в аргоне и воздухе. Представлены данные по скоростям горения топлив и о морфологическом, гранулометрическом и химическом составе отобранных продуктов горения. С помощью специальной видеосъемки, сочетающей возможности шпирен-метода и регистрации в собственном свечении, получена информация о форме и размерах частиц конденсированной фазы в факеле, скорости движения частиц и наличия у них конвективного следа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2020-781 и проекта РФФИ № 20-33-90208 («аспиранты» {Белоусова Н. С.}).

Список литературы

1. Pang W., De Luca L.T., Fan X., Glotov O.G., Zhao F. Boron-Based Fuel-Rich Propellant: Properties, Combustion, and Technology Aspects. CRC Press, Taylor & Francis Group, an Informa Group company, 2019. 323 pp.
2. Арефьев К.Ю., Воронцов А.В., Прохоров А.Н., Яновский Л.С. Экспериментальное исследование полноты сгорания двухфазных продуктов газификации борсодержащих энергоемких конденсированных составов в высокоэнгальпийном воздушном потоке // Физика горения и взрыва, Т. 53, № 3, 2017. С. 42–52.
3. Лю Ц.Ч., Лян Д.Л., Сяо Ц.У., Чэнь Б.Х., Чжан Я.В., Чжоу Ц.Х., Цэнь К.Ф. Состав и характеристики первичных продуктов горения топлив на основе бора // Физика горения и взрыва, Т. 53, № 1, 2017. С. 64–74.
4. Глотов О.Г., Зырянов В.Я. Конденсированные продукты горения алюминизированных топлив. I. Методика исследования эволюции частиц дисперсной фазы // Физика горения и взрыва, Т. 31, № 1, 1995. С. 74–80.

ГОРЕНИЕ ПОРИСТЫХ ЧАСТИЦ ТИТАНА И СМЕСЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ С НИМИ

**Глотов О.Г.^{1,2)}, Корчагин М.А.^{3,2)}, Белоусова Н.С.^{1,2)}, Беляева Д.Ю.^{1,2)},
Сухоруков А.В.^{1,2)}, Трубина С.В.^{1,2)}**

¹⁾ Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск

²⁾ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

³⁾ Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Пористые осференные частицы титана с размерами в десятки-сотни микрометров были получены посредством механоактивационной обработки в шаровой мельнице АГО-2 и могут рассматриваться как новый тип титанового металлического горючего. С использованием нескольких методов определена эффективная плотность пористых частиц в зависимости от их размера в диапазоне 80–760 мкм. На практике удобно пользоваться формулой $D = D_{\text{поро}} / (1.253 - D_{\text{поро}} \times 1.559 \times 10^{-4})$, связывающей видимый начальный диаметр пористой частицы $D_{\text{поро}}$ и диаметр монокристаллической сферы D , которая получается в результате плавления пористой частицы. В работе представлены результаты двух типов экспериментов. Первый тип связан с горением крупных (сотни микрометров) одиночных частиц в свободном падении в воздухе. Эти эксперименты по постановке аналогичны проведенным ранее с титановыми агломератами [1] и с агломератами Al+V [2]. Основные результаты – характерные времена процесса (время начала фрагментации, время окончания фрагментации, время горения), а также характеристики конденсированных продуктов горения. Некоторые предварительные результаты были сообщены в [3]. Второй тип экспериментов связан с исследованием характеристик горения смесевых композиций. Композиции включали 20% Ti варьированной дисперсности (пористого или, для сравнения, обычного), 20% активного связующего и 60% ПХА. Определены скорости горения, а также характеристики конденсированных продуктов горения. Эксперименты с композициями проведены в двух вариантах: (1) В сосуде высокого давления (бомбе) при 0.35 МПа в азоте с гашением и отбором частиц, вылетающих с поверхности образца. Факел образца направлен вниз, частицы отбираются в сосуд с дистиллированной водой, помещенный внутрь бомбы. Расстояние от поверхности образца до поверхности воды 1.5 см. (2) В воздухе при атмосферном давлении. Факел образца направлен вверх, отбор продуктов горения производится в поддон диаметром 24 см. В первом варианте определяются характеристики титановых агломератов, покидающих поверхность горения. Во втором варианте исследуются характеристики финальных продуктов агломератов, горевших в избытке воздуха без принудительного гашения. Представлены данные о скоростях горения и о характеристиках продуктов горения (морфологический состав частиц и распределение частиц по размерам) в каждом из вариантов экспериментов. Дополнительно исследовали влияние модификации пористых частиц титана на указанные характеристики горения. Модификацию осуществляли посредством замачивания частиц в насыщенном водном растворе ПХА с последующим высушиванием. В зависимости от дисперсности частиц, массовая доля ПХА, введенного в частицы титана, составляла 2.4–2.7%.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-03-00294 и проекта № 20-33-90208 («аспиранты» {Белоусова Н. С.}).

Список литературы

1. Глотов О.Г. Горение сферических титановых агломератов в воздухе. I. Экспериментальный подход // Физика горения и взрыва, Т. 49, № 3, 2013. С. 50–57.
2. Глотов О.Г., Суродин Г.С. Горение свободно падающих в воздухе агломератов из алюминия и бора. I. Экспериментальный подход // Физика горения и взрыва, Т. 55, № 3, 2019. С. 100–109.
3. Glotov O.G., Belyaeva D.Y., Belousova N.S., Korchagin M.A. Combustion characteristics of large porous titanium particles falling freely in air // Nonequilibrium Processes: Recent accomplishments. S. M. Frolov, A. I. Lanshin (Eds.). Moscow: Torus Press. 2020. pp. 93-96. DOI: 10.30826/NEPCAP9A-28.

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УГЛЕЙ И УГЛЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

Голубев В.А., Платов И.В.

ООО «ПроЭнергоМаш-Проект», г. Барнаул

Вовлечение углей, включая низкосортные, местные и углесодержащие отходы, в топливный баланс предприятий требует разработки высокоэффективных технологий их подготовки и переработки. В качестве первого примера рассматривается технология [1] внутрицикловой термоконтактной обработки углей с использованием горячих циркулирующих частиц в многоцелевых котлах циркулирующего кипящего слоя с наклонным экраном. Котлы позволяют с повышенной экономичностью перерабатывать влажные топлива и отходы по разомкнутой схеме с выдачей не только тепловой энергии, выжженной золы, но и сухого топлива или кокса. Пары влаги топлива не балластируют дымоходы и дымосос, снижая потери тепла с уходящими газами, типоразмер дымососа и затраты электроэнергии на его привод. Теплота конденсации паров влаги топлива полезно используется в цикле водоподготовки.

Вторая схема касается термообработки топлив в транспортёре с обогревающими рубашками [2]. Опыты с термоконтактной сушкой показали высокую эффективность применения данной схемы, так как выделяющиеся пары влаги можно легко сконденсировать с полезным использованием тепла. Активное перемешивание и хороший контакт топлива с горячей рубашкой транспортёра обеспечивают повышенную интенсивность термообработки. Схема применима при переводе типовых котлов на нерасчетные, в том числе низкосортные топлива путем их переработки или сушки в предвключенной установке, расположенной между бункером топлива и котлом.

Важным также является широко исследованное в лабораторных опытах и на промышленных установках направление переработки углей в специальные виды кокса с выработкой тепловой энергии в виде пара или горячего теплоносителя. Разработанные установки термоокислительного коксования экономичны, экологически эффективны, обеспечивают высокие показатели выхода и качества кокса, имеют различные варианты исполнения в соответствии с типами применяемого сырья, в том числе с сопутствующим производством горючего газа и выделением жидких горючих фракций, и их переработкой.

Подготовленная при термической переработке угля масса может брикетироваться и использоваться в качестве спецкокса и/или основы для создания брикетов бездымного топлива. В опытах с пробами бурого угля были получены [3] качественные, плотные и прочные брикеты.

В целом предлагаемые схемы с глубокой термической переработкой являются перспективным направлением, так как позволяют организовать эффективное использование не только качественных, но и низкосортных углей, накопленных терриконов, отвалов из угольных разработок и других углесодержащих отходов. На сегодня имеются как действующие промышленные объекты, так и опытно-промышленные установки модульного типа, позволяющие еще на этапе технико-экономического обоснования предложить Заказчику не только технологию, но и дать надежно обоснованную оценку ее экономической эффективности.

Список литературы

1. Пат. 2675644. Котел с циркулирующим слоем / Е.М. Пузырев, В.А. Голубев, М.Е. Пузырев; заявл. 18.10.17; опубл. 21.12.18, Бюл. № 36.
2. Пат. 2716656. Котлоагрегат / Е.М. Пузырев, В.А. Голубев, И.В. Платов; заявл. 03.06.19; опубл. 13.03.20, Бюл. № 8.
3. Development of In-Cycle Systems for Preparation and Recycling of Coal and Coal-Containing Wastes/Vadim A. Golubev, Ivan V. Platov and Evgenij M. Puzyrev // AIP Conf. Proc. 2337, 040002-1-040002-4; <https://doi.org/10.1063/5.0046612>.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОРИСТЫХ ГОРЕЛОК ПРИ СЖИГАНИИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ**Гончаренко Ю.Б.¹⁾, Кулик А.В.¹⁾, Цой К.А.¹⁾, Пономарева А.А.²⁾**¹⁾ Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия²⁾ Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

Основная проблема пылеугольных электростанций Дальнего Востока в использовании широкой гаммы углей с характеристиками, отличающимися от проектных. Задачу, которую предполагается решить, можно разделить на два этапа. Первое- обеспечение устойчивого воспламенение пылеугольного потока, из «холодного» состояния котла, без использования мазута для подсветки факела и изменения конструкции системы пылеприготовления и горелочных устройств. Вторая задача- ведение устойчивого режима горения во всем диапазоне нагрузок котла, с обеспечением оптимального режима горения и заданных параметров пара. Частична газификация объектов энергетики ДФО и запуск завода по переработке природного газа позволяют рассматривать в качестве растопочного топлива природный и сжиженный газ.

Многолетние исследования процессов горения в пористых средах позволили разработать эффективное устройство для сжигания газа с выдачей максимального радиационного теплового потока при полном отсутствия химического недожога. Первые лабораторные исследования по вводу аэросмеси в зону излучения пористой горелки показали возможность устойчивого воспламенения, при этом необходимо отметить, что потоки были разделены кварцевой стенкой, то есть горение обеспечивалось бесконтактным методом [1].

Для получения граничных условий по скорости и концентрации угольной пыли, а также условий работы пористой горелки и эмиссионных характеристик сгенерированного пылеугольного факела создана уникальная экспериментальная установка.

Радиационный поток воздействует на кварцевую трубку, внутри которой двигаются частицы угольной пыли, проходящие все стадии термического разложения. Поток излучения направлен ортогонально движению частиц, что позволит активно применять оптические методы измерения температуры угольных частиц, их плотности и других характеристик.

Необходимо отметить особенности организации горения газа в пористой структуре. Основной задачей является обеспечение устойчивой волны горения внутри стенки пористого цилиндрического тела [2]. Для этого разработана система встречной подачи предварительно перемешанных потоков с зажиганием внутри цилиндра. Такая система позволяет эффективно регулировать скорость распространения волны горения и обеспечивать максимально возможный тепловой поток с поверхности пористого тела [3]. Угольная пыль подавалась потоком воздуха по кварцевой трубке, расположенной на некотором расстоянии от пористой горелки, а анализ продуктов реакции горения проводился на выходе из золоуловителя включая газовый анализ и содержание горючих веществ в очаговых остатках.

По результатам математического моделирования аэродинамики и верификации модели с экспериментальными данными разработан проект угольной горелки для контактного воздействия излучения пористого тела на поток аэросмеси.

Список литературы

1. Ponomareva A., Tsoi K., Shtym K. Estimation of time parameters of coal particle combustion in airflow under thermal radiation. В сборнике: 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2020). 2020. С. 1236–1239.
2. Смеситель газозооушной смеси радиационной газовой горелки. Цой К.А., Мазной А.С., Штым К.А., Минаев С.С., Кирдяшкин А.И. Патент на полезную модель RU 197125 U1, 02.04.2020. Заявка № 2019143964 от 26.12.2019.
3. Цой К.А., Мазной А.С., Штым К.А., Кихайогло Е.Ф. экспериментальное исследование противоточной горелки с пористой оболочкой. Динамика многофазных сред. тезисы XVI Всероссийского семинара с международным участием. 2019. С. 174–176.

РЕЖИМЫ ОБЕДНЕННОГО ГОРЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННОГО ГАЗОВОГО ТОПЛИВА В РАДИАЛЬНОЙ ГОРЕЛКЕ

Гореликов Е.Ю.^{1,2)}, Литвинов И.В.^{1,2)}, Шторк С.И.^{1,2)}

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

²⁾ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

На сегодняшний день совершенствование технологий горения в значительной степени направлено на сокращение выбросов NOx при одновременном повышении энергоэффективности горелочных устройств. Реализация оптимального устройства смешения топливно-воздушной смеси, влияние нестационарных вихревых структур на процесс горения и акустический шум в горелочном устройстве остаются научными проблемами энергетики, основанной на эффективном и, главное, экологичном сжигании газовых углеводородов [1].

На рис. 1 представлена схема горелочного устройства, которое обладает низкой эмиссией оксидов азота, т.к. предназначено для сжигания обедненной предварительно перемешанной топливно-воздушной смеси с формированием нестационарных вихревых структур. Управление стехиометрией смешения осуществляется с помощью высокоточных контроллера массового расхода пропана и ультразвукового расходомера воздуха. Управление углом атаки лопаток завихрителя, определяющего интенсивность закрутки потока, осуществляется в полностью автоматизированном режиме с помощью шагового двигателя и оригинального программного обеспечения. Это позволяет точно задавать параметр крутки, варьировать режимы горения в широких пределах режимов.

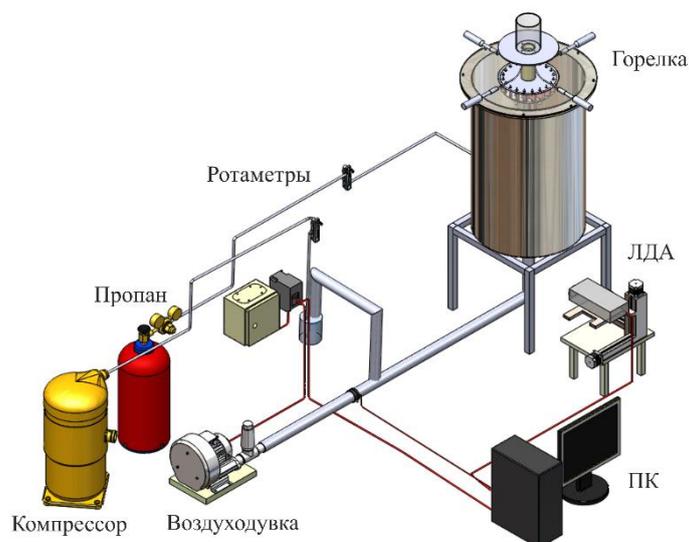


Рис. 1. Схема экспериментального горелочного устройства.

В работе представлены результаты экспериментального исследования аэродинамики предварительно перемешанной топливно-воздушной смеси при варьировании режимов течения, условий закрутки при изотермических и реагирующих условиях. Распределения средних и пульсационных полей скоростей, в том числе, привязанных к фазе прецессирующего вихря, а также анализ пульсаций давления, индуцируемых прецессирующим вихрем.

Работа поддержана РФФ (грант № 21-19-00769).

Список литературы

1. Syred N. A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems //Progress in Energy and Combustion Science. – 2006. – Т. 32. – № . 2. – С. 93–161.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ НАНОЧАСТИЦ САЖИ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ**

Гуренцов Е.В.¹⁾, Дракон А.В.¹⁾, Еремин А.В.¹⁾, Колотушкин Р.Н.¹⁾,
Михеева Е.Ю.^{1,2)}, Ходыко Е.С.^{1,2)}

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

²⁾ МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Данные об оптических свойствах сажевых наночастиц необходимы для расчетов величины поглощения солнечного света аэрозолями, находящимися в атмосфере и на поверхности льдов, для расчетов радиационного теплообмена в процессах горения, для оценки качества технического углерода и т.д. [1]. Известно, что оптические свойства сажи, образующейся при горении и пиролизе углеводородов, существенно зависят от стадии их формирования, от условий синтеза таких как температура, давление, вид топлива, конструкция реактора [2].

В данном исследовании наночастицы сажи синтезировались при горении этилена, ацетилен и пропилен в плоском предварительно-перемешанном атмосферном пламени и при пиролизе этих же углеводородов в ударной трубе при температурах 1800–2000 К и давлении 3–4 атм. Для измерения оптических свойств сажевых наночастиц был использован метод лазерно-индуцированной инкандесценции (ЛИИ) [3], основанный на их быстром лазерном нагреве и последующем анализе возникающего теплового излучения. С помощью метода ЛИИ были извлечены значения функции коэффициента преломления сажи $E(m)$ на длине волны 1064 нм и отношения значений функции коэффициента преломления на длинах волн 1064 и 532 нм. Эти данные позволили определить спектральный коэффициент поглощения сажи в видимом и ближнем ИК диапазоне спектра в зависимости от высоты пламени, от размеров наночастиц и от вида углеводорода.

Структура и размеры наночастиц сажи были исследованы при помощи просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. С помощью разработанного алгоритма обработки изображений были выделены «скелетонизированные» изображения структуры сажевых наночастиц, состоящих из графеновых плоскостей, видимых с торца. При помощи статистической обработки этих изображений были получены параметры внутренней структуры сажевых частиц такие как средняя длина графеновых плоскостей, кривизна графеновых плоскостей и среднее расстояние между параллельными плоскостями, которые образуют составляющие наночастицы «кристаллиты». Получены зависимости параметров внутренней структуры этиленовой, ацетиленовой и пропиленовой сажи, синтезированной в различных реакторах от их стадии формирования и размеров сажевых наночастиц. Найдена корреляция изменения оптических свойств сажевых наночастиц и межплоскостного расстояния в «кристаллитах» сажи. Показано, что при увеличении количества «кристаллитов» и уменьшении расстояний между их плоскостями, коэффициент поглощения сажи увеличивается. Данный процесс «графитизации» сажевых частиц протекает при увеличении высоты пламени (времени реакции) или при увеличении размера сажевых наночастиц.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда,
грант № 19-79-10204.*

Список литературы

1. Sorensen C. M. Light Scattering by Fractal Aggregates: A Review // *Aerosol Sci. Technol.* 2001. V. 35. P. 648–687.
2. Dobbins R.A., Mulholland G.W., Bryner N.P. Comparison of a fractal smoke optics model with light extinction measurements // *Atmos. Environ.* 1994. V. 28. P. 889–897.
3. Gurentsov E. A review on determining the refractive index function, thermal accommodation coefficient and evaporation temperature of light-absorbing nanoparticles suspended in the gas phase using the laser-induced incandescence // *Nanotechnology Reviews.* 2018. V. 7. P. 583–604.

ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РАДИАЦИОННЫХ ПОРИСТЫХ ГОРЕЛОК С ОСЕВОЙ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВАДац Е.П.^{1,2)}, Минаев С.С.^{1,3)}¹⁾ Институт прикладной математики ДВО РАН, г. Владивосток, Россия²⁾ Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, г. Владивосток, Россия³⁾ Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

Разработка эффективных и экологически приемлемых источников тепловой энергии на основе сжигания газа - актуальная проблема в энергетике. Горение газа в пористой среде является одним из эффективных способов сжигания газообразного топлива. Горение в этом случае происходит внутри пористого тела. Тепло от зоны горения передается по пористому каркасу в сторону газового потока и нагревает смесь исходных реагентов. Пористые горелки характеризуются возможностью сжигания бедных топливно-воздушных смесей, смеси, широким диапазоном регулирования, высокой удельной производительностью и низким уровнем выбросов [1]. В настоящем исследовании представлено теоретическое исследование нового типа пористой горелки с осевым потоком газа [2]. Фильтрационное горение происходит в пористой горелке в форме полого цилиндра с подачей горючей смеси через торцевую поверхность. Такая конфигурация горелки позволяют применять их для термической подготовки низкокалорийных топлив, которые подаются в цилиндрический канал с непроницаемыми стенками и нагреваются инфракрасным излучением от пористого каркаса горелки. Внешняя поверхность пористого реактора теплоизолирована. Излучение с внутренней поверхности пористой среды позволяет нагревать помещенный внутрь материал. Эта схема фильтрационного сжигания газа может быть использована при создании химических реакторов для бесконтактного нагрева различных материалов до высоких температур.

Моделирование горения в пористой среде осуществлялось с использованием метода конечных элементов в среде Comsol Multiphysics в рамках двух-температурной термодиффузионной модели [3]. Численные расчеты позволили изучить влияние размеров пористой горелки, тепловых потерь на внутренней поверхности и скорости подачи смеси на стабилизацию фронта горения внутри пористой среды. Было показано, что при определенной скорости подачи смеси устойчивый режим горения существует максимум радиационного потока во внешней полости реактора. Полученные при этом высокие значения температуры внутренней поверхности позволяют сделать вывод о том, что горелка данного типа может быть применена для создания эффективного реактора.

Работа выполнена при финансовой поддержке министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2020-80).

Список литературы

1. Fursenko R., Maznoy A., Odintsov E., Kirdyashkin A., Minaev S., Sudarshan K. Temperature and radiative characteristics of cylindrical porous Ni–Al burners // International Journal of Heat and mass Transfer. – 2016. – V. 98. – P. 277–284.
2. Dats E. P., Minaev S.S., Kirdyashkin A.I. Filtration combustion inside a porous cylindrical pipe with axial gas flow // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1404. – P. 012056.
3. Fursenko R., Minaev S., Maruta K., Nakamura H., Yang H. Characteristic regimes of premixed gas combustion in high-porosity microfibrinous porous media // Combustion Theory and Modelling. – 2010. – V. 14, № 4. – P. 571–581.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА СИСТЕМЫ ЧАСТИЦ С ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИЕЙ В ОДНОРОДНОЙ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ИЗОТРОПНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Деревич И.В., Клочков А.К.

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана, Россия

Рассматривается влияние флуктуаций температуры и скорости частиц на потерю тепловой стабильности системы частиц с экзотермической химической реакцией, проходящей в объеме частиц. Частицы взвешены в турбулентном потоке газа. Изучается момент достижения частицами критической температуры, после которой наступает экспоненциальный рост температуры. Выделяются два типа теплового взрыва: тепловой взрыв одиночной частицы и системы частиц, когда изменение температуры среды происходит в результате коллективных тепловых эффектов.

В объеме частиц выделяется тепло в результате экзотермической химической реакции. Скорость реакции моделируется законом Аррениуса. Учитывается радиационный перенос тепла в системе газ – частицы. Влияние силы тяжести не учитывается. Объемная концентрация дисперсной примеси мала и столкновением частиц между собой пренебрегается. Массовая концентрация примеси порядка единицы. Концентрация частиц в объеме постоянна. Частицы взвешены в поле однородной изотропной неизотермической турбулентности. Изменением концентрации окислителя в процессе прогрева и достижения границы потери тепловой стабильности системы пренебрегается. В работе изучается процесс экспоненциального роста температуры частиц, то есть теплового взрыва, обусловленного потерей тепловой стабильности. Флуктуации скорости и температуры газа на траектории частицы описываются случайным процессом Гаусса с экспоненциально затухающими автокорреляционными функциями. Получено замкнутое уравнение для функции плотности вероятности координат, скорости и температуры частиц с учетом тепловыделения. Это прямое уравнение Колмогорова. Турбулентные параметры газа рассчитываются на основе модернизированной двухпараметрической модели турбулентности, учитывающей обратное влияние инерционных и тепловыделяющих частиц на интенсивность флуктуаций скорости, температуру и флуктуации температуры несущего газа. В рамках подхода Эйлера численно решается сопряженная система уравнений двухпараметрической модели турбулентности и уравнений для первых и вторых моментов флуктуаций скорости и температуры дисперсной фазы. Показано, что в турбулентном потоке флуктуации температуры несущего газа приводят к тепловому взрыву в условиях, когда в детерминированном случае система абсолютно стабильна. Исследовано влияние массовой концентрации примеси, числа Стокса частиц, интенсивности тепловыделения и числовой плотности частиц на границу начала теплового взрыва. На основе обратного уравнения Колмогорова, сопряженного прямому уравнению, рассчитывается время ожидания теплового взрыва. Это время трактуется как среднее время первого пересечения случайной температурой частицы критического уровня, после которого наступает тепловой взрыв.

Список литературы

1. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва – М.: Наука, 1980. – 478 с.
2. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике – М.: Наука, 1987. – 502 с.
3. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ – М.: Физматлит, 2003. – 352 с.
4. Гардинер К.В. Стохастические методы в естественных науках – М.: Мир, 1986. – 528 с.
5. Деревич И.В., Галдина Д.Д. Влияние временной структуры флуктуаций температуры газа на воспламенение мелкодисперсных частиц // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, № 6. С. 935–949.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА И ВУТ**Дектерев А.А.^{1,2)}, Кузнецов В.А.^{1,2)}**¹⁾ Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия²⁾ Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Несмотря на ужесточающиеся экологические требования, угольное топливо в ближайшие десятилетия будет так же широко использоваться в энергетике. Поэтому весьма важно совершенствовать существующие технологии сжигания угля и разрабатывать новые технологии, позволяющие снизить выбросы экологически вредных веществ. Использование математического моделирования дает возможность оперативно проводить исследования по изучению таких технологий и определять целесообразность и широту их проработки для внедрения. В институте 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. В последние годы был проведен комплекс расчетно-экспериментальных исследований по совершенствованию устройств и процессов пылеугольного факельного горения [1, 2], горения водоугольного топлива [3–6], совместного сжигания угольного и газового топлива. [7, 8]. Доклад посвящен опыту математического моделирования различных подходов при сжигании угольного топлива.

Расчетные исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (номер рег. 121031800229-1).

Список литературы

1. Alekseenko, S.V., Anufriev, I.S., Dekterev, A.A., Naumov, I.V., Kabardin, I.K. Investigation of transfer processes in swirling flows in application to vortex furnaces for coal fuel. *International Journal of Thermal Sciences* this link is disabled, 2021, 161, 106715.
2. Dekterev, A., Kuznetsov, V. Investigation of pulverized coal flaring based on eddy-resolving turbulence models. *Journal of Physics: Conference Series* this link is disabled, 2020, 1677(1), 012104.
3. Kuznetsov, V., Maltsev, L., Dekterev, A. Numerical simulation of combined combustion of coal-water and pulverized coal fuel. *Journal of Physics: Conference Series* this link is disabled, 2020, 1677(1), 012109.
4. Kuznetsov, V., Maltsev, L., Dekterev, A. Numerical investigation of coal-water fuel combustion in two-chamber furnace of a low-power boiler. *Journal of Physics: Conference Series* this link is disabled, 2020, 1677(1), 012110.
5. Алексеенко С.В., Дектерев А.А., Кузнецов В.А., Мальцев Л.И., Кравченко И.В. способ оптимизации капельно-факельного сжигания водоугольного топлива в вихревом потоке. Патент на изобретение RU 2717868 С1, 26.03.2020. Заявка № 2018143591 от 10.12.2018.
6. Alekseenko S.V., Kuznetsov V.A., Mal'tsev L.I., Dekterev A.A., Chernetskii M.Y. Analysis of combustion of coal-water fuel in low-power hot-water boiler via numerical modeling and experiments. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2019. Т. 28. № 2. С. 177–189.
7. Butakov, E.B., Kuznetsov, V.A., Minakov, A.V., Dekterev, A.A., Alekseenko, S.V. Numerical study of diffusion combustion of pulverized coal in a gas jet. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics* this, 2021, 62(3), стр. 484–489.
8. Kuznetsov, V., Dekterev, A., Minakov, A. Numerical study of the processes of co-combustion of pulverized coal and gas fuel based on nonstationary methods of turbulence modeling. *Journal of Physics: Conference Series* this link is disabled, 2021, 1867(1), 012011.

ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ГАЗОВОГО ГОРЕНИЯ**Дектерев Ар.А.¹⁾, Дектерев А.А.^{1,2)}, Минаков А.В.^{1,2)}**¹⁾ Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия²⁾ Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Процессы горения очень широко распространены в природе и технике. Во многих промышленных областях таких как металлургия, электрообеспечение, теплоснабжение, транспорт используются процессы газового горения. Развитие и повышение эффективности таких систем невозможно без детального исследования процесса горения и сопряженных процессов. Экспериментальные исследования комплексных процессов очень дорогостоящи, занимают много времени и зачастую являются недоступными при проектировании и оптимизации технологических систем. Поэтому все большее распространение в промышленности получают методы вычислительной гидродинамики.

Данная работа посвящена разработке и тестированию методики численного моделирования процессов газового горения, а также ее применения для решения прикладных задач. Моделирование газового горения – одна из сложнейших задач для вычислительной гидро-газодинамики, поскольку это сложный комплексный процесс, определяющийся совместным действием тепло и массообменных и химических процессов в турбулентных потоках многокомпонентных газовых смесей. Для адекватного моделирования газового горения совокупность всех этих процессов требует аккуратного воплощения в вычислительной модели.

Параметры потока и турбулентные характеристики определялись на основе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, замыкаемых как двухпараметрическими моделями турбулентности, так и вихреразрешающими моделями (LES). Для газового горения использовались различные модели и подходы. Для каких-то случаев достаточно гибридной модели, по которой скорость реагирования рассчитывается на основе глобального механизма реагирования и скорости турбулентного перемешивания компонент. Для части задач целесообразным является применение более сложной и ресурсозатратной модели eddy dissipation concept (EDC) с применением редуцированных или даже детальных механизмов реагирования. Для сильнозакрученных пламен, требующих нестационарных вихреразрешающих моделей турбулентности и детальной химической кинетики применялась наиболее передовая модель с предварительным табулированием химии flamelet generated manifolds (FGM). Радиационный теплообмен учитывался с помощью модели дискретных ординат, коэффициент поглощения газа рассчитывался по модели взвешенных серых газов.

Для верификации моделей и алгоритмов были проведены расчеты для задач аэродинамики, задач горения струйных пламен и горения в условиях камер сгорания ГТУ. Результаты моделирования показали достаточно хорошее совпадение с экспериментальными данными [1–3].

Комплексная методика расчета была успешно применена при расчетах горелочных устройств для сжигания влажного попутного газа при нефтегазодобыче. Также наработки применялись для моделирования и оптимизации процесса дожигания анодных газов в укрытиях.

Список литературы

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

ТЕРМИЧЕСКОЕ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ И УТИЛИЗАЦИЯ ОРГАНОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ, НАХОДЯЩИХСЯ В РАЗЛИЧНЫХ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЯХ

Делягин В.Н.¹⁾, Иванов Н.М.¹⁾, Мурко В.И.²⁾

¹⁾ Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, рп. Краснообск, Россия

²⁾ Сибирский государственный индустриальный университет, г.Новокузнецк, Россия

Крупные животноводческие комплексы и птицефабрики в современных условиях остаются одними из наиболее мощных загрязнителей окружающей среды. Ежесуточный сброс отходов крупного комплекса составляет: твердая фракция 50...70 т, жидкая – 1000...3000 т, газообразная 1000 т. Наиболее эффективный - термический способ утилизации отходов, использующий качественное топливо – не эффективен для утилизации многокомпонентных смесей.

Обоснован новый метод утилизации отходов, находящихся в различных агрегатных состояниях на основе использования композитного водоугольного топлива (ВУТ) приготовленного из отходов углеобогащения и жидкой фракции отходов. В качестве дутья используется вентиляционные выбросы производственных помещений. Твердая фракция отходов подается непосредственно для сжигания в топочное пространство вихревой адиабатической топки [1].

Разработан рабочий макет вихревой адиабатической топки мощностью 700 кВт и проведены экспериментальные исследования по отработке рациональных режимов утилизации и обеззараживания органосодержащих отходов, находящихся в различных агрегатных состояниях.

Использование отходов углеобогащения и отходов жизнедеятельности животных по предложенной технологической схеме позволяет обеспечить утилизацию отходов животноводческого комплекса: твердых – 100%, газообразных – 100% и жидких – от 40 до 60%. от объемов выбросов. Для предложенной схемы утилизации отходов с исходной влажностью до 70% требуется соотношение подачи ВУТ и твердой части отходов (влажностью 70%) 3:1. Сокращение данного соотношения до (1.2–1.1):1 может обеспечить стабилизация горения с использованием низкотемпературной плазмы [2]. При данных показателях технологического процесса обеспечивается устойчивое горение рабочей смеси в адиабатической топке.

Проведена оценка эффективности инвестиций для термической утилизации отходов на основе разработанного метода утилизации и существующего оборудования котельных мощностью 20–30 МВт. в соответствии с методикой [3]. Срок окупаемости проекта по утилизации и обеззараживанию отходов животноводческого комплекса с использованием теплоэнергетического комплекса составляет 2,4–3 года. Чистый дисконтированный доход за период проекта (30 лет) 600–700 млн руб (время использования максимума нагрузки 5500 ч/год и 8760 ч/год).

Список литературы

1. Делягин В. Н. Использование водоугольного топлива в энергообеспечении АПК [Текст]: монография/Делягин В.Н., Мурко В.И., Иванов Н.М., Ревякин Е.Л. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2013. – 92 с.
2. Use of low – temperature plasma for stabilizing a combustion process under the utilization of waste products with high moisture content. V N Delyagin, N M Ivanov, A N Karzanov, V I Bocharov and A A Kondratev // Published under licence by IOP Publishing Ltd, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 941, The International Scientific and Practical Conference «Modern Problems of Ecology, Transport and Agricultural Technologies» 26–27 June 2020. Barnaul, Russia.
3. Методика определения предотвращенного экологического ущерба [Электронный ресурс]: утв. Председателем Государственного комитета Российской Федерации по охране окружающей среды В.И. Даниловым-Данильяном 30 ноября 1999 г. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПОДАВЛЕНИЯ САЖИ ОКИСЬЮ ПРОПИЛЕНАДмитриев А.М.^{1,2)}, Осипова К.Н.^{1,2)}, Князьков Д.А.^{1,2)}, Шмаков А.Г.^{1,2)}¹⁾ Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск, Россия²⁾ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Уменьшение вредных выбросов и глобальное снижение экологической нагрузки является одной из ключевых задач развития современных двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Одним из наиболее жизнеспособных способов решения данной проблемы является переход на новые виды топливных смесей, которые смогут обеспечить необходимый баланс между экологией, экономикой и энергоэффективностью.

Одной из перспективных топливных добавок является окись пропилена СЗН6О, которая производится в больших объемах в химической промышленности. Ранее в натурных испытаниях было показано, что присадка окиси пропилена (0,04% об.) к дизельному топливу снижает дымность выхлопных газов ДВС на 30% и уменьшает расход топлива почти на 9% [1]. Однако для точного подбора состава и широкого применения подобных смесей необходимо установление механизма влияния СЗН6О на образование полиароматических соединений (ПАУ) и сажи в пламени. Таким образом, целью данной работы стало определение химического механизма подавления сажеобразования в пламени модельного дизельного топлива.

В работе исследованы пять ламинарных предварительно перемешанных пламен смесей н-гептан/толуол (7:3 об.) с различной добавкой окиси пропилена. Пламена стабилизировались на плоской горелке при атмосферном давлении. Все топливные смеси имели одинаковый коэффициент избытка горючего $\varphi=1,6$. Методом молекулярно-пучковой масс-спектрометрии были измерены профили мольной доли ключевых ПАУ и прекурсоров сажи в пламенах с разной долей СЗН6О. Помимо этого проведено численное моделирование химической структуры исследуемых пламен на основе измеренных профилей температуры и предложенных в литературе кинетических механизмов окисления окиси пропилена [2] и смеси н-гептан/толуол [3].

Было показано, что увеличение доли СЗН6О в топливной смеси приводит к уменьшению максимальной мольной доли прекурсоров сажи в пламени, а также к сужению зоны основных реакций. При этом максимальная температура пламен с увеличением добавки почти не менялась. Численный анализ путей превращений измеренных веществ и СЗН6О в пламенах позволил выделить ключевые реакционные пути, ответственные за влияние окиси пропилена на сажеобразование в данной системе. На основе полученных результатов предложены рекомендации по оптимальному использованию данной присадки в смесях с дизельным топливом.

Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2020-806 (контракт № 13.1902.21.0014).

Список литературы

1. Цыганков Д.В., Мирошников А.М., Текутьев И.Б. Изучение окиси пропилена в качестве добавки к моторному топливу. 2013. № 3. Р. 114–116.
2. Knyazkov D.A. et al. Structure of premixed flames of propylene oxide: Molecular beam mass spectrometric study and numerical simulation // Proceedings of the Combustion Institute. 2021. Vol. 38, № 2. P. 2467–2475.
3. Dirrenberger P. et al. Laminar burning velocity of gasolines with addition of ethanol // Fuel. 2014. Vol. 115. P. 162–169.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АГЛОМЕРАЦИИ СМЕСЕЙ ДРЕВЕСНЫХ ОПИЛОК И ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ГРАНУЛ ПРИ СЛОЕВОМ ГОРЕНИИ

Донской И.Г., Козлов А.Н., Свищев Д.А., Пензик М.В.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

Термическая переработка отходов (лесопереработки, сельскохозяйственных, бытовых) требует разработки новых способов их конверсии. Среди методов термической переработки значительное место занимает слоевое сжигание. Биомасса и полимерсодержащие материалы часто демонстрируют сложное термическое поведение. При нагреве и разложении эти топлива вспучиваются, и выделяют большое количество вязких продуктов, которые обладают высокой адгезией. Благодаря этому частицы топлив слипаются, образуя крупные агломераты. При переработке отходов в плотном слое агломерация приводит к формированию клинкеров, снижению проницаемости и образованию прогаров.

В работе экспериментально исследованы особенности агломерации смесей древесных опилок и полиэтилена в условиях внешнего нагрева в плотном слое. Плавление полимера и забивание мелкими частицами приводит к перераспределению потока воздуха и образованию прогаров вблизи стенок. С увеличением доли полиэтилена газовая проницаемость слоя по ходу нагрева ухудшается, из-за плавления (и частичного разложения) полимера скорость горения резко падает. При большом содержании полиэтилена площадь пропускного сечения уменьшается настолько, что воздух развивает скорость, достаточную для уноса частиц. При разложении полимера выделяются компоненты, образующие плотные отложения в системе охлаждения и очистки. Образование прогаров и связанное с ними снижение скорости выгорания качественно согласуется с результатами расчетов.

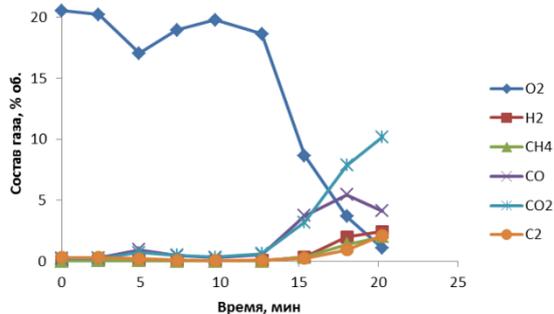


Рис. 1. Внешний вид остатка после сжигания смеси с содержанием полиэтилена 50% масс. (слева); динамика состава газа при сжигании (справа).

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-08-00744.

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛОВ УСТОЙЧИВОГО ДИФФУЗИОННОГО ГОРЕНИЯ МЕТАНА НАД СЛОЕМ ГАЗОВОГО ГИДРАТА

Донской И.Г.¹⁾, Мисюра С.Я.²⁾

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

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

Содержание метана в газовом гидрате составляет около 10% масс. Теоретическая температура горения такого состава оказывается довольно низкой. Однако измерения показывают, что при подходящей организации можно достичь намного большей температуры пламени. Для этого необходимо разделить область диссоциации и область горения (т.е., исключить нагрев воды). С другой стороны, для того чтобы горение было устойчивым, необходимо возвращать в область гидрата часть теплоты сгорания для поддержания скорости диссоциации на нужном уровне. Устойчивость горения гидрата метана естественным образом определяется соотношением тепловыделения и теплопередачи, как в случае горения полимеров и твердых топлив. При горении слоя частиц газового гидрата теплота, воспринимаемая гидратом, расходуется не только на нагрев и разложение частиц, но и на фазовые переходы воды (плавление льда, образование водяного пара). Выделяющийся метан оказывается разбавлен водяным паром, который снижает температуру горения.

В настоящей работе предложена модель стационарного горения метана над порошком газового гидрата. Рассматривается брутто-кинетика окисления метана на фронте диффузионного горения и теплоотдача в пограничном слое (продукты сгорания нагревают слой льда). Устойчивое горение может быть реализовано в том случае, когда существует высокотемпературное решение уравнений теплового баланса и химической кинетики. Варьируемыми параметрами в расчетах являются скорость течения воздуха (которая определяет время пребывания реагентов в зоне смешения и коэффициент теплоотдачи) и доля водяного пара в смеси с метаном, поступающей в надслоевое пространство. Расчеты показывают, что при увеличении скорости движения воздуха над слоем гидрата до критического значения наступает срыв горения, связанный с уменьшением времени пребывания реагентов в слое смешения и увеличением теплоотдачи от газового потока к поверхности гидрата. Сравнение с экспериментальными данными позволяет определить концентрацию водяного пара и составить тепловые балансы горения гидрата.

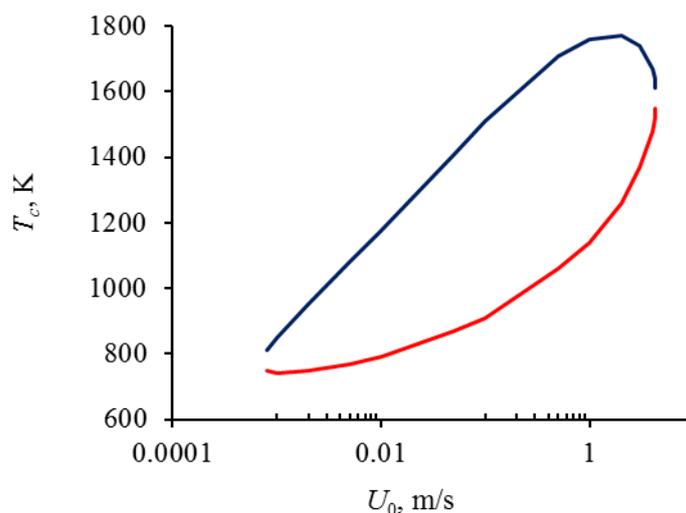


Рис. 1. Зависимость температуры горения от скорости воздуха над слоем гидрата.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования.
Соглашение № 075-15-2020-806 (Контракт № 13.1902.21.0014).

САЖЕОБРАЗОВАНИЕ ПРИ ПИРОЛИЗЕ ЭТИЛЕНА С ДОБАВКАМИ ФУРАНА И ТЕТРОГИДРОФУРАНА

Дракон А.В., Еремин А.В., Коршунова М.Р., Михеева Е.Ю.

Объединенный институт высоких температур Российской Академии Наук

Изучение процессов образования углеродных частиц (сажи) при пиролизе и горении различных углеводородных топлив является актуальной темой исследований последних десятилетий [1]. В связи с их загрязняющими и токсичными свойствами ведутся активные поиски альтернативных видов биотоплив [2, 3]. Предполагается, что наличие в биотопливе атома кислорода увеличивает эффективность процессов окисления, что, в свою очередь, приводит к снижению образования сажевых частиц. Фуран (C_4H_4O) и его производные (тетрогидрофуран C_4H_8O , 2,5 диметилфуран C_6H_8O , фурфурол $C_5H_4O_2$) широко рассматриваются как потенциальные биотоплива, имеющие ряд преимуществ перед биотопливами первого поколения [4, 5].

В данной работе была проведена серия экспериментов по изучению влияния добавок фурана и тетрогидрофурана на сажеобразование при пиролизе этилена за отраженной ударной волной (ОУВ) $p_5=2.13-4.37$ атм, $T_5=1604-2581$ К. Для измерения объемной доли конденсированной фазы применялся метод лазерной экстинкции на длине волны 633 нм. Совместно с измерением образующейся объемной доли конденсированной фазы проводились измерения размеров частиц методом лазерно-индуцированной инкаандесценции (ЛИИ). Для инициирования ЛИИ использовался Nd:YAG лазер на длине волны 1064 нм, для регистрации теплового излучения – ФЭУ с интерференционными фильтрами на 450 и 670 нм.

Были исследованы смеси: 5% C_2H_4 + Ar, 1% C_4H_4O + Ar, 1% C_4H_8O + Ar, 5% C_2H_4 + 0,1/1/2,5% C_4H_4O + Ar, 5% C_2H_4 + 1% C_4H_8O + Ar. Получены температурные зависимости объемной доли конденсированной фазы и размеров образующихся наночастиц. Из полученных зависимостей был сделан вывод, что добавка фурана существенно увеличивает выход сажи при пиролизе этилена. Добавка тетрогидрофурана незначительно увеличила выход сажи при пиролизе этилена в температурном диапазоне $T_5=2238-2581$ К. При пиролизе тетрагидрофурана не обнаружено образования конденсированной фазы. При пиролизе фурана выход сажи зарегистрирован в области более низких температур по сравнению с этиленом. Из температурных зависимостей размеров частиц, полученных с помощью сигналов ЛИИ, было установлено, что добавление фурана и тетрогидрофурана не оказывает существенного влияния на размеры образующихся сажевых частиц. Для анализа полученных экспериментальных данных было проведено кинетическое моделирование в программе Open SMOKE++ [6] с использованием детального газофазного механизма пиролиза и окисления этилена [7], включающего в себя дискретный секционный подход образования углеродных наночастиц.

Список литературы

1. Zhao F., Yang W., Yu W. A progress review of practical soot modelling development in diesel engine combustion // J. Traffic Transp. Eng. (Eng. Ed.). – 2020. – V. 7. – P. 269 – 281.
2. Liu X., Wang H., Yao M., Experimental and modeling investigations on soot formation of ethanol, n-Butanol, 2,5-Dimethylfuran, and biodiesel in diesel engines // Energ. Fuel. – 2017. – V. 31. – P. 12108 – 12119.
3. Mwangi, J. K., Lee W.-J., Chang, Y.-C., Chen C.-Y., Wang L.-C., An overview: Energy saving and pollution reduction by using green fuel blends in diesel engines // Appl. Energy. – 2015. – V. 159. P. – 214 – 236.
4. Tran L.S., Sirjean B., Glaude P.-A. Fournet R., Battin-Leclerc F. Progress in detailed kinetic modeling of the combustion of oxygenated components of biofuels // Energy. – 2012. – V. 43. – P. 4–18.
5. Lange J. -P., E. van der Heide, J. van Buijtenen, Price R. Furfural - A Promising Platform for Lignocellulosic Biofuels // ChemSusChem. – 2012. – V. 5. – P. 150–166.
6. Cuoci A., Frassoldati A., Faravelli T., Ranzi E. OpenSMOKE++: An object-oriented framework for the numerical modeling of reactive systems with detailed kinetic mechanisms // 2015. – Comp. Phys. Commun. – V. 192. – P. 237–264.
7. Pejpichestakul W., Ranzi E., Pelucchi M., Frassoldati A., Cuoci A., Parente A., Faravelli T., Examination of a soot model in premixed laminar flames at fuel-rich conditions // 2019. – Proc. of the Comb. Inst. – V. 37. – P. 1013–1021.

АЛЛОТЕРМИЧЕСКАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Егоров Р.И., Белоногов М.В.

Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Применение возобновляемых растительных топлив, например, рапсового масла ограничено достаточно узкой областью моторных топлив [1]. Разработка методик переработки растительных масел в формы, пригодные для применения в других промышленных цепочках позволит значительно расширить область применения возобновляемых топлив, а также снизить воздействие промышленных выбросов на экологию [2].

Рапсовое масло (РМ) в исходном виде является трудновоспламеняемым веществом, и для превращения в топливо обычно применяется процесс этерификации (реакция с простыми спиртами) дающий на выходе смесь метиловых эфиров высших алифатических кислот [3]. Для применения в промышленной энергетике более привлекательным выглядит конверсия топливной смеси на основе таких масел в генераторный газ [4]. В данной работе исследованы особенности аллотермического процесса термохимической конверсии смеси РМ и торфа в различных соотношениях. Показано, что под действием мощного потока светового излучения может производиться генераторный газ с высоким содержанием горючих компонентов.

На рис. 1 приводится зависимость состава генераторного газа, от концентрации РМ в смеси. Видно, что с ростом доли РМ до 65-67 вес.% растет выработка метана при относительно малых изменениях концентрации оксида углерода. При дальнейшем росте доли масла процесс газогенерации резко замедляется.

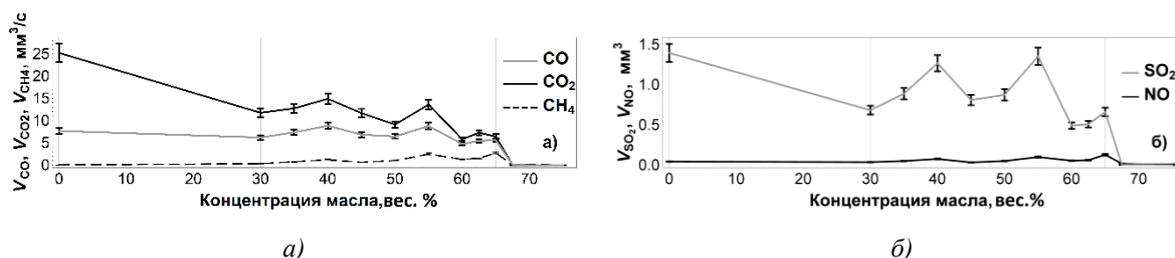


Рис. 1. Зависимость состава продуктов конверсии от времени контакта.

Рассмотрены основные параметры процесса конверсии топливной смеси в зависимости от ее состава, проанализирована динамика изменения температуры и скорости конверсии в сравнении с аналогичным процессом аллотермической переработки торфа. Было показано, что соотношение горючих и негорючих компонентов генераторного газа растет с ростом доли РМ в составе смеси вплоть до 67 вес.%.

Список литературы

1. Demirbas, A., Importance of biodiesel as transportation fuel // Energy Policy. – 2007. – V.35, № 9. – P. 4661–4670.
2. Вершинина К. Ю., Дорохов В. В., Няшина Г.С., Романов Д. С. Экологические и энергетические характеристики горения композиционных топлив на основе торфа, нефти и воды // Химия твердого топлива. – 2019. Т.5. – С. 44–52.
3. Buyukkaya, E., Effects of biodiesel on a di diesel engine performance, emission and combustion characteristics // Fuel. – V.89, № 10. – P. 3099–3105.
4. Zaitsev, A.S., Taburchinov, R.I., Ozerova, I.P., Pereira, A.O., Egorov, R.I. Allothermal gasification of peat and lignite by a focused light flow // Applied Sciences (Switzerland). – 2020. V.10, № 126665.

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ БЕНЗ(А)ПИРЕНА И ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ СЖИГАНИИ БУРЫХ УГЛЕЙ В КОТЛАХ С ЖИДКИМ ШЛАКОУДАЛЕНИЕМ

Елсуков В.К., Латушкина С.В.

Братский государственный университет, г. Братск, Россия

В представленной статье авторами исследуется опыт сжигания канско-ачинских углей (КАУ) на ТЭЦ-6 г. Братска в котлах типа БКЗ-320-140 ПТ. Целью анализа является уточнение условий образования NO_x и БАП и выявление технических решений по комплексному снижению выбросов обоих загрязнителей. Испытания проводились работниками САФ ВНИИпромгаз. Часть опытов отражены в [1].

Результаты испытаний двух котлов (к.а. № 5 и № 7) авторами этой публикации представлены в виде зависимостей концентраций указанных загрязнителей, а также содержания горючих веществ в уносе (Гун), сразу от нескольких параметров: нагрузки котла, числа работающих пылесистем и избытков воздуха. Из сопоставления опытов на к.а. № 5 и № 7 сделаны выводы: 1) наиболее существенно на величину выбросов БАП влияют 2 параметра – схема ввода сушильных газов в камеру горения и избыток воздуха в камере горения; 2) имеется определенная связь выбросов БАП и содержания горючих веществ в уносе: режиму с меньшей концентрацией БАП соответствует и меньшее значение Гун. Из этого следует, что выбросы БАП могут быть снижены мероприятиями, уменьшающими химический и механический недожог (q_3 и q_4), прежде всего, турбулизация топочных газов.

Из проведенного анализа следует, что существующая методика оценки выбросов БАП должна быть уточнена применительно к условиям вихревого сжигания введением дополнительного понижающего коэффициента. В этом случае концентрация БАП будет определяться формулой:

$$C'_{\text{БП}} = C_{\text{БП}} \cdot K_{\text{вг}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{БП}}$ – концентрация БАП, рассчитанная по существующей методике; $K_{\text{вг}}$ – коэффициент, учитывающий число и симметричность тангенциальных вводов дымовых газов (включенных пылесистем), $K_{\text{вг}} \approx 0.1 \div 0.2$ при двух симметрично включенных п.с., $K_{\text{вг}} \approx 0.6$ при одной включенной п.с., $K_{\text{вг}} \approx 0.7$ при 2 несимметрично включенных п.с., $K_{\text{вг}} \approx 1$ при отсутствии включенных п.с.

Воздействие подачи сушильных газов на выбросы NO_x определяется нагрузкой котла и расходом этих газов. Уменьшение выбросов NO_x при малых и средних нагрузках из-за подачи сушильных газов, по мнению авторов, обусловлено образованием вихревого движения и обратного потока части газов в центральной зоне камеры горения [2]. Этот поток поступает в область основных горелок, где снижает температуру горения, концентрации реагирующих компонентов и, соответственно, генерацию NO_x .

Предложены различные технологические мероприятия по комплексному снижению выбросов загрязнителей путем обеспечения вихревого сжигания на котлах как с жидким, так и с твердым шлакоудалением, такие как: обеспечение высокой турбулизации процессов сжигания; организация ступенчатого сжигания угля; регулирование температуры горения при колебаниях качества угля (химического и количественного состава минеральной части, влажности и других характеристик) вводом в область горелок части дымовых газов или водяных паров.

Список литературы

1. Будилов О.И. Опыт улучшения экологических характеристик тепловой электростанции/ О.И. Будилов, А.С. Заворин -Томск: Красное знамя, 1994. – 100 с.
2. Пиралишвили Ш.А., Поляев В.М., Сергеев М.Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения/ Под. ред. А.И.Леонтьева. – М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. – 412 с.

ВЗАИМОВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТОВ МИНЕРАЛЬНОЙ ЧАСТИ КАНСКО-АЧИНСКИХ УГЛЕЙ В ТЕХНОЛОГИЯХ КАМЕРНОГО СЖИГАНИЯ С УЧЕТОМ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ И КИНЕТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Елсуков В.К.

Братский государственный университет, г.Братск, Россия

Указанное взаимовлияние может быть важно при совершенствовании технологий сжигания и золоудаления. В частности, актуальными являются вопросы дополнительного использования золошлаковых отходов в топочных технологиях для снижения шлакования поверхностей нагрева и (или) выбросов загрязнителей окружающей среды.

Частично факторы, определяющие свойства золошлаковых отходов, рассматриваются в различных литературных источниках, в том числе в фундаментальной работе Отса А.А. [1]. Однако в отмеченной работе не рассматриваются перспективы снижения выбросов диоксида серы (SO₂) при сжигании КАУ различных месторождений.

На примере факельного сжигания КАУ в водогрейных котлах типа КВТК-100-150 показана возможность низкотемпературного горения при температурах горения в ядре факела менее 1450 К.

Показано, что выбросы газообразных сернистых соединений при таких температурах резко снижаются в соответствии с термодинамическими зависимостями и могут быть ниже значений ПДВ.

Показана возможность и целесообразность дополнительного использования золы КАУ для снижения выбросов SO₂ путем ее рециркуляции в верхнюю часть топки, рекомендованное в [2].

Показана необходимость учета изменений электрофизических свойств золы, образующейся при сжигании с высокой долей связывания SO₂.

Для реакции связывания диоксида серы, оксида кальция получено кинетическое уравнение

$$n = \frac{1 - e^{-1,5}}{1,5 \cdot K \cdot \tau \cdot m_o^{1,5} \cdot C_o^{1,5} \cdot e},$$

где $n = \frac{C_{CaO}}{C_{SO_2}}$; $m = \frac{C_{O_2}}{C_{SO_2}}$; C, C₀ – соответственно конечная и начальная концентрации вещества

(SO₂); τ- время реакции; K – константа скорости; $e = \frac{C_{(SO_2)}}{C_{O(SO_2)}}$.

На основе приведенного уравнения получены кинетические зависимости параметров реакции связывания SO₂ друг от друга. В частности, оценено влияние изменения количества оксида кальция на выбросы диоксида серы применительно к сжиганию ирша – бородинского угля на котлах с жидким шлакоудалением.

Список литературы

1. Отс А.А. Процессы в парогенераторах при сжигании сланцев и канско-ачинских углей. М.: Энергия, 1977. 312 с.
2. Елсуков В.К., Латушкина С.В. Трансформация и снижение выбросов диоксида серы при сжигании канско-ачинских углей на котлах с жидким шлакоудалением // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 4 (44). С. 61–65.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ КОНГЛОМЕРАТОВ ЧАСТИЦ БОРА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ УСКОРЯЮЩИМСЯ ПОТОКОМ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Еремин И.В., Рашковский С.А., Костюшин К.В., Червакова А.В.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

При создании эффективных вычислительных моделей для численного моделирования многофазной газовой динамики с учетом агломерации частиц бора при горении борсодержащих высокоэнергетических композиций, представляет интерес моделирование движения конгломератов частиц бора. Горящие конгломераты имеют сложную несимметричную форму и сложный состав входящих в них включений, покрытых расплавом перхлората. Предлагается подход позволяющий на основе моделирования получать характеристики обтекания конгломератов произвольной формы, определять условия, приводящие к разрушению горящего конгломерата.

Актуальность проблемы обусловлена перспективами применения высокоэнергетических борсодержащих композиций в качестве перспективных топлив для беспилотных летательных аппаратов (в том числе, гиперзвуковых). Эффективность их применения напрямую зависит от полноты сгорания твердого топлива и его компонент, и определяется размерами, формой, структурой и химическим составом конденсированных продуктов сгорания (в первую очередь, конгломератов частиц бора), образующихся при горении таких композиций.

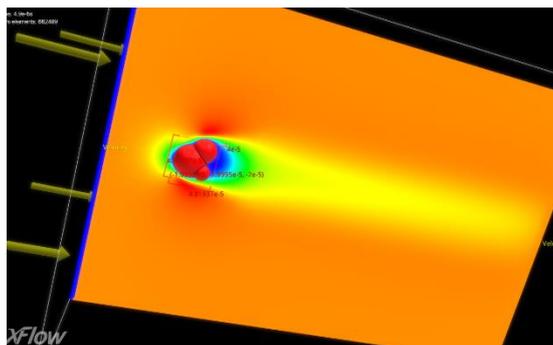


Рис. 1. Структура потока при обтекании конгломерата.

Исследование обтекания конгломератов сложной формы с размерами включений от единиц до сотен мкм проводится на основе пакетов прикладных программ с открытым исходным кодом OpenFOAM и Xflow. Так на рис. 1 представлена структура обтекания конгломерата бора, состоящего из трех включений. Частица обдувается высокотемпературным потоком газообразных продуктов сгорания борсодержащего топлива в условиях камеры сгорания типового ракетного двигателя.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 21-19-00541).

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ВИХРЕВОГО ПИРОЛИЗА ЛУЗГИ ПОДСОЛНЕЧНИКА И ПОЛУЧЕНИЕ БИОУГЛЯ НА СТЕНДОВОЙ УСТАНОВКЕ

Загрудинов Р.Ш.¹⁾, Литвиненко Л.М.²⁾, Никишанин М.С.^{3,4)},
Сеначин А.П.⁴⁾, Сеначин П.К.^{4,5)}

¹⁾ ООО ИЦ «Новые энергетические технологии», г. Рязань, Россия

²⁾ ООО АФ «Перспектива» ОМЗ, г. Самара, Россия

³⁾ АО «Перманент», г. Москва, Россия

⁴⁾ Алтайский государственный технический университет, г. Барнаул, Россия

⁵⁾ Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Плодовая оболочка (лузга) подсолнечника при производстве масла является отходом производства. Выход лузги зависит от технологической схемы переработки масла, например, при маслоэкстракционном способе обрушивается от 14 до 25 кг лузги с каждых 100 кг семян. Распространенным приложением лузги, из-за наличия в ней большого количества углерода, является использование ее в качестве топлива, но при этом имеется ряд проблем ее сжигания [1].

ООО АФ «Перспектива» ОМЗ последние два года работает над проектом реализации производства сорбентов из отходов растениеводства. Отработана технология получения биоугля методом вихревого окислительного пиролиза лузги и отработана на стендовой установке. Полученный биоуголь можно использовать в качестве твердого топлива и в других целях, например, в схемах биоочистки от различного рода загрязнений. Для разработки промышленного окислительного пиролизера предварительно была создана стендовая установка (рис.1).

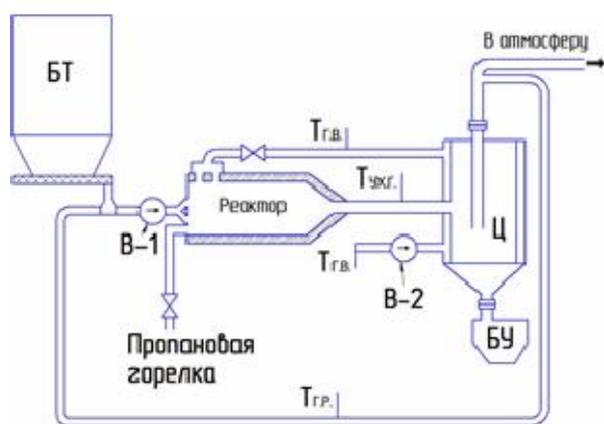


Рис. 1. Схема стендовой окислительной пиролизной установки типа ВПУ-0,4ЛП:
БТ – бункер топлива;
В-1 и В-2 – вентиляторы;
Ц – циклон-воздухоподогреватель;
БУ – бункер сбора биоугля;
Тг.в., Тух.г., Тг.р. – термометры на линиях горячего воздуха, газов за реактором и пиролизных газов рециркуляции.

В процессе отработки различных технологических схем был определен диапазон оптимальных режимов работы установки. Все характеристики полученного биоугля вполне согласуются с соответствующими показателями биоуглей полученных пиролизом биомассы [2, 3].

Список литературы

1. Попов Н.А. Практика и проблемы использования растительной биомассы как альтернативного источника энергии на предприятиях масложировой отрасли // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 14 (920). – С.54–59. – Эл. ресурс: <http://repository.kpi.kharkov.ua/simple-search?location=%2F&query>.
2. Усенко А.Ю., Губинский М.В., Федоров С.С. Методика исследования процесса пиролиза биомассы в потоке горячего воздуха // Интегрированные технологии и энергосбережение. № 2, 2004, С. 130–134. – Эл. ресурс: <https://www.researchgate.net/publication/301246354>.
3. А.Ю. Усенко, А.С. Грек, М.В. Губинский Определение технологических возможностей реализации процесса окислительного пиролиза мелкодисперсных отходов биомассы // Интегрированные технологии и энергосбережение № 2, 2006, С. 126–130. – Эл. ресурс: http://library.kpi.kharkov.ua/files/JUR/ite_2006_2_Usenko_.

ГОРЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ПРИ НИЗКИХ ЧИСЛАХ МАХА

Замураев В.П.^{1,2)}, Калинина А.П.^{1,2,3)}

¹⁾ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
г. Новосибирск, Россия

²⁾ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

³⁾ Сибирский университет потребительской кооперации (СибУПК), г. Новосибирск, Россия

Численно изучается горение углеводородных топлив в газообразной фазе в сверхзвуковом потоке в расширяющемся осесимметричном канале переменного сечения при различной молекулярной массе, различном давлении торможения и различных числах Маха. Молекулярная масса соответствует этилену и керосину. Числа Маха $M=1.7$ и $M=2$. Температура торможения $T_0=1700$ К и $T_0=1500$ К. Давления торможения $P_0=5$ атм и $P_0=7$ атм. Моделирование выполняется на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, замыкаемых к-ε моделью турбулентности. Для моделирования горения во всех случаях используется химическая кинетика из одной брутто-реакции. Показано, что для инициализации горения во всех случаях необходимо использовать хотя бы два импульса дросселирующей струи, подаваемой перпендикулярно потоку, иначе горение не происходит. Это справедливо и для эксперимента [1], и для расчета.

В расчете происходит полное сгорание газообразного топлива, и при этом получен тот же уровень давления, что и в эксперименте, как показано на рис. 1(а, б) в начале горения ($T_0=1500$ К).

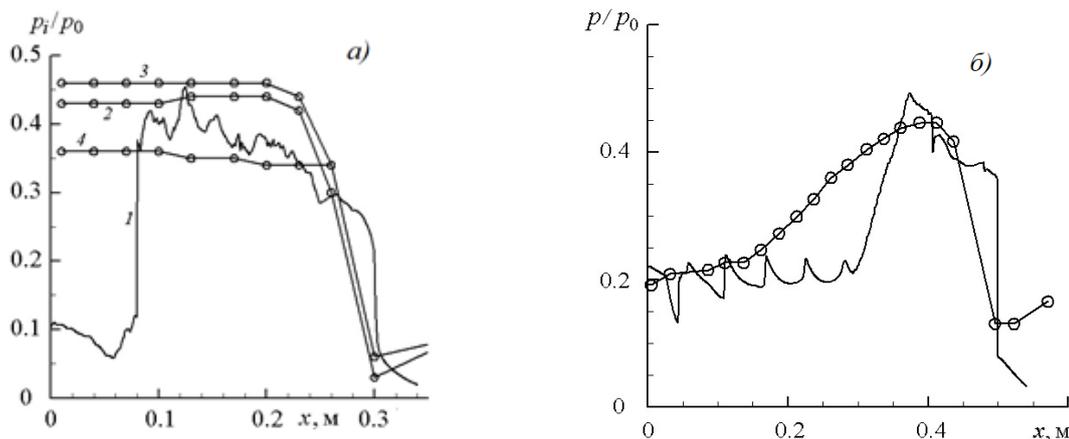


Рис. 1. Распределение отношения статического давления к полному P/P_0 вдоль канала а) – кривая 1 – мгновенное распределение в расчете ($y=0.25$ мм, $P_0=7$ атм), б) – кривая без символов – среднее во времени распределение в расчете ($y=0.25$ мм, $P_0=5$ атм), кривые с символами – эксперимент из [1].

Отсюда следует, что и в эксперименте топливо также сгорает полностью. Однако при снижении давления и температуры торможения в расчете не требуется такого значительного повышения давления в газодинамических импульсах, как в эксперименте, что может быть объяснено отсутствием моделирования процессов испарения керосина.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021–2023 (проект № 121030500157-3) и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 20-08-00245).

Список литературы

1. П.К. Третьяков Организация эффективного горения керосина в канале при больших числах Маха. //Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56. № 3. С. 42–47.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ИНДУЦИРОВАННЫХ СВЕЧОЙ МЕТОДАМИ ГИЛЬБЕРТ-ОПТИКИ

Золотухина О.С.^{1,2)}, Арбузов В.А.^{1,2)}, Арбузов Э.В.^{1,2,3)}, Дубнищев Ю.Н.^{1,2)}, Лукашов В.В.²⁾

¹⁾ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

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

³⁾ Институт математики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Работа мотивируется научной и практической значимостью проблемы не возмущающей диагностики фазовых и температурных полей, индуцированных в газовой среде пламенем факела (свечи). Пространственные условия, в которых исследуются поля, удовлетворяют модели осевой симметрии факела, связанной с вертикальной ориентацией свечи. [1]

Разработан адекватный решаемой задаче метод, основанный на полихроматической гильберт-визуализации полей фазовой оптической плотности, измерении температурного профиля в выбранных сечениях исследуемой среды, регистрации и селекции, регистрируемых фотоматрицей RAW-изображений в RGB-каналах. Визуализированные гильберт-структуры несут информацию о возмущениях фазовой оптической плотности, индуцированных температурным полем.

Достоверность результатов подтверждается сравнением гильбертограмм, полученных в эксперименте, и реконструированных из фазовых структур с использованием преобразования Абеля. Диагностический комплекс выполнен на базе прибора ИАБ–451 с модифицированным узлом оптической фильтрации, модулем светового излучателя, регистрации и обработки информации [2]. Методом гильберт-оптики визуализирована динамическая фазовая структура горячего воздушного потока от пламени свечи одновременно на длинах волн $\lambda_1=636$ нм, $\lambda_2=537$ нм и $\lambda_3=466$ нм (рис. 1.a). Выполнено сравнение экспериментальных и реконструированных гильбертограмм. На осесимметричных участках из гильбертограмм получена фазовая функция и с применением обратного преобразования Абеля реконструировано температурное поле (рис. 1.b).

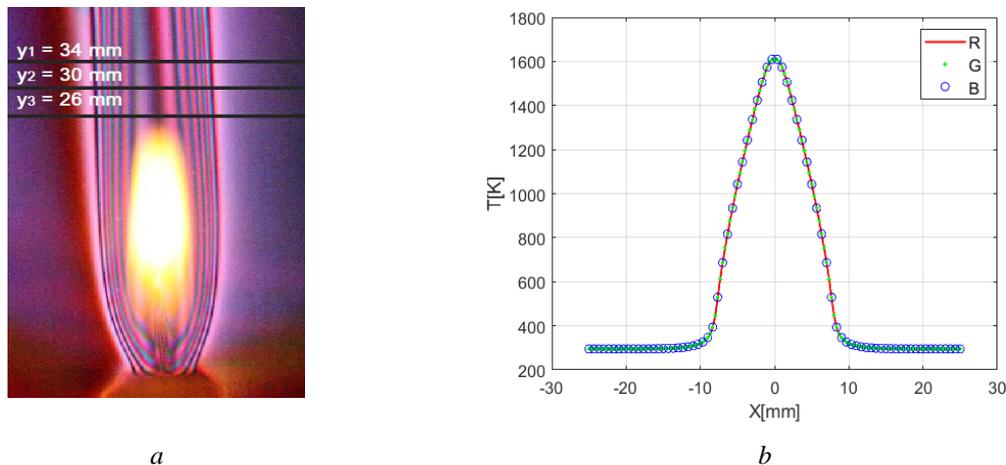


Рис. 1. (a) экспериментальная RGB-гильбертограмма от пламени свечи; (b) реконструированное радиальное температурное поле на высоте 26 мм от конца фитиля свечи для трех каналов RGB.

Список литературы

1. Арбузов В.А., Арбузов Э.В., Дубнищев Ю.Н., Золотухина О.С., Лукашов В.В. Реконструкция пространственной фазовой и температурной структуры пламени свечи методами гильберт-оптики и сдвиговой интерферометрии // Тез. докл. 29-й Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению «ГрафиКон 2019». – Брянск, 2019. – Т. 1.
2. Арбузов В.А., Арбузов Э.В., Дубнищев Ю.Н., Золотухина О.С., Лукашов В.В. Восстановление методами гильберт-оптики поля температуры при горении предварительно перемешанных пропано-воздушных смесей // Автометрия. – 2020. – Т. 56, № 1. – С. 74–82.

**ПРЯМОТОЧНЫЙ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ
С НЕПРЕРЫВНО-ДЕТОНАЦИОННЫМ ГОРЕНИЕМ ВОДОРОДА И ЭТИЛЕНА:
ОГНЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПРИ ЧИСЛАХ МАХА 1,5–2,5**

**Иванов В.С.¹⁾, Фролов С.М.¹⁾, Звезгинцев В.И.²⁾, Зангиев А.Э.¹⁾
Шамшин И.О.¹⁾, Гусев П.А.¹⁾**

¹⁾ Федеральный исследовательский центр химической физики, г. Москва, Россия

²⁾ Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

На основе вычислительной технологии ФИЦ ХФ РАН и результатов огневых испытаний предыдущего варианта макета-демонстратора детонационного прямооточного воздушно-реактивного двигателя (МД ДПВРД) [1], использующего водород в качестве горючего, выполнены расчетно-экспериментальные исследования по доводке конструкции ДПВРД. Цель доводочных работ – повысить устойчивость воздухозаборного устройства при числе Маха набегающего воздушного потока $M=2,0$, уменьшить аэродинамическое сопротивление и повысить тяговые характеристики ДПВРД. В результате доводочных работ изготовлен новый вариант ДПВРД и проведены его огневые испытания в импульсной аэродинамической трубе при $M=1,5$ и $2,0$. Важнейший результат огневых испытаний – значительное повышение тяговых характеристик ДПВРД по сравнению со старым вариантом во всем исследованном диапазоне значений коэффициента избытка воздуха. Так, при $M=1,5$ увеличение полной тяги и удельного импульса по топливу достигало 200 Н и 1100 с соответственно, а при $M=2,0$ – 400 Н и 1300 с соответственно. Кроме того, при $M=2,0$ значительно расширена область устойчивой работы камеры сгорания с непрерывно-детонационным горением водорода: от значения коэффициента избытка воздуха (КИВ) $\sim 1,6$ до $\sim 3,3$, причем при $\text{КИВ}=3$ значение удельного импульса достигало ~ 4760 с.

Для нового варианта ДПВРД максимальные измеренные значения полной тяги, а также оценочные значения эффективной тяги и удельного импульса по топливу составили 740 Н, 100 Н и 2680 с при $M=1,5$ и 1000 Н, 165 Н и 4760 с при $M=2,0$ соответственно. Измеренная эффективная тяга ДПВРД положительна при коэффициенте избытка воздуха в камере сгорания (КС) $\alpha_{\text{КС}} < 1,6$ при $M=1,5$ и $\alpha_{\text{КС}} < 2,0$ при $M=2,0$.

Повышение устойчивости работы ВЗУ в новом ДПВРД позволило впервые получить устойчивый непрерывно-детонационный рабочий процесс в ДПВРД данного типа при $M=2,5$. Максимальные значения полной тяги и удельного импульса для испытаний с $M=2,5$ составили 1160 Н и 3780 с.

Повышение числа Маха и давления торможения набегающего потока воздуха позволяет получить более эффективные режимы с высокочастотным продольно-пульсирующим и непрерывным спиновым детонационным горением. При этом более энергоэффективный непрерывный спиновый детонационный (НСД) режим горения [2–4] наблюдается в области повышенных КИВ, а значение КИВ при котором наблюдается переход на НСД режим уменьшается и приближается к $\text{КИВ}=1$ с ростом числа Маха и давления торможения набегающего потока воздуха. На рис. 1 показаны кадры видеосъемки огневых испытаний МД ДПВРД при $M=1,5$ и $\alpha_{\text{КС}}=1,12$ (а), $M=2,0$ и $\alpha_{\text{КС}}=1,25$ (б) и $M=2,5$ и $\alpha_{\text{КС}}=1,19$ (в).

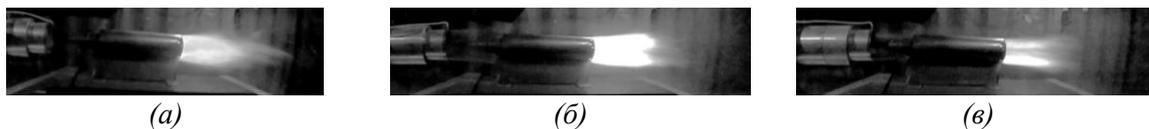


Рис. 1. Кадры огневых испытаний МД ДПВРД при $M=1,5$ и $\alpha_{\text{КС}}=1,12$ (а), $M=2,0$ и $\alpha_{\text{КС}}=1,25$ (б) и $M=2,5$ и $\alpha_{\text{КС}}=1,19$ (в).

Замена водорода на этилен приводит к сужению области устойчивой работы ДПВРД. Устойчивое непрерывно-детонационное горение этилено-воздушной смеси удалось получить только для оклостехиометрических смесей и при установке на выходе КС дроссельного диска с перекрытием выходного сечения 50%. Во всех испытаниях получен низкочастотный продольно-пульсирующий детонационный (ППД) режим горения [2–4] с характерной частотой 210–280 Гц. Для режима с $M=2,5$ на фоне низкочастотного рабочего процесса наблюдались высокочастотные

пульсации давления с частотой около 2500 Гц. Значения полной тяги и удельного импульса оказались ниже ожидаемых и составили 400–500 Н и 360–480 с соответственно, что связано с использованием дроссельного диска на выходе камеры сгорания. С увеличением числа Маха длина струи на выходе КС уменьшается, что свидетельствует об увеличении полноты сгорания и более эффективном рабочем процессе. Снижение тяговых характеристик и устойчивости непрерывно-детонационного рабочего процесса по-видимому связано с низкой температурой набегающего потока воздуха близкой к температуре кипения этилена при нормальных условиях, что значительно ухудшает смесеобразование в камере сгорания. Тем не менее результаты испытаний показывают возможность получения устойчивого непрерывно-детонационного горения этиленовоздушной смеси в камере сгорания диаметром 120 мм.

Таким образом, экспериментально доказана возможность снижения минимальной скорости полета для эффективной работы ПВРД до $M \leq 1,5$. Возможность снижения числа Маха эффективной работы ДПВРД обусловлена комбинацией новых физических принципов, заложенных в проект силовой установки. Во-первых, в МД впервые используется непрерывно-детонационный рабочий процесс. Во-вторых, существенно снижен уровень тепловыделения в камере сгорания из-за повышения суммарного коэффициента избытка воздуха до $KIV > 3$ вследствие использования двухконтурной схемы проточного тракта СУ, что обеспечивает более устойчивую работу воздухозаборного устройства (ВЗУ) ДПВРД для низких чисел Маха полета. При непрерывно-детонационном горении выделение энергии происходит в узкой зоне реакции в детонационных волнах, непрерывно циркулирующих в кольцевой КС. Поскольку детонационная волна в каждый момент времени занимает лишь малую часть поперечного сечения КС, это позволяет организовать рабочий процесс при относительно низкой скорости набегающего потока воздуха лишь с частичным нарушением режима втекания воздуха в КС. Использование двухконтурной схемы позволяет повысить значение суммарного коэффициента избытка воздуха так как часть воздуха обгибает КС через обводной канал, а в КС формируется смесь околостехиометрического состава. Более того обводной канал позволяет быстро ослаблять волны давления, возникающие при локальном нарушении режима втекания воздуха в горячую часть КС при прохождении детонационной волны. Использование такой комбинации физических принципов позволило улучшить устойчивость работы ВЗУ двигателя при малых скоростях набегающего потока и обеспечить высокую эффективность силовой установки.

*Работа выполнена по гранту Минобрнауки России
(госконтракт № 13.1902.21.0014, соглашение № 075-15-2020-806).*

Список литературы

1. Ivanov V. S., Frolov S. M., Sergeev S. S., Mironov Yu. M., Novikov A. E., Schultz I. I. Pressure measurements in detonation engines. // Proc IMechE Part G: J Aerospace Engineering, 2021.
2. Frolov S.M., Aksenov V.S., Ivanov V.S., Shamshin I.O. Large-scale hydrogen-air continuous detonation combustor. // International Journal of Hydrogen Energy, 2015, Vol. 40, pp. 1616–1623.
3. Frolov S.M., Aksenov V.S., Ivanov V.S., Shamshin I.O. Continuous detonation combustion of ternary “hydrogeneliquid propaneair” mixture in annular combustor. // International Journal of Hydrogen Energy, 2017.
4. Frolov S.M., Zvegintsev V.I., Ivanov V.S., Aksenov V.S., Shamshin I.O., Vnuchkov D.A., Nalivaichenko D.G., Berlin A.A., Fomin V.M. Wind tunnel tests of a hydrogen-fueled detonation ramjet model at approach air stream Mach numbers from 4 to 8. // International Journal of Hydrogen Energy, 2017, Vol. 42, pp. 25401–25413.

ГЕНЕРАЦИЯ И УСИЛЕНИЕ ВОЛН СЖАТИЯ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ГОРЕНИИ**Киверин А.Д., Яковенко И.С.**

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

Одним из наиболее значимых факторов динамического воздействия взрыва на окружающую среду является генерация ударных волн. В ряде случаев, развитие взрыва в газообразной или дисперсной среде может протекать в форме детонационной волны, и такой сценарий, как правило, считается наиболее опасным при оценке рисков, связанных с развитием взрыва [1]. С другой стороны, и сценарии с генерацией сильных ударных волн в ходе нестационарного развития взрыва представляются существенными [2]. Для корректной оценки рисков, связанных со взрывом больших объемов газообразных топливно-воздушных смесей, необходимы достоверные и полные представления о физических механизмах, определяющих генерацию сильных ударных волн при нестационарном развитии взрыва. Настоящее исследование посвящено детальному анализу структуры потока при свободном распространении пламени в открытом пространстве с целью определения конкретных механизмов генерации и усиления волн сжатия. Исследование выполнено методами численного моделирования на основе модели сжимаемой вязкой теплопроводной среды [3] с учетом многокомпонентной диффузии и химической кинетики окисления водорода согласно детальному кинетическому механизму [4]. Подробнее с математической моделью и реализующим ее алгоритмом можно познакомиться в работах [3, 5].

В работе показано, что генерация ударных волн естественным образом связана с развитием неустойчивости фронта пламени. Причем ударные волны формируются как на линейной стадии развития неустойчивости, в результате экспоненциального ускорения отдельных участков фронта пламени, так и на нелинейной стадии стабилизации, в результате более быстрого сгорания смеси между языками пламени, сформированными на линейной стадии. Механизмом усиления ударных волн является термоакустическая неустойчивость, определяющая рост интенсивности волн сжатия при прохождении через зону экзотермической реакции (фронта пламени). В случае высокоактивной смеси описанные механизмы генерации и усиления ударных волн в свободном пламени определяют условия перехода к детонации. Представленные результаты дополняют и уточняют выводы работ [5,6], где впервые был предложен механизм перехода к детонации в свободно распространяющихся пламенах как прямое следствие локальных особенностей развития возмущений на поверхности фронта пламени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2020-806 от 29.09.2020).

Список литературы

1. Ng H.D., Lee J. Comments on explosion problems for hydrogen safety // J. Loss Prev. Proc. Ind. – 2008. – V. 21, Is. 2. – P. 136 – 146.
2. Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants. 2011. IAEA-TECDOC-1661. Vienna: IAEA.
3. Выков В., Киверин А., Кокшаров А., Яковенко И. Analysis of transient combustion with the use of contemporary CFD techniques // Computers & Fluids. – 2019. – V. 194. – 104310.
4. Keromnes A. et al. An experimental and detailed chemical kinetic modeling study of hydrogen and syngas mixture oxidation at elevated pressures. Combustion and Flame. 160(6): 995–1011. doi: 10.1016/j.combustflame. 2013.01.001.
5. Киверин А. Д., Яковенко И. С., Фортон В. Е. Механизм формирования детонации при свободном распространении пламени в неограниченном пространстве // ДАН. – 2019. – Т. 489, № 5. – С. 461 – 464.
6. Kiverin A., Yakovenko I. Mechanism of transition to detonation in unconfined volumes // Acta Astronautica. – 2020. – V. 176. – P. 647 – 652.

**СТРУКТУРА ПЛАМЕНИ ПРОПИЛЕНА ПРИ ДАВЛЕНИЯХ 2–5 АТМ:
МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
И ХИМИКО-КИНЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**Князьков Д.А., Дмитриев А.М., Большова Т.А., Герасимов И.Е.,
Шмаков А.Г. Коробейничев О.П.**

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

Пропилен является одним из основных промежуточных компонентов при горении углеводородных топлив. Реакции с его участием составляют ключевую часть полного механизма реакций, описывающего горение основного топлива. Несмотря на большое количество работ, посвященных химии горения легких углеводородов, включая пропилен, до сих пор остаются пробелы в понимании кинетики его превращения в условиях горения при повышенных давлениях, т.е. в условиях, интересных для разработчиков камер сгорания двигателей. Это связано с недостатком экспериментальных данных при давлениях, выше атмосферного. Таким образом, задачей настоящей работы являлось получение данных по химической структуре ламинарного предварительно перемешанного пламени пропилена в интервале давлений от 2 до 5 атм. Цель – провести проверку предложенных в литературе детальных моделей горения пропилена на новых данных и выяснить их способность описывать наблюдаемые тенденции при изменении давления.

В работе применен метод молекулярно-пучковой масс-спектрометрии с мягкой электронной ионизацией для исследования химической структуры пламен богатых смесей пропилен/кислород/аргон (с коэффициентом избытка горючего $\phi=1,5$), стабилизированных при давлениях 2, 3, 4, 5 атм на плоскопламенной горелке. Измерены профили мольной доли как реагентов, основных продуктов горения (CO_2 , CO , H_2O , H_2), так и таких интермедиатов, как H , CH_3 , ацетиолен, OH , метан, этилен, пропаргильный радикал, CH_2O , C_2H_6 , C_3H_4 , C_4H_8 .

Особое внимание в работе уделено исследованию возмущающего влияния пробоотборника на измеряемые концентрации соединений. Для этого впервые проведено 2D-моделирование течения реагирующего газа в пламени при давлениях 2–5 атм вблизи пробоотборника с помощью программного пакета ANSYS Fluent. Показано, что в указанных условиях вносимые зондом газодинамические и тепловые возмущения могут быть учтены в одномерных расчетах, используя измеренный профиль температуры перед пробоотборником.

В программном пакете CHEMKIN проведено численное моделирование структуры экспериментально исследованных пламен с использованием различных детальных химико-кинетических механизмов горения пропилена. Сопоставления данных расчета и эксперимента показало, что все модели удовлетворительно предсказывают поведение пиковых концентраций интермедиатов в зависимости от давления в исследуемом диапазоне. Однако, обнаружены количественные расхождения между измеренными и рассчитанными концентрациями, в частности, для таких ключевых интермедиатов, как метан, метильный радикал, ацетилен, этан, пропаргильный радикал. Анализ путей превращения позволил выявить основные реакции, ответственные за их образование и сформулировать рекомендации по усовершенствованию механизма окисления пропилена.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России,
соглашение № 075-15-2020-806 (контракт № 13.1902.21.0014).*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ТОПЛИВА ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ЭМИССИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Ковальногов В.Н.¹⁾, Федоров Р.В.¹⁾, Генералов Д.А.¹⁾, Хахалев Ю.А.¹⁾, Бондаренко А.А.²⁾

¹⁾ Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

²⁾ Ульяновский институт гражданской авиации имени главного маршала авиации Б.П. Бугаева, г. Ульяновск, Россия

Одними из наиболее перспективных решений для обеспечения сокращения эмиссии загрязняющих веществ является разработка низкоэмиссионных горелочных устройств и мультитопливных «всеядных» энергоустановок на основе зонирования топочных камер с пространственно-распределенными горелочными устройствами и рециркуляционными зонами.

Сложность получения достаточного количества данных по химической кинетике процесса в топочных камерах серьезно усложняет проведение точных расчетов горения, в результате чего возникает необходимость применения приближенных постановок. Для решения задачи о горении частиц требуется нужно выполнить решение аэродинамической задачи – определение полей скоростей в топочной камере. После получения решения аэродинамической задачи уравнения теплообмена, горения и движения и одиночной частицы могут быть численно проинтегрированы. Для описания турбулентных характеристик газа используется двухпараметрическая «к-ε» модель турбулентности. Удельные теплоемкости топлива, окислителя и продуктов сгорания равны между собой и не меняются, турбулентные числа Sc и Pr являются постоянными.

На рис. 1 приведены результаты моделирования сжигания комбинированного топлива в топке энергетического котла ТГМЕ–464. По полученным результатам видно, что при сжигании комбинированного топлива можно добиться оптимизации режима горения с сокращением эмиссии загрязняющих веществ.

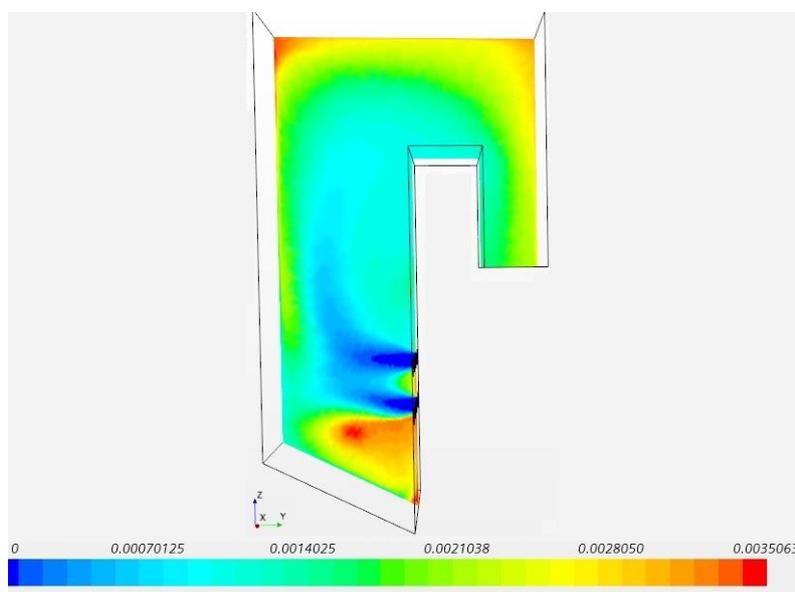


Рис. 1. Содержание NO_x в топке котла

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2021-584).

Список литературы

1. Таймаров М.А., Ахметова Р.В. и др. Сжигание метано-водородной фракции и мазута в котлах ТГМ-84А // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2016. № 4. С. 83–95.
2. Тайлашева Т.С., Моделирование топочной среды в котле типа ДКВР при сжигании природного газа // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т.314. № 3-4. С. 42–47.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДИФфуЗИОННОГО ГОРЕНИЯ МИКРОСТРУИ ВОДОРОДА ПРИ ОДНОВРЕМЕННОЙ ПОДАЧЕ ВОЗДУХА ИЗ СООСНО РАСПОЛОЖЕННОЙ КОЛЬЦЕВОЙ ЩЕЛИ

Козлов В.В.^{1,2)}, Литвиненко М.В.^{1,2)}, Литвиненко Ю.А.²⁾, Павленко А.М.²⁾,
Тамбовцев А.С.^{1,2)}, Шмаков А.Г.³⁾

¹⁾ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

²⁾ Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

³⁾ Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Для струй водорода, истекающих из круглых микросопел с $d=250 \div 500$ мкм, в зависимости от скорости истечения, характерные следующие сценарии горения: 1) Горение ламинарной микроструи водорода; 2) Разделение факела на ламинарную и турбулентную области; 3) Отрыв турбулентного пламени при сохранении горения; 4) Прекращение горения в турбулентной области микроструи при сохранении горения в ламинарной; 5) Прекращение горения всей микроструи [1].

В данной работе были экспериментально исследованы особенности горения микроструи водорода, окруженной потоком воздуха. Сопловой аппарат в разрезе представлен на рис. 1. Экспериментальная установка, представлена на рис. 2.

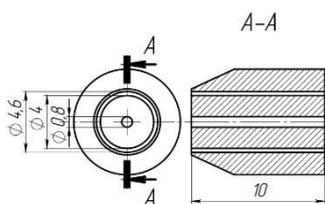


Рис. 1. Сопловой аппарат в разрезе.

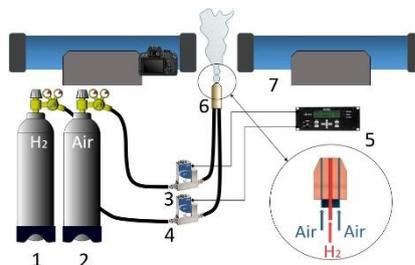


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.
1 – баллон со сжатым водородом; 2 – баллон со сжатым воздухом; 3, 4 – клапан расходомера; 5 – контроллер расходомера; 6 – сопловой аппарат; 7 – теневой прибор ИАБ – 451.

Теневые картины процесса рис. 3 свидетельствуют о том, что сценарии горения, описанные ранее, сохраняются и в данной ситуации, но с некоторыми особенностями.

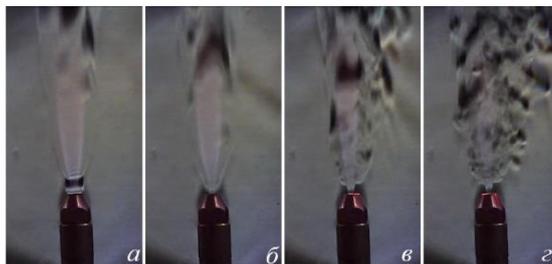


Рис. 3. Теневые картины процесса горения водорода, окруженного струей воздуха.
 $U_1(\text{м/с}) = \text{const} = 204$, $U_2(\text{м/с}) = a$

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 075-15-2020-806 (контракт № 13.1902.21.0014)

Список литературы

1. Шмаков А.Г., Грек Г.Р., Козлов В.В., Коробейничев О.П., Литвиненко Ю. А. Различные режимы диффузионного горения круглой струи водорода в воздухе // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, № 2. С. 27–41.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ГОРЕНИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В УСЛОВИЯХ ПАРОВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ В ПРИСУТСТВИИ ГАЗА РАЗБАВИТЕЛЯ

Копьев Е.П.¹⁾, Садкин И.С.¹⁾, Мухина М.А.¹⁾, Шадрин Е.Ю.¹⁾, Шимченко С.Ю.²⁾

¹⁾ Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

²⁾ Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Исследования процессов горения некондиционных жидких углеводородных топлив и производственных отходов с подачей в зону горения струи перегретого водяного пара были рассмотрены в ряде работ при сжигании дизельного топлива и отработанного машинного масла в разработанных перспективных прямоточных горелочных устройствах [1, 2]. Авторы отмечают, что использование перегретого водяного пара позволяет снизить содержание оксидов азота в отработанных газах до 30% при высокой полноте сжигания низкокачественного топлива. В работе такой эффект связывают со снижением температуры пламени, за счет чего снижается образование «термического» NO_x, а также протекания паровой газификации, что позволяет сохранить высокую полноту сжигания топлив. Авторы отмечают, что такой способ сжигания является одним наиболее перспективных путей утилизации низкокачественных топлив и производственных отходов, которые могут быть подвержены сжиганию (отработанных масел и др.).

Однако, кинетика горения жидких углеводородов, особенно некондиционных, при впрыске пара до сих пор остается малоизученной. Поэтому в рамках настоящей работы проведено изучение влияния состава парогазовой смеси при частичном или полном замещении перегретого водяного пара газом разбавителем на энерговыделение и состав продуктов сгорания.

Данная работа является частью цикла исследований по сжиганию жидких углеводородов в присутствии перегретого водяного пара [1, 2], направленного на создание научно-экспериментальной базы для создания энергоэффективного и экологически безопасного способа сжигания жидких углеводородных топлив (в том числе, некондиционных, загрязненных и низкокачественных жидких топлив).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и БРФФИ № 20-58-04011.

Список литературы

1. Anufriev I.S., Alekseenko S. V., Sharypov O. V., Kopyev E.P. Diesel fuel combustion in a direct-flow evaporative burner with superheated steam supply // Fuel.– 2019.– Vol. 254.– P. 115723.
2. Anufriev I.S., Kopyev E.P. Diesel fuel combustion by spraying in a superheated steam jet // Fuel Process. Technol.– Elsevier B.V., 2019.– Vol. 192.– P. 154–169.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ ПО АРМИРОВАННОЙ СТЕКЛОВОЛКНОМ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЕ В ПОТОКЕ ОКИСЛИТЕЛЯ. ЭФФЕКТ ДОБАВЛЕНИЯ АНТИПИРЕНОВ НА ЕЕ ГОРЮЧЕСТЬ

Коробейничев О.П.¹⁾, Палецкий А.А.¹⁾, Терещенко А.Г.¹⁾, Чернов А.А.¹⁾, Карпов А.И.²⁾, Шаклеин А.А.²⁾, Шмаков А.Г.¹⁾, Трубочев С.А.¹⁾, Глазнев Р.К.¹⁾, Барботько С.Л.³⁾

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

²⁾ УдФИЦ УрО РАН, г. Ижевск, Россия

³⁾ ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов ГНЦ РФ, г. Москва, Россия

Армированные полимерные композиционные материалы широко применяются в различных отраслях, в первую очередь, в авиационной промышленности. Целью данной работы являлось исследование горючести и распространения пламени по поверхности армированной стекловолокном эпоксидной смолы (стеклопластика) в потоке окислителя с различной концентрацией кислорода, а также разработка сопряженной модели горения и термического разложения стеклопластика, способной предсказывать поведение полимерных композитов в различных сценариях пожаров. С помощью микротермопар и инфракрасной камеры были получены распределения температуры поверхности и пламени стеклопластиков различной толщины (0.3–1.2 мм) в потоке окислителя с различной концентрацией кислорода (25–45%). Увеличение концентрации кислорода приводит к увеличению скорости распространения пламени v (Рис. 1). С помощью измеренной температуры и теплофизических параметров стеклопластика были оценены v при горении сверху-вниз для тонких (0.3 мм толщиной) стеклопластиков с помощью формулы [1]. На основе программного пакета OpenFoam было проведено моделирование распространения пламени сверху-вниз по пластине стеклопластика. Показано хорошее согласие экспериментальных результатов и численных расчетов.

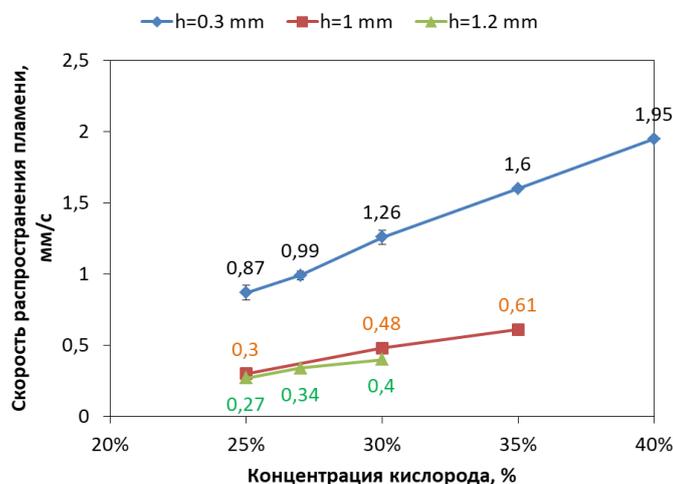


Рис. 1. Зависимость скорости распространения пламени сверху-вниз по армированной стекловолокном эпоксидной смоле при разной концентрации кислорода в потоке окислителя.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по гранту № 20-19-00295.

Список литературы

1. T. Delzeit, L. et al. Influence of edge propagation on downward flame spread over three-dimensional PMMA sample // Proceedings of the Combustion Institute. 37 – 2019 P. 3203–3209.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПО СЛОЮ ХВОИ PINUS SYLVESTRIS

Коробейничев О.П.¹⁾, Muthu Kumaran²⁾, Raghavan V.²⁾, Трубачев С.А.³⁾, Палецкий А.А.¹⁾, Шмаков А.Г.¹⁾, Глазнев Р.К.³⁾, Чернов А.А.¹⁾, Терещенко А.Г.¹⁾

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

²⁾ Индийский институт технологий Мадраса, г. Ченнаи, Индия

³⁾ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

В данной работе впервые проведено комплексное экспериментальное и численное исследование процесса распространения низового пожара в спокойном воздухе по слою хвои Сибирских бореальных лесов (*Pinus silvestris*) разной влажности (1-8%), разной ширины слоя (8-100 см), разной высоты слоя (20-25 мм), разной плотности загрузки топлива (343-685 г/м²) и разной скорости ветра (0-0.4 м/с). Выявлено влияние ширины слоя в широком диапазоне (от 8 см до 100 см), его влажности, плотности загрузки топлива, плотности упаковки хвои на скорость распространения пламени, профили температуры в газовой фазе пламени на разном расстоянии от поверхности слоя, профили температуры в конденсированной фазе. Впервые измерены полные и лучистые тепловые потоки из пламени в поверхность слоя в зоне горения с помощью компактных охлаждаемых датчиков, помещенных в слой хвои, по которому распространяется пламя. Лучистый тепловой поток дает большой вклад (до 30%) в полный тепловой поток из пламени на поверхность слоя хвои. При скорости ветра меньше 0.4 м/с лучистый тепловой поток ответствен за перенос тепла перед фронтом пламени к несгоревшему топливу. Это было подтверждено расчетами конвективного числа Байрама, характеризующего режим распространения пламени по растительному горючему.

На рис. 1 приводится сравнение экспериментальной и рассчитанной скорости распространения пламени по слою хвои различной ширины в зависимости от влажности топлива.

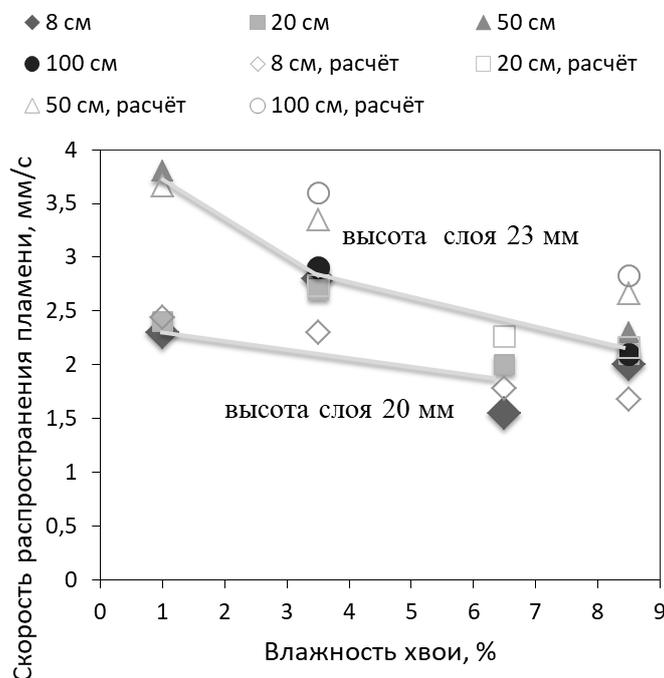


Рис. 1. скорости распространения пламени по слою хвои различной ширины в зависимости от влажности топлива.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по гранту № 19-58-80002.

ЛАЗЕРНОЕ ЗАЖИГАНИЕ ПОРОШКОВЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ Al И B

Коротких А.Г.^{1,2}, Сорокин И.В.¹, Архипов В.А.²¹) Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия²) Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Современные твердотопливные композиции содержат окислитель, полимерное горючее-связующее и порошки металлов (в основном алюминия, магния, бора), основным назначением которых является увеличение температуры и удельного тепловыделения в камере сгорания двигательной установки. Порошковые металлизированные системы характеризуются теплотой сгорания, удельной плотностью, дисперсностью, содержанием активного металла и реакционной способностью, значения которых определяет скорость оттока продуктов сгорания твердого топлива и, как следствие, удельный импульс двигателя. В отличие от углеродного горючего вещества металлизированным системам требуется меньшее количество кислорода для полного окисления в процессе горения топливных композиций.

В данной работе проведено экспериментальное исследование характеристик зажигания микropорошков (МП) Al ($d=10,6$ мкм), боридов алюминия AlB_2 ($d=6,2$ мкм) и AlB_{12} ($d=2,3$ мкм), а также нанопорошков (НП) алюминия Alex ($d=90-110$ нм) и аморфного бора при интенсивном лучистом нагреве. Зажигание порошков металлов осуществлялось в воздухе при инициировании CO_2 -лазером непрерывного действия в диапазоне плотности теплового потока $q=68-182$ Вт/см². Время задержки воспламенения t_{ign} порошковых систем определялось по разности сигналов фотодиодов, регистрирующих начало инициирования и появление свечения на поверхности образца. На рис. 1 представлены экспериментальные значения времени задержки зажигания t_{ign} (точки) при разной плотности теплового потока излучения для исследуемых металлизированных систем. Линии показывают аппроксимационные зависимости $t_{ign}(q)$.

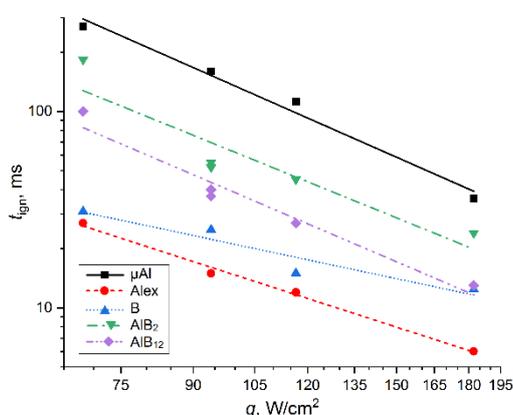


Рис. 1. Время задержки зажигания от плотности теплового потока излучения порошков металлов и бора.

Увеличение плотности теплового потока излучения от 68 до 182 Вт/см² ведет к снижению времени задержки зажигания всех образцов металлов. Наименьшие времена задержки зажигания получены для НП алюминия Alex, обладающего высокой реакционной способностью. Для аморфного бора значения t_{ign} на 18–95% оказались выше значений t_{ign} НП Alex. Максимальные значения t_{ign} характерны МП Al (в 6,6–11,4 раз выше, чем у НП Alex), частицы которого покрыты оксидным слоем и требующие большего времени на прогрев, плавление активного металла и начало интенсивного окисления. Для МП боридов алюминия AlB_2 и AlB_{12} времена t_{ign} меньше (в 1,97–2,3 и 3,4–3,6 раза, соответственно), в сравнении с МП Al, что, возможно, связано с изменением кинетики и отсутствием накопления Al_2O_3 на поверхности частиц при их окислении.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-03-00588.

ВЛИЯНИЕ ГОРЮЧЕГО-СВЯЗУЮЩЕГО ВЕЩЕСТВА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ ВЭМ, СОДЕРЖАЩИХ БОРИДЫ АЛЮМИНИЯ

Коротких А.Г.^{1,2)}, Сорокин И.В.¹⁾, Архипов В.А.²⁾

¹⁾ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

²⁾ Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Использование боридов алюминия в качестве горючих компонентов высокоэнергетических материалов (ВЭМ) является перспективным в разработке новых топливных композиций двигательных установок. Бориды алюминия имеют высокую удельную плотность 2.5–2.84 г/см³, удельную теплоту сгорания на уровне бора 122–140 кДж/см³ и легче воспламеняются.

В данной работе выполнено исследование характеристик зажигания двух составов ВЭМ, отличающихся полимерным связующим. Состав А был изготовлен на основе перхлората аммония (ПХА), нитрата аммония (НА) и тетраэзоляного каучука (ТК), а состав В – на основе ПХА, НА и бутадиенового каучука (БК). Оба состава ВЭМ содержали 15 масс.% микропорошки (МП) алюминия, аморфного бора и бориды алюминия AlB₂ и AlB₁₂.

Исследование характеристик зажигания ВЭМ осуществлялось на экспериментальном стенде, включающего непрерывный СО₂-лазер с длиной волны излучения 10,6 мкм и систему регистрации параметров (тепловой поток излучения, время задержки t_{ign} и температура зажигания), в диапазоне плотности теплового потока $q=60\text{--}220$ Вт/см². В опытах использовали твердо-топливные композиции ВЭМ диаметром 10 и высотой 5 мм, которые изготавливали методом перемешивания компонентов с последующим прессованием и полимеризацией образцов.

В табл. 1 представлены значения коэффициента K_{Me} от q , который равен отношению времен t_{ign} состава А к t_{ign} состава В при содержании одинакового Ме. Полученные экспериментальные данные по t_{ign} от q показали, что времена прогрева и зажигания t_{ign} двух составов ВЭМ с одинаковым содержанием Ме могут существенно отличаться при $q < 110$ Вт/см² за счет отличия экзо- и эндотермических процессов при разложении БК и ТК, окислителя в период прогрева образца топлива. При увеличении q значения K_{Me} снижаются для всех видов порошков Ме.

Таблица 1. Коэффициент K_{Me} от плотности теплового потока

ВЭМ	K_{Me} при q , Вт/см ²						
	60	90	110	150	180	200	220
A1/B1 (Al)	2,32	1,66	1,41	1,09	0,94	0,86	0,80
A2/B2 (B)	1,59	1,52	1,48	1,42	1,39	1,38	1,36
A3/B3 (AlB ₂)	1,31	1,27	1,25	1,22	1,21	1,20	1,19
A4/B4 (AlB ₁₂)	1,30	1,25	1,23	1,19	1,17	1,16	1,15

Данные скоростной съемки зажигания ВЭМ показали, что при нагреве состава А на торцевой поверхности образца образуется жидкий слой, который препятствует оттоку газообразных продуктов разложения и выходу частиц Ме в зону газозависимых реакций, что увеличивает период формирования пламени на поверхности образца. Применение частиц боридов алюминия в составе А3 и А4 снижает времена прогрева, разложения компонентов ВЭМ и химических реакций в конденсированной и газовой фазах по сравнению с составами А1 или А2, содержащими Al или В.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-03-00588.

МНОГОСТУПЕНЧАТЫЙ АНАЛИЗ КИНЕТИКИ ОКИСЛЕНИЯ И ВОСПЛАМЕНЕНИЕ НАНОПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

Коротких А.Г., Годунов А.Б.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Для решения практических задач по воспламенению и горению конденсированных систем необходимо использование временных, энергетических характеристик и кинетических констант. В соответствии с квазистационарной теорией Зельдовича Я.Б., температура воспламенения может быть определена из уравнения [1]:

$$Q\rho \exp\left(-\frac{E}{RT_{ign}}\right) \frac{2\lambda RT_{ign}^2}{E} = q_s^2 \quad (1)$$

где Q – удельный тепловой эффект химической реакции, λ – теплопроводность, ρ – плотность, q_s – плотность теплового потока, T_{ign} – температура воспламенения, E – энергия активации, A – предэкспонент.

В расчете кинетических констант для порошковых металлических систем широко используются изоконверсионные методы анализа [2] одностадийного процесса окисления порошков металлов, исходные данные которых получают путем проведения термических анализов. Для точного определения кинетических констант в настоящее время предлагается метод анализа, основанный на многоступенчатых реакциях и процессах [3], проходящих при нагреве систем.

В работе на примере нанопорошков (НП) алюминия и алюминия-меди, полученных методом электрического взрыва проводников, выполнен расчет кинетических констант и температуры воспламенения металлических порошковых систем (табл. 1) с применением экспериментальных данных термического анализа при нагреве НП в воздухе при скоростях нагрева 2, 4, 10 и 20°C/мин. Показано, что расчетные значения температуры T_{ign} имеют хорошую сходимость с экспериментальными данными T_{ign} НП Al₉₀ и Al-Cu, которые мы получили при измерении тепловизионной камерой Jade J530 SB в процессе нагрева CO₂-лазерным лучом при постоянной плотности теплового потока $q_s=68$ Вт/см².

Таблица 1. Кинетические константы и температура воспламенения НП металлов

Наименование	НП Al ₉₀	НП Al-Cu
E , кДж/моль	138	143
A , сек ⁻¹	4372	393
T_{ign} , К (расчет)	1069	1253
T_{ign} , К (эксперимент)	1067	1554
Погрешность расчета δ , %	0,2	19,4

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-03-00588.

Список литературы

1. Вилунов В. Н. Теория зажигания конденсированных веществ – Новосибир.: Наука, 1984. – 188 с.
2. Vyazovkin S. et al. ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data // *Thermochim. Acta*. Elsevier – 2011. – V. 520, № 1–2. – P. 1–19.
3. Vyazovkin S. et al. ICTAC Kinetics Committee recommendations for analysis of multi-step kinetics // *Thermochim. Acta*. Elsevier B.V. – 2020. – V. 689. – P. 178597.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОПАСНЫХ СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ ПРИ СЖИГАНИИ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ**Корценштейн Н.М.**

Объединенный институт высоких температур РАН

Одним из источников загрязнения атмосферы экологически опасными субмикронными частицами является их эмиссия при сжигании твердых топлив. В том числе угля, биомассы, твердых коммунальных отходов [1]. Одним из механизмов образования таких частиц при сжигании углей считается объемная конденсация паров веществ, выделяющихся из минеральной части углей в процессе горения [2]. Дополнительным негативным фактором, связанным с образованием частиц при сжигании углей, является то, что на их поверхности могут конденсироваться некоторые токсичные микроэлементы, содержащиеся в углях. Для организации процесса улавливания, который позволит снизить выброс субмикронных частиц в атмосферу при сжигании углей, требуется информация о параметрах конденсационных аэрозолей, образующихся при горении. Необходимые данные, в частности о концентрации частиц и их распределении по размерам, могут быть получены на основе численного моделирования процесса объемной конденсации [3].

В данной работе предложена конденсационная модель образования субмикронных частиц сульфата калия и натрия при сжигании углей. Модель базируется на применении комплексного подхода: термодинамического и кинетического – к описанию процесса объемной конденсации в продуктах сгорания углей. Использовано допущение, что образование алюмосиликатов калия и натрия в объеме горячей угольной частицы “замораживается” после прекращения горения и снижения температуры частицы. При этом часть калия и натрия в составе алюмосиликатов удаляется из продуктов сгорания со шлаком и летучей золой; другая часть, не вошедшая в алюмосиликаты, остается в газовой фазе и с понижением температуры образует сульфатный конденсационный аэрозоль субмикронного размера. С использованием компьютерной реализации предложенной модели проведено численное моделирование объемной конденсации паров сульфата калия в продуктах сгорания углей при их охлаждении в технологическом тракте. Получены данные по концентрации и распределению по размерам образующихся частиц. Проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных [4] по фракционному составу частиц. Установлено, что предсказания модели можно рассматривать в качестве ориентиров при организации эффективного улавливания субмикронных частиц, образующихся при сжигании углей, из дымовых газов. Задачей дальнейших исследований является совершенствование модели в части учета соединений калия и натрия не только с серой, но и фосфором и хлором, а также продолжение ее тестирования применительно к другим видам твердых отходов.

Список литературы

1. Wu Yang, Deepak Pudasainee, Rajender Gupta, Wei Li, Ben Wang, Lushi Sun. An overview of inorganic particulate matter emission from coal/biomass/MSW combustion: Sampling and measurement, formation, distribution, inorganic composition and influencing factors // *Fuel Processing Technology*. – 2020. – V. 213. – 106657.
2. Tomeczek J. and Palugniok H. Kinetics of mineral matter transformation during coal combustion // *Fuel*. – 2002. – V. 81. – P. 1251 – 1258.
3. Корценштейн Н.М., Петров Л.В. Численное моделирование параметров субмикронных частиц, образующихся при сжигании углей // *Теплоэнергетика*. – 2018. – № 7. – С. 33–41.
4. Zhang L. and Ninomiya Y. Emission of suspended PM₁₀ from laboratory-scale coal combustion and its correlation with coal mineral properties // *Fuel*. – 2006. – V. 85. – P. 194–203.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РЕАКЦИИ БЕНЗИЛА И ПРОПАРГИЛА

Красноухов В.С.¹, Загидуллин М.В.^{1,3}, Порфирьев Д.П.^{1,3}, Мебель А.М.^{1,2}¹ Самарский университет (Московское шоссе 34, Самара, Россия, 443086)² Международный университет Флориды, Майами, США (SW 8 th St, Miami, 33199, USA)³ Самарский филиал физического института имени П.Н. Лебедева РАН (Ново-Садовая 221, Самара, Россия, 443011)

В данном исследовании реакции радикалов на первом этапе рассчитываются энергии, оптимизированные структуры реагентов, промежуточных и переходных комплексов и продуктов взаимодействия бензила (C₇H₇) и пропаргила (C₃H₃) [1, 2] с использованием неэмпирического квантово-механического метода теории функционала плотности UB3LYP/6-311G(d,p). Колебательные частоты и энергии нулевых колебаний E(ZPE) вычислялись аналогичным методом. Далее энергии реагентов, комплексов и продуктов уточнялись на основе модифицированной комбинированной схемы E[G3]=E[CCSD(T)/6-311G**] + E[MP2/G3Large] – E[MP2/6-311G**] + E(ZPE), включающей расчетные методы высокого уровня. Данная реакция содержит также бирадикальные соединения, для которых полные энергии были рассчитаны и последующим уточнением более точными квантово-механическими методами CASSCF и CASPT2, соответственно, с базисом cc-pVDZ и активным пространством (10e, 10o). Расчет энергий синглетных бирадикальных структур выполнялся на основе следующей формулы [3]: E(S)=E(T)[G3] + ΔE[S-T](CASPT2/cc-pVDZ) + ZPE(S).

В результате данной работы показано, что в реакции C₇H₇ + C₃H₃ продуктами выступают различные продукты изомеризации начальных структур с возможными отрывами атома (p1, p2, p3, p5, p7, p8, p9, p10, p12, p13) или молекулы водорода (p6, p11, p14 – нафталин). Данные расчеты позволят перейти к исследованию констант скорости реакции и изучению относительных выходов продуктов.

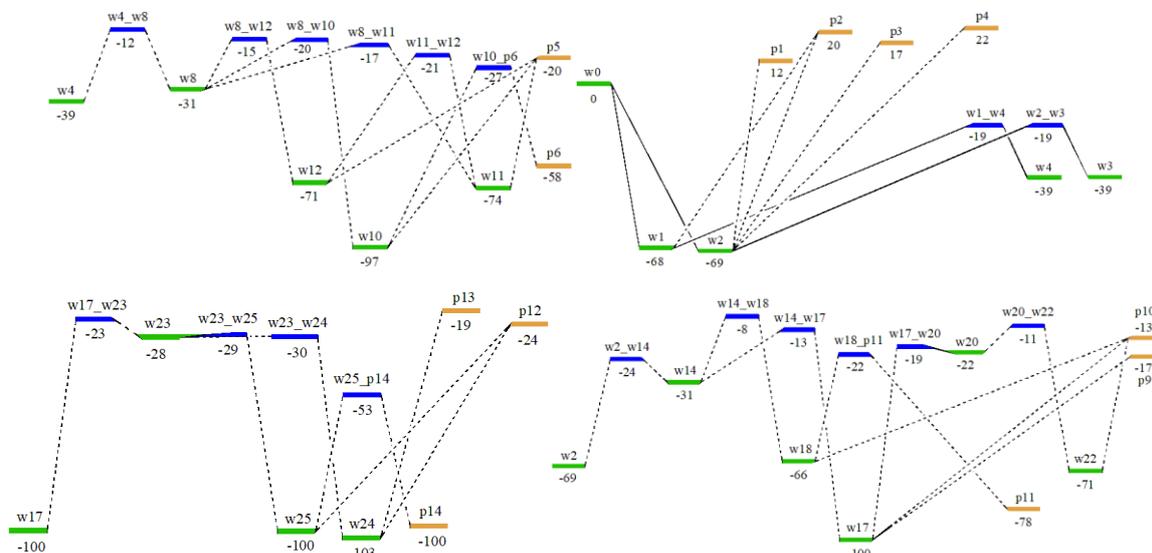


Рис.1. Схемы реакции бензила и пропаргила.

Список литературы

1. Matsugi A., Miyoshi A. Computational study on the recombination reaction between benzyl and propargyl radicals //International Journal of Chemical Kinetics. – 2012. – Т. 44. – № 3. – С. 206–218.
2. Zhang L. et al. Kinetic modeling study of toluene pyrolysis at low pressure //Combustion and Flame. – 2010. – Т. 157. – № 9. – С. 1686–1697.
3. Matsugi A., Suma K., Miyoshi A. Kinetics and mechanisms of the allyl+ allyl and allyl+ propargyl recombination reactions //The Journal of Physical Chemistry A. – 2011. – Т. 115. – № 26. – С. 7610–7624.

ПИРОЛИЗ БУРОГО УГЛЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Крафт Я.В.¹⁾, Адуев Б.П.¹⁾, Нурмухаметов Д.Р.¹⁾, Исмагилов З.Р.^{1,2)}

¹⁾ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

²⁾ Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН», г. Новосибирск, Россия

Выполнено исследование термического разложения Тисульского бурого угля под воздействием импульсного лазерного излучения ($\lambda=1064$ нм, $\tau_u=120$ мкс, $H=1,15-1,95$ Дж/см², $F_u=6$ Гц) в среде аргона. Характеристика угля приведена в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика угля.

Технический анализ			Элементный анализ	
$W^a, \%$	$A^d, \%$	$V^{daf}, \%$	$C^{daf}, \%$	$H^{daf}, \%$
11,1	9,5	51,4	61,4	5,0

Использовались таблетированные образцы углей ($\rho=1,00 \pm 0,02$ г/см³). Изготовление образцов проводилось с использованием частиц угля размером $l \leq 100$ мкм.

Методом масс-спектрометрии зарегистрированы следующие газообразные продукты пиролиза: H₂, CH₄, H₂O, CO, CO₂. Зависимость состава газовой смеси от плотности энергии лазерного излучения в момент времени 10⁴ с приведена на рис. 1. В исследованном диапазоне плотности энергии лазерного излучения концентрация H₂ в составе газообразных продуктов пиролиза возрастает с увеличением плотности энергии лазерного воздействия, а концентрация CO₂ и паров воды, наоборот, снижается. Объемная доля горючих компонентов в смеси газообразных продуктов пиролиза при воздействии лазерного излучения с плотностью энергии в импульсе 1,95 Дж/см² достигает 93%.

На рис. 2 представлены данные по выходу горючих компонентов (H₂, CH₄, CO) на единицу массы прореагировавшего образца угля от плотности энергии в импульсе в момент времени 10⁴ с. При увеличении плотности энергии в импульсе от 1,15 до 1,95 Дж/см² выход горючих компонентов линейно возрастает и при $H=1,95$ Дж/см² достигает $\sim 1,3 \cdot 10^3$ см³/г. С увеличением плотности энергии лазерного излучения линейно возрастает доля прореагировавшего образца угля (рис. 2, вспомогательная ось).

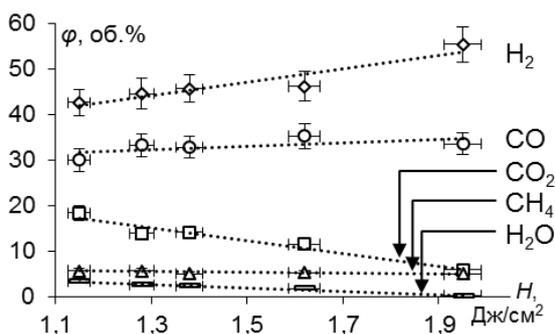


Рис. 1. Зависимость состава газовой смеси от плотности энергии лазерного излучения в момент времени 10⁴ с.

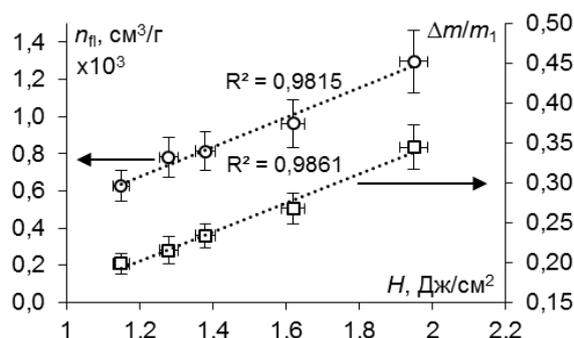


Рис. 2. Зависимость выхода горючих газов (H₂, CH₄, CO) от плотности энергии в импульсе. По вспомогательной оси — зависимость доли прореагировавшего образца угля от плотности энергии лазерного излучения.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ МЕТАНА ПРИ ВДУВЕ ПАРОВОЙ СТРУИ В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ГОРЕЛКЕ

Красинский Д.В.

Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Известной возможностью повышения экологических характеристик и эффективности процессов сжигания углеводородных топлив является специально организованный подвод водяного пара в зону горения, способствующий интенсивному протеканию реакций паровой газификации. В соответствии с этой концепцией, в ИТ СО РАН разработаны образцы перспективного горелочного устройства мощностью от 5 до 20 кВт [1–2], в которых реализован автономный самоподдерживающийся режим вдува струи перегретого водяного пара в зону горения. В проведенных ранее исследованиях для горелки испарительного типа на дизельном топливе [1–3], где жидкое топливо подается в донную часть корпуса и испаряется при нагреве, были продемонстрированы эффекты интенсификации горения во внешнем факеле и повышение экологических характеристик (низкие уровни выбросов CO , NO_x , сажи).

В настоящей работе для аналогичной конструкции горелочного устройства проведено численное моделирование аэродинамики, процессов турбулентного теплопереноса и горения метана, при этом подача газового топлива осуществляется путем радиального вдува по периметру корпуса в нижней части горелки – см. рис. 1. Применяемая физико-математическая модель основана на эйлеровом описании многокомпонентной сплошной среды. Для учета детального химического реагирования рассмотрено применение двух моделей турбулентного горения: по квазиравновесному приближению (см. [3]), и по флеймлет-модели. Заданный в расчетах расход метана составляет 0.56 кг/ч (что соответствует мощности горелки ~ 7.7 кВт), водяного пара – 0.25 кг/ч. Газодинамические параметры аксиальной струи перегретого пара на срезе форсунки: скорость истечения 638 м/с, температура струи 400 К. Для топлива и воздуха входная температура принята равной 300 К. Внутри горелочного тракта заданы условия недостатка воздуха (коэффициент избытка 0.7), догорание топлива происходит во внешнем факеле. Полученные в расчетах экологические характеристики факела свидетельствуют о достаточно низком уровне эмиссии оксидов азота (около 6 мг/нм³).

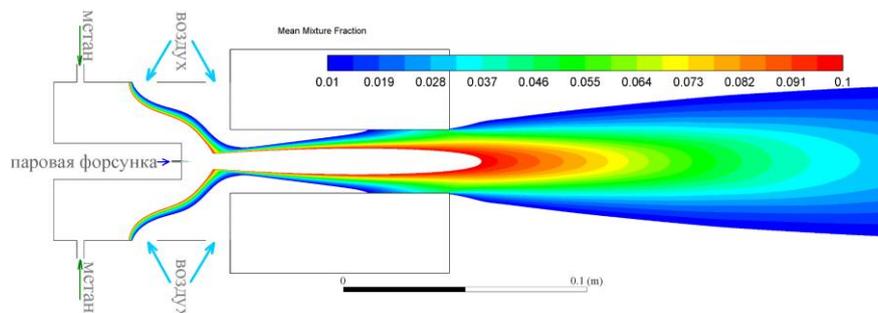


Рис. 1. Схема горелочного устройства и входных условий; изоконтуры скаляра ξ доли смешения топлива (заливкой показан диапазон $0.01 < \xi < 0.1$ при $\xi_{st} \approx 0.055$).

Исследования выполнены при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки РФ (КНП «Фундаментальные исследования процессов горения и детонации применительно к развитию основ энерготехнологий» № 075-15-2020-806).

Список литературы

1. Алексеенко С.В., Пашенко 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., Копьев Е.П., Шарыпов О.В. Характеристики процесса сжигания дизельного топлива в горелочном устройстве с подачей струи перегретого водяного пара // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т. 52, № 3. – С. 37–44.
3. Krasinsky D.V. Numerical simulation of hydrocarbon fuel combustion processes in a burner with axial injection of steam jet // J. Phys.: Conf. Ser. – 2018. – Vol. 1105, No. 1. Article No. 012035.

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ ФРОНТА ПЛАМЕНИ**Крикунова А.И., Коссов Г.А.**

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

Серьезной проблемой современных камер сгорания являются избыточные выбросы NOx [1]. Применение предварительно перемешанных смесей с низким содержанием горючего – перспективная технология, используемая для сокращения выбросов NOx. Горение обедненных предварительно перемешанных смесей обладает низкой устойчивостью, что приводит к необходимости разрабатывать методы, повышающие устойчивость. Для понимания природы возникновения и развития неустойчивостей одним из требуемых шагов является изучение динамики фронта пламени. Существуют различные методы ее исследования [2, 3], но анализ изображений хемилюминесценции пламени обладает рядом преимуществ по сравнению с другими: высокая надежность, простота реализации и универсальность.

В настоящей работе предложена универсальная эффективная методика выделения контура фронта пламени, как непрерывной линии толщиной в 1 пиксель, с использованием анализа изображений хемилюминесценции пламени. Суть методики заключается в выделении контура фронта пламени с помощью последовательного применения фильтров. Основу предложенной методики составляет обработка исходного изображения оператором “Canny”, алгоритм работы которого состоит из нескольких этапов: размытие изображения фильтром Гаусса, вычисление градиента изображения и подавления не максимумов [4, 5]. В реализации алгоритма фильтра “Canny” представлены 2 параметра, которые задаются пользователем: τ , отвечающий за не максимальное подавление и σ , влияющая на степень размытия изображения фильтром Гаусса. Подбор данных параметров необходимо проводить вручную для каждого режима пламени, что существенно увеличивает время обработки нескольких режимов. Для устранения вышеописанного недостатка разработан алгоритм автоматического подбора параметров σ и τ , позволяющий повысить эффективность применения оператора “Canny” и обеспечивающий универсальность предложенной методики. Эффективность применения метода проверялась на основании анализа кадров скоростной видеосъемки хемилюминесценции пламени предварительно перемешанных реагентов при различных режимах горения.

Реализованная методика помогла решить одну из основных проблем, возникающих при обработке, вызванные неоднородностью интенсивности свечения фронта пламени [6]. Представлены результаты обработки изображений хемилюминесценции пламени с применением настоящей методики. А также получены оценки колебаний фронта пламени для различных режимов горения.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации (МК-3888.2021.4).

Список литературы

1. Nemitallah M. A., Abdelhafez A. A., Habib M. A. Global Warming and Emission Regulations // Approaches for Clean Combustion in Gas Turbines. – Springer, Cham, 2020. – P. 1–12.
2. Souflas K. et al. Low cost image processing of Bunsen flame photography for estimation of flame speeds // Combust. Sci. Technol. – 2019. – V. 191. – № . 7. – P. 1123–1138.
3. Kojima J., Ikeda Y., Nakajima T. Basic aspects of OH (A), CH (A), and C2 (d) chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane–air premixed flames // Combust. Flame. – 2005. – V. 140. – № . 1-2. – P. 34–45.
4. Canny J. A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1986. – V. 6. – P. 679–698.
5. Hussain Z., Agarwal D. A comparative analysis of edge detection techniques used in flame image processing // International Journal of Advance Research In Science And Engineering IJARSE. – 2015. – № . 4. – P. 3703–3711.
6. Krikunova A.I. M-shaped flame dynamics // Phys. Fluids. – 2019. – V. 31. – P. 123607.

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ СИЛ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОБРАТНОГО КОНИЧЕСКОГО ПЛАМЕНИ

Крикунова А.И., Сон Э.Е.

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

Вопросы методов эффективной стабилизации пламен предварительно перемешанных смесей в различных гравитационных условиях имеют большое прикладное значение, например, при проектировании и эксплуатации камер сгорания и форсажных камер турбореактивных двигателей, газотурбинных силовых установок, бытовых газовых нагревателей и промышленных котлов. Понимание и описание динамических процессов в таких сложных комплексных системах и отклика их функционирования на внешние воздействия представляет собой актуальную задачу. В современных технических устройствах стабилизация горения осуществляется, как правило, пассивными способами: формирование в потоке застойной вихревой зоны вблизи фронта пламени, что способствует увеличению времени контакта свежей смеси и продуктов реакции, как следствие, упрощающее воспламенение смеси и расширяющее пределы стабильного горения. Зачастую это реализуется при помощи препятствий, таких как пилоны, пороги, и использования завихрителей. Активные стабилизаторы непопулярны из-за сложности реализации и необходимости значительного усложнения конструкции объекта.

Одним из модельных пассивно стабилизированных пламен, широко применяемых в лабораториях, является обратное коническое пламя. Такое пламя обладает значительной устойчивостью [1] и в то же время проявляет особенности динамики фронта пламени в зависимости от совокупности параметров: скорости потока, коэффициента избытка горючего, гравитационных условий [2, 3]. В настоящей работе характеристики обратного конического пламени исследованы при помощи скоростной видеосъемки хемилюминесценции пламени, а также методом Particle Image Velocimetry.

В работе исследована структура и динамика вихревой зоны обратного конического метано-воздушного пламени. Сочетание используемых методов позволило с высоким разрешением реконструировать структуру поля течения в пламени, а также зафиксировать форму фронта пламени в моменты погасания и перестроения. Таким образом определены границы проскока и срыва пламени, а также изменение размеров вихревой зоны за стабилизатором в зависимости от коэффициента избытка горючего и скорости потока. Исследования проведены для случаев прямой и обратной гравитации. Выявлено, что для случая обратной гравитации размер вихревой зоны на малых скоростях несколько больше, а на скоростях более 5 м/с – до 15% меньше, чем для случая нормальной гравитации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2020-806 от 29.09.2020).

Список литературы

1. Krikunova A.I. Effects of gravity on plane-symmetric rod-stabilized flame stabilization // High Temp 2019. V. 57(3), P. 430.
2. Krikunova A.I. M-shaped flame dynamics // Phys. Fluids. 2019. V. 31, P. 123607.
3. Krikunova A.I., Arefyev K.Y., Saveliev A.S., Kossov G.A., and Cheshko A.D. Inverted conical methane/air flame shape transformation under acoustic excitation // Phys. Fluids. 2021. V. 33, P. 053610.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ, ГОРЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ТВЕРДОГО КОМПОЗИТНОГО ТОПЛИВА УГОЛЬ-ДЕРЕВО

Кузнецов А.В.¹⁾, Бутаков Е.В.¹⁾, Плюснин П.Е.²⁾, Матвеева А.Г.³⁾

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

²⁾ Институт неорганической химии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

³⁾ Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Исследование совместного воспламенения, газификации, факельного горения смесей угля и растительного сырья на экспериментальном стенде туннельного вихревого типа мощностью 50 кВт при стационарном режиме работы обнаружило, что практически на всех участках горения композита распределение температур по длине экспериментального стенда выше для композитного топлива. Впервые показано, что композитное топливо обладает повышенной по сравнению с углем теплотворной способностью, которая может обеспечиваться за счет увеличения полноты сгорания топлива. Горение композитного топлива с различным содержанием угля и растительного сырья осуществляется в две стадии, аналогично горению угля, выделение газообразных веществ растительного сырья и угля из композита осуществляется одновременно.

Обнаружено, что теплоты сгорания смеси и композитного топлива выше, чем теплота сгорания опилок. Композит горит лучше смеси – начинается горение раньше, образуется больше летучих веществ и меньше золы. Композитное топливо обладает повышенной по сравнению с углем теплотворной способностью, которая может обеспечиваться за счет увеличения полноты сгорания топлива. Оптимальными параметрами горения обладает композит состава 70% угля и 30% опилок.

При сжигании композитного топлива по сравнению со сжиганием смеси компонентов того же состава первая стадия начинается примерно на 100 секунд ранее, чем при использовании смеси топлива и происходит при температурах на 50 – 100°С выше. Горение на второй стадии происходит примерно одновременно как для смеси компонентов, так и для композитного топлива, но горение композита обеспечивает температуры на 100 – 400°С выше. Разница в температурах горения увеличивается к выходу из трубной печи.

Методом ЭПР показано образование в ходе получения композитного топлива парамагнитных центров, концентрация которых связана с временем воспламенения топлива.

В течение нескольких часов после механической обработки опилок и при получении композита происходит плавное изменение свойств – «старение» образца, аналогичное старению механически активированного угля [1], выражающееся в снижении реакционной способности угля в отношении реакций окисления. Одновременно наблюдается падение интенсивности механически-индуцированного сигнала ЭПР радикалов лигнина (парамагнитных центров) и снижение эффективности воспламенения опилок сосны, измеряемое как время вспышки образца в вертикальной трубчатой печи.

Список литературы

1. Burdukov, A. P.; Butakov, E. B.; Kuznetsov, A. V.; Chernetskiy, M. Yu. Deactivation of Mechanically Activated Micronized Coal // COMBUSTION EXPLOSION AND SHOCK WAVES. 2018. WOS:000427077200004

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЖИГАНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В ПРЯМОТОЧНОЙ ИСПАРИТЕЛЬНОЙ ГОРЕЛКЕ С ПОДАЧЕЙ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА

Кузнецов В.А.^{1,2)}, Дектерев Ар.А.¹⁾, Ануфриев И.С.¹⁾, Минаков А.В.^{1,2)}

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

²⁾ Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Использование впрыска воды или пара при сжигании жидких топлив является перспективным способом по снижению содержания оксидов азота в уходящем дымовом газе, снижению сажеобразования, диспергированию жидкого топлива, а также по подавлению детонации в двигателях внутреннего сгорания [1–3].

В работе с помощью численного моделирования исследован процесс горения жидкого топлива в оригинальном горелочном устройстве [3] испарительного типа с подачей воздуха и перегретого водяного пара в зону реакции. В качестве модельного топлива использовался n-гептан. Моделирование горения осуществлялось посредством модели Eddy Dissipation Concept (EDC) с применением детального кинетического механизма. Проведена верификация используемой комплексной математической модели и сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными данными. На рис. 1 приводится сравнение некоторых расчетных данных распределения параметров по оси горелки с экспериментом.

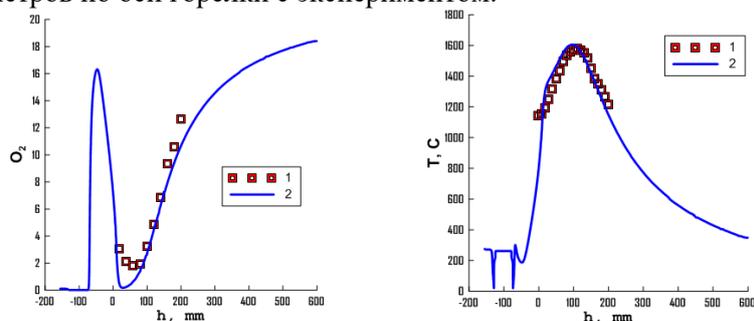


Рис. 1. Концентрация кислорода и температура в факеле (об. %): 1 – эксперимент [3]; 2 – расчет.

Разработана комплексная математическая модель процесса сжигания жидкого топлива с добавлением перегретого пара. Сравнительный анализ показал, что расчет качественно и количественно хорошо воспроизводит экспериментальные данные для разных режимных вариантов как с подачей пара, так и без него. Выполнено расчетное исследование влияние расхода подаваемого топлива и пара при сжигании жидких углеводородов на физико-химические процессы, протекающие внутри и снаружи горелочного устройства. Показано положительное влияние подачи пара на снижение вредных выбросов в исследуемой горелке.

Расчетные исследование физико-химических процессов при горении жидкого топлива с добавлением перегретого пара были выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-79-10134). Разработка численной методики моделирования процессов получена в результате государственного задания ИТ СО РАН (номер рег. 121031800229-1).

Список литературы

1. F. Ren, L. kai Xiang, H. qiang Chu, Y. chen Ya, W. wei Han, and X. kang Nie, “Numerical investigation on the effect of CO₂ and steam for the H₂ intermediate formation and NO_x emission in laminar premixed methane/air flames,” Int. J. Hydrogen Energy, vol. 45, no. 6, pp. 3785–3794, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.05.096.
2. F. Liu, J. L. Consalvi, and A. Fuentes, “Effects of water vapor addition to the air stream on soot formation and flame properties in a laminar coflow ethylene/air diffusion flame” Combust. Flame, vol. 161, no. 7, pp. 1724–1734, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.combustflame.2013.12.017.
3. Anufriev, I. S., Alekseenko, S. V., Sharypov, O. V., & Kopyev, E. P. (2019). Diesel fuel combustion in a direct-flow evaporative burner with superheated steam supply. Fuel, 254, 115723. doi:10.1016/j.fuel.2019.115723

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСАЖДЕНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В ПОМЕЩЕНИЯХ

Жданова А.О.¹⁾, Волков Р.С.¹⁾, Кузнецов Г.В.¹⁾, Копылов Н.П.²⁾, Копылов С.Н.²⁾,
Сушкина Е.Ю.²⁾, Стрижак П.А.¹⁾

¹⁾ Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

²⁾ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны», г. Балашиха, Россия

Дымовыделение при горении материалов и веществ в помещениях затрудняет эвакуацию людей и проход к очагу горения спасательных бригад [1]. Эксперименты по определению скоростей осаждения дымового аэрозоля горючих материалов проводились на стенде, схема которого приведены на рис. 1.

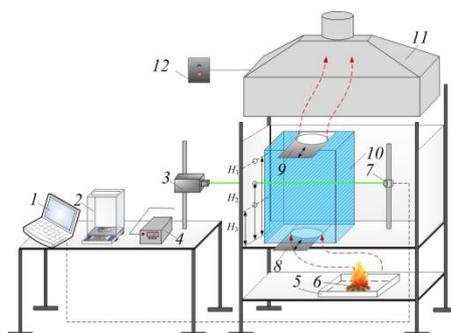


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для определения скорости осаждения дымового аэрозоля: 1 – рабочая станция (ПК); 2 – лабораторные микровесы; 3 – непрерывный DPSS лазер; 4 – блок управления лазером; 5 – поддон; 6 – навеска горючего материала; 7 – измеритель интенсивности излучения; 8, 9 – шиббер (заслонка); 10 – полный параллелепипед со стенками из стекла; 11 – вытяжная система; 12 – пульт включения/отключения вытяжной вентиляции.

По результатам выполненных экспериментов построена зависимость линейной скорости осаждения частиц дымового аэрозоля от радиуса частиц (рис. 2).

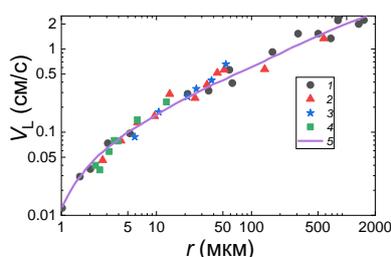


Рис. 2. Зависимость скорости осаждения от размера частиц: 1 – резина; 2 – ППС; 3 – ПВХ; 4 – древесина; 5 – итоговая аппроксимационная зависимость ($Y=0.0754\sqrt{x}-0.063$).

На основании полученных результатов можно сделать заключение о том, что независимо от типа горючего материала линейная скорость осаждения частиц продуктов пиролиза зависит непосредственно от размера частиц.

Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 21-19-00009).

Список литературы

- Halawa T. Numerical simulation of the evacuation process and smoke propagation due to a fire in a road tunnel with transverse ventilation system // J. Thermal Sci. Eng. Appl. – 2021. Vol. 13. – Paper No: TSEA-20-1117.
- Rasbash D.J., Rogowski Z.W. Extinction of Fires in Liquids by Cooling with Water Sprays // Comb. Flame – 1957. – V. 1. – P. 453–466. зажигания

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ КАПЛИ ОРГАНОВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Кузнецов Г.В., Стрижак П.А., Вершинина К.Ю., Няшина Г.С.

Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Разработана математическая модель, обеспечивающая адекватное воспроизведение экспериментальных значений характеристик зажигания капель органоводоугольных топлив (ОВУТ) в потоке окислителя. Выполнены численные исследования процессов зажигания капель топлив на основе типичных отходов переработки каменных углей, промышленных масел и воды. Установлены времена задержки зажигания капель ОВУТ при варьировании размеров (радиусов) капель от 0.25 мм до 1.5 мм, скорости и температуры потока высокотемпературных газов (окислителя) от 0.5 м/с до 3 м/с и от 700 К до 1000 К, соответственно. Получено удовлетворительное соответствие результатов математического моделирования известным экспериментальным данным. Обоснована возможность использования пакета Ansys Fluent для численного моделирования зажигания капель ОВУТ. Установлена хорошая корреляция результатов моделирования с данными экспериментов. Вычислены температурные поля капель ОВУТ при зажигании, а также координаты зон интенсивных химических превращений в газовой фазе и в глубине капель ОВУТ. Выполнено прогнозирование предельных условий устойчивого зажигания ОВУТ для наиболее типичных топливных компонентов при относительно низкотемпературном нагревании. Определены условия и ограничения, при которых модели Ansys Fluent могут обеспечивать удовлетворительное соответствие характеристик зажигания ОВУТ известным данным экспериментов.

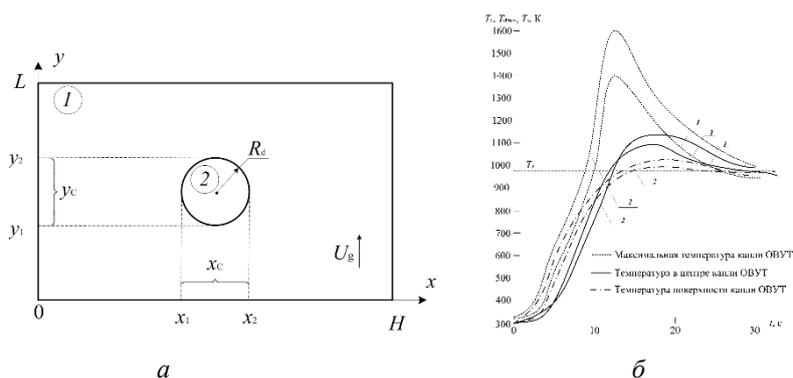


Рис. 1. Схема области решения задачи для моделирования зажигания капли ОВУТ: 1 – разогретый поток окислителя, 2 – капля топлива (а); тренды температуры ОВУТ (90% КЕК К, 10% мазут) в центре (T_c) и поверхности (T_s) капли, а также максимальной температуры (T_{dmax}) (при $R_d \approx 1$ мм, $T_g \approx 973$ К, $V_g \approx 3$ м/с): 1 – экспериментальные данные [1, 2], 2 – результаты моделирования (б).

Полученные при моделировании результаты для группы капель ОВУТ хорошо коррелируют с известными экспериментальными данными и иллюстрируют правомерность применения созданной модели для исследования условий и характеристик зажигания аэрозольного потока ОВУТ в камерах сгорания.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ (контракт № 13.1902.21.0014).

Список литературы

1. Glushkov D.O., Syrodoy S.V., Zhakharevich A.V., Strizhak P.A. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: Analysis of key aspects // Fuel Processing Technology. – 2016 – V. 148. – P. 224–235. DOI: 10.1016/j.fuproc.2016.03.008.
2. Glushkov D.O., Strizhak P.A., Verшинina K.Y. Minimum temperatures for sustainable ignition of coal water slurry containing petrochemicals // Applied Thermal Engineering. – 2016. – V. 96. – P. 534–546. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.11.125.

ВЛИЯНИЕ ДОЛИ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ НА ВРЕМЕНА ЗАДЕРЖКИ ЗАЖИГАНИЯ ПРИ ЕЕ ТЕРМИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ В СМЕСИ С МОНГОЛЬСКИМ УГЛЕМ

Кузнецов Г.В., Мисюкова А.Д., Янковский С.А.

Томский политехнический университет, Россия 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: Jankovsky@tpu.ru

Экспериментально выполнены исследования по зажиганию диспергированных частиц Бу-рого угля месторождения Шивэ-Овоо (Монголия) в смеси с частицами из отходов переработки древесины Томского ЛПК. По результатам экспериментов установлено, что интенсификация воспламенения частиц угля в смеси с биомассой, осуществляется при увеличении доли последней до 25%.

На рис. 1 приводится зависимость времен задержки зажигания смесевых топлив от температуры среды в диапазоне от 500 до 800 °С.

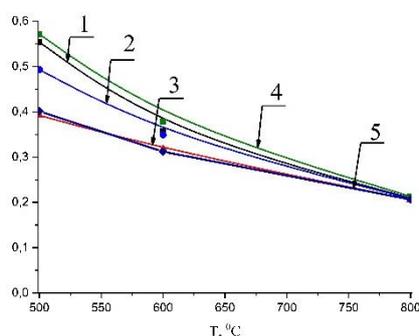


Рис. 1. Зависимость времен задержки зажигания витающих частиц на основе угля месторождения Шивэ-Овоо, древесины и топливных смесей на их основе от температуры среды при разных концентрациях древесной компоненты: 1 – однородный уголь; 2 – смесь с содержанием угля 90%; 3 – смесь с содержанием угля 75%; 4 – смесь с содержанием угля 50%; 5 – однородная древесина.

Анализ рисунка 1 позволяет установить, что биомасса в смеси с углем Шивэ-Овоо приводит к снижению температуры процессов воспламенения. Установлено, что увеличение доли древесины в смеси до 25% приводит к началу процессов воспламенения угля при температуре 500°С (на 29,2% ниже), а при температуре 600°С (на 11,2% ниже). С увеличением температуры до 800°С процессы воспламенения протекают интенсивно в одном временном диапазоне, как для однородного угля, так и для смесевых топлив.

По результатам выполненных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что эффективная концентрация древесной биомассы (отходы переработки древесины), способствующая снижению времени задержки зажигания угля марки Шивэ-Овоо – 25%.

Установленный эффект, позволит существенно снизить затраты на растопку котлоагрегатов, сжигающих данный вид угля.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ грант № 18-29-24099.

Список литературы

1. EA. Coal – Fuels & Technologies – IEA 2020.
2. Key World Energy Statistics 2020 – Analysis – IEA 2020.
3. Kuznetsov GV, Yankovskii SA, Tolokol'nikov AA, Cherednik IV. Mechanism of the Suppression of Sulfur Oxides in the Oxidative Thermolysis Products of Coals upon Their Combustion in a Mixture with Dispersed Wood. Solid Fuel Chem 2020; 54. <https://doi.org/10.3103/S0361521920030076>.

БЕЗМАЗУТНЫЙ РОЗЖИГ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ С ЭЛЕКТРОИОНИЗАЦИОННЫМ ВОСПЛАМЕНЕНИЕМ

Кучанов С.Н.¹⁾, Кочергин Д.О.³⁾, Белявская П.В.^{2,3)}

¹⁾ ООО «КОТЭС Инновационные Технологии», г. Новосибирск, Россия

²⁾ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

³⁾ ООО «КОТЭС Инжиниринг», г. Новосибирск, Россия

Отказ от мазута на пылеугольных котлах является актуальной задачей. Компанией КОТЭС разработана оригинальная технология воспламенения и поддержания горения пылеугольного топлива. Данная технология прошла опытные испытания и имеет промышленное внедрение.

Угольная генерация долгое время была и по сей день остается лидером в мировом производстве электроэнергии. По данным Международного энергетического агентства (IEA, МЭА), в течение 2000–2017 гг. доля угольной генерации в мировой структуре производства электроэнергии находилась в диапазоне 38–41% [1].

Роль основного источника электроэнергии в мире угольной генерации досталась благодаря хорошо известным ее преимуществам, среди которых:

- высокая обеспеченность запасами (по данным BP Statistical Review of World Energy, на конец 2017 года отношение доказанных запасов угля к годовому объему его добычи составило 134);
- относительно низкая стоимость угля как энергетического топлива (особенно в регионах его добычи);
- возможность создания запасов на электростанциях, гарантирующих долгосрочную надежную работу даже в случае перебоев с поставками топлива [2].

Благодаря этим преимуществам угольная генерация исторически была и остается важным инструментом поддержки индустриализации и экономического роста в развивающихся странах и, с другой стороны, источником экономического развития и рабочих мест в угледобывающих регионах [3].

Подходы в использовании горелочных устройств циклонного типа в сочетании с системой УВЭИ позволяют увеличить мощность и эффективность воспламенения пылеугольного топлива за счет увеличения времени нахождения угольных частиц в зоне активации. За счет реализации вариантов данного способа удается снизить унос несгоревшей угольной пыли в объем топочного пространства, тем самым обеспечив безопасный режим растопки из холодного состояния.

Циклонное растопочное устройство с применением системы УВЭИ позволяет уменьшить время на разогрев горелочного устройства и образования стабильного горения факела. Использование циклона имеет еще одно дополнительное преимущество, которое позволяет работать на двух сортах топлива, смешивая их уже непосредственно в объеме горелки и манипулировать расходами каждого компонента в зависимости от ситуации.

Список литературы

1. Русанов В.Д. Физика химически активной плазмы. / В.Д. Русанов, А.А. Фридман – М.: Наука. – 1984. – 414 с.
2. Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Нагибина Н.Б., Матвеев В.А. Использование плазменно-топливных систем пылеугольных тепловых электростанциях. VIII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива» институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 13–16 апреля 2012 г.

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ
ТВЕРДОТОПЛИВНОГО ГИБРИДНОГО ДВИГАТЕЛЯ****Кушниренко А.Г., Стамов Л.И., Михальченко Е.В., Смирнова М.Н., Тюренкова В.В.**Федеральный научный центр «Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук», г. Москва, Россия

В данной работе проводится вычислительное моделирование камеры сгорания гибридного твердотопливного двигателя. Под гибридными двигателями рассматриваются двигатели, у которых горючие и окислитель находятся в разных агрегатных состояниях. Такой тип двигателей сохраняет некоторые преимущества классических твердотопливных и жидкостных ракетных двигателей, в тоже время в нем отсутствует ряд их недостатков. К примеру, по сравнению с твердотопливными они позволяют хранить компоненты топлива отдельно друг от друга, что сказывается на безопасности устройства, отдельная подача дает возможность управлять тягой двигателя, также по сравнению с жидкостными двигателями устройство гибридных проще и, соответственно, дешевле.

В работе рассматривается камера сгорания гибридного двигателя в трехмерной постановке. Геометрия соответствует геометрии из работы [1]. В качестве твердого топлива используются НТРВ (полибутадиен с концевыми гидроксильными группами) и РММА (полиметилметакрилат). Подогретый окислитель (кислород) подается в камеру в газообразном виде со сверхзвуковой скоростью и взаимодействует с поверхностью твердого топлива. В результате последнее начинает нагреваться и разлагаться на составляющие части, которые поступают в камеру и вступают в реакцию с окислителем. Для определения потока горючего с поверхности твердого топлива используются модели определения тепло- и массообмена около термохимически разрушающегося горючего из работы [2].

Для проверки работы программы проводилось сравнение результатов моделирования с данными физических экспериментов по скорости выгорания твердого топлива. Проведено исследование влияния коэффициентов кинетического механизма на процесс распространения пламени по поверхности твердого топлива. Показано значительное влияние кинетического механизма на процесс воспламенения паров горючего. В дальнейшем, после стабилизации пары топлива находятся только около поверхности твердого топлива, что свидетельствует о том, что горючее полностью реагирует с окислителем. Такой процесс характерен для диффузионного горения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 20-07-00587).

Список литературы

1. Ben-Yakar A., Natan B., Gany A. Investigation of a solid fuel scramjet combustor // J. Propuls. Power. 1998. V. 14 (4). pp. 447–455.
2. Tyurenkova Veronika V., Stamov Lyuben I. Flame propagation in weightlessness above the burning surface of material // Acta Astronautica. 2019. V. 159. pp. 342–348.

СЖИГАНИЕ ПИРОГЕНЕТИЧЕСКОЙ ВОДЫ ПИРОЛИЗНЫХ ПРОИЗВОДСТВ В СОСТАВЕ ВУТ

Ларионов К.Б.^{1,2,3}, Калтаев А.Ж.^{1,2}, Губин В.Е.¹, Громов А.А.²

¹) Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

²) Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

³) Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово, Россия

Одним из перспективных способов термической утилизации древесных отходов является пиролиз [1]. К основным достоинствам данной технологии относятся вариативность получаемых полезных продуктов (полукос, жидкие углеводороды, неконденсируемый горючий газ) и экологичность [2]. Ввиду высокой влажности древесины, процесс пиролиза сопровождается выделением пирогенетической влаги, впоследствии являющейся балластом пиролизного масла (продукта конденсации парогазовой смеси). Высокое содержание воды в составе топлива приводит к снижению теплоты сгорания, затруднению воспламенения и снижению температуры пламени [3]. При отделении воды от пиролизного масла, ее утилизация посредством использования системы канализации или отвода в почву, отстойники или на открытый грунт не возможна с экологической точки зрения [4]. Одним из решений утилизации пирогенетической воды является ее использование в качестве жидкофазной компоненты водоугольных топлив (ВУТ).

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования изменения физико-химических характеристик и процесса горения водоугольного топлива на основе пирогенетической воды.

В качестве твердой горючей компоненты был использованы различные марки энергетических углей: 2Б, Д, Т и А. В качестве жидких компонент ВУТ использовались дистиллированная и пирогенетическая вода. Последняя была получена в результате ее отделения от пиролизного масла, произведенного на предприятии термической переработки древесных отходов ООО «Сибирский Биоуголь» (п. Беляй, Томская область, РФ). Массовое соотношение жидкой и твердой фаз ВУТ составляло 1:1.

Энергетическая характеристика исследуемых образцов была определена с помощью бомбового калориметра АБК-1 (Русские Энергетические Технологии, Россия). Процесс горения был исследован с помощью экспериментального стенда изучения процессов зажигания и горения органических топлив [5]. Температура греющей среды составляла 500–800°C.

По результатам определения теплоты сгорания было установлено, что для образца ВУТ выполненного на основе пирогенетической воды значение Q_i^r было увеличено в среднем на 1.8 МДж/кг. Данное отличие связано с наличием легких углеводородов в составе пирогенетической воды. Также было установлено, что использование пирогенетической воды способствовало повышению реакционной способности топлива, что выразилось в снижении времени задержки зажигания ВУТ в среднем на 30%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта № FSWW-2020-0022.

Список литературы

1. Pang S. Advances in thermochemical conversion of woody biomass to energy, fuels and chemicals // *Biotechnol. Adv.* – 2019. – V. 37 (4). – 589–597.
2. Jahirul M.I., Rasul M.G., Chowdhury A.A., Ashwath N. Bio-fuels production through biomass pyrolysis – a technological review // *Energies* – 2008. – V. 4. – 4952–5001.
3. Balat M., Balat M., Kırtay E., Balat H. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems // *Energy Convers. Manag.* – 2009. – V. 50 (12). – 3147–3157.
4. Park L., Ren S., Yiacoumi S., Ye, X., Borole A., Tsouris C. Separation of Switchgrass Bio-Oil by Water/Organic Solvent Addition and pH Adjustment // *Energy & Fuels* – 2016. – V. 30 (3). – 2164–2173.
5. Larionov K., Slyusarskiy K., Tsibulskiy S., Tolokolnikov A., Mishakov I., Bauman Y., Vedyagin A., Gromov A. Effect of $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ and $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ activating additives on combustion characteristics of anthracite and its semi-coke // *Energies* – 2020. – V. 13 (22). – 5926.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВЛЕНИЯ АРГОНА И ОЗОНА НА ДЕТОНАЦИОННОЕ ГОРЕНИЕ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Левин В.А., Журавская Т.А.

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

Используя детальный кинетический механизм химического взаимодействия [1], численно исследовано влияние добавок аргона Ar и озона O₃ в стехиометрическую водородно-воздушную смесь на параметры волны детонации с целью снижения скорости распространения волны и температуры продуктов горения без существенного увеличения детонационной ячейки, являющейся фундаментальной характеристикой детонационной способности смеси.

Изучено распространение сформированной ячеистой детонационной волны, инициируемой в начальный момент времени сверхкритическим (достаточным для прямого инициирования) энергоподводом, в покоящейся при нормальных условиях газовой смеси в плоском канале постоянной ширины. Численное моделирование показало, что добавление O₃ в водородно-воздушную смесь приводит к существенному уменьшению размера детонационной ячейки (рис. 1а, б) при незначительном увеличении скорости волны и температуры продуктов горения, что полностью согласуется с результатами экспериментов, представленными в [2]. Однако с целью использования детонации в различных энергетических установках и решения сложной проблемы охлаждения стенок детонационной камеры желательно снизить температуру продуктов горения. Хорошо известно, что простым способом понижения температуры за волной является внесение в горючую смесь Ar, приводящее при этом к существенному росту детонационной ячейки. Проведенные расчеты показали, что мольные доли добавок Ar и O₃ можно подобрать так, что размер ячейки волны детонации в полученной смеси будет близок к среднему размеру ячейки в чистой водородно-воздушной смеси или меньше его (рис. 1в, г), при этом скорость волны и температура продуктов детонации будут существенно снижены. Обнаружено, что детонационная волна в смеси, полученной после внесения добавок, отличается от волны в чистой водородно-воздушной смеси регулярной ячеистой структурой. Кроме того, установлено, что внесение Ar и O₃ в подобранных концентрациях (рис. 1в, г) не снижает устойчивость детонационной волны к возмущениям, вызванным расположенными в канале препятствиями.

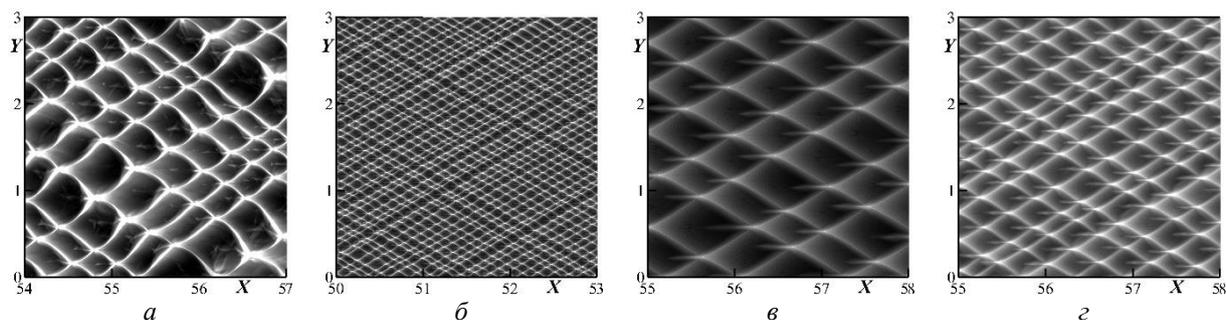


Рис. 1. Численные аналоги следа детонационной волны: а – H₂-воздух (скорость самоподдерживающейся волны $D \cong 1975$ м/с); б – H₂-воздух-1%O₃ ($D \cong 1982$ м/с); в – H₂-воздух-80%Ar-1.5%O₃ ($D \cong 1170$ м/с); г – H₂-воздух-70%Ar-1%O₃ ($D \cong 1318$ м/с). Волна распространяется слева направо.

Работа выполнена в НИИ механики МГУ при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2020-806 от 29.09.2020).

Список литературы

1. Bezgin L.V., Kopchenov V.I., Sharipov A.S., Titova N.S., Starik A.M. Evaluation of Prediction Ability of Detailed Reaction Mechanisms in the Combustion Performance in Hydrogen/Air Supersonic Flows // Combust. Sci. Technol. – 2013. – Vol. 185(1). – P. 62–94.
2. Crane J., Shi X., Singh A.V., Tao Y., Wang H. Isolating the effect of induction length on detonation structure: Hydrogen-oxygen detonation promoted by ozone // Combust. Flame. – 2019. – V. 200. – P. 44–52.

ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОГОЛОВОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ДЕТОНАЦИИ

Левин В.А.^{1,2)}, Мануйлович И.С.¹⁾, Марков В.В.^{1,3)}

¹⁾ НИИ механики МГУ, г. Москва, Россия

²⁾ Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

³⁾ Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, г. Москва, Россия

Сформулирована задача, моделирующая процесс инициирования и высокоскоростного сгорания смеси в трехмерных детонационных волнах, вращающихся в кольцевом зазоре между параллельными плоскими диском и кольцом ортогональными их оси симметрии. Предполагается, что однородная горючая смесь поступает в зазор из резервуара с заданными параметрами торможения через внешнее цилиндрическое кольцо в направлении к оси симметрии. Продукты детонации выходят в окружающее пространство через коническое сопло с углом полураствора 45 градусов. Сформулирована модель инициирования детонации подводом энергии, и в численных экспериментах определены значения параметров инициаторов, оптимальные для формирования вращающейся детонации и позволяющие задавать направление вращения. Система подачи смеси реализована с учетом соотношения давления в резервуаре и статического давления на входе в зазор. Получены и проанализированы нестационарные ударно-волновые структуры, возникающие в процессе формирования стационарной вращающейся детонации.

Изучен процесс инициирования восьми вращающихся в одну и ту же сторону волн детонации. Определены параметры инициаторов, при которых они формируются, и в системе координат, вращающейся вместе ними, проанализирована структура течения. Получены и исследованы осциллограммы тяговых характеристик при вращении нескольких детонационных волн: значения реактивной силы и удельного импульса

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

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2020-806).

Список литературы

1. Годунов С.К., Забродин А.В. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики – М: Наука, 1976 – 400 с.
2. Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И., Антонов А.С., Брызгалов П.А., Никитенко Д.А., Стефанов К.С., Воеводин Вад.В. Практика суперкомпьютера «Ломоносов»; // Открытые системы. – 2012. – № 7. – С. 36–39.

ВЛИЯНИЕ НЕИДЕАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕСС САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ДВУХФАЗНЫХ ТОПЛИВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Лещевич В.В., Пенязьков О.Г., Шимченко С.Ю.

Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

Изучение явлений самовоспламенения топливных смесей тесно связано как с решением многих прикладных задач: инициирование горения, распространение пламени, детонация, так и с фундаментальными проблемами создания адекватных кинетических механизмов химических реакций. Измеряемая в эксперименте задержка самовоспламенения, или период индукции смеси, отражает скорость протекания химических реакций и является функцией, зависящей от температуры и исходных концентраций топлива и окислителя [1]. С понижением температуры при сжатии смеси и, соответственно, с экспоненциальным ростом значения ее периода индукции до нескольких миллисекунд может происходить возгорание посторонних микронных частиц, которые случайно находятся в измерительном объеме экспериментальных установок. Во многих случаях они начинают возгораться при более низких температурах и вызывают дополнительный локальный нагрев горючей смеси и ее последующее вынужденное очаговое зажигание [2]. При работе с заранее испаренными жидкими топливами на установках быстрого сжатия или ударных трубах, текущее парциальное давление паров вблизи холодных стенок установки может превышать их равновесное значение и, как следствие, вызывать конденсацию топлива [3]. Это вызывает перераспределение его концентрации в измерительном объеме, а выделившаяся теплота фазового перехода может влиять на локальные параметры смеси в газовой фазе.

В работе исследованы основные физико-химические закономерности, определяющие процессы самовоспламенения двухфазных топливовоздушных сред, содержащих угольные микрочастицы, метан и пересыщенные пары *n*-декана, при адиабатическом нагреве в установке быстрого сжатия до температур 600–1200 К. Показано, что воспламенение стехиометрической метановоздушной смеси с угольными микрочастицами диаметром 20–32 мкм при температурах менее 1070 К происходит за счет ее вынужденного зажигания от микрочастиц, время возгорания которых составляет 0,45–23 мс, а температура возрастает от температуры самовозгорания (850 К) до температуры горения 2500±200 К, причем установленная близость минимальной температуры смеси необходимой для зажигания метана от угольных микрочастиц (1030 К) и для воспламенения метановоздушной смеси (1060 К), позволяет распространить справедливость предложенного механизма зажигания на режимы воспламенения метана от случайных примесных частиц, существующих в экспериментальных установках.

Экспериментально установлено, что процесс неравновесной конденсации паров *n*-декана из топливовоздушной смеси вблизи холодных стенок камеры сгорания и их перенос тороидальным вихревым движением газа над поверхностью сжимающего поршня при температурах 600–800 К и давлениях 0,8–1,3 МПа, приводит в зависимости от начального состава к росту средней температуры смеси на 15–100 К по сравнению с адиабатической и к существенному снижению эквивалентного отношения топливо-окислитель, что определяет неоднородность и пространственное положение первичных очагов самовоспламенения *n*-декана.

Список литературы

1. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. – М.: Мир, 1968. – 592 с.
2. Leschevich V.V. et. al. Auto-ignitions of a methane/air mixture at high and intermediate temperatures. // *Shock Waves*. – 2016. – Vol. 26(5) – P. 657–672.
3. Лещевич, В.В., Пенязьков О.Г., Шимченко С.Ю. Особенности самовоспламенения паров *n*-декана в воздухе при температурах 600–800 К. // Докл. НАН Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 747–756.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФУЗИОННОГО ГОРЕНИЯ ИМПАКТНОЙ МИКРОСТРУИ

Литвиненко Ю.А., Литвиненко М.В.

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

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном исследовании развития импактной пропан-бутановой микроструи при диффузионном горении в условиях внешнего акустического воздействия при низком числе Рейнольдса. Развитие воздушной микроструи может сопровождаться контролируемым порождением синусоидальной моды неустойчивости от воздействия внешнего источника акустических колебаний [1]. Частота акустических колебаний выбирается из диапазона восприимчивости микроструи.

По полученным теневым картинам было установлено, что частота восприимчивости при диффузионном горении микроструи пропан/бутана соответствует диапазону от 2 до 2,2 кГц. При воздействии частотой из этого диапазона развитие микроструи и самого процесса горения существенно меняется. Следует учесть, что для реализации механизма воздействия необходимо, чтобы факел не контактировал с соплом, т.е. был реализован так называемый «поднятый» факел. При выполнении этих условий происходит развитие синусоидальной неустойчивости в струе. На рис. 1 представлена визуализация процесса диффузионного горения пропан/бутановой смеси в импактной микроструе. Здесь в плоскости zy можно наблюдать деформацию пламени в виде «зонтика» в пристеночной области ограничивающей пластины с акустическим воздействием (рис. 1а) и без акустического воздействия (рис. 1б). Диаметр зоны пристенного горения составлял порядка 50–60 мм.

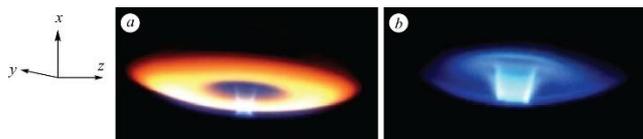


Рис. 1. Диффузионное горение в круглой импактной микроструе смеси пропан/бутана без воздействия (а) и с акустическим воздействием частотой $F=2100$ Гц (б).

Показано, что при диффузионном горении импактной струи с относительно малыми диаметрами сопла можно управлять параметрами процесса смешения, увеличивать полноту сгорания такой системы, используя акустическое возмущение. Установлено, что акустическое воздействие на импактную микрострую приводит к неравномерности радиального распространения скоростного потока в пристенной области струи. Определено, что уровень среднеквадратичных пульсаций скорости после взаимодействия микроструи со стенкой падает с $0,7\% U_0$ до $0,2\% U_0$. Отмечен рост дальности микроструй (протяженности ламинарного участка струи) с $x/d \approx 3$ для струи с $d = 22$ мм, до $x/d \approx 32$ для струи с $d=0,5$ мм. Обнаружено, что развитие синусоидальной неустойчивости в импактной струе приводит к улучшению полноты сгорания пропан/бутановой смеси в воздухе и уменьшению выброса сажи. Установлено, что при диффузионном горении импактной струи образующаяся естественным образом горючая смесь является излишне богатой и горение происходит с желтым цветом пламени, что свидетельствует о недостатке окислителя (воздуха) и большом количестве сажи в продуктах горения. Показано, что важным фактором, влияющим на полноту сгорания при диффузионном горении в импактной струе, являются геометрические параметры установки, такие как диаметр сопла и расстояние от сопла до ограничивающей стенки.

Список литературы

1. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко Ю.А., Козлов Г.В., Литвиненко М.В. Дозвуковые круглая и плоская макро- и микроструи в поперечном акустическом поле // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2010. Т. 5, вып. 2. С. 28–42.

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ПАНОРАМНАЯ ДИАГНОСТИКА ДИНАМИКИ ПОДНЯТОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПЛАМЕНИ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНЕГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ВОЗМУЩЕНИЯ

Лобасов А.С., Шарaborин Д.К., Толстогузов Р.В., Дулин В.М.

Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Возмущение внешним периодическим акустическим полем, может быть использовано как эффективный способ активного управления динамикой и характеристиками вихрей на начальном участке струи [1–3] и интенсивностью турбулентного теплообмена [1, 4]. Более того, возмущение акустическими волнами является эффективным методом воздействия на пламя, что приводит к повышению устойчивости пламени, улучшению смешения и интенсификации горения [5, 6].

Исследование влияния внешнего периодического возмущения на горение богатой незакрученной предварительно перемешанной метано-воздушной смеси было выполнено с применением метода PIV (particle image velocimetry) с высоким временным разрешением (частота съемки 10 кГц), с использованием двойного импульсного лазера PHOTONICS DM150-532-DH (30 мДж в импульсе при 10 кГц) и скоростной камеры PHOTRON SA5 (частота съемки до 7,5 кГц при полном разрешении). Полученные наборы мгновенных полей скорости использовались для вычисления средних характеристик течения, пульсаций компонент скорости и напряжений Рейнольдса. Проведена пространственно-временная декомпозиция ансамбля мгновенных полей скорости с использованием метода главных компонент для количественного анализа влияния внешнего акустического поля на крупномасштабные вихревые структуры на начальном участке струи.

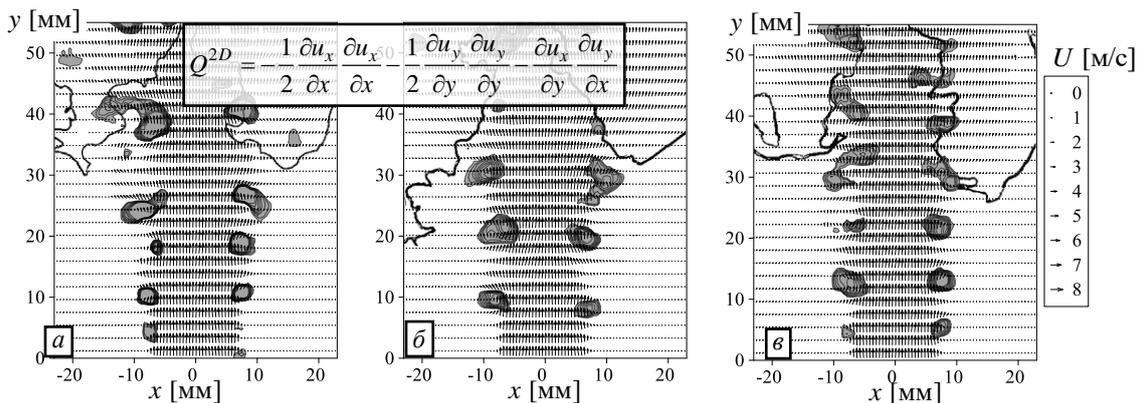


Рис. 1. Пример мгновенного поля скорости для различных режимов внешнего периодического возмущения (а – без возбуждения, б – возбуждение 290 Гц, в – возбуждение 400 Гц) при горении богатой незакрученной предварительно перемешанной метано-воздушной струи. Вихревые структуры идентифицированы на изображениях с использованием модифицированного Q^{2D} -критерия ($Q^{2D} > 1,3$). Черная линия показывает положение фронта пламени, идентифицированного по градиенту плотности засева трассеров.

Список литературы

1. Гиневский А.С., Власов Е.В., Каравосов Р.К. Акустическое управление турбулентными струями. М: Физматлит. 2001 – 240 с.
2. Грек Г.Р., Козлов В.В., Литвиненко Ю.А. Устойчивость дозвуковых струйных течений: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГУ. 2012 – 208 с.
3. Broze G., Hussain F. Transitions to chaos in a forced jet: intermittency, tangent bifurcations and hysteresis. // J. Fluid Mech. – 1996. – V. 311. – P. 37–71.
4. Cerecedo L.M., Aisa L., Garcia J.A., Santolaya J.L. Changes in a coflowing jet structure caused by acoustic forcing // Exp. Fluids. – 2004. – V. 36. – P. 867–878.
5. Накоряков В.Е. Горение капли жидкого топлива в звуковом поле. // ИФЖ. – 1967. – Т.12. – С.650–656
6. Голуб В.В., Бакланов Д.И., Головастов С.В., Иванов К.В., Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Володин В.В. Воздействие акустического поля на развитие пламени и переход в детонацию // ТВТ. – 2010. – Т. 48. – С. 901–907.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ТОЧЕЧНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА

Матвиенко О.В., Луценко А.В., Касымов Д.П., Лобода Е.Л.

Национальный Исследовательский Томский Государственный Университет, г. Томск, Россия

В последние годы наблюдается увеличение количества природных пожаров. Эти пожары наносят огромный ущерб, а также представляют угрозу для жизни и здоровья людей. Основными факторами, которые влияют на распространения таких пожаров, являются радиационный и конвективный перенос тепла от пламени, а также формирующиеся в процессе пожара горящие частицы [1], которые переносятся далеко от очага пожара посредством ветра и конвективных течений [2], создавая точечные пожары и являясь причиной зажигания построек [3]. Целью данной работы является адаптация физико-математической модели, предложенной в статье [4], для моделирования процесса зажигания слоя древесины горящими частицам, которые образуются при распространении лесного пожара.

В результате математического моделирования зажигания слоя древесины тлеющими частицами сосновой коры и сосновыми веточками, а также сравнение с результатами проведенного эксперимента установлено, что для инициирования процесса зажигания тлеющая частица должна обладать значительной тепловой энергией. А так как максимальная температура частицы ограничена температурой тления, то увеличение запаса тепловой энергии частицы возможно только при увеличении размера частицы. Для частиц малых размеров, запасенного в них тепла оказывается недостаточным для инициирования пиролиза и зажигания не участвующих в горении слоя древесины. Температура в слое древесины вследствие кондуктивного теплообмена сначала несколько повышается, а затем в результате теплообмена с окружающим воздухом и почвой начинает уменьшаться. Интенсивный теплообмен с окружающей средой частиц малых размеров приводит к прекращению тления частицы и ее охлаждению. Если размеры частицы достигают критического значения, то в прилегающей к ней области начинается процесс пиролиза. Смешение продуктов пиролиза с атмосферным кислородом приводит к вспышке, сопровождаемой резким, скачкообразным ростом температуры. После выгорания газообразных продуктов пиролиза в данной области пространства режим горения сменяется режимом тления. При этом зона пиролиза распространяется во внешнюю по отношению к частице область. Если размеры частицы достаточно большие, то после зажигания слоя древесины возникает режим пламенного горения в газовой фазе. Результаты исследований также показывают, что на процесс воспламенения влияет скорость ветра, размер и количество частиц, упавших на подстилающую поверхность.

Список литературы

1. Filkov A., Kasymov D., Zima V., Matvienko O. Experimental investigation of surface litter ignition by bark firebrands. AIP Conference Proceedings 1698, 060004 (2016). doi: 10.1063/1.4937859.
2. Матвиенко О.В., Фильков А.И., Гришин А.М. Численное исследование переноса горящих частиц, образующихся в очаге горения. Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. № 5. С. 1328–1338.
3. Kasymov D. P., Tarakanova V. A., Martynov P. S., Agafontsev M. V. Studying firebrands interaction with flat surface of various wood construction materials in laboratory conditions. Journal of Physics Conference Series. 11/2019; 1359:012092, DOI:10.1088/1742-6596/1359/1/012092.
4. Matvienko O. V., Kasymov D. P., Filkov A. I., Daneyko O. I., Gorbatov D. A. Simulation of fuel bed ignition by wildland firebrands. International Journal of Wildland Fire (2018). Vol. 27, 550–561. <https://doi.org/10.1071/WF17083>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА С ДОБАВКОЙ ПОРОШКА БОРА

Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Порязов В.А.

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Доклад посвящен численному моделированию горения смесового твердого топлива, содержащего порошок бора. Физико-математическая постановка задачи строится на допущениях теории динамики многофазных реагирующих сред [1], сопряженной модели горения смесовых твердых топлив [2], модели окисления и горения частиц бора [3].

Постановка задачи строится для двух расчетных областей: область реагирования твердого топлива и область горения полупродуктов разложения твердого топлива над его поверхностью. В области твердого топлива решаются уравнение теплопроводности для топлива и уравнение для изменения концентрации окислителя в твердом топливе. В области над поверхностью топлива решаются уравнения сохранения массы, импульса и энергии газа и частиц, а также уравнения сохранения массы компонентов газозвеси и уравнение счетной концентрации частиц. На поверхности топлива задаются условия равенства потоков энергии и массы компонентов смеси.

Методика решения задачи основана на алгоритме распада произвольного разрыва и конечно-разностном методе. Для исследования выбрано смесовое твердое топливо с полидисперсным порошком бора. Кинетические константы горения смесового твердого топлива без частиц бора подбирались таким образом, чтобы скорость горения смесового твердого топлива без добавления порошка металла при давлении 10 МПа составляла 9 мм/с, конечная температура продуктов горения равнялась 2800 К, в соответствии с экспериментальными данными, приведенными в [4]. Кинетические константы горения порошка бора в реакционноспособном газе частично взяты из [3]. В качестве параметра согласования для горения смесового твердого топлива, содержащего частицы бора, выбирались значения теплового эффекта реакций и коэффициенты для скорости диффузии в реакции окисления частиц бора. Согласование результатов осуществлялось путем сравнения результатов расчета с данными экспериментов, выполненных в институте химической кинетики и горения под руководством Глотова А. Г. Для согласования результатов численного решения и данных эксперимента были взяты составы с дисперсностью и массовым содержанием частиц, соответствующими данным эксперимента.

Было проведено параметрическое решение задачи и определена зависимость скорости горения смесового твердого топлива от давления газа над поверхностью топлива и дисперсности порошка бора.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта
Российского научного фонда (проект № 19-79-10054).*

Список литературы

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987.
2. Порязов В. А., Крайнов А. Ю. Численное моделирование погасания пороха Н при резком сбросе давления на основе сопряженной модели горения // ФГВ. – 2015. – Т. 51, № 6. – С. 47–52.
3. Крайнов А. Ю., Крайнов Д. А., Моисеева К. М., Порязов В. А., Хакимов А. А. Математическое моделирование горения газозвеси порошка бора // ИФЖ – 2021 – Т. 94, № 2 – 360–371.
4. Зенин А. А., Глазкова А. П., Лейпунский О. И., Боболев В. К. Влияние алюминия на горение перхлората аммония с полиформальдегидом // ФГВ. – 1968. – Т.4, № 3. – С. 299–304.

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ИСКРОВОГО ЗАЖИГАНИЯ ГАЗОВЗВЕСИ ПОРОШКА БОРА В ПРОПАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Моисеева К.М., Крайнов А.Ю.

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

В докладе представлены результаты параметрического исследования особенностей воспламенения газовзвеси порошка бора в пропано-воздушной смеси. Тема работы связана с тем, что горение порошка бора на текущий момент является предметом исследования ряда авторов. Несмотря на возросший интерес к исследованиям в этой области остается много нерешенных вопросов в области особенностей воспламенения и горения газовзвесей порошка бора в зависимости от состава газовзвеси. В частности, в работе [1] показана возможность горения наноразмерного порошка диборида алюминия. В [2] показана возможность горения взвеси порошка бора в пропано-воздушной смеси. В [3] утверждается, что горения аэрозвеси бора в трубе достичь не удастся. При этом в [3] приведены данные о горении взвеси бора в кислороде.

В работе [4] сформулирована физико-математическая модель горения аэрозвеси порошка бора и проведено сопоставление результатов численного исследования с данными из научной литературы. В настоящем докладе предложена физико-математическая модель искрового зажигания порошка бора в пропано-воздушной смеси. Идея горения бора в пропано-воздушной смеси с малой массовой концентрацией пропана в газе взята из работы [2], где пропано-воздушная смесь использовалась для предварительного прогрева установки по исследованию горения газовзвеси порошка бора. Целью работы являлось определение критических условий воспламенения порошка бора в пропано-воздушной смеси, а также определение влияния малой добавки пропана в газовзвесь на критические условия воспламенения состава.

Физико-математическая постановка задачи определялась уравнениями сохранения массы, импульса и энергии газа и частиц, а также уравнениями сохранения массы компонентов газовзвеси и уравнением счетной концентрации частиц. Методика решения задачи основана на алгоритме распада произвольного разрыва.

Физико-химические параметры расчета были взяты из [4, 5]. Было выполнено параметрическое исследование зависимости критической энергии зажигания взвеси порошка бора в пропано-воздушной смеси в зависимости от содержания пропана в газе, массовой концентрации и радиуса частиц бора.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-421.2020.8.

Список литературы

1. Арефьев К.Ю., Яновский Л.С., Ягодников Д.А. Математическое моделирование горения диборида алюминия в воздушном потоке // ЖПХ. – 2019. – Т. 92, № 7. – С. 938–946.
2. Ягодников Д. А. Экспериментальное исследование газодисперсного пламени частиц бора // ФГВ. – 2010. – Т. 46, № 4. – С. 64–71.
3. Бойчук Л. В. Исследование процессов распространения пламени в двухкомпонентных смесях: Автореф. дис. ... канд. физ.-матем. Наук, 01.04.17. – Одесса: ОГУ, 1993. – 18 с.
4. Крайнов А. Ю., Крайнов Д. А., Моисеева К. М., Порязов В. А., Хакимов А. А. Математическое моделирование горения газовзвеси порошка бора // ИФЖ. – 2021. – Т. 94, № 2. – С. 360–371.
5. Moiseeva K. M., Krainov A. Yu., Krainov D. A. Numerical investigation on burning rate of propane-air mixture // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – V. 696. – 012011.

КИНЕТИКА ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Молоканов А.А., Тарасов Г.А., Казаков А.И., Плишкин Н.А.,
Яновский Л.С., Варламова Н.И.

Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Россия

Традиционные авиационные топлива для газотурбинных двигателей, такие как ТС-1 и РТ, в своем составе могут включать сырье, полученное с применением процессов каталитического крекинга, гидрокрекинга и гидроочистки [1]. За счет непостоянства состава углеводородных соединений физико-химические и эксплуатационные свойства таких топлив могут меняться от партии к партии. В качестве перспективных топлив будущего могут рассматриваться индивидуальные соединения или топлива постоянного состава, включающие индивидуальные соединения. Такие соединения могут получать из газа или биомассы путем химического синтеза [2, 3].

В качестве объектов исследования были использованы нормальные, каркасные, циклопропанированные и спиранные углеводороды C₈–C₁₄, представляющие интерес для применения в качестве компонентов авиационных топлив.

Кинетику термического разложения отобранных углеводородных соединений изучали по газовыделению на манометрической установке, позволяющей проводить разложение в стеклянном сосуде заданного объема и регистрировать увеличение давления газа от 0 до 4560 кПа компенсационным методом с точностью в пределах ± 4 кПа при температурах от 30 до 500°C.

Установлено, что циклопропанированные соединения, включающие в себя не более 10 атомов, обладают хорошими низкотемпературными свойствами (температура застывания, температура помутнения, вязкость при минус 50°C).

Экспериментальными методами исследовали физико-химические, термохимические свойства и кинетику термического разложения отобранных углеводородных соединений.

При изучении кинетики термодеструкции установлено, что в интервалах температур от 390 до 460°C реакция термического разложения рассмотренных углеводородов подчиняется уравнению первого порядка до глубины 95% и более.

Установленные кинетические закономерности позволяют рассчитывать глубины разложения углеводородов за времена их пребывания при повышенных температурах эксплуатации.

Список литературы

1. M.E. MacDonald, D.F. Davidson, R.K. Hanson Decomposition Measurements of RP-1, RP-2, JP-7, n-Dodecane, and Tetrahydroquinoline in Shock Tubes / Journal of Propulsion and Power, V. 27, No 5, 2011.
2. Пат. 5151171 US / Method of cooling with an endothermic fuel // L.J. Spadaccini, P.J. Marteney, M.B. Colket; assignee United Technologies Corporation.
3. Томилов Ю.В., Менчиков Л.Г., Новиков Р.А., Иванова О.А., Трушков И.В. Методы синтеза донорно-акцепторных циклопропанов / Успехи химии. 2018. Т. 87. № 3. С. 201–250.

ВИХРЕВОЙ СПОСОБ СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА ИЗ ШЛАМОВ УГЛЕБОГАЩЕНИЯ

Мурко В.И.¹⁾, Баранова М.П.^{2,3)}, Делягин В.Н.⁴⁾

¹⁾ Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

²⁾ Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

³⁾ Красноярский ГАУ, г. Красноярск

⁴⁾ СФНЦА РАН, г. Новосибирская обл., р.п. Краснообск, Россия

Увеличение предприятий по углеобогащению в Кузбассе привело к росту выхода угольных шламов и тонкодисперсных отходов углеобогащения на вновь построенных углеобогащительных фабриках. Высокие значения влажности и зольности данных материалов не позволяют использовать их как товарный продукт без дополнительной обработки. В результате эти отходы отправляют в отвал, что приводит не только к потерям добытого сырья, но и значительному загрязнению окружающей среды [1]. В этом случае, эти отходы можно использовать как топливо в виде водоугольных суспензий с применением технологии низкотемпературного вихревого сжигания забалластированных топлив.

На рис. 1 представлен процесс экспериментальных исследований сжигания.



Рис. 1. Процесс сжигания водоугольного топлива в вихревой камере.

Представлены результаты разработки конструкций теплогенераторов малой и средней мощности. Вихревые адиабатические камеры сжигания различаются по расположению оси вихревого движения газов в топочном пространстве (горизонтально и вертикально). В зависимости от теплопроизводительности котла вихревая камера располагается либо рядом с котлом (котел является котлом-утилизатором), либо встраивается в топочное пространство котла. Адиабатические вихревые топочные камеры с горизонтальной осью вращения топочных газов были разработаны для котлов с теплопроизводительностью от 0,1 до 0,7МВт. Разработана методика расчета геометрических размеров вихревых адиабатических камер сгорания малой и средней мощности с учетом их теплопроизводительности и качества водоугольного топлива.

Список литературы

1. Murko V, Karpenok V, Fedyayev V and Chernykh D 2017 Results of tests of a fuel additive on a coal-fired boiler Journal of SFU 10 (8)
2. V. I. Murko, V. A. Khyamyalyainen and M. P. Baranova, "The Creation of a Low-Capacity Boiler Plant on Coal-Enrichment Waste," 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/EastConf.2019.8725397
3. Murko V., Baranova M., Grishina I The intensification of the solid fuel grate-firing process // Journal of Physics: Conference Series, Volume 1261, conference 1 2019 J. Phys.: Conf. Ser.1261 012024 DOI <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1261/1/012024>
4. Мурко В. И., Хямяляйнен В. А., Волков М. А., Баранова М. П. Возможности и перспективы реализации отходов технологии обогащения углей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 6. – С. 165–172. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-165-172.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРОВОЗДУШНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ МЕТАМОРФИЗМА В ДВУХСТУПЕНЧАТОМ РЕАКТОРЕ

Никитин А.Д., Рыжков А.Ф.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

Исследование процесса поточной паровоздушной газификации угля представляет интерес для повышения эффективности и снижения материалоемкости парогазовых установок с внутрицикловой газификацией угля (ПГУ-ВЦГ), внедрение которых позволит решить экологические проблемы угольной энергетики и уменьшить выбросы CO₂ за счет увеличения эффективности угольных электростанций.

В работе проведено расчетное исследование процесса паровоздушной газификации углей различной степени метаморфизма (березовский бурый, кузнецкий длиннопламенный, кузнецкий тощий и антрацит) в поточном двухступенчатом газогенераторе фирмы МНІ производительностью по углю 1700 т/сут. Водяной пар подается на вход во вторую ступень. Исследование выполнено с использованием одномерной модели, разработанной на основе кинетико-термодинамической модели [1] и результатов экспериментальных исследований паровоздушной газификации кузнецкого каменного угля в поточном реакторе [2]. В используемой модели учитывается реагирование внутри пор угольных частиц, изменение порядка реакции взаимодействия углерода с водяным паром, изменение размера частиц в ходе газификации, распределение частиц угля по размеру, рециркуляция коксозольного остатка с выхода газогенератора в первую ступень.

В ходе расчетов при неизменной конструкции газогенератора и удельного по поперечному сечению теплонапряжения варьировалось соотношение пар/уголь. Влажность всех рассматриваемых углей принята одинаковой и равной 2%. Для всех типов угля задано одинаковое распределение частиц угля по размеру, типичное для помола каменного угля на шаровой барабанной мельнице. Площадь поверхности и объем пор в коксовом остатке угля задавались пропорционально содержанию летучих. При расчетах расход воздуха в первую ступень газогенератора подбирался таким образом, чтобы степень конверсии угля на выходе из газогенератора составила 90%, что соответствует режиму работы действующего газогенератора МНІ.

В результате расчетов для рассмотренных углей получены зависимости состава и температуры синтез-газа на выходе из газогенератора, степени конверсии угля и химического КПД газогенератора от соотношения пар/уголь. При увеличении соотношения пар/уголь хим. КПД газогенератора изменяется немонокотонно, что связано с изменением порядка реакции взаимодействия углерода с водяным паром от первого до нулевого. Добавка пара в воздушное дутье оказывает положительный эффект для всех рассмотренных углей (при условии их предварительной сушки). По мере увеличения степени метаморфизма углей оптимальное соотношение пар/уголь и максимальное увеличение хим. КПД газогенератора возрастают от 0,32 кг/кг и 2,3% (абс.) для бурого угля до 0,51 кг/кг и 7,5% (абс.) для антрацита. Однако с учетом высокой рабочей влажности бурого угля (до 30–45%), при отсутствии его предварительной сушки концентрация H₂O в зоне газификации будет выше оптимальной, и дополнительная добавка пара в газогенератор приведет к резкому уменьшению хим. КПД. Согласно выполненным оценкам, повышение хим. КПД газогенератора на 2% (абс.) приводит к увеличению КПД-нетто ПГУ-ВЦГ на 0,5% (абс.), что снижает потребление угля и выбросы CO₂ на 1%.

Список литературы

1. Donskoy I.G. et al. Coal gasification process simulations using combined kinetic-thermodynamic models in one-dimensional approximation // *Combust. Theory Model.* – 2017. – V. 21, No 3. – P. 529–559.
2. Nikitin A.D. et al. The effect of steam on air gasification of mechanically activated coal in a flow reactor // *Thermal Science.* – 2021. – V. 25(1A). – P. 321–330.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯЧЕИСТОЙ СТРУКТУРЫ В СМЕСЯХ АЦЕТИЛЕН, ЭТИЛЕН, ВОДОРОД С ВОЗДУХОМ

Никитин В.Ф., Михальченко Е.В., Стамов Л.И.

Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, г. Москва, Россия

Детонация – это сложное явление из-за трехмерной волновой структуры с неоднородным динамическим волновым фронтом [1–4]. Если рассматривать движение тройной точки через детонационную трубу, покрытую сажей, сдвиговые силы от этих тройных точек размечают рисунок похожий на чешую рыбы во внутренних стенках. Эта модель известна как детонационная ячейка. По мере того, как ведущий ударный фронт распространяется вниз по течению, тройные точки чередуются. Одновременно поперечная волна колеблется перпендикулярно направлению распространения [5].

Для расчета ячеистой детонации была использована математическая модель многокомпонентного совершенного газа с химическими превращениями, без явлений переноса и без моделирования турбулентности. Зажигание газовой смеси проводится вводом энергии от внешнего источника; энергии должно быть при этом достаточно для того, чтобы инициировать прямое возбуждение детонации.

На рис. 1 показано распределение максимально достигнутого давления в области для случая смеси водород-воздух в трубе длиной 20 см и диаметром 2 см. Начальная температура смеси 500К.

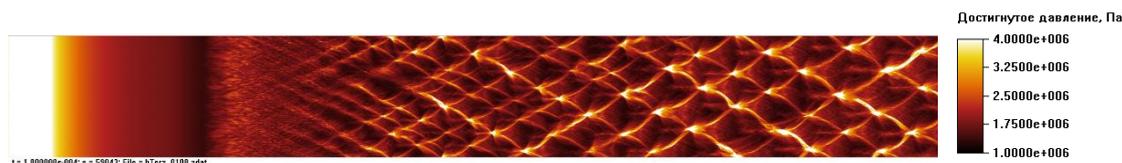


Рис. 1. Распределение максимально достигнутого давления в области к моменту времени 100 мкс.

Работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН на выполнение государственного задания по теме No. 0580-2021-0021 «Разработка алгоритмической компоновки и программ для расчета многомасштабных процессов и горения».

Список литературы

1. Gamezo V.N., Vasil'ev A.A., Khokhlov A.M., Oran E.S. Fine cellular structures produced by marginal detonations // Proceedings of the Combustion Institute Vol. 28(1), p. 611-617, 2000.
2. Lee, J., Knystautas, R., and Freiman, A., "High Speed Turbulent Deflagrations and Transition to Detonation in H₂-Air Mixtures," Combustion and Flame, Vol. 56, 1984.
3. Kuo, K., "Principles of Combustion," McGraw-Hill, Boston, 2005.
4. В. А. Левин, И. С. Мануйлович, В. В. Марков. Трехмерная ячеистая детонация в цилиндрических каналах. Доклады Академии наук, 460(1): 35–38, 2015.
5. Gavrikov, A., Efimenko, A., and Dorofeev, S., "A Model for Detonation Cell Size Prediction from Chemical Kinetics," Combustion and Flame Vol. 120, p. 19-33, 2000.

УДЕЛЬНЫЕ ГАЗОВЫЕ АНТРОПОГЕННЫЕ ВЫБРОСЫ, ОБРАЗУЮЩИЕСЯ ПРИ ГОРЕНИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СУСПЕНЗИОННЫХ ТОПЛИВ

Няшина Г.С., Дорохов В.В., Стрижак П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Суспензионные топлива на основе угля, отходов углеобогащения, а также отходов деревообрабатывающей и нефтяной отраслей промышленности являются экологичной и экономически обоснованной альтернативой традиционному твердому топливу [1, 2]. В рамках настоящего экспериментального исследования проведено сравнение газовых выбросов, образованных при горении угля и водоугольных суспензий, с использованием методов нормирования и расчета удельных концентраций загрязняющих веществ (оксидов серы, азота и углерода). Выделены методики нормирования относительно: (i) массы сжигаемого топлива; (ii) выделяемой при горении тепловой энергии; (iii) удельных массовых выбросов в единицу времени; (iv) удельных максимальных массовых выбросов; (v) удельных массовых выбросов, приходящихся на килограмм условного топлива (или 1 МДж тепловой энергии).

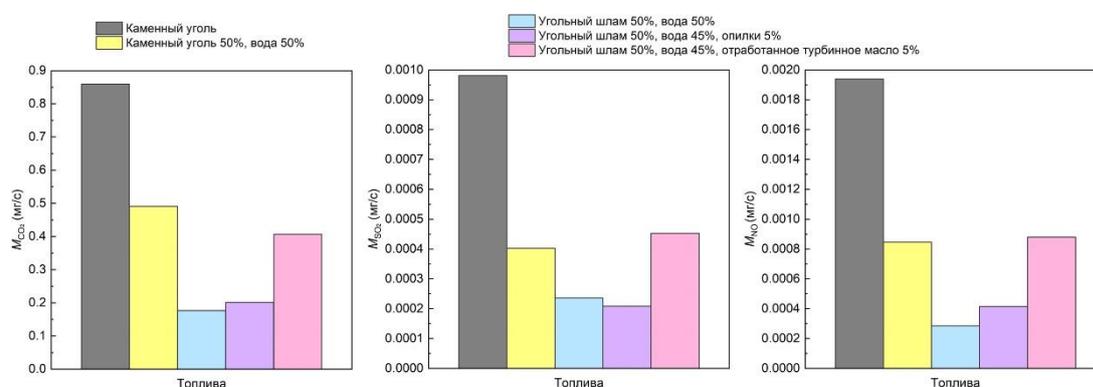


Рис. 1. Концентрации загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу в единицу времени.

На рис.1 представлены концентрации SO_2 , CO_2 и NO , выделяемых в атмосферу при горении различных топлив. Проведенные эксперименты показали, что сжигание угля характеризуется максимальными выбросами загрязняющих веществ вне зависимости от массы навески и температуры в камере сгорания. При сжигании водоугольных суспензий средние концентрации CO_2 снижаются на 12–52%, SO_2 – 24–90%, NO_x – 28–60% по сравнению с углем. Нормированные относительно тепловой энергии значения концентраций в дымовых газах оксидов серы и азота E_{SO_2} и E_{NO} для суспензий на 20–70% ниже, чем у угля. При этом данные показатели диоксида углерода для водоугольных топлив на основе угля и угольного шлама увеличились до аналогичных значений для угля.

Исследования выполнены при поддержке гранта Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2020-806 (контракт № 13.1902.21.0014).

Список литературы

1. Vershinina K.Y., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Promising components of waste-derived slurry fuels // J. Energy Inst. – 2020. – V. 93. – P. 2044–2054.
2. Li D., Wu D., Xu F., Lai J., Shao L. Literature overview of Chinese research in the field of better coal utilization // J. Clean. Prod. – 2018. – V. 185. – P. 959–980.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ БАРЗАССКИХ УГЛЕЙ В ПРИСУТСТВИИ ВОДОРОДОДОНОРНОГО РАСТВОРИТЕЛЯ

Осипов А.В.¹⁾, Петров И.Я.²⁾, Ушаков К.Ю.¹⁾, Богомолов А.Р.^{1,3)}

¹⁾ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
г. Кемерово, Россия

²⁾ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

³⁾ Институт теплофизики им. С.С. кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В России история исследований по созданию технологий переработки твердых полезных ископаемых в продукты топливного и химического назначения насчитывает порядка 100 лет. За это время было реализованы химико-технологические исследования, показавшие перспективы использования углей с высоким содержанием водорода в органической массе в качестве сырья для химической, нефте- и газохимической отраслей [1–3].

Ранее было показано [4], что среди кузбасских углей плитчатая форма барзасских сапромикситов и продукт ее выветривания являются наиболее подходящим сырьем для технологий прямого ожижения с последующим получением моторных топлив и ценных химических соединений из продуктов гидроконверсии твердых топлив. Следующим этапом стало исследование с целью определения термодинамических и режимных характеристик термического превращения барзасского угля в присутствии водорододонорного растворителя (тетралина). Для проведения исследования использовалась установка, основанная на реакторе непроточного типа объемом 400 мл.

К предварительным результатам исследований следует относить значения термодинамических величин процесса термического воздействия на барзасские сапромикситы в присутствии тетралина, при которых достигается максимальный выход жидких продуктов (давление 12–13 МПа и температура 440°C). Стоит отметить, что с увеличением давления выход жидких продуктов увеличивается, но при этом происходит увеличение вязкости полученной жидкости. В экспериментальных исследованиях по определению влияния продолжительности термообработки при наиболее выгодных параметрах ведения процесса было выявлено, что с увеличением времени выдержки от 10 до 40 минут выход жидких продуктов уменьшается, одновременно с этим увеличивается выход твердого продукта. Также было определено, что использование водорододонорного растворителя увеличивает выход жидких продуктов по сравнению с процессом без него, при этом наибольший выход жидких продуктов наблюдался при соотношении уголь/тетралин равным 1/2.

Список литературы

1. Сапропелиты Барзасского месторождения Кузбасса / Г.И. Грицко, В.А. Каширцев, Б.Н. Кузнецов и др.; науч. Ред. Акад. А.Э. Конторович; Рос. Акад. Наук, Сиб. отд-ние, ин-т нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2011. – 126 с. ISBN 978-5-4262-0007-4
2. Комплексная переработка горючих сланцев Волжского бассейна / Лapidус А.Л., Бейлина Н.Ю., Худяков Д.С., Жагфаров Ф.Г., Илясов В.Н. // Химия твердого топлива. 2018. № 2. С. 6–13.
3. Сапропелитовые угли - ценное сырье для органического синтеза / Исхаков Х.А., Кочетков В.Н., Корнилова В.П. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2004. № 1 (38). С. 62–63.]
4. Ушаков, К. Ю. Исследование термических превращений низкометаморфизованных кузбасских углей в различных средах и прогнозирование их гидрируемости в процессах прямого ожижения / К. Ю. Ушаков, И. Я. Петров, А. Р. Богомолов // Химия твердого топлива. – 2021. – № 4. – С. 3-12. – DOI 10.31857/S0023117721040083.

СТРУКТУРА И СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННЫХ ПЛАМЕН СМЕСЕЙ АММИАКА С ДОБАВКОЙ ВОДОРОДА

Осипова К.Н.^{1,2)}, Шмаков А.Г.^{1,2)}

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

²⁾ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Водород является перспективным видом топлива, так как единственным продуктом его горения является вода, а выбросы парниковых газов в атмосферу при его сжигании отсутствуют. Как известно, смеси водорода с воздухом имеют высокую скорость горения, что приводит к существенным проблемам, связанным с его хранением, транспортировкой и взрывоопасностью, поэтому практическое использование чистого водорода пока не представляется возможным. Одним из возможных решений могло бы стать использование химических носителей водорода, представителем которых является аммиак. Однако смеси аммиака с воздухом имеют низкую скорость горения. Идея устранения этой проблемы состоит в том, чтобы к аммиаку добавить небольшое количество водорода, который может быть получен из аммиака.

Цель данной работы состоит в получении новых экспериментальных данных по скорости распространения и химической структуре пламен смесей аммиака с водородом, а также в проверке существующих детальных механизмов превращения аммиака.

В работе была измерена тепловая и химическая структура пламен смесей $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$ ($\text{NH}_3/\text{H}_2=1/1$) с коэффициентом избытка топлива $\varphi=0.8, 1.0, 1.2$. Пламена были стабилизированы на плоской горелке при давлении 1 атм. Для измерения структуры пламен использовалась молекулярно-пучковая масс-спектрометрическая установка с мягкой ионизацией электронным ударом. Отбор проб из пламени производился кварцевым зондом с диаметром отверстия 0.08 мм и углом 40° . Профили температуры измерялись при помощи тонких Pt/Pt10%Rh термопар. Скорость распространения пламен смесей $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{O}_2/\text{N}_2$ ($\text{NH}_3/\text{H}_2=7/3$) была измерена при помощи горелки Махе-Хебра при начальной температуре 368К в диапазоне $\varphi=0.7-1.5$.

Моделирование структуры и скорости распространения исследуемых пламен проводилось с помощью программного пакета CHEMKIN. Для моделирования были использованы три детальных химико-кинетических механизма превращения азотсодержащих веществ, представленных в литературе [1–3].

В ходе работы были измерены профили концентраций следующих веществ: NH_3 , H_2 , O_2 , N_2 , H_2O , NO , N_2O . Установлено, что использование механизмов [1-3] позволяет получить удовлетворительное согласие экспериментальных и численных данных. Из данных по структуре пламен установлено, что водород является одним из основных продуктов превращения аммиака в реакционной зоне. Скорость распространения пламен наиболее точно описывает модель [3], а модели [1] и [2] дают существенно завышенные значения. Также установлено, что добавка водорода позволяет повысить скорость распространения пламен аммиака.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 20-33-90163.

Список литературы

1. Glarborg, P.; Miller, J. A.; Ruscic, B.; Klippenstein, S. J. Modeling Nitrogen Chemistry in Combustion // Prog. Energy Combust. Sci. – 2018. – V.67. – P.31–68.
2. Coppens, F. H. V.; De Ruycck, J.; Konnov, A. A. The Effects of Composition on Burning Velocity and Nitric Oxide Formation in Laminar Premixed Flames of $\text{CH}_4+\text{H}_2+\text{O}_2+\text{N}_2$ // Combust. Flame. – 2007. – V.149 (4). – P.409–417. ; Shmakov, A. G.; Korobeinichev, O. P.; Rybitskaya, I. V.; Chernov, A. A.; Knyazkov, D. A.; Bolshova, T. A.; Konnov, A. A. Formation and Consumption of NO in $\text{H}_2+\text{O}_2+\text{N}_2$ Flames Doped with NO or NH_3 at Atmospheric Pressure. – Combust. Flame. – 2010. – V.157 (3). – P.556–565.
3. Okafor, E. C.; Naito, Y.; Colson, S.; Ichikawa, A.; Kudo, T.; Hayakawa, A.; Kobayashi, H. Experimental and Numerical Study of the Laminar Burning Velocity of $\text{CH}_4\text{-NH}_3\text{-Air}$ Premixed Flames. Combust. Flame. – 2018. – V.187. – P.185–198.

ВЗРЫВНЫЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В СМЕСЯХ $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{O}_2$, $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{AIR}$ С ВЗВЕСЯМИ ЧАСТИЦ КАМЕННОГО УГЛЯ

Пинаев А.В., Пинаев П.А.

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

В ряде работ исследованы волны горения, околосвуковые взрывные и детонационные режимы в метановоздушных смесях в связи с использованием метана в быту, на производствах и выбросами из пластов в угольных шахтах. Менее исследованы процессы горения, взрыва и детонации в двухфазных системах смеси метана с воздухом или кислородом – угольная пыль [1–4]. Практически нет работ по изучению взрывных и детонационных волн в метановодородных смесях с взвесями частиц угольной пыли. В настоящей работе частично восполнен этот пробел.

Эксперименты выполнены в вертикальной ударной трубе длиной L 6.75 м, диаметром d 70 мм ($L/d \approx 96$). Трубу вакуумировали и заполняли смесями газов $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{O}_2/$ или $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Air}$ и взвесью мелкодисперсного угля. Инициирование взрывных волн и детонации осуществляли секциями инициирования СИ, заполненными газовой смесью $\text{C}_2\text{H}_2+2.5\text{O}_2$. Опыты проведены на порошке каменного угля с размерами частиц $0-200$ мкм. Порошок выдували в трубу из контейнера струей, исследуемой взрывчатой газовой смеси.

Установлено, что за фронтом взрывных и детонационных волн происходит воспламенение и горение частиц угля. С увеличением длины зоны реакции в газовых смесях (при уменьшении начального давления смеси) возрастает степень сгорания частиц угля и наблюдается усиление волн сжатия. Горение угольных частиц продолжается за зоной реакции. Водород в метановоздушной смеси даже в небольших околопредельных концентрациях облегчает инициирование газовой смеси, увеличивает интенсивность волн и интенсифицирует горение угольных частиц.

Если падающая волна является затухающей взрывной волной, то горение угля ускоряется в отраженных от торца трубы волнах, при этом возможно возникновение самоподдерживающихся низкоскоростных режимов детонации. Во всех опытах с взвесями угля наблюдается неполное сгорание угля, доля сгоревшего угля в зоне реакции и за ней не превышает 30% и зависит от величины его среднеобъемной плотности. В работе выяснен механизм горения угольной пыли во взрывных и детонационных волнах. Получены данные о параметрах взрывных и детонационных волн непосредственно в газовых смесях $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{O}_2/$ и $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Air}$ и в тех же газовых смесях с взвесями мелкодисперсного угля при варьировании интенсивности иницирующей волны. Проведено сравнение экспериментальных параметров детонации с термодинамическими равновесными расчетами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Минобрнауки по соглашению № 075-15-2020-806 (контракт № 13.1902.21.0014).

Список литературы

1. Взрывоопасность угольных шахт / А.Т. Айруни, Ф.С. Клебанов, О.В. Смирнов. М.: Из-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 264 с. (Серия «Библиотека горного инженера». Т. 9 «Рудничная аэрология». Кн. 2).
2. Пылевая взрывоопасность горного производства / К.А. Лебецки, С.Б. Романченко. М.: «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2012. – 464 с. (Серия Библиотека горного инженера. Т. 6 «Промышленная безопасность». Кн. 10).
3. Пинаев А.В., Пинаев П.А. Изучение сравнительной химической активности метана и взвесей частиц угля при горении, взрывах и детонации // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2019. № 4. – С. 5–16.
4. Пинаев А.В., Пинаев П.А. Волны горения и детонации в смесях газов CH_4/Air , CH_4/O_2 , O_2 с взвесями каменного угля // ФГВ. – 2020. – Т. 56, № 6. – С. 56–68.

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Пляскина Н.И.^{1,2)}

¹⁾ Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН

²⁾ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Российская Федерация занимает ведущее место в мировой энергетике, являясь крупным производителем, потребителем и экспортером всех видов топливно-энергетических ресурсов. Топливо-энергетический комплекс – важнейшая составная часть экономики России, формирует более 50% доходов федерального бюджета и обеспечивает жизнедеятельность других секторов экономики. Основным приоритетом энергетической политики России в условиях смены ресурсно-сырьевого технологического уклада является обеспечение энергетической безопасности, что в значительной степени обусловлено геополитической ситуацией и ролью ТЭК в развитии страны. В этих условиях требуется ускоренный переход к гибкой и устойчивой энергетике, способной адекватно ответить на вызовы и угрозы [1].

В работе исследуется потенциал энергосбережения, вовлечение которого позволит существенно сократить потребление энергетических ресурсов, повысить энергетическую безопасность при одновременном сокращении нагрузки на окружающую среду. Наибольшую значимость эти вопросы приобрели в связи с подписанием Парижского соглашения, Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК) и Киотского протокола. В этих условиях выделяются следующие тенденции развития энергетической политики:

- структурная диверсификация в направлении увеличения доли не углеродной энергетики - возобновляемых источников энергии (геотермальная, солнечная энергия, энергия биомассы, космоса и др.), перехода на использование топлива с меньшим содержанием углерода (увеличение доли природного газа, сжиженного природного газа, газомоторного топлива, развитие атомной и гидроэнергетики);
- повышение энергоэффективности производства, распределения, потребления. По оценкам экспертов около 53% потенциала снижения эмиссий в энергетическом секторе можно реализовать за счет потенциала энергосбережения [2];
- стимулирование поиска новых экологически чистых энергоресурсов и технологий посредством изменения ценовой и бюджетно-налоговой системы (установление специального налога на ископаемые энергоносители, введение налогов на углерод/энергию, способствующих переходу на менее углеродосодержащие виды топлива, реформирование системы субсидий, в т.ч. в угольном и электроэнергетическом секторах);
- использование передовых прорывных энергоэффективных технологий, таких как строительство солнечных фотоэлектрических станций, технологий на базе исследований перспектив космонавтики, переход к локальным энергоустановкам, не требующим ЛЭП и др.

Исследование выполнено при финансовой поддержке базового проекта № 121040100284-9 (0260-2021-0002).

Список литературы

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Утверждена 9 июня 2020 г. № 1523-р. – URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (Дата обращения 12.06 2021).
2. И. А. Башмаков. Потенциал энергосбережения в России // Энергосбережение. - 2009. – № 1. – URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=4225 (Дата обращения 12.07 2021).

СВЧ-МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ ГАЗИФИКАЦИИ И ГОРЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ

Подшивалов А.И.^{1,2)}, Зарко В.Е.¹⁾, Кискин А.Б.¹⁾, Гришин Ю.А.¹⁾

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

²⁾ Институт ядерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Скорость горения (газификации) является одним из основных баллистических параметров при разработке и проектировании различных силовых установок. В прошлом предпринимались многочисленные попытки разработать методы для измерения динамики газификации с использованием оптических методов и рентгеновского излучения. В настоящее время можно утверждать, что доступные реализации данных методов не обеспечивают требуемой точности и надежности при измерении.

Ранее в ИХКГ СО РАН был предложен резонаторный СВЧ-метод [1]. Для этого был изготовлен СВЧ-датчик, который представляет собой коаксиальный резонатор тороидального типа (рис. 1), характеризующийся однородным распределением продольного электрического поля в рабочей зоне, образованной центральным зазором 20 мм. Цилиндрический образец исследуемого вещества с внутренним каналом радиуса r помещается в рабочую зону, и при горении (газификации) центрального канала регистрируется амплитуда СВЧ-сигнала на фиксированной частоте в пределах частотной характеристики. Полученный сигнал в соответствии калибровкой (рис. 2) пересчитывается в толщину свода образца и мгновенную скорость газификации. Недостатком данной методики является предположение о неизменности частотной характеристики, т.е. добротность СВЧ-датчика должна оставаться постоянной, что возможно, если исследуемое вещество практически не имеет потерь. Однако реальные вещества могут иметь диэлектрические потери, не постоянные в процессе горения, и, кроме того, при горении могут выделяться копоть, сажа и т.п., что приведет к ухудшению добротности.

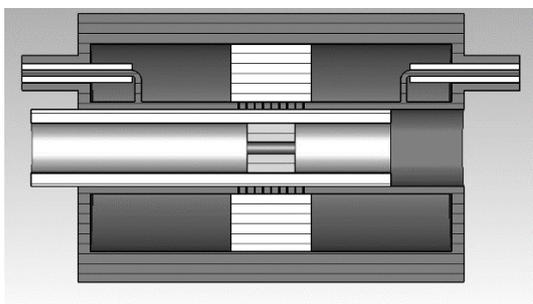


Рис. 1. Модель СВЧ-датчика

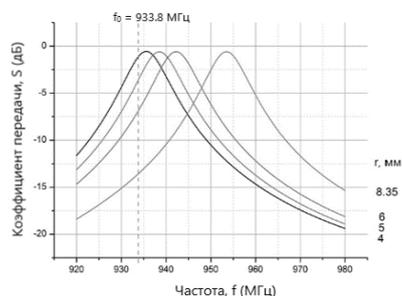


Рис. 2. Измерение коэффициента передачи при различных значениях радиуса внутреннего канала

В докладываемой работе предложен альтернативный СВЧ-метод измерения динамического скорости горения (газификации). Поскольку при горении образца уменьшается его масса, что приводит к изменению (увеличению) резонансной частоты СВЧ-датчика, предлагается записывать всю частотную характеристику СВЧ-датчика и по ней определять резонансную частоту. Резонансная частота зависит (в первом приближении) только от диэлектрической проницаемости исследуемого вещества и геометрии резонатора.

Список литературы

1. V. Zarko, V. Perov, A. Kiskin, D. Nalivaichenko. – Microwave resonator method for measuring transient mass gasification rate of condensed systems / Acta Astronautica 158. – 2019. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.03.028.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ И ГОРЕНИЯ УГОЛЬНЫХ БРИКЕТОВ, СОДЕРЖАЩИХ ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОТХОДЫ

Пономарева А.А.^{1,2)}, Лесных А.В.¹⁾, Цой К.А.¹⁾, Минаев С.С.^{1,3)}, Штым К.А.¹⁾

¹⁾ Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

²⁾ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург, Россия

³⁾ Институт прикладной математики ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

Известно [1], что сжигание брикетов позволяет повысить КПД слоевых котлов, даже по сравнению с исходным рядовым углем. Это объясняется усреднением среднего размера фракций, что позволяет настроить оптимальный режим работы. Отсутствие большой разницы в фракционном составе топлива также сведет к минимуму потери топлива с провалом и уносом. Экспериментально доказано, газообразование при сжигании брикетов протекает быстрее, чем при сжигании рядового угля. На этапе газификации выделяются горючие газы CO, CH₄, H₂. Тепло от горения этих газов передается твердому остатку, который обладает меньшей зольностью, чем кокс угля. Одной из задач исследования является определение оптимального состава брикета.

В рамках исследований свойств брикетов, полученных на основе угля с добавлением таких материалов, как мазут, битум, целлюлоза, картон, выполнен ряд экспериментальных работ, в ходе которых изучены теплофизические характеристики материалов, составы газовых продуктов термического разложения и температурные диапазоны выхода различных горючих газов.

Определение теплофизических характеристик образцов проводилось в соответствии с общепринятыми стандартами: зольность определялась по ГОСТ 11022-1995, содержание общей влаги – по ГОСТ Р 52911-2013. Дополнительно с помощью калориметра ИКА С 6000 (ИКА -Werke GmbH & Co, Германия) определялась низшая теплота сгорания образцов.

Определение компонентов газовых продуктов реакций производилось с помощью ИК-спектроскопии. Инфракрасные спектры поглощения газовыми продуктами реакций термодеструкции образцов получали с помощью прибора TGA-HP150s (США), который оснащен Фурье-спектрометром Nicolet iS10 FT-IR (Spectrometer Thermo Electron Corporation, США). Методика исследования заключалась в следующем: образец массой около 1 грамма помещался в керамическом тигле в реакционную печь, выполненную в виде трубы диаметром 25 мм. Печка разогревалась с постоянным заданной скоростью нагрева 5°С/мин до температуры 800°С. Эксперименты выполнялись в среде воздух-азот (в объемном соотношении 3:1) при атмосферном давлении. В результате измерений получены синхронизируемые данные процесса изменения химического состава выходящих газов, которые образовались в условиях непрерывного равномерного нагрева образцов и постоянной газовой атмосферы. Далее полученные трехмерные спектры разбивались на отдельные спектры и расшифровывались с использованием базы спектров, которая была предоставлена вместе с прибором, а также с помощью анализа литературных данных. Благодаря проведенным исследованиям удалось определить химический состав продуктов термического разложения для каждого из исследуемых образцов, оценить температуры, при которых наблюдаются максимумы на спектрах поглощения инфракрасного излучения для каждого из обнаруженных компонентов газовых смесей, полученных на выходе из реакционной камеры. Выявлены температурные зоны образования различных компонентов газовых продуктов разложения. Эти данные важны для оптимизации режима сжигания с целью уменьшения образования токсичных газов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2020-806).

Список литературы

1. Шувалов Ю.В., Нифонтов Ю.А., Никулин А.Н. Брикетирование нетрадиционных видов топлива // Горный информационно-аналитический бюллетень (Москва, МГГУ) – 2005. – № 10. – С. 161–166.

О ТЕМПЕРАТУРЕ ПЛАВЛЕНИЯ УГЛЕРОДА, ПОЛУЧЕННОГО ПРИ ДЕТОНАЦИОННОМ СГОРАНИИ АЦЕТИЛЕНА

Прохоров Е.С.

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

Представлена математическая модель детонации газовых смесей на основе углеводородного топлива при недостатке окислителя (кислорода или воздуха). Она сформулирована с учетом ранее разработанной унифицированной методике расчета равновесных состояний продуктов сгорания, когда среди компонентов химической реакции возможно появление одновременно газообразной и конденсированной фаз углерода [1]. Для определения молярной доли конденсата углерода в продуктах реакции использованы справочные данные для кривой равновесия газообразной и конденсированной фаз графита [2]. В рамках этой модели проведены расчеты параметров детонации ацетиленокислородной смеси $n \text{ C}_2\text{H}_2 + (1 - n) \text{ O}_2$ при повышенных значениях концентрации (молярной доли в смеси) ацетилена от $n=0.5$ и более. Установлено, что конденсированный углерод за детонационным фронтом может быть в твердом, жидком или находится в частично расплавленном состоянии. Температура плавления графита $T_m=4130 \text{ K}$ [2].

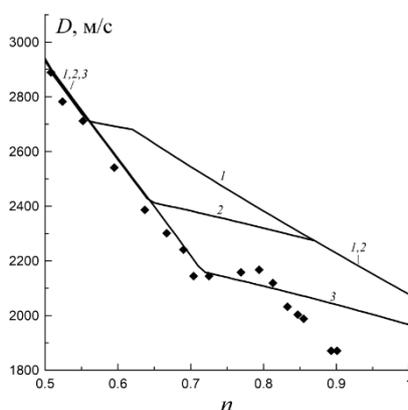


Рис. 1. Скорость детонации в смеси $n \text{ C}_2\text{H}_2 + (1 - n) \text{ O}_2$ в зависимости от молярной доли ацетилена n при различных значениях температуры плавления углеродного конденсата T_m за фронтом детонационной волны: $T_m=4130 \text{ K}$ (кривая 1), 3600 K (2), 3100 K (3). Точки — экспериментальные данные [3].

Проведено сопоставление расчетов (рис. 1) с известными результатами экспериментальных исследований [3], в которых при детонации ацетиленокислородной смеси в стволе специальной установки (модернизированной установки для детонационного напыления) удается получать наноразмерные частицы из углеродного материала с особыми свойствами. Выдвинута гипотеза, что температура плавления такого материала ниже, чем у графита. Только при ее корректировке удалось добиться хорошего согласования между расчетной и экспериментальной зависимостью скорости детонационного фронта D от концентрации ацетилена в смеси. Показано, что при температуре плавления углеродных частиц около 3100 K расхождение результатов численного решения и опытных данных практически совпадает с погрешностью измерения скорости детонации в эксперименте.

Список литературы

1. Prokhorov E.S. Computation of equilibrium states for products of reacting hydrocarbon combustion under oxygen lack // Journal of Physics: Conf. Series. – 2019 – V. 1382, 012064.
2. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание: в 4-х томах / Под ред. В.П. Глушко. М.: Наука, 1978.
3. Батраев И.С., Васильев А.А., Ульяницкий В.Ю., Штерцер А.А., Рыбин Д.К. Исследование газовой детонации переобогащенных смесей углеводородов с кислородом // ФГВ. – 2018. – Т. 54, № 2. – С. 89 – 97.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В КС, ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ КОТЛОВ

Пузырев Е.М., Голубев В.А., Щербаков Ф.В.

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

В современной зарубежной энергетике с 1980 годов наибольшее развитие получили котлы с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС), экономичные, наиболее эффективные по экологии и дающие главный вклад в мировое строительство ТЭЦ. В России применяются схемы с кипящим слоем (КС) первого уровня, топки с высокотемпературным КС на узкой цепной решетке и котлы с форсированным КС (ФКС). Освоение котла ЦКС блока № 9 Новочеркасской ГРЭС в зарубежном варианте исполнения выявило значительные проблемы и не дало прорыва. Для ликвидации отставания в применении котлов ЦКС требуется, помимо интереса энергетиков, создание разработок более высокого уровня, так как здесь непригодны имеющиеся нормы и стандарты проведения тепловых и аэродинамических, применяемые при расчете пылеугольных котлов.

Влияние частиц на вынос и аэродинамику в ЦКС изучалось на моделях в плоском стенде с прозрачной фронтальной стенкой с замером расхода циркулирующих частиц (ЦЧ) и полей скорости воздуха приборами собственной разработки. Опыты показали, что без циркуляции частицы выносятся, не влияя на аэродинамику, и замеренные доли χ выноса монофракций частиц 198 и 410 мкм соответствовали теоретическим расчетам выноса невзаимодействующих частиц. При включении циркуляции появляется донный КС, χ многократно снижается за счет взаимодействия частиц и теоретические модели непригодны в ЦКС даже для оценок.

Далее изучался вынос донного КС с измерением расходов монофракций песка 410 мкм и полиэтиленовой крошки 3600 мкм в ЦКС отдельно и в бинарной смеси. Опыты показали, бинарный ансамбль ЦЧ ведет себя как поток ЦЧ осредненного размера, мелочь задерживается в донном КС, расширяя диапазон работы ЦКС. Проведенные исследования объясняют высокую эффективность улавливания ЦЧ в огромных, диаметром до 10 м циклонах: крупные частицы удерживают более мелкие. В итоге переход к сжиганию дробленого топлива при высокой скорости газов и циркуляции частиц привел к качественному скачку, повышению к.п.д. циклонов до 99%, и за счет этого эффекта возникли топки ЦКС.

В горячих опытах, также на монофракциях различных углей были определены времена сушки, воспламенения летучих и кокса и их догорания. Изучены процессы формирования механического недожога с уносом и выявлены: бимодальный закон формирования уноса, три стадии горения и три стадии формирования уноса, характерных для антрацита, тощего, каменных и бурых углей. Рассчитывалась площадь горячей поверхности и интенсивность истирания, ее непрерывное обновление с формированием мелкого уноса, частицы 65 мкм, особенность горения в КС и ЦКС.

Рассмотрены котлы с топками ФКС. ФКС это специфический ЦКС с внутритопочной циркуляцией частиц за счет форсировки донного КС до 7-12 МВт/м² при внутритопочной сепарации ЦЧ в вихре над наклонным экраном при подаче в него вторичного дутья. По схеме ФКС реконструированы все котлы Читинской ТЭЦ-2 с повышением нагрузки на 20% сверх номинала, котел БКЗ-75 в Монголии и др. Также рассмотрены и более эффективные схемы ФКС. Потоки ЦЧ на наклонных экранах и в других элементах ЦКС предложено описывать в рамках динамики тела переменной массы, задача Мещерского.

Обсуждены предложенные упрощенные конструкции котлов ЦКС без вынесенных циклонов с заменой их встроенными охлаждаемыми циклонами, выполняемыми топочными экранами. Также предлагаются новые возможности повышения эффективности технологии ЦКС с применением испытанного наклонного экрана в многоцелевом котле с циклонами квадратного сечения и экранами, которые скашивают углы, газоотводящими патрубками, стояками и дозаторами, которые образуют контур управляемой циркуляции частиц через донный КС.

ТЕХНОЛОГИЯ «ТОРНАДО» ДЛЯ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ

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

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

Проводимый западными странами курс снижения ископаемых топлив в генерации, особенно угля, и повышения экологических требований становится реальностью. Китай, принимая эти вызовы, как и растущее давление защитников окружающей среды, инициирует [1] проект «Техническая революция в экологической и эффективной добыче и утилизации угля в угольной энергетике»: три этапа (3.0, 4.0 и 5.0) стратегии развития угольной промышленности и энергетике. До 2025 г в угольной генерации Китая должны быть достигнуты в том числе сверхнизкие выбросы, на уровне сжигания природного газа.

Нами выделены, как наиболее эффективные, использующие активную вихревую аэродинамику и весь объем топки с холодной воронкой схемы БКЗ-ЦКТИ с угловыми грелками и нижним дутьем [2] и низкотемпературные вихревые топки (НТВ). Но на сегодня выхлоп этих топков превышает экологические нормы развитых стран, а реконструкции мощных котлов энергоблоков 500 МВт Назаровской и Экибастузской ГРЭС-1 по НТВ схеме к тому же были неудачны и характеризуются большим механическим недожогом топлива.

В докладе рассматривается, развивающая выделенное направление, обоснованная многолетними научными и промышленными исследованиями инновационная низкотемпературная вихревая технология сжигания в топках «Торнадо». Котлы уровня промышленной энергетике, а их более 200, позволили нам быстро и уверенно продвинуться по пути обоснования и совершенствования технологии, которая повысит экономичность и экологические характеристики ТЭЦ при простоте регулирования – управление как для котла с одной горелкой. Технология минимизирует высокотемпературную миграцию соединений калия, других щелочных металлов и карбонатов, согласно раскрытым в исследованиях механизмам их образования подавляет формирование натрубных отложений – экраны технически чистые.

Топочный процесс эффективен по экологии, имеет ступенчатое дутье с дожиганием выхлопа и надежным удержанием частиц в вихре. Это загружает топку частицами топлива и золы, обеспечивая изотермичность при пониженной внутритопочной температуре. Предлагаемые технические решения интенсифицируют горение и теплообмен, а заполнение топки золой приближает схему к топкам с циркулирующим кипящим слоем с сохранением привычности, простоты и преимуществ пылеугольного сжигания.

В итоге это привело к созданию пригодных и для реконструкции топков «Торнадо», использующих вихри с горизонтальной или вертикальной осью [4], а также радиальные с двухсторонним выходом и сдвоенные дубль топки с различными типами дожигающих устройств. Новые схемы компоновки котлов с топками «Торнадо» не только снижают габариты топков и котлов, но зачастую позволяет существенно уменьшить и объем инвестиций в строительную часть котлоагрегатов в целом.

Список литературы

1. Guofa Wang, Yongxiang Xu, Huaiwei Ren Intelligent and ecological coal mining as well as clean utilization technology in China: Review and prospects. // International Journal of Mining Science and Technology. Vol. 29 Issue 2 March 2019. P. 161–169.
2. Тильде Е.Э. Повышение эффективности работы котлов с применением системы нижнего дутья конструкции НПО ЦКТИ. [Текст] / Тильде Е.Э., Клепиков Н.С., Гусев Л.Н., Шатиль А.А., Вешняков Е.К., Илясов В.А., Петухов В.Г., Бирюкова О.А. // Теплоэнергетика, № 2, 2003. С. 55–57.
3. Пузырев Е.М., Голубев В.А., Пузырев М.Е. Разработка технологии «Торнадо» и котлов для сжигания луги и других сельхоз отходов. // Промышленные и отопительные котельные и мини ТЭЦ. 2019, 5(56). С. 16–18.
4. Пузырев Е.М. Разработка вихревых топков для энергетических котлов. [Текст] / Пузырев Е.М., Голубев В.А., Пузырев М.Е. // Энергетик № 4, 2017. С. 44–47.

ПИРОЛИЗ БОРСОДЕРЖАЩИХ СМЕСЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ

Рашковский С. А., Кузнецов В.Т., Басалаев С.А.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

В настоящее время значительное внимание уделяется исследованию высокоэнергетических материалов, содержащих добавки бора и легких металлов, таких как алюминий или магний. Наибольший интерес в качестве компонента таких энергоносителей вызывает бор [1]. Однако бор как энергоноситель имеет существенный недостаток, а именно низкая полнота сгорания из-за образования оксидной пленки. В последнее время в качестве альтернативы бору рассматривают бориды и додекабориды алюминия. Хотя исследования боридов и додекаборидов алюминия в качестве энергетических добавок в состав высокоэнергетических материалов начались сравнительно недавно уже сейчас получены довольно интересные результаты. Исследование закономерностей термического разложения конденсированного вещества при стационарном распространении в нем фронта химической реакции представляет значительный и теоретический и практический интерес. Такой режим называется линейным пиролизом, реализующийся чаще всего при высокотемпературной деструкции [2].

В настоящей работе представлены экспериментальные исследования пиролиза бинарных композиций СКДМ-80+AlB₁₂, в разных процентных пропорциях, под действием потока лучистой энергии оптической печи УРАН-1 [3]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

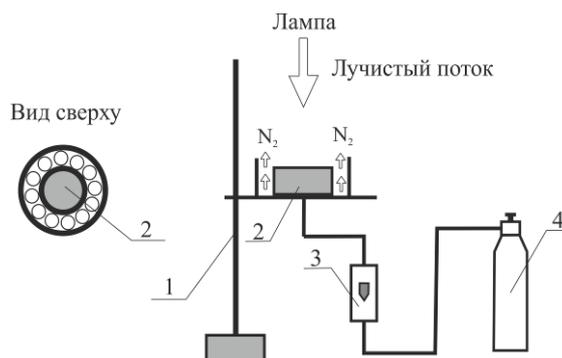


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 – держатель, 2 – образец, 3 – ротаметр, 4 – баллон газа N₂.

Экспериментальная установка состоит из держателя 1, на котором закреплен исследуемый образец 2, обдуваемый потоком газа, в качестве газа использовался азот. Расход газа измерялся ротаметром 3. Для предотвращения воспламенения исследуемого образца в процессе пиролиза значение расхода азота из баллона 4 устанавливалось равным 0,13 м³/час. Проводилась скоростная кино съемка процесса пиролиза. Измерялась массовая скорость пиролиза в зависимости от интенсивности теплового излучения. Отработка методики проводилась на составах уротропина с алюминием марки АСД-4.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00541).

Список литературы

1. Фролов Ю.В., Пивкина А.Н., Завьялов С.А., Муровьев Н.В. Физико-химические свойства компонентов энергетических конденсированных систем // Хим. физика. – 2010. Т.29, № 11. – С. 42–49.
2. Штейнберг А.С. Быстрые реакции в энергоемких системах: высокотемпературное разложение ракетных топлив и взрывчатых веществ. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 208 с.
3. Архипов В.А., Жуков А.С., Кузнецов В.Т., Золоторев Н.Н., Осипова Н.А., Перфильева К.Г. Характеристики зажигания и горения конденсированных систем с энергетическими наполнителями // Физика горения и взрыва – 2018. Т.54, № 6. – С. 68–77.

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С НЕПРЕРЫВНОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ

Рыбакин Б.П., Никитин В.Ф., Михальченко Е.В.

Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук, г. Москва, Россия

В работе представлены результаты вычислительного моделирования процессов в камере сгорания детонационного двигателя [1]. Выполнено трехмерное численное моделирование камеры сгорания двигателя с вращающейся детонационной волной цилиндрического типа с внутренним телом. Моделируемая камера сгорания представляет собой коаксиальный полый цилиндр [2,3,4]. Математическая модель основана на модели многокомпонентной газовой динамики с химическими превращениями, учитывающей явления переноса с турбулентной моделью RANS. Для того, чтобы описать горение ацетилена, использовалась сокращенная химико-кинетическая схема, вовлекающая в реакцию следующие компоненты: C_2H_2 , CO , CO_2 , H_2 , O_2 , H_2O , OH , O , H , N_2 . Всего между этими компонентами идет 13 химических реакций при том, что азот считается нейтральным. Для моделирования химической кинетики водородно-воздушной смеси был использован следующий набор компонент: H_2O , OH , H , O , HO_2 , H_2O_2 , O_2 , H_2 , N_2 . Всего 9 компонент и 20 реакций, с нейтральным азотом. Получены варианты стабильно работающих компоновок камер сгорания детонационного двигателя с непрерывной детонационной волной. Получены их тяговые характеристики.

На рис. 1 показано концентрации ацетилена в моменты времени а) 20 мкс и б) 500 мкс для случая щелевой подачи богатой смеси ацетилен-кислород.

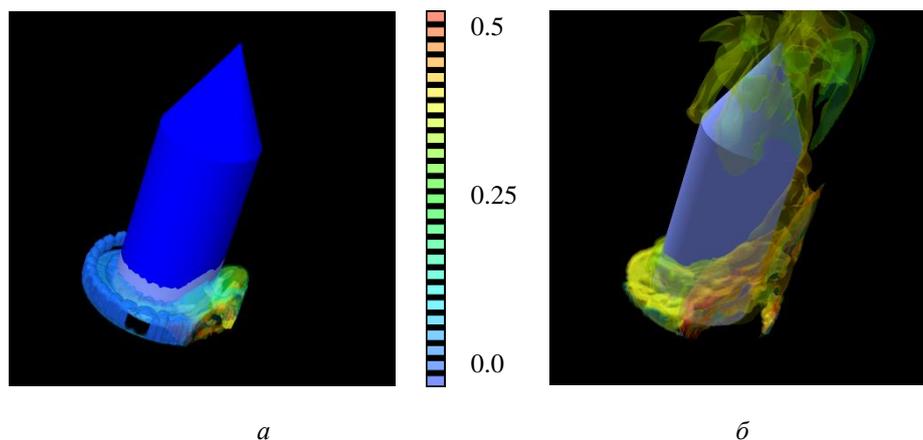


Рис. 1. Распределение ацетилена

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-29-09070 мк).

Список литературы

1. Wolanski P., 2013. Proceedings of the Combustion Institute. 34, 125.
2. Nikitin V.F., Filippov Y.G., Stamov L.I., Mikhalchenko E.V., 2018. Supercomputing Frontiers and Innovations. 5, 2:76-85.
3. N. N. Smirnov, V. F. Nikitin, L. I. Stamov, E. V. Mikhalchenko, V. V. Tyurenkova, 2019. Acta Astronautica, 163(A), 168-76.
4. Zhdan S.A., Bykovskii F.A., Vedernikov E.F., 2007. Combustion, Explosion, and Shock Waves 43, 4:449-59.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИСЛОРОДНОЙ КОНВЕРСИИ МЕТАНА С УЧЕТОМ САЖЕОБРАЗОВАНИЯ

Рыжков А.Ф.¹⁾, Каграманов Ю.А.²⁾, Никитин А.Д.¹⁾, Масленников Г.Е.¹⁾, Вохмякова И.С.³⁾

¹⁾ Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

²⁾ ООО «ПЛМ Урал», г. Екатеринбург, Россия

³⁾ ООО «НПВП ТОРЭКС», г. Екатеринбург, Россия

В настоящее время повышенное внимание уделяется проблеме предотвращения глобального изменения климата, в частности снижению выбросов CO_2 в промышленности. Применение в черной металлургии процесса прямого восстановления железа из руды вместо доменного процесса позволяет сократить выбросы CO_2 в 3–4 раза. Одним из направлений усовершенствования этой технологии является производство восстановительного газа путем парциального окисления метана. Кислородная конверсия природного газа перспективна по ряду причин: отсутствие катализатора, простота аппаратного оформления, положительный тепловой баланс процесса, но серьезной проблемой является выпадение сажи в газе.

Широко применяемый для задач горения природного газа механизм Grimech 3.0 имеет в себе несколько ограничений, касающихся выбросов оксидов азота, серы и сажи. Для обхода ограничений применяются эмпирические модели, которые есть в составе модуля Fluent программы ANSYS. Для расчета выбросов сажи часто применяются двух стадийная модель Теснера, модель Мосса-Брукса и Мосса-Брукса-Холла. Все эти модели запускаются в ходе пост-обработки, то есть, после получения основных параметров потока – распределений температур, давлений, скоростей и концентраций реагентов. Модели адекватно рассчитывают выбросы сажи, но приводят к разрыву баланса массы, что существенно сказывается на состоянии системы при существенных расходах сажи, их рекомендуется использовать при переходе в сажу менее 10% от исходного углерода. Вторым ограничением моделей является неспособность учитывать взаимодействие сажи с CO_2 и H_2O , что можно учесть только с подключением пользовательских кодов и эмпирических констант, что требует дополнительной разработки, отладки и калибровки модели. Более того, механизм Grimech 3.0 допускает ошибку 20% при расчете радикалов и ацетилена [1], что принципиально важно для количественной оценки выбросов сажи.

В настоящее время доступны детальные механизмы горения легких и тяжелых углеводородов с учетом образования выбросов, среди которых есть и сажа. Программа ANSYS и внедренные в ее состав модули CHEMKIN-Pro и Reaction Workbench, а также библиотека топлив Model Fuel Library позволяют с достаточной точностью определить выбросы сажи.

В данной работе выполнено сопоставление двух способов расчета поточного реактора кислородной конверсии метана, первый выполнен с использованием ANSYS Fluent с подключенным механизмом Grimech 3.0 и моделью Мосса-Брукса, а второй – в программе CHEMKIN с использованием полученного в программе Reaction Workbench редуцированного механизма. Использован механизм горения дизельного топлива (5450 реакций), который был редуцирован до 350 реакций с ошибкой менее 1%. Расчетная область представляла собой цилиндрическую трубу диаметром 100 мм и длиной 1,5 м. В трубу с расходом 0,000306 кг/с подавалась предварительно перемешанная смесь метана (45% масс.) и кислорода (0,55% масс.). Температура стенки реактора поддерживалась постоянной и равной 1200 °С. В результате расчетов получены профили концентрации H_2 , CO , H_2O , CO_2 , CH_4 , O_2 и сажи по длине реактора. Благодаря расчетной методике программ CHEMKIN-Pro и Reaction Workbench удалось более точно определить состав газа, избежать разрыва массовых расходов при расчете сажеобразования, учесть взаимодействие сажи с CO_2 и H_2O , определить размер частиц сажи.

Список литературы

1. Dubey A. et al. Analysis of kinetic models for rich to ultra-rich premixed CH_4/air weak flames using a microflow reactor with a control temperature profile // Comb. Flame. – 2019. – V. 206. – P. 68–82.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЯЗАННЫХ МЕЖДУ СОБОЙ РЕАКТОРОВ С ЦИРКУЛИРУЮЩИМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА

Рябов Г.А.

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

Дан краткий анализ перспектив использования водорода и развития методов его получения. При производстве водорода зачастую происходит эмиссия CO_2 , поэтому важно добиваться минимальной эмиссии в течении всего жизненного цикла. Имеется ряд процессов производства водорода из энергетических топлив или биомассы, связанных с получением синтетического газа, разделением H_2 и CO_2 с дальнейшим захоронением CO_2 . В [1, 2] указывается, что стоимость водорода с низким углеродным следом по технологии SMR с CCS будет оставаться на уровне 1–2 €/kg в период с 2019 по 2050. Стоимость водорода, полученного путем электролиза, составляла 3–7 €/kg в 2019 г, но в дальнейшем предполагается ее снижение. Считается, что к 2050 году обе технологии будут одинаково востребованы с небольшой разницей в затратах в зависимости от региональных условий. Водород, произведенный электролизом из энергии ветра, требует значительно большей площади (почти на 3 порядка), чем по технологии SMR из органических топлив.

Выполнен обзор состояния разработок в области технологии химических циклов для производства водорода. Показано, что производство водорода с использованием технологии химического цикла вызывает все больший интерес в последние годы. Одним из наиболее важных вопросов при использовании технологии химических циклов является гидродинамика связанных между собой реакторов. Первые в России исследования высокотемпературных химических циклов с оксидами металлов-носителями кислорода были выполнены в ОАО «ВТИ» [3]. При этом рассматривался весь цикл от подготовки оксидов (НИФХИ им. Л. Я. Карпова) до подземного захоронения уловленного CO_2 (ОАО «Подземгазпром») или его использования для повышения эффективности нефтедобычи (РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина). Ниже рассмотрен ряд новых исследований в области использования технологии химических циклов для производства водорода. Даны некоторые результаты экспериментальных исследования в России, проведенных ОАО «ВТИ» на крупной аэродинамической установке. Намечено проведение исследований на огневой установке системы связанных между собой реакторов с реальной температурой процесса. Такие исследования позволят создать необходимый научный задел для передовых установок получения водорода из органических топлив без выбросов CO_2 .

Список литературы

1. Energy Technology Perspectives 2020. Paris: International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>.
2. Energy Technology Perspectives 2020. Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage. CCUS in clean energy transitions. Paris: International Energy Agency. <https://webstore.iea.org/ccus-in-clean-energy-transitions>.
3. Рябов, Г. А. Сепарация CO_2 с использованием химических циклов сжигания и газификации топлив [Текст] / Г. А. Рябов, О. М. Фоломеев, Д. С. Литун, Д.А. Санкин // Теплоэнергетика. – 2009. – № 6. – С. 39–49.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОЧНОЙ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ O₂-CO₂ ГАЗИФИКАЦИИ КАМЕННОГО УГЛЯ МЕТОДОМ CFD

Седачева О.В., Абаймов Н.А., Рыжков А.Ф.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

Непрерывно ужесточающиеся экологические нормы вынуждают угольную энергетику внедрять принципиально новые технологии по борьбе не только с такими вредными выбросами как соединения серы, оксиды азота, летучая зола и т.д., но и с CO₂. Решить данную задачу позволяет перспективный цикл парогазовой установки с кислородной внутрицикловой газификацией, дополненной системой улавливания и хранения углерода - oxy-fuel integrated coal gasification combined cycle (IGCC) with carbon capture and sequestration (CCS).

В цикле oxy-fuel IGCC, разрабатываемом в Японии [1], воздушный двухступенчатый поточный газификатор типа МНІ работает на нестандартном окислителе – смеси O₂-CO₂. Это приводит к изменению его обычного режима работы. Целью данного исследования является определение характера изменения параметров работы газификатора при его переводе на O₂-CO₂ дутье.

Существует несколько работ, посвященных данной проблеме. В [2] представлены результаты эксперимента, проведенного на полупромышленном газификаторе с расходом топлива 2 т/сут типа МНІ с подачей O₂-CO₂, а также его численное моделирование. В [3] с использованием численного метода определено влияние расхода угля во вторую ступень на основные параметры работы пилотного газификатора. Численное исследование промышленного газификатора с расходом топлива 1700 т/сут на O₂-CO₂ дутье проведено в [4]. Установлено, что при переходе с воздушного дутья на O₂-CO₂ температура на выходе снижается, а хим. КПД возрастает.

В настоящем исследовании используется ранее разработанная CFD-модель поточной газификации угля, отдельные элементы которой описаны в [5]. В основе этой модели лежат уравнения неразрывности, энергии, переноса компонентов среды, равновесия сил, закон сохранения импульса и т.д. Использована подмодель турбулентности k-ε (стандартного вида). Подмодель гетерогенного реагирования – диффузионно-кинетическая. На стенках установки выполняется условие прилипания.

В рамках данного исследования проведена валидация CFD-модели с использованием литературных экспериментальных данных [6]. Проведено численное моделирование работы газификатора типа МНІ на O₂-CO₂ дутье с варьированием отношения O₂/CO₂. Определен характер изменения параметров работы газификатора в зависимости от состава дутья.

Список литературы

1. Oki Y., Hamada H., Kobayashi M., Yuri I., Hara S Development of High-efficiency Oxy-fuel IGCC System // Energy Procedia. – 2017, - V. 114. – P. 501–504.
2. Watanabe H., Tanno K., Umetsu H., Umemoto, S. Modeling and simulation of coal gasification on an entrained flow coal gasifier with a recycled CO₂ injection // Fuel. – 2015. – 142. – P. 250–259.
3. Tanno K., Seongyool A., Watanabe H. Numerical study of effects of operation condition for oxygen blown coal gasifier in oxy-fuel IGCC // Proceedings of the ASME 2017 Power Conference Joint With ICOPE-17. – 2017. – V. 1. – 130327.
4. Watanabe H., Ahn S., Tanno K. Numerical investigation of effects of CO₂ recirculation in an oxy-fuel IGCC on gasification characteristics of a two-stage entrained flow coal gasifier // Energy. – 2017. – V. 118. - P. 181–189.
5. Abaimov N.A., Butakov E.B., Burdukov A.P., Osipov P.V., Ryzhkov A.F. Investigation of air-blown two-stage entrained-flow gasification of micronized coal // Fuel. – 2020. – V. 271. 117487.
6. Watanabe H., Otaka M. Numerical simulation of coal gasification in entrained flow coal gasifier // Fuel. – 2006. – V. 85(12-13). - P. 1935–1943.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОЙ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ СМЕСИ ВОДОРОД-ВОЗДУХ В РЕЖИМЕ ЭЖЕКЦИИ ВОЗДУХА

Симонов Е.В., Ждан С.А.

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

В [1] для смеси H_2 -воздух в проточной кольцевой камере сгорания (КС: внешний диаметр $d_c=30.6$ см, длина $L_c=51$ см, начальная ширина канала $\Delta=2.3$ см, щелевой зазор на входе в КС $\delta=1$ см) впервые экспериментально была реализована непрерывная спиновая детонация (НСД) в режиме эжекции воздуха. В [2] для смеси H_2 -воздух в проточной КС с геометрическими размерами [1] были получены первые результаты численных расчетов НСД водорода в режиме эжекции воздуха. В расчетной области ($-10 \text{ см} < x < 51 \text{ см}$, $0 < y < l$) была решена двумерная нестационарная периодическая задача с периодом $l_c=\pi(d_c - \Delta)=88.91$ см и параметрами в системе подачи водорода: давлением торможения $p_{H_2}^*=20.325$ атм, температурой торможения $T_{H_2}^*=293$ К и удельным расходом $g_{H_2}=2.5$ кг/(с·м²) при иницировании поперечной детонационной волны (ПДВ) в КС. Получен выход на самоподдерживающийся одноволновый режим НСД со скоростью детонации $D \approx 1.87$ км/с и высотой фронта ПДВ $h \approx 7.5$ см.

В данной работе, являющейся продолжением [2], при численном моделировании проведено варьирование удельного расхода водорода g_{H_2} в диапазоне $g_{H_2}=2.25 - 3$ кг/(с·м²) и периода задачи $l=(62 - 125)$ см с целью определения области существования НСД смеси H_2 -воздух в режиме эжекции воздуха. Получены новые расчетные данные по двумерной структуре ПДВ (распределение давления, чисел Маха, коэффициента избытка горючего). Обобщающие численные результаты при варьировании параметров g_{H_2} и l представлены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные параметры НСД смеси H_2 – воздух при эжекции воздуха/

g_{H_2} , кг/(с·м ²)	$l(l_{min})/l_c$	$\langle p \rangle$, атм	h , см	D , км/с	$\langle \phi \rangle$
3	1.05(1.05)	1.05 ±0.05	8±0.5	1.91	2.16
2.75	±0.05			1.92	1.97
2.6	1.1(1.1)			1.91	1.86
2.55	±0.05			1.9	1.82
2.5	1(0.9)±0.1		7.5±0.5	1.87	1.74
2.45	1(0.7)±0.1			1.89	1.71
2.4	1(0.9)±0.1			1.87	1.67
2.25	>1.4			-	-

Здесь l_{min} - минимальный период задачи; $\langle p \rangle$ - среднее за период давление на входе в КС; $\langle \phi \rangle$ - средний за период коэффициент избытка горючего на выходе из КС. Видно, что с уменьшением расхода g_{H_2} уменьшается скорость НСД, высота ПДВ и $\langle \phi \rangle$, а среднее давление на входе в КС остается постоянным $\langle p \rangle \approx 1.05$ атм, что соответствует эксперименту. Для диапазона $g_{H_2}=2.4 - 2.5$ кг/(с·м²) величина $l_{min} < l_c=88.91$ см, что означает одноволновый режим НСД. Значения скорости и высоты фронта ПДВ в эксперименте были меньше на 30% и больше в 2–2.5 раза соответственно. Такое отличие может быть связано с отсутствием системы смешения компонентов в рассматриваемой математической модели.

Список литературы

1. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е.Ф. Непрерывная детонация в режиме автоколебательной подачи окислителя. 2. Окислитель – воздух // ФГВ. – 2011. – Т. 47, № 2. – С. 102–111.
2. Симонов Е. В., Ждан С. А. Расчет непрерывной спиновой детонации смеси водород-воздух в режиме эжекции воздуха // Тезисы XV Всероссийского симпозиума по горению и взрыву, Москва, 2020 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЗАРЯДА, ВЫПОЛНЕННОГО ИЗ ПОЛИМЕРНОГО ЛЕГОПЛАВКОГО МАТЕРИАЛА, ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СВЕРХЗВУКОВОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ПРОТОЧНОМ ТРАКТЕ ПВРД

Скибина Н.П., Фарапонов В.В.

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

В настоящее время актуальной темой исследований является создание силовых установок, обеспечивающих движение летательных аппаратов с гиперзвуковой скоростью. При использовании распространенных в современной авиации турбореактивных двигателей возможно достижение скорости движения порядка $M \sim 3$. Дальнейшее увеличение скорости приводит к уменьшению эффективности работы силовой установки такого типа.

Прямоточные воздушно-реактивные двигатели отличаются от турбореактивных двигателей диапазоном обеспечиваемых скоростей движения, принципом работы и устройством в целом. В крупных научных центрах проводятся экспериментальные и теоретические исследования, направленные на улучшение рабочих элементов ПВРД, на разработку топливных композиций и организацию процесса горения.

В рамках данной работы рассматривается прямоточный воздушно-реактивный двигатель на твердом топливе, в проточном тракте которого течение воздуха происходит со сверхзвуковой скоростью [1, 2]. Турбулентный поток имеет сложную ударно-волновую структуру, включающую в себя зоны отрыва и присоединения потока, вблизи которых происходит интенсификация процессов теплообмена.

В качестве заряда твердого топлива в работе рассматривается топливная шашка, выполненная из полимерного материала (полиэтилен, полиоксиметилен), с продольным центральным каналом радиуса $r=10$ мм. Выбор материалов для исследования производился на основании результатов термометрических испытаний и численных расчетов, в ходе которых были получены оценки температуры в пристеночной области течения [1, 2]. Шашка размещается в камере сгорания модели ПВРД, после чего модель закрепляется в рабочей части аэродинамической установки [3] и обдувается равномерным сверхзвуковым потоком. В ходе экспериментов осуществляется регистрация температуры в характерных точках. Математическая модель процесса состоит из системы уравнений Навье-Стокса, уравнений полуэмпирической SST модели турбулентности, начальных и граничных условий.

В ходе работы получены поля газодинамических параметров в потоке газа – плотность, давление, скорость. На основании экспериментальных и расчетных данных построены распределения температуры в пристеночной зоне и в шашке из полимерного материала. Показана динамика прогрева материала с течением времени. Для полиэтилена и полиоксиметилена получены максимальные и минимальные значения толщины прогретого слоя материала, объяснена их локализация. Результаты работы позволяют прогнозировать время воздействия потока, необходимое для достижения температуры плавления материала и последующего горения, а также определять положение областей, где начнется изменение геометрии заряда твердого топлива.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90108.

Список литературы

1. Скибина Н.П. Численное исследование нестационарного течения газа в камере сгорания прямоточного воздушно-реактивного двигателя с учетом процесса теплообмена. Вычислительные технологии. 2020; 25(6):50–61. DOI: 10.25743/ICT.2020.25.6.003.
2. Ищенко А.Н., Маслов Е.А., Скибина Н.П., Фарапонов В.В. Комплексное исследование нестационарного течения с ударными волнами в рабочем тракте гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя// Инженерно-физический журнал. – 2021. – Т.94. – № 2 – С. 466–473.
3. Звезгинцев В.И. Газодинамические установки кратковременного действия. Часть I. Установки для научных исследований. Новосибирск: Параллель, 2014. 551 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРИОДА ИНДУКЦИИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ СТРУКТУРНО-НАПРЯЖЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ С ПОМОЩЬЮ УДАРНОЙ ТРУБЫ

Сон Э.Е.¹⁾, Яновский Л.С.^{2,3)}, Ежов В.М.³⁾, Куликов С.В.³⁾, Червонная Н.А.³⁾, Ильина М.А.³⁾

¹⁾ ФГАОУ ВО «Московский Физико-Технический Институт

(Национальный Исследовательский Университет)», г. Москва, Россия

²⁾ ФГБУ «Российская академия ракетных и артиллерийских наук», г. Москва, Россия

³⁾ ФГБУН «ИПХФ РАН», г. Черноголовка, Россия

Объемная энергоемкость топлива может быть повышена при сохранении уровня вязкостно-температурных свойств путем введения в молекулу алканов малых циклов. Известно, что циклоалканы C₃ и C₄ обладают повышенной теплотой сгорания в сравнении с циклоалканами C₆ и выше, а также алканами линейной и разветвленной структуры вследствие их структурной напряженности [1].

Одним из ключевых показателей процесса горения топливовоздушных смесей в камерах сгорания является период индукции воспламенения (ПИВ). Данные по ПИВ могут быть использованы при проектировании камер сгорания перспективных двигателей, создании новых энергоемких горючих и оценки возможности их применения на изделиях авиатехники.

ПИВ топлива включает продолжительность процессов распыла, испарения, смешения с окислителем, нагрева и периода индукции или задержки воспламенения. ПИВ может быть исследован с применением ударных труб. Этот метод характеризуется широким диапазоном температур и давлений смеси, а также высокой точностью измерений, обусловленных высокой скоростью нагрева смеси и практически полным отсутствием тепловых потерь [2].

На ударной трубе ИПХФ РАН проведены исследования ПИВ смесей паров структурно напряженных углеводородов (СНУ) с числом атомов углерода, равным 9, 10 и 11, в зависимости от коэффициента избытка окислителя (КИО) и температуры.

Значения времени задержки воспламенения и параметры за фронтом рассчитаны на основе экспериментально определенной скорости падающей волны D [3]. Начало химического процесса определялось по появлению излучения радикала OH•. В качестве толкающего газа использовался He.

Установлены зависимости ПИВ СНУ от температуры КИО. Приведена зависимость ПИВ углеводородовоздушных смесей в зависимости от структурного напряжения молекул и стандартной энтальпии образования. Показана связь ПИВ с числом атомов углерода в молекуле углеводорода. Сделано заключение о связи ПИВ со строением молекулы углеводородов.

Список литературы

1. Бакулин В.Н., Дубовкин Н.Ф., Яновский Л.С. Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей/ под. ред. Л.С. Яновского. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 400 с.
2. Куликов С.В., Манелис Г.Б., Терновая О.Н. Влияние добавки Хе на поступательную неравновесность газовой смеси He-O₂-H₂ во фронте ударной волны, «Химическая физика», 2021, том 40, № 3, С. 31–40.
3. Гейдон А., Герл И. Ударная труба в химической физике высоких температур –Москва: Изд. «Мир», 1966. – 428 с.

УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ГОРЮЧЕМ ГАЗЕ, СОДЕРЖАЩЕМ ЛОКАЛЬНУЮ ОБЛАСТЬ ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТИ

Сутырин О.Г., Георгиевский П.Ю., Левин В.А.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: sutyrin@imec.msu.ru

На основе уравнений Эйлера для совершенного газа с неоднородным распределением плотности и термодинамических характеристик моделируется взаимодействие ударной волны в горючем газе с эллипсоидальным пузырем инертного газа повышенной плотности. Задача решается в двумерной плоской и осесимметричной постановках. Рассмотрены различные числа Маха M падающей волны и отношения длин полуосей пузыря. Для численного моделирования применяется конечно-разностная WENO5-JS схема, дополненная специальным методом аппроксимации уравнения переноса показателя адиабаты газа. Реакция горения газовой смеси моделируется с помощью двухстадийной кинетики Коробейникова-Левина.

Описаны различные режимы воспламенения смеси и показана их существенная зависимость как от интенсивности падающей волны, так и от формы пузыря. При достаточно больших числах Маха падающей волны инициирование горения смеси происходит непосредственно за счет разогрева в ударной волне. Для более слабых скачков воспламенение может происходить при отражении падающей ударной волны от границы раздела газов, незадолго перед фокусировкой (только в осесимметричном случае) и непосредственно при фокусировке падающей волны (рис. 1).

Показано, что форма пузыря также играет важную роль, во многих случаях обеспечивая инициирование горения пузыря более слабой волной, или наоборот, отсутствие воспламенения по сравнению со сферическими пузырями.

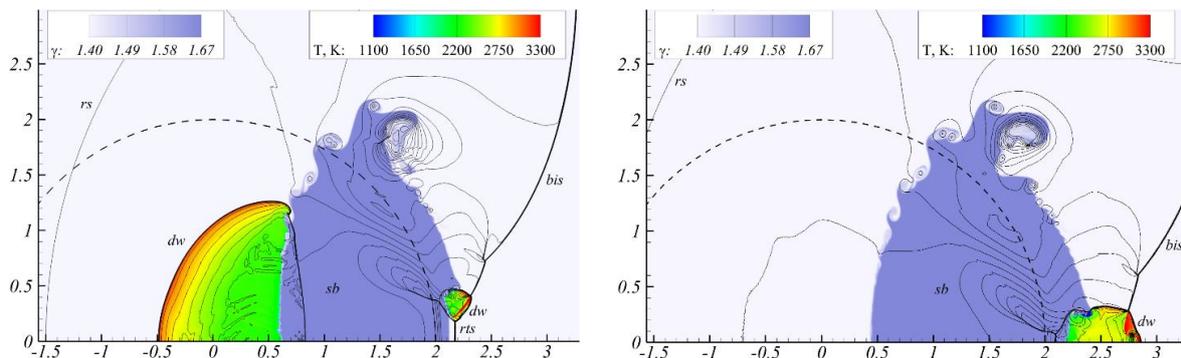


Рис. 1. Воспламенение горючей газовой смеси при отражении и преломлении падающей волны (слева, $M=2.9$) и при фокусировке поперечных скачков (справа, $M=2.4$), осесимметричный случай. Изолинии давления, показатель адиабаты газа, цветом показана температура (только $T > 1100\text{K}$).

Координаты в сантиметрах, пунктирная линия – исходная граница пузыря. Нижняя граница рисунков – ось симметрии. *bis* – падающая ударная волна (движется слева направо), *rs* – отраженная волна, *rts* – ретранслированная волна, *dw* – детонационная волна, *sb* – ударно-сжатый пузырь.

Работа выполнена в НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В. Ломоносова при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-11-00307) и Минобрнауки РФ (соглашение № 075-15-2020-806).

**ФИЗИКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ БЕГУЩЕЙ, МЕРЦАЮЩЕЙ
И ПОЛЗУЩЕЙ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ГОРЕНИЯ В ЖАРОВЫХ ТРУБАХ
В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ ГТД**

Сухинин С.В.¹⁾, Трилис А.В.¹⁾, Константинов А.П.¹⁾, Юрковский В.С.¹⁾, Черемисин А.А.²⁾

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

²⁾ Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск, Россия

При помощи численно-аналитических исследований проведены исследования собственных мод и частот термоакустических колебаний в жаровых трубах в кольцевом канале. Показано, что такие моды и частоты всегда существуют и их конечное число. Описана зависимость собственных мод и частот колебаний от геометрических параметров жаровых труб. Получено дисперсионное соотношение для волновых чисел и частот бегущих волн, описаны волновые пакеты, обусловленные дисперсией волн. Описаны бегущие, мерцающие и ползущие неустойчивости горения в жаровых трубах в кольцевом канале ГТД.

**ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ КАК ПРЕКУРСОР
НЕУСТОЙЧИВОСТИ ГОРЕНИЯ В ЖАРОВЫХ ТРУБАХ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ**

Сухинин С.В.¹⁾, Трилис А.В.¹⁾, Константинов А.П.¹⁾, Юрковский В.С.¹⁾, Черемисин А.А.²⁾

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

²⁾ Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Показано, что собственные акустические колебания около жаровых труб в кольцевом канале всегда обуславливают появление собственных термоакустических колебаний. Развитие или интенсификация неустойчивости вибрационного горения в жаровых трубах обусловлено высокой добротностью резонансных явлений на собственных частотах акустических колебаний. Это означает, что термоакустические колебания являются прекурсором появления неустойчивости горения в жаровых трубах в кольцевом канале.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОВМЕТСНОГО ВОСПАЛМЕНЕНИЯ ЧАСТИЦ УГЛЯ И БИОМАССЫ

Сыродой С.В.¹⁾, Кузнецов Г.В.¹⁾ Саломатов В.В.²⁾

¹⁾ Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

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

Как известно [1] один из самых перспективных способов энергетического использования угля – сжигание последнего в составе энергоэффективных и экологоперспективных топливных композиций [2]. К последним относятся древесно-угольные смеси [3]. Анализ современного состояния теории и практики по тематике сжигания смесей уголь/биомасса показывает (например, работа [4]), что до настоящего времени не разработано математической модели, описывающей совместное воспламенение и горение частиц древесины и угля. По этой причине, цель этой работы - разработка математического аппарата, адекватно описывающего процессы зажигания и горения частиц древесно-угольного топлива. На рисунках 1 а,б приведены температурные поля и изолинии функции тока в момент воспламенения частиц биомассы (рис.1а) и угольного топлива (рис.1б).

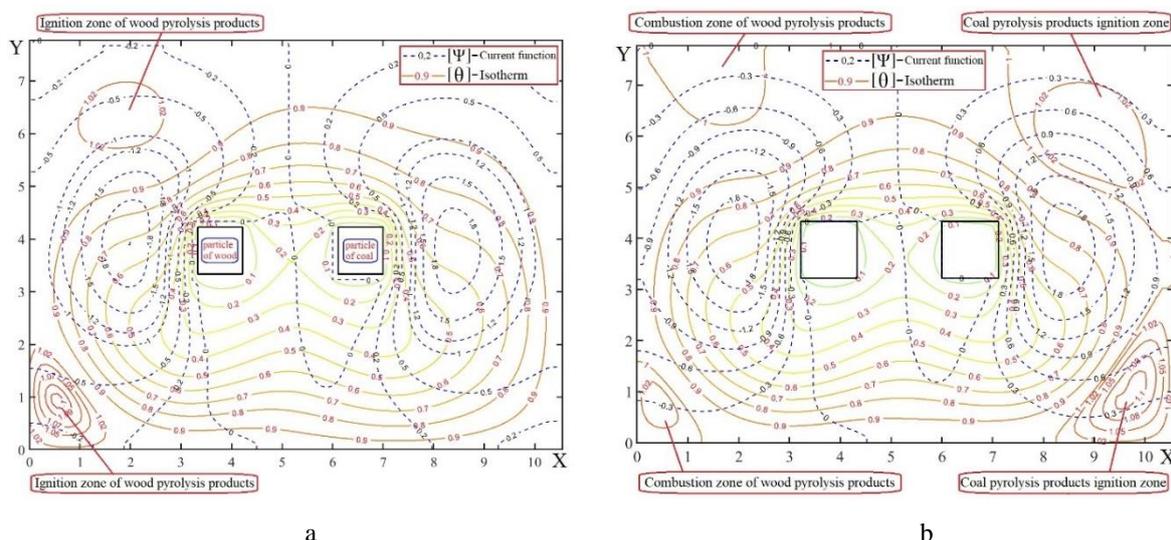


Рис. 1. Типичные поля температур и изолинии функции тока в момент воспламенения частицы биомассы (а) и угля (б).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 18-79-10015).

Список литературы

1. Hansson J., Berndes G., Johnsson F., Kjärstad J. Co-firing biomass with coal for electricity generation—An assessment of the potential in EU27//Ener. Policy. – 2009. – V. 37 – p. 1444–1455.
2. Ryabov G. A., Dolgushin I. A. Use of circulating fluidized bed technology at thermal power plants with co-firing of biomass and fossil fuels. //Power Techn. and Engineer. – 2013. – V. 46 – p. 4–9.
3. Rokni E., Ren X., Panahi A., Levendis Y.A. Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels//Fuel. – 2018. – V. 211 – p. 363–374.
4. Alobaid F., Busch J.-P., Stroh A., Strohle J., Epple B. Experimental measurements for torrefied biomass co-combustion in a 1 MW-th pulverized coal-fired furnace//J. of the Ener. Inst. – 2020. – V. 93 – p.833–846.

УТИЛИЗАЦИЯ ХЛОРСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ТЕРМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Тарасов Г.А., Молоканов А.А., Яновский Л.С.

Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Россия

Основным источником хлорсодержащих отходов по объему образования являются строительные и бытовые отходы содержащие хлорорганические полимеры (поливинилхлорид, хлорпреновый каучук, полистиролы и т.д.) [1]. Но наиболее опасными в экологическом отношении являются промышленные отходы предприятий хлорорганического синтеза. Это связано с тем, что первые в обычных условиях нетоксичны или малотоксичны.

Показано, что наиболее предпочтительными способами утилизации строительных и бытовых хлорсодержащих отходов при условии их отделения от общего потока отходов являются механическая и химическая переработка во вторсырье. Допустимо сжигание в общем потоке на мусоросжигательных заводах. Наиболее распространенным способом обращения с отходами предприятий хлорорганического синтеза является высокотемпературная переработка, при которой из кубовых остатков первичного процесса получают соляную кислоту. Встречаются установки, основанные на каталитических и гидрирующих процессах [2].

Основной проблемой в области переработки и утилизации хлорсодержащих отходов, в том числе твердых бытовых отходов, является очистка дымовых газов при применении термических методов. Предлагается использовать порошок негашеной извести в добавлении к твердым бытовым отходам, а также в растворе с водой при очистке уходящих газов предприятий по переработке промышленных отходов предприятий хлорорганического синтеза. Экспериментально показано в эксперименте с ретортой, нагретой до 600°C в которой разлагался поливинилхлорид, что применение негашеной извести в стехиометрическом количестве для полного протекания реакции с хлором позволяет поглотить 80% образующегося хлороводорода. Предполагается, что это позволит снизить коррозионный износ оборудования и уменьшить количество вредных веществ в выбросах дымовых газов [3].

В работе проведен анализ основных источников хлорсодержащих отходов. Рассмотрены применяемые методы их утилизации в зависимости от различных факторов и состава сырья. Проанализированы основные проблемы в области переработки и утилизации хлорсодержащих отходов в том числе твердых бытовых отходов. Предложен способ улучшения экологических показателей установок по утилизации хлорсодержащих отходов термическим методом.

Список литературы

1. Воронков М.Г., Татарова Л.А., Трофимова К.С., Верхозина Е.И., Халиуллин А.К. Переработка промышленных хлори серосодержащих отходов – М.: Химия в интересах устойчивого развития 9 (2001) 393–403.
2. Демина Т.Я., Шаяхметова Л.Р. К проблеме утилизации отходов химических технологий на примере производства хлорорганических соединений // Вестник ОГУ. 2005. № 10–2.
3. Балабаева Е.М., Коршунова Л.А., Манелис Г.Б., Полианчик Е.В., Цветков М.В. Нейтрализация хлора кальцийсодержащими сорбентами непосредственно в процессе газификации твердого топлива. // Альтернативная энергетика и экология. 2009. № 8. С. 190–194.

ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ ПРОПАН-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ В ДЕТОНАЦИЮ В ЩЕЛЕВЫХ ЗАЗОРАХ

Тесленко В.С., Дрожжин А.П.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
vteslenko@mail.ru

В экспериментах по моделированию сжигания пропан-кислородных смесей в макетной камере двигателя внутреннего сгорания (ДВС) диаметром $D=72$ мм и высотой зазора $h=4$ мм изучались возможные способы создания условий быстрого перехода горения в детонацию. Были опробованы различные методы генерации перехода горения в детонацию. Переход горения в детонацию реализовался при распространении горения через щели шириной $\sim 0,1\div 1$ мм. Щели располагались между двумя секторами цилиндра.

На кинограмме представлен процесс перехода горения в детонацию через щель, расположенную по диаметру цилиндра.



Полученные результаты обосновывают механизм генерации детонационных режимов, проявляющие себя в виде «стуков» в ДВС, при увеличении числа оборотов: за счет опережающего открытия клапанов до моментов полного сгорания топлива. Именно по этим причинам, по статистике, «прогары» металла начинают развиваться на клапанах.

Рассматривается простая модель, объясняющая переход горения в детонацию [1].

На основании полученных результатов обосновывается необходимость разработок инициирования горения в ДВС пространственно разнесенными многоочаговыми источниками (МОИ) [2,3].

МОИ позволят сократить время полного сжигания топлива в цилиндре без развития детонационных режимов, позволят увеличить среднюю мощность двигателя без выбросов недогоревшего топлива.

Список литературы

1. Субботин В.А. Возбуждение детонации при взаимодействии пламени с волной разрежения // ФГВ 2003, т. 30, № 1, С. 104–115.
2. Kociszewski A., Jamrozik A., Sosnowski M., Tutak W. Computational analysis and experimental research into lean mixture combustion in multi-spark plug si engine // Journal of KONES. 2006. V. 13. N. 3. P. 123–130.
3. V.S. Teslenko, A.P. Drozhzhin and Yu.V. Anisichkin. Multispark initiation of propane combustion in an enclosed volume // Journal of Physics: Conference Series 1666 (2020) 012065, http://swsl.hydro.nsc.ru/publ/Teslenko_JPCS_2020.pdf.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТОДОМ ПЛОСКОСТНОЙ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ В ПОТОКЕ МЕЖДУ ПЛАМЕНЕМ БУНЗЕНА И ПЛОСКОЙ ОХЛАЖДАЕМОЙ ПРЕГРАДОЙ

Толстогузов Р.В.^{1,2)}, Лобасов А.С.^{1,2)}, Шараборин Д.К.^{1,2)}, Дулин В.М.^{1,2)}

¹⁾ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

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

Метод плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции позволяет регистрировать 2D-распределения температуры в потоке. Один из принципов основан на сравнении изменения интенсивности различных участков спектра флуоресценции гидроксильного радикала (ОН) в зависимости от температуры [1]. Вклад столкновений и теплового движения молекул в интенсивность флуоресценции высокоэнергетичных переходов возрастает с температурой. Реализация метода основана на однократном освещении плоскости потока лазерной вспышкой и регистрации локального соотношения интенсивности двух различных участков спектра флуоресценции с использованием двух независимых камер.

В настоящей работе данный метод был применен для исследования распределения температуры в пламени Бунзена предварительно-перемешанной метановоздушной смеси, расположенного на расстоянии в один, два и три калибра от среза горелочного устройства с диаметром сопла 15 мм. Над соплом установлена плоская преграда, положение которой относительно сопла регулируется с помощью механизированного позиционирующего устройства. Коэффициент избытка топлива для метановоздушной смеси Φ был равен 0.92, число Рейнольдса составляло $Re=1\ 000$. Измерительная система состояла из перестраиваемого импульсного лазера на красителе, импульсного Nd:YAG лазера накачки и двух интенсифицированных камер на основе электронно-оптических преобразователей и усилителей. Перестраиваемый лазер возбуждал флуоресценцию ОН на длине волны перехода $Q1(8)$ полосы $A2\Sigma^+-X2\Pi(1-0)$. Интенсивность сигнала флуоресценции ОН для полосы $(2-0)$ и для полос $(0-0)$, $(1-1)$ регистрировалась двумя интенсифицированными камерами. Калибровочная зависимость для метода термометрии, полученная численно с использованием пакета программ LASKIN [2] для различных переходов, подробно описана в [3]. В работе показано, что предложенный метод может быть использован для обнаружения и регистрации горячих зон в высокотемпературном потоке.

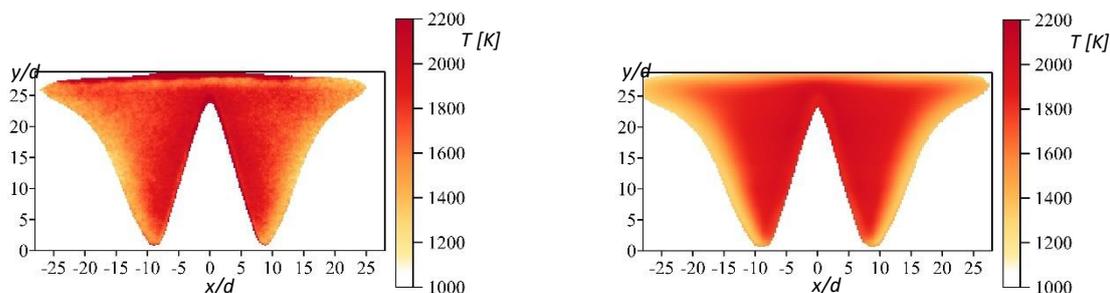


Рис. 1. Пример полученного осредненного поля температуры для импактного пламени Бунзена при расстоянии в два калибра. Слева – данные, полученные предложенным методом, справа – методом two-line LIF.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90164.

Список литературы

1. Copeland C., Friedman J., Renksizbulut M. Planar temperature imaging using thermally assisted laser induced fluorescence of OH in a methane–air flame //Exp. Thermal Fluid Sci. – 2007. – V. 31. – P. 221–236.
2. Bülter A. et al. LASKIN: Efficient simulation of spectra affected by energy transfer //Laser Applications to Chemical and Environmental Analysis. – Optical Society of America, 2004. –TuE4.
3. Dulin V. et al. Assessment of single-shot temperature measurements by thermally-assisted OH PLIF using excitation in the $A2\Sigma^+-X2\Pi(1-0)$ band //Proc. Combust. Inst. – 2021. – V. 38. – P. 1877–1883.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ОКОЛО ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В КАНАЛАХ И ТРУБАХ

Трилис А.В.¹⁾, Константинов А.П.¹⁾, Сухинин С.В.¹⁾, Юрковский В.С.¹⁾, Черемисин А.А.²⁾

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

²⁾ Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Актуальность работы обусловлена потребностями создания новых типов горелочных устройств (камер сгорания) или химических реакторов с выделением энергии с управляемыми амплитудами термоакустических автоколебаний потока продуктов реакции в течение всего рабочего периода. Современные задачи проектирования и создания новых типов реакторов и горелочных устройств (камер сгорания) требуют расширения допустимых технологий для автоколебательных режимов работы. В общем случае наряду с задачами разработки и создания систем контроля автоколебаний актуальными являются задачи разработки и создания макро и микроскопических процессов управления химической кинетикой при горении и химических реакциях. Решение указанных задач позволит улучшить технические и эксплуатационные характеристики горелочных устройств и экзотермических реакторов.

В работах [1, 2] было показано, что в круглых однородных каналах существуют собственные колебания среды, локализованные около цилиндрических препятствий (эоловы тона). Спектр частот этих колебаний вещественный.

В настоящей работе впервые проведены расчетные и экспериментальные исследования и сравнительный анализ термоакустических автоколебаний потока газа около тонкостенного цилиндра (труба Рийке), расположенного в цилиндрическом однородном канале и являющегося моделью проточного химического реактора или горелочного устройства, с автоколебаниями потока газа в отдельной трубе Рийке (см, например, [3, 4]).

В результате исследований были получены частоты автоколебаний и амплитуды гармоник. Были определены области существования автоколебаний по расположению источника тепла в трубе Рийке относительно ее нижнего конца. Было показано, что, в отличие от отдельной трубы Рийке, для трубы Рийке в цилиндрическом канале существенно увеличиваются амплитуды гармоник, уменьшается время установления автоколебаний, расширяется область существования автоколебаний по положению нагревателя. Таким образом, показано, что конфигурация «тонкостенный цилиндр в круглом однородном канале» является резонатором с повышенной добротностью.

Результаты исследований могут быть использованы для разработки методов управления или подавления термоакустических автоколебаний типа эоловых тонов (эффекта Рийке или эффекта Хиггинса), локализованных в каналах жаровых труб.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2020-781).

Список литературы

1. Сухинин С.В. Собственные колебания в открытых цилиндрических областях // Динамика сплошной среды: Сб. науч. трудов / РАН. Сиб. отделение. Ин-т гидродинамики. – 1995. – Вып. 110. – С. 139–152.
2. Сухинин С.В. Акустические колебания около тонкостенных цилиндрических препятствий в канале // ПМТФ. – 1999. – Т. 40, № 4. – С. 133–142.
3. Марченко В.Н, Тимошенко В.И. Исследование термической генерации звука в трубе Рийке // Акустический журн. – 1970. – Т. 16, № 2. – С. 323–324.
4. Dan Zhao. Transient growth of flow disturbances in triggering a Rijke tube combustion instability // Combustion and Flame. – 2012. – Vol. 159. – P. 2126–2137.

РАЗРАБОТКА ОБОБЩЕННЫХ ДВУХСТАДИЙНЫХ МОДЕЛЕЙ КИНЕТИКИ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ В ДВУХТОПЛИВНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ

Троцюк А.В., Фомин П.А.

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

Разработаны обобщенные двухстадийные модели химической кинетики детонационного горения в кислороде и воздухе двухтопливных газовых смесей: смеси окиси углерода с водородом (синтез-газ) H_2-CO и с гексаном $C_6H_{14}-CO$. Кинетические модели позволяют вычислять молярную массу, внутреннюю энергию, показатель адиабаты и теплоемкость рассматриваемых смесей без расчета их детального химического состава. Они являются дальнейшим развитием предложенной ранее обобщенной кинетической модели детонационного сгорания метановых смесей [1].

Предлагаемый набор кинетических моделей обладает оригинальным набором свойств: физической обоснованностью, простотой, высокой точностью, возможностью описания как динамики химических превращений, так и состояния химического равновесия, соответствием второму началу термодинамики и принципу Ле Шателье, применимостью в широком диапазоне начальных химических составов. Рассматриваемые модели являются эффективной альтернативой детальным кинетическим схемам в численных многомерных расчетах параметров и структуры детонационных волн (ДВ), поскольку использование подобных схем в силу громоздкости и проблемам в выборе констант является проблематичным.

Рассматриваемые модели являются двухстадийными (стадия периода индукции и стадия основного тепловыделения). Для первой, индукционной стадии, предложена оригинальная полуэмпирическая формула определения длительности периода индукции в двухтопливной смеси по известным константам аррениусовских формул для расчета периода индукции в отдельных компонентах топлива. Подобный подход основан на работе [2]. Реальные многостадийные химические процессы во время периода индукции заменяются некоторой брутто-реакцией, которая учитывает, что к моменту окончания периода индукции все молекулы углеводородов, присутствующие в начальной смеси, претерпевают разложение с образованием молекул CO , а тепловой эффект химической реакции при этом много меньше максимально возможного тепловыделения, соответствующего полной рекомбинации продуктов реакции.

Предложенные модели кинетики использованы для численных двумерных расчетов структуры ДВ в стехиометрической смеси синтез-газа $\alpha H_2 + (1-\alpha)CO$ с кислородом и воздухом при различном содержании водорода α в топливе, а также в стехиометрической смеси гексана (тяжелый углеводород) и CO с воздухом при различной доли CO в бинарном топливе.

В расчетах получено, что при увеличении доли окиси углерода в рассматриваемых смесях двумерная регулярная структура ДВ сменяется нерегулярной, которая характеризуется хаотическим несогласованным движением основных поперечных волн (ПВ), многочисленными вторичными (третичными и т.д.) ПВ, составляющими иерархию уменьшающихся по размерам возмущений лидирующего ударного фронта волны, «тонкой» (многофронтной) структурой как основных так и вторичных ПВ, наличием значительных областей непрореагировавшего газа за фронтом волны, что полностью соответствует эксперименту. Рассчитанные размеры детонационных ячеек в широком диапазоне изменения доли CO в бинарном топливе хорошо (в пределах экспериментальных ошибок) соответствуют известным экспериментальным данным.

*Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации, соглашение № 075-15-2020-806 от 29.09.2020.*

Список литературы

1. Trotsyuk A.V, Fomin P.A, Vasil'ev A.A. Numerical study of cellular detonation structures of methane mixtures // J. of Loss Prevention in the Process Industries. – 2015. – V. 36. – P. 394–403. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.03.012.
2. Васильев А.А. Задержка воспламенения в многотопливных смесях // ФГВ. – 2007. – Т. 43, № 3. – С. 42–46.

РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ КЕРОСИНА В КАНАЛЕ ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ЧИСЛЕ МАХА $M=1.7$ НА ВХОДЕ.

Третьяков П.К., Тупикин А.В.

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

Одной из основных фундаментальных задач, которые необходимо решить для создания эффективных сверхзвуковых ПВРД, является снижение гидродинамических потерь по тракту двигателя. В патенте [1] предложена схема рабочего процесса с уменьшением потерь давления за счет организации горения в волновых структурах типа псевдоскачок. О возможности реализации такого подхода с параметрами потока на входе модельной камеры сгорания (КС): число Маха $M=2$ и температура торможения $T^*=1650$ К – свидетельствуют работы [2,3].

Экспериментально были реализованы пульсирующий и квазистационарный режимы горения в псевдоскачке при параметрах потока на входе модельной КС: число Маха $M=1.7$, температура торможения $T^*\approx 1400$ К, давление в форкамере $P_0\approx 0.5$ МПа. Модельная КС состояла из двух секций постоянного сечения (диаметрами 50 и 90 мм), в конце первой подавались газодинамические импульсы для инициирования и поддержания горения в псевдоскачке. Для реализации квазистационарного режима перед внезапным расширением подавался водород, горение которого стабилизировало положение псевдоскачка в первой секции. Пример распределения статического давления отнесенного к давлению в форкамере вдоль модельной КС представлен на рис.1.

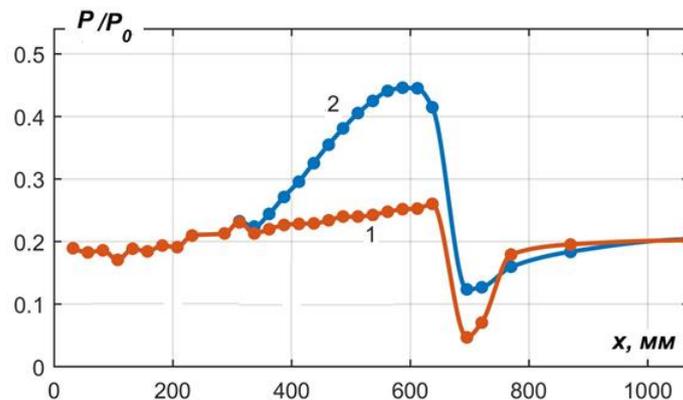


Рис. 1. Распределение статического давления вдоль модельной КС: 1 – без горения; 2 – с горением.

Таким образом, показана применимость способа интенсификации горения, предложенного в [1] при более низких параметрах течения на входе, чем в работах [2,3].

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ 121030500157-3) и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-08-00245).

Список литературы

1. Третьяков П.К., Прохоров А.Н. Сверхзвуковой прямоточный воздушно-реактивный двигатель с пульсирующим режимом запуска (СПВРД С ПРЗ) и способ его работы // Патент на изобретение РФ (Заявка № 2016113653. Приоритет 08.04.2016). –№.2651016. – М., 2018. – С. 8. (Бюллетень «Изобретения. Полезные модели», № 11).
2. Третьяков П.К. Организация эффективного горения керосина в канале при больших скоростях потока // Физика горения и взрыва. – 2020. – №.1. – С. 42–47.
3. Третьяков П.К., Тупикин А.В., Куранов А.Л., Колосенок С.В., Саваровский А.А., Абашев В.М. Применение синтез-газа для интенсификации горения керосина в сверхзвуковом потоке // Физика горения и взрыва. – 2020. №. 5. – С. 45–48.

**ИНГИБИРУЮЩИЙ ЭФФЕКТ ДОБАВКИ ТРИФЕНИЛФОСФАТА
НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ ПО ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТУ**

**Трубачев С.А.^{1,2)}, Коробейничев О.П.¹⁾, Карпов А.И.³⁾, Шаклеин А.А.³⁾, Палецкий А.А.¹⁾,
Терещенко А.Г.¹⁾, Шмаков А.Г.^{1,2)}, Глазнев Р.К.^{1,2)}, Wang Xin⁴⁾, Yuan Hu⁴⁾, W.Z. Hu⁴⁾**

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

²⁾ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

³⁾ УдФИЦ УрО РАН, г. Ижевск, Россия

⁴⁾ Университет науки и технологий Китая, г. Хэфэй, Китай

Экспериментально и численно был изучен эффект ингибирования антипирена трифенилфосфата (ТФФ) на распространение пламени по горизонтальной поверхности полиметилметакрилата (ПММА). Были измерены следующие параметры распространения пламени по поверхности ПММА (чистого и с добавкой ТФФ): термическое разложение с помощью ТГ/ДСК-анализатора, скорость распространения пламени, длина зоны пиролиза, скорость потери массы, пространственное распределение температуры с помощью термопар и концентраций веществ в газовой фазе пламени с помощью зондирующей масс-спектрометрии. Разработанная сопряженная математическая модель тепломассопереноса, описывающая связанное взаимодействие между пламенем и твердым топливом, а также выход продуктов пиролиза, была модифицирована для выявления влияния ТФФ на распространение пламени путем введения поправочного коэффициента константы скорости газозафазного горения γ , связанным с концентрацией ингибитора в твердом материале:

$$W_g = k_g (1 - \gamma Y_{TRP}) Y_F Y_O \exp\left(-\frac{E_g}{R_0 T}\right) \quad (1)$$

W_g – скорость макрореакции окисления топлива, k_g – предэкспонент, E_g – энергия активации, Y_F – доля топлива (ММА), Y_O – доля окислителя (O_2), R_0 – универсальная газовая постоянная, T – температура.

Выявлено хорошее согласие между измеренными и рассчитанными макропараметрами горения (скорость распространения пламени, массовая скорость выгорания, длина зоны пиролиза), а также детальными характеристиками горения (структура пламени). Показано, что предложенный подход удовлетворительно описывает ингибирующее действие ТФФ на распространение пламени по поверхности ПММА за счет ингибирования реакции газозафазного горения.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 19-03-00611.

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ АКТУАЛИЗАЦИИ СПРАВОЧНИКА НДТ ИТС 9-2020 «УТИЛИЗАЦИЯ И ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ ОТХОДОВ ТЕРМИЧЕСКИМИ СПОСОБАМИ»

Тугов А.Н.

ОАО «ВТИ», г. Москва, Россия

В РФ с 1 января 2020г. принят Федеральный закон (№ 450-ФЗ от 27.12.2019г.), в котором термическая переработка ТКО с отпуском потребителю энергии трактуется как энергетическая утилизация, а сами твердые коммунальные отходы (ТКО) считаются вторичными энергетическими ресурсами. Руководствуясь зарубежным опытом, процесс термической переработки ТКО можно считать энергетической утилизацией только в том случае, если энергоэффективность (Θ) предприятия по переработке ТКО (ТЭС на ТКО) выше определенного значения.

Для определения реально достижимого в российских условиях значения Θ для теплоты сгорания ТКО, не требующих подсветки дополнительным топливом для их сжигания, приведенную в [1] формулу можно преобразовать в следующий вид:

$$\Theta = \left[\left(1 - \frac{E_{\text{сн}}}{Q_i^r \eta_{\text{эл}} V_p} \right) 2,6\eta_{\text{эл}} + \frac{V_{\text{т}}}{V_p} (1,1\eta_{\text{теп}} - 2,6\eta_{\text{эл}}) \right] / 0,97 \quad (1)$$

где $E_{\text{сн}}$ – электроэнергия, затраченная на собственные нужды, ГДж/год; V_p – расход перерабатываемых отходов, т/год; Q_i^r – теплота сгорания перерабатываемых отходов, МДж/кг; $\eta_{\text{эл}}$, $\eta_{\text{теп}}$ – коэффициенты преобразования энергопотенциала отходов в электрическую и тепловую энергию (электрический и тепловой КПД) соответственно; $V_{\text{т}}$ – количество отходов, которые сжигают для отпуска потребителю только тепловой энергии, т/год.

Анализ формулы показывает, что энергоэффективность ТЭС на ТКО зависит от коэффициента преобразования энергопотенциала отходов в электрическую и тепловую энергию, мощности предприятия и теплоты сгорания ТКО, затрат на собственные нужды. Однако ключевое влияние на энергоэффективность оказывает соотношение отпускаемой потребителю тепловой и электроэнергии. Так, в российских условиях для ТЭС на ТКО производительностью 360 тыс. т отходов в год энергоэффективность при работе в конденсационном режиме и в режиме максимального отпуска тепловой энергии составляет 0,4–0,5 и 0,75–0,8 соответственно [2].

В прошлом году в соответствии с графиком, утвержденным распоряжением Правительства Российской Федерации от 30 апреля 2019 г. № 866-р, выполнена актуализация информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям ИТС 9-2015 «Обезвреживание отходов термическим способом (сжигание отходов)», который стал называться «Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами» (справочник НДТ ИТС 9-2020).

Исходя из обоснования, приведенного выше, в справочнике НДТ ИТС 9-2020 технология термической переработки ТКО признается энергетической утилизацией отходов, если при комбинированном производстве тепловой и электрической энергии (когенерация) энергоэффективность ТЭС на ТКО не менее 0,65, а в конденсационном режиме (производится только электрическая энергия) данный показатель не менее 0,45. Наилучшими доступными технологиями энергетической утилизации ТКО считаются установки для случая когенерации - с общим КПД не менее 70%, а для случая получения только электрической энергии – с электрическим КПД не менее 20%.

Список литературы

1. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance) // Official Journal of European Union, 22.11.2008.
2. Тугов А. Н. К вопросу об энергетической утилизации твердых коммунальных отходов в России // Энергетик. – № 9. – 2020. – С. 15–18.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ LOW-NO_x ГОРЕЛОК ВТИ-ЕНТЕН ДЛЯ СЖИГАНИЯ ПИРОЛИЗНЫХ ГАЗОВ

Тугов А.Н.¹⁾, Сидоркин В.Т.²⁾, Верещетин В.А.¹⁾, Штегман А.В.¹⁾, Берсенев К.Г.²⁾

¹⁾ ОАО «ВТИ», г. Москва, Россия

²⁾ ENTEH Engineering AS, г. Кохтла-Ярве, Эстония

Рекомендации по проектированию газовых горелок содержатся во многих работах. В частности, можно отметить достаточную детализацию рекомендаций в работах [1, 2]. Специальные рекомендации стали появляться в связи с требованиями по снижению выбросов оксидов азота [3].

В данной работе обобщен подход ВТИ и ENTEH разработке Low-NO_x горелок и приведены результаты внедрений горелок на энергетических котлах [4].

Признавая эффективность горелок с внутренней рециркуляцией дымовых газов в плане снижения выбросов оксидов азота, тем не менее, в качестве более приемлемого для пиролизных газов был выбран метод с использованием внешней рециркуляции, поскольку у пиролизных газов достаточно распространено значительное колебание калорийности и плотности газа, а давление газа, как правило, невысоко.

Конструкция горелок выбрана двухсекционной с независимым регулированием расхода газа и окислителя в центральную и в периферийную часть. Степень балластирования воздуха дымовыми газами рециркуляции также регулируется отдельно в центральной и в периферийной части.

Газораспределение по сечению горелки и угол установки осевых лопаточных завихрителей выбирается в зависимости от различных параметров (форма факела, его светимость, уровень выбросов NO_x, габариты топки).

С помощью CFD-моделирования была выполнена попытка сравнительной оценки влияния газораспределения в горелке на образование NO_x.

Список литературы

1. Иванов Ю.В. Газогорелочные устройства. – М.: Недра, 1972. – 375 с.
2. Вулис Л.А., Ярин Л.П. Аэродинамика факела. – Л.: Энергия, 1978. – 216 с.
3. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. – Л.: Недра, 1988. 3– 12 с.
4. Тугов А.Н., Верещетин В.А., Сидоркин В.Т. и др. Снижение выбросов оксидов азота на котле Е-135-3,2-420ДГ при сжигании газообразных продуктов сланцелереработки. – Электрические станции. – 2018. – № 5. – С. 46–49.

АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ДАВЛЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ

Федорова Н.Н., Гольдфельд М.А., Пикалов В.В.

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

Процесс самовозбуждения акустических колебаний газа в каналах с горением обнаружен в работах Хиггинса в конце 18 века. Исследование акустических колебаний в камере сгорания при сверхзвуковых скоростях актуально с точки зрения обеспечения полноты сгорания топлив в высокоскоростных потоках, а также сохранения целостности конструкций летательного аппарата под действием высоких динамических и температурных нагрузок [1].

В экспериментах [2] исследовано воспламенение и горение водородных струй, подаваемых под углом 45 и 90 градусов в модельную камеру сгорания, представляющую собой плоский канал с резким расширением (уступом). Исследование выполнены при сверхзвуковых ($M=4$) скоростях воздуха на входе в канал. Поведение давления в датчиках, расположенных по длине камеры сгорания с шагом 60 мм (рис. 1), показывает наличие акустических колебаний, амплитуда которых растет со временем. Частоты колебаний получены путем обработки сигналов датчиков с помощью быстрого преобразования Фурье и вэйвлет-анализа [3].

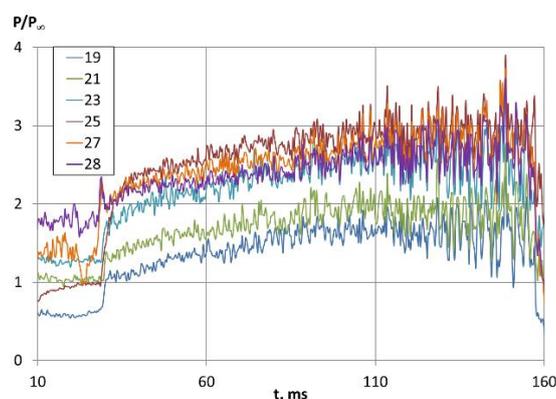


Рис. 1. Безразмерное статическое давление в датчиках, установленных на стенках канала для пуска с углом подачи водорода 45 град, цифрами 19-28 обозначены номера датчиков.

Для того, чтобы выяснить природу этих колебаний и их влияния на горение водорода, была выполнена серия расчетных исследований. Моделирование проведено в ANSYS Fluent на основе нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, дополненных двухпараметрической моделью турбулентности и детальной кинетической схемой Maas & Warnatz (1988). Описание математической модели и методики расчета можно найти в [4]. Расчет качественно и количественно верно моделирует нестационарные режимы горения неподготовленной водородно-воздушной смеси, а также воспроизводит акустические колебания с частотами около 150 Гц, которые близки к зафиксированным в эксперименте. В докладе представлено описание нестационарных процессов в сверхзвуковой камере сгорания и проанализировано взаимное влияние акустических колебаний и процессов смешения и горения.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ 20-08-00959.

Список литературы

1. Ларионов В.М., Зарипов Р.Г. Автоколебания газа в установках с горением. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. 227 с.
2. Гольдфельд М.А. Процесс самовоспламенения и стабилизации пламени в водородной сверхзвуковой камере сгорания при поперечной подаче топлива // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27. № 4. С. 601–613.
3. Астафьева Н.М. Вэйвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145–1170.
4. Ванькова О.С., Федорова Н.Н. Моделирование воспламенения и горения спутной водородной струи в сверхзвуковом потоке воздуха // Физика горения и взрыва, 2021, т. 57, № 4.

СЖИГАНИЕ ХЛОРСОДЕРЖАЩИХ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ: ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУБ- И СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ВОДЫ

Федяева О.Н., Востриков А.А.

Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Накопленные к настоящему времени хлорсодержащие органические отходы (пластик, отработанное трансформаторное масло, отходы химической и целлюлозно-бумажной промышленности) нуждаются в эффективной и экологически безопасной утилизации. Неквалифицированное сжигание этих отходов приводит к образованию полихлорированных dibензодиоксинов и dibензофуранов (ПХДД и ПХДФ), являющихся кумулятивными ядами. Одним из способов экологически безопасного обезвреживания хлорсодержащих отходов может стать их обработка суб- и сверхкритической водой ($T_c=374^\circ\text{C}$, $P_c=22.1$ МПа), которая обладает рядом преимуществ. Во-первых, вода в суб- и сверхкритическом состоянии является активным химическим реагентом [1–3]. Во-вторых, неполярные вещества и газы растворяются в сверхкритической воде (СКВ), что улучшает массоперенос и, как следствие, способствует увеличению скорости превращения. В-третьих, из-за низкой растворимости в СКВ [4] минеральные компоненты осаждаются, что обеспечивает их отделение от органических веществ.

В докладе рассмотрены механизмы образования ПХДД и ПХДФ при сжигании полихлорвинила, полихлорированных бифенилов и фенолов в воздушной атмосфере, а также механизмы участия суб- и сверхкритической воды в реакциях дехлорирования и роль щелочного гидролиза в этом процессе [5–7]. В частности, показано [8], что источником ПХДД и ПХДФ являются реакции рекомбинации хлорфеноксильных радикалов, образующихся в результате окисления. Удаление хлора из органических соединений в среде суб- и сверхкритической воды протекает по механизмам нуклеофильного замещения и элиминирования [5, 7], в том числе при участии молекул H_2O в качестве нуклеофильного агента. Особое внимание уделено окислению хлорсодержащих промышленных отходов в СКВ и практическому использованию этого процесса для их обезвреживания [9, 10].

Список литературы

1. Akiya N., Savage P.E. Roles of water for chemical reactions in high-temperature water // *Chem. Rev.* 2002. – V. 102. – P. 2725–2750.
2. Галкин А.А., Лунин В.В. Вода в суб- и сверхкритическом состояниях – универсальная среда для осуществления химических реакций // *Успехи химии.* – 2005. – Т. 74, № 1. – С. 24–40.
3. Bandura A.V., Lvov S.N. The ionization constant of water over wide ranges of temperature and density // *J. Phys. Chem. Ref. Data.* – 2006. – V. 35. – P. 15–30.
4. Voisin T., Erriguible A., Ballenghein D., Mateos D., Kunegel A., Cansell F., Aymonier C. Solubility of inorganic salt in sub- and supercritical hydrothermal environment: application to SCWO process // *J. Supercrit. Fluids.* – 2017. – V. 120. – P. 18–31.
5. Lee G., Nunoura T., Matsumara Y., Yamamoto K. Effect of a sodium hydroxide addition on the decomposition of 2-chlorophenol in supercritical water // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2002. – V. 41. – P. 5427–5431.
6. Fang Z., Xu S., Kozinski J.A. Flameless oxidation of chlorinated wastes in supercritical water using sodium carbonate as the oxidation stimulant // *Proc. Combust. Inst.* – 2002. – V. 29. – P. 2485–2492.
7. Xiu F., Lu Y., Qi Y. DEHP degradation and dechlorination of polyvinyl chloride waste in supercritical water with alkali and ethanol: A comparative study // *Chemosphere.* – 2020. – V. 249. – P. 126138.
8. Weber R., Hagenmaier H. Mechanism of the formation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans from chlorophenols in gas phase reactions // *Chemosphere.* – 1999. – V. 38. – P. 259–549.
9. Fedyaeva O.N., Morozov S.V., Vostrikov A.A. Supercritical water oxidation of chlorinated waste from pulp and paper mill // *Chemosphere.* – 2021. (In Press).
10. Kim K., Kim K., Son S.H., Cho J., Kim Y.-C. Supercritical water oxidation of transformer oil contaminated with PCBs – A road to commercial plant from bench-scale facility // *J. Supercrit. Fluids.* – 2011. – V. 58. – P. 121–130.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПИРОЛИЗА И ГАЗИФИКАЦИИ ОТХОДОВ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Филимонова А.С.¹⁾, Зябрев А.С.¹⁾, Петров И.Я.²⁾, Ушаков К.Ю.¹⁾, Богомолов А.Р.^{1,3)}

¹⁾ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
г. Кемерово, Россия

²⁾ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

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

В современном мире одной из задач для сохранения экологического благополучия, является решение проблемы утилизации отходов резинотехнических изделий (РТИ). Связано это с тем, что шины и другие резиновые изделия, их отходы из-за своей сложной структуры и состава являются источником длительного экологического загрязнения [1]. На сегодняшний день большее развитие получили такие способы переработки отходов РТИ как сжигание, пиролиз, механическое измельчение, девулканизация и газификация [2]. Но не один из них не является одновременно экологически безопасным и привлекательным для инвесторов, поэтому не нашел широкого распространения в практическом применении. В связи с чем, на сегодня актуален поиск альтернативных способов переработки отходов РТИ. Одним из вариантов повышения технико-экономического обоснования практического применения процессов утилизации резинотехнических отходов является последовательно-связанное сочетание пиролиза резиновой крошки и газификации твердого углеродсодержащего остатка (ТУО). В результате совмещения процессов есть возможность получения 4 видов продуктов: пиролизная жидкость, пиролизный газ, генераторный газ и твердый углеродсодержащий остаток.

Задачей исследования является определение влияния условий последовательного проведения процессов пиролиза и газификации отходов РТИ на выход и состав получаемых продуктов.

Для реализации предлагаемой технологии и задачи была собрана экспериментальная установка, основанная на использовании реактора проточного типа, объемом 200 см³. Проведение эксперимента состоит из 2 последовательных этапов: пиролиза резиновой крошки в диапазоне температур 600–650°C и последующей газификации углеродного остатка при различной температуре (900–1000°C) с использованием в качестве газифицирующего агента диоксида углерода и составлением материального баланса процесса.

В результате определены составы и выходы продуктов превращения отходов РТИ и области их применения, выявлена температурная зависимость образования оксида углерода в процессе углекислотной газификации ТУО. Так, для увеличения содержания оксида углерода в получаемом генераторном газе, процесс газификации следует проводить при температуре не ниже 970°C. Усредненные значения выходов продуктов утилизации РТИ в предлагаемой схеме (пиролизная жидкость – 17%, пиролизный газ – 13%, генераторный газ – 33% и твердый углеродсодержащий остаток – 37%), а также состав этих продуктов позволяют авторам сделать вывод о целесообразности дальнейших исследований и высоком потенциале практического применения предлагаемой технологии утилизации отходов резинотехнических изделий.

Список литературы

1. Machin, E.B., Pedroso D.T., deCarvalho Jr. J.A. Energetic Valorization of Waste Tires / E.B. Machin, D.T. Pedroso, Jr. J.A. deCarvalho // Renewable & Sustainable Energy Revs. – 2017. – V. 68. – P. 306-315.
2. Бернадинер И.М. Пиролиз и газификация – способы утилизации изношенных автомобильных покрышек / И.М. Бернадинер, Н.С. Гаврилова // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. - 2016. – № 3. – С. 44–45.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ЗАРЯДА НА КИНЕТИКУ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ ПРИ ДЕТОНАЦИИ ТРОТИЛА

Хорунженко А.С.¹⁾, Сатонкина Н.П.²⁾

¹⁾ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

²⁾ Институт гидродинамики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В физике детонации хорошо известно, что чувствительность взрывчатого вещества зависит не только от вида ВВ, но и существенным образом определяется структурой заряда. Наиболее ярко это влияние проявляется для тротила: критический диаметр для прессованного заряда составляет 3–5 мм, в то время как для литого это 15–30 мм. Очевидно, что, в рамках теории горячих точек, это влияние связано с концентрацией и характером неоднородностей. Имеющиеся модели, способные предсказать развитие детонации в зарядах с разной структурой, базируются на кинетике Аррениуса.

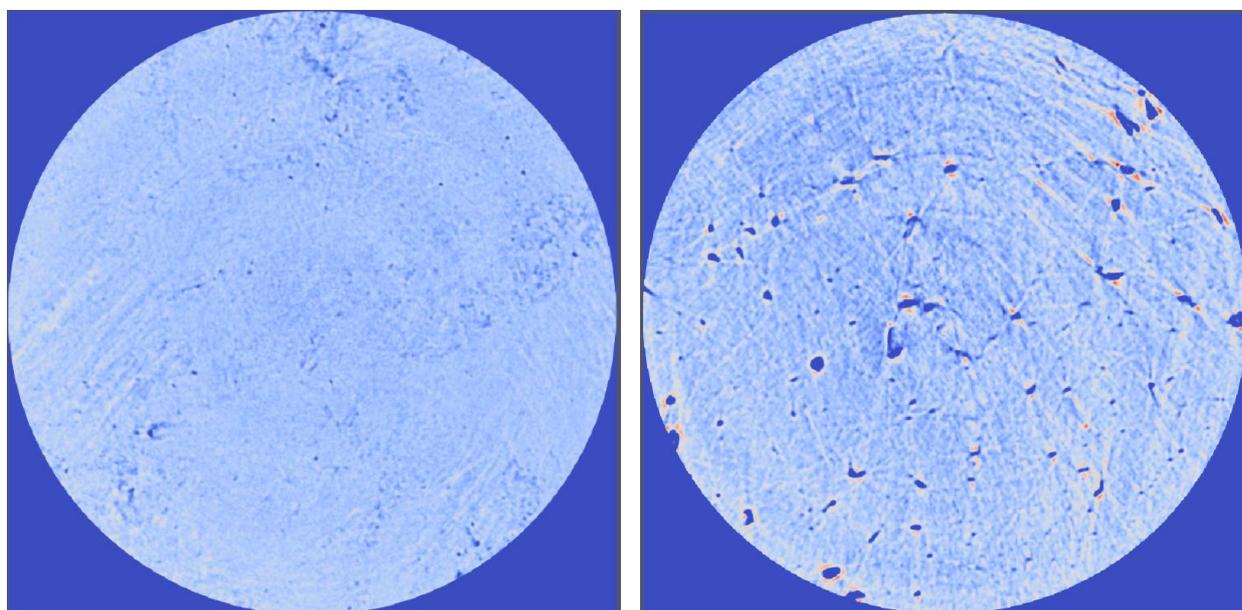


Рис. 1. Томография заряда тротила слева прессованного, справа литого.

На рис. 1 приведены результаты томографического исследования образцов прессованного и литого тротила. Для прессованного однородность заряда существенно выше. При моделировании перехода горения в детонацию с использованием кинетики Аррениуса заряд литого тротила имеет чувствительность выше, в противоположность имеющимся экспериментальным данным. Таким образом, необходимо развитие других моделей кинетики.

В докладе представлены наши данные по исследованию кинетики химических реакций при детонации тротила с разной начальной структурой.

ИССЛЕДОВАНИЕ БУНЗЕНОВСКОГО ГАЗОКАПЕЛЬНОГО ПЛАМЕНИ СПИРТА ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Шараборин Д.К., Лобасов А. С., Толстогузов Р.В., Дулин В.М.

Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Сжигание жидкого топлива используется в энергетике, транспорте и во многих отраслях промышленности. Для повышения эффективности сжигания и уменьшения габаритов камер сгорания недостаточно решения задачи распыла топлива, но и крайне важны исследования особенностей движения и процессов горения газочапельных течений. С использованием современных оптических методов проведено исследование локальной скорости и размера капель, пространственного распределения радикала ОН, температуры и концентрации основных компонент за фронтом пламени в ламинарном предварительно перемешанном пламени Бунзена.

В качестве тестового объекта исследования было использовано ламинарное предварительно перемешанное пламя Бунзена (рис. 1). Струйное течение организовано сужающимся соплом с профилем Витошинского. Взвесь капель спирта была организована ультразвуковым генератором капель, состоящим из десяти пьезоэлектрических мембран, собранных в одном корпусе. Ультразвуковой генератор размещался на дне герметичной емкости общим объемом 50 литров. Спирт (концентрация 96%) был залит так, чтобы открытая поверхность жидкости располагалась на расстоянии 3–5 см от мембран ультразвукового генератора. Сухой воздух пропусклся через объем емкости со спиртом для транспортировки капель и паров спирта до смесителя, в котором спирт смешивался с основным потоком воздуха. Расход воздуха по обоим каналам контролировался отдельно друг от друга электронными расходомерами Bronkhorst high-tech.



Рис. 1. Фотография ламинарного газочапельного пламени Бунзена.

Измерение локальной скорости и размера капель производилось измерительным комплексом SpraySpray производства AOM-Systems, работающим на основе локального времяпролетного метода. Для измерения локальной температуры и концентрации основных газовых компонент за фронтом пламени использовался метод на основе регистрации спектра спонтанного комбинационного рассеяния. Пучок второй гармоники 532 нм твердотельного Nd:YAG лазера Quantel Brilliant B Twins фокусировался до диаметра менее 0.5 мм в области над конусом пламени, рассеяное излучение раскладывалось в спектр монохроматором Newport (MS127i 1/8 м, 1200 лин./мм) выполненным по схеме Черни-Тернера. Регистрация спектра производилась интенсифицированной камерой Princeton Instruments PI-MAX4 (1024x1024 пикселей, 16-бит) с фотокатодом S20 (multialkali). Измерение пространственного распределения радикала ОН, возникающего в процессе окисления спирта во фронте пламени и термической диссоциации воды в продуктах сгорания за фронтом пламени, производилось с использованием метода плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции. Возбуждение сигнала флуоресценции на линии Q1(5) перехода (1–0) системы $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ использовалось излучение перестраиваемого лазера на красителях LaVision Sirah Precision Scan, с накачкой импульсным Nd:YAG лазером (Quanta-Ray). Сигнал флуоресценции регистрировался камерой (LaVision, Imager sCMOS, 5 Мпикс, 16 бит) с установленной на ней электронно-оптическим преобразователем и усилителем LaVision IRO, излучение регистрировалось в диапазоне 310 ± 5 нм с использованием оптического фильтра.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ДИНАМИКИ ПОТОКА В МОДЕЛЬНОЙ КС ГТУ

Хребтов М.Ю.^{1,2)}, Палкин Е.В.²⁾, Мулляджанов Р.И.^{1,2)},
Шараборин Д.К.^{1,2)}, Лобасов А.С.^{1,2)}, Чикишев Л.М.^{1,2)}, Дулин В.М.^{1,2)}

¹⁾ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

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

Одной из стратегий снижения вредных выбросов при работе газотурбинных установок (ГТУ) является сжигание в камере сгорания (КС) предварительно перемешанной смеси со значительным избытком воздуха. При этом организация устойчивого горения затруднена тем, что в таких условиях часто возникает термоакустический резонанс [1], что приводит к вибрационному режиму горения и повреждению элементов ГТУ. Поэтому задача управления динамикой потока, нестационарным смесеобразованием и горением в КС ГТУ является актуальной.

Целью настоящей работы является исследование структуры и динамики течения в модельной КС ГТУ с фронтным устройством, обеспечивающим двухзонное горение газового топлива. Фронтное устройство представляет из себя радиальный завихритель с центральным телом обтекания. Завихритель обеспечивает формирование центральной зоны рециркуляции для стабилизации пламени. По центру КС в дежурной зоне организован прямоточный диффузионный факел. Остальное топливо, подается между лопастями завихрителя и после смешения с воздушным потоком горит в основной зоне на выходе из сопла. Исследование выполнено с использованием современных численных и экспериментальных методов.

Измерения проведены с использованием методов анемометрии по изображениям частиц (англ.: particle image velocimetry) и плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (англ.: planar laser-induced fluorescence). Численное моделирование выполнено методом крупных вихрей (англ.: large-eddy simulation). Число Рейнольдса было равно 1.5×10^4 . Соотношение топлива, подаваемого по основному и дежурным каналам, соответствовало 3:1. Интегральное эквивалентное отношение топлива к окислителю составляло 0.34. Вычислительная сетка, полностью состоящая из гексагональных ячеек, насчитывала 4.1×10^6 . Расчет турбулентного горения проводился с использованием модели FGM (flamelet-generated manifold), реализованной на базе пакета OpenFoam.

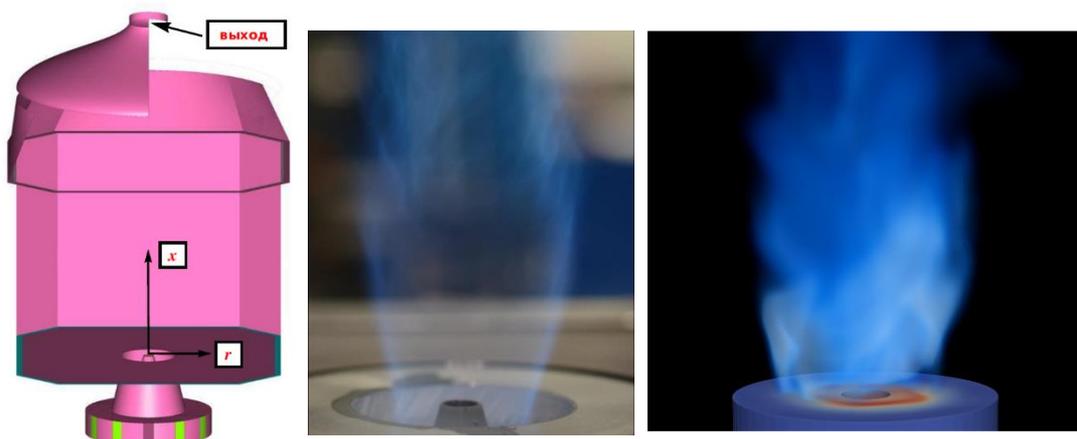


Рис. 1. Геометрия камеры сгорания и примеры формы горения метанового пламени.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-79-10225).

Список литературы

1. Lieuwen T.C. Unsteady combustor physics. – Cambridge University Press, 2012.

ДИАГНОСТИКА РАСПЫЛА ТОПЛИВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛОКАЛЬНОГО ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО МЕТОДА

Чикишев Л.М.^{1,2)}, Толстогузов Р.В.^{1,2)}, Лебедев А.С.¹⁾, Дулин В.М.^{1,2)}

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

²⁾ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Для снижения концентрации вредных выбросов в авиационных газотрубных двигателях применяются методы оптимизации распыла керосина топливными форсунками. В настоящее время численное моделирование распыла не позволяет с хорошей точностью предсказывать распределение капель топлива по размерам в зависимости от геометрии форсунки и рабочих параметров. По этой причине задача экспериментального измерения и контроля параметров распыла, в особенности размера капель топлива, как фактора, оказывающего определяющее влияние на процессы смешения, испарения и горения топлива обладает высокой актуальностью.

Большой интерес вызывает использование локального времяпролетного метода измерения размера и скорости капель [1]. Данный подход позволяет проводить измерения в режиме обратного рассеяния, что дает существенное преимущество при проведении измерений в камерах сгорания под давлением с ограниченным оптическим доступом. Особенностью данного метода является высокая точность определения размера капель, для которых точно дискриминируется отражение и внутреннее преломление, что гарантирует измерение размера и скорости при прохождении одной частицы.

В данной работе применен локальный времяпролетный метод (time-shift), реализованный на базе прибора Spray Spy (AOM Systems) для диагностики распыла модельного топлива форсунками при различных режимах подачи топлива и значениях перепада давления. На рисунке представлены облако точек, демонстрирующее распределение капель по размерам и осевой скорости для всех измеренных реализаций в выбранной точке потока и распределения капель по размерам для модельной форсунки.

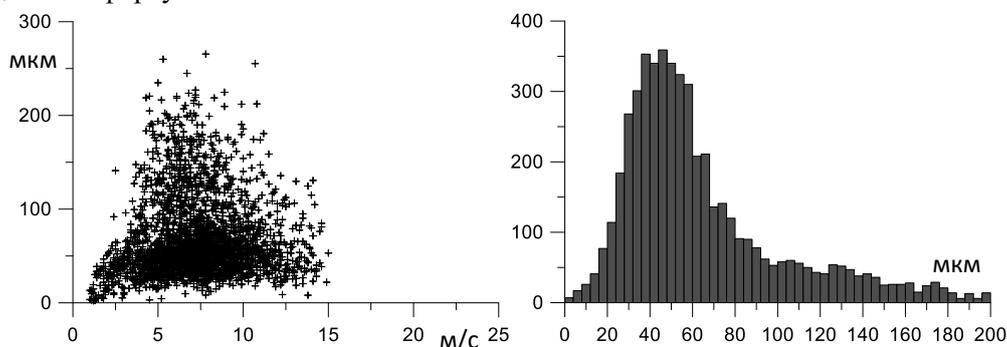


Рис. 1. Распределение капель по размерам и осевой скорости для модельной форсунки и гистограмма размеров капель.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

Список литературы

1. Schäfer W., Tropea C. Time-shift technique for simultaneous measurement of size, velocity, and relative refractive index of transparent droplets or particles in a flow // Applied Optics. – 2014. – V. 53(4). – P. 588-597.

КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В СТЕХИОМЕТРИЧЕСКИХ ВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ МЕТАНОВОДОРОДНОГО И ПРОПАНОВОДОРОДНОГО ГОРЮЧЕГО

Шамшин И. О., Казаченко М. В., Фролов С. М., Басевич В. Я.

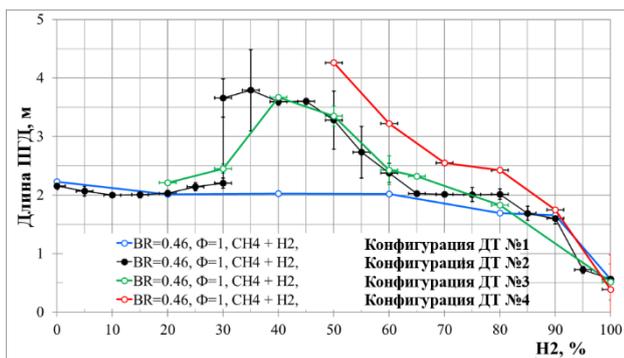
Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук (ФИЦ ХФ РАН), г. Москва, Россия

Для оценки детонационной способности (ДС) топливно-воздушных смесей (ТВС) предложен экспериментальный метод на основе измерения длины L_{DDT} и времени T_{DDT} перехода горения в детонацию (ПГД) в импульсно-детонационной трубе при одинаковых газодинамических и термодинамических условиях [1]. Импульсно-детонационная труба содержала форкамеру со свечой зажигания, секцию ускорения пламени со спиралью Щелкина, секцию фокусировки ударной волны с винтовой трубой и прямую измерительную секцию. На основе предложенного метода проведены экспериментальные исследования ПГД в ТВС ряда горючих, включая водород, метан и пропан [1], и в стехиометрических ТВС метановодородного горючего, в которых объемная доля водорода, xH_2 , изменялась от 0 до 1 [2]. Вопреки ожиданиям, основанным на известной высокой реакционной способности водорода, оказалось, что с ростом концентрации водорода длина и время ПГД изменяются немонотонно: в интервале $0,3 < xH_2 < 0,6$ обнаружен эффект нерегулярных зависимостей $L_{DDT}(xH_2)$ и $T_{DDT}(xH_2)$ с локальными максимумами. В настоящей работе аналогичные исследования проведены со стехиометрическими ТВС пропановодородного горючего, в которых объемная доля водорода изменялась от 0 до 1. Кроме того, как для метановодородных, так и для пропановодородных ТВС дополнительно изучено влияние на ПГД форсирующих ускорение пламени устройств [3], чтобы доказать независимость полученных результатов от конструкции импульсно-детонационной трубы.

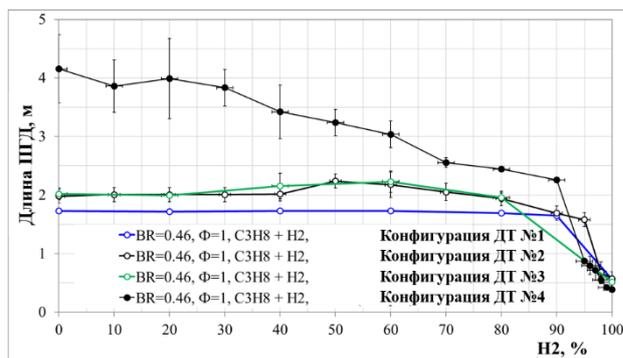
На рис. 1 представлены измеренные значения L_{DDT} и T_{DDT} для метановодородного горючего (рис. 1а и рис. 1в соответственно) и пропановодородного горючего (рис. 1б и рис. 1г соответственно) в зависимости от объемной доли водорода в стехиометрических ТВС в импульсно-детонационной трубе с разной конфигурацией секции ускорения пламени. Конфигурацию секции ускорения пламени изменяли, передвигая спираль Щелкина ближе и дальше от форкамеры, а также увеличивая длину секции. Отсутствие экспериментальных точек при относительно малых концентрациях водорода в метановодородном горючем означает отсутствие ПГД. Из рис. 1 следует, что для стехиометрических ТВС на основе пропановодородного горючего также проявляется нерегулярность зависимостей $L_{DDT}(xH_2)$ и $T_{DDT}(xH_2)$.

Анализ показывает, что увеличение доли водорода в смесевом метановодородном и пропановодородном горючем сопровождается разнонаправленными эффектами, приводящими как к возрастанию, так и к снижению чувствительности стехиометрической ТВС к ПГД. С одной стороны, с увеличением доли водорода в смесевом горючем увеличивается скорость ламинарного пламени и уменьшается задержка самовоспламенения, т. е. чувствительность ТВС к ПГД возрастает. С другой стороны, с увеличением доли водорода увеличивается скорость звука в ТВС, что приводит к уменьшению числа Маха УВ, бегущей перед пламенем, к снижению температуры и давления ударно сжатого газа перед фронтом пламени и, следовательно, к увеличению задержки самовоспламенения t_i , т. е. чувствительность ТВС к ПГД снижается.

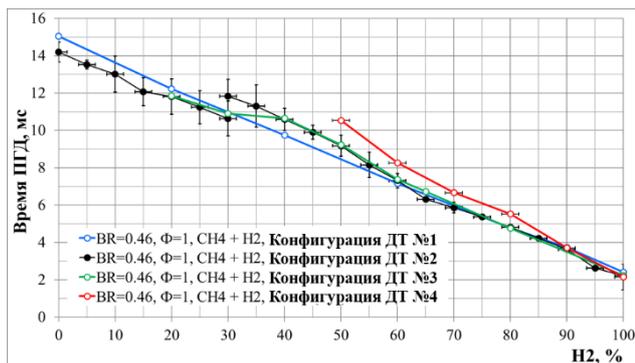
Обобщение экспериментальных результатов показывает, что наблюдаемый эффект уменьшения чувствительности ТВС на основе смесового метановодородного и пропановодородного горючего к ПГД в определенном интервале концентрации водорода вызван физико-химическими свойствами рассматриваемых ТВС и проявлением критических явлений при взаимодействии газодинамических и химико-кинетических эффектов. Подобно большинству критических явлений в химической кинетике, например, при тепловом и разветвленно-цепном взрывах [4], нерегулярные зависимости $L_{DDT}(xH_2)$ и $T_{DDT}(xH_2)$ проявляются только вблизи критических условий по давлению и температуре, а вдали от них эффект нивелируется.



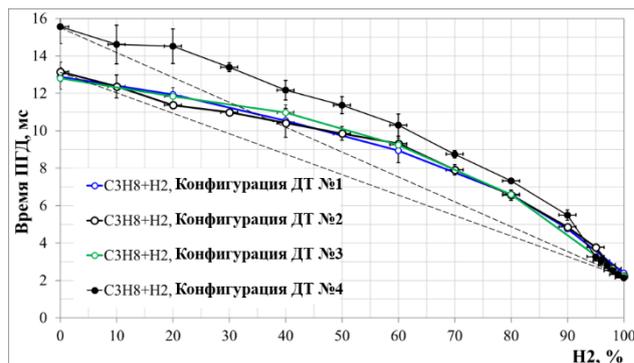
(a)



(б)



(в)



(г)

Рис. 1 Экспериментальные зависимости длины и времени ПГД в стехиометрических ТВС метановодородного (а, в) и пропановодородного (б, г) горючих в импульсно-детонационных трубах четырех разных конфигураций.

Работа выполнена по гранту Минобрнауки России (госконтракт № 13.1902.21.0014, соглашение № 075-15-2020-806).

Список литературы

1. Фролов С.М., Шамшин И.О., Аксенов В.С., Казаченко М.В., Гусев П.А. Ранжирование газовых топливно-воздушных смесей по их детонационной способности с помощью эталонной импульсно-детонационной трубы // Горение и взрыв. – 2019. – Т. 12, № 3. – С. 78–90.
2. Шамшин И.О., Казаченко М.В., Фролов С.М., Басевич В.Я. Переход горения в детонацию в воздушных смесях метановодородного горючего // Горение и взрыв. – 2020. – Т. 13, № 3. С. 60–75.
3. Frolov, S.M., Zvegintsev, V.I., Aksenov, V.S. et al. Detonability of fuel-air mixtures // Shock Waves. – 2020. – V. 30 – P. 721–739.
4. Семенов Н.Н. Цепные реакции – М.: Наука, 1986. – 535 с.

ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ВОДОРОДА ПРИ ПАРОВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ БИОМАССЫ**Шевырев С.А.**Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,
г. Кемерово, Россия

В литературе представлено теоретическое обоснование процесса получения перегретого водяного пара для осуществления процесса газификации в условиях полигенерации на тепловых электрических станциях [1]. Это позволяет провести расчеты по оценке стоимости водорода, получаемого при паровой бескислородной газификации биомассы.

Для осуществления расчета использовалась разработанная в [1] схема полигенерации. Общее представление данной схемы показано на рис. 1. Она имеет блочную структуру и отражает все основные стадии процесса получения водорода при производстве перегретого водяного пара температурой до 1000°C, давления до 3 МПа и осуществления процесса паровой бескислородной газификации биомассы.

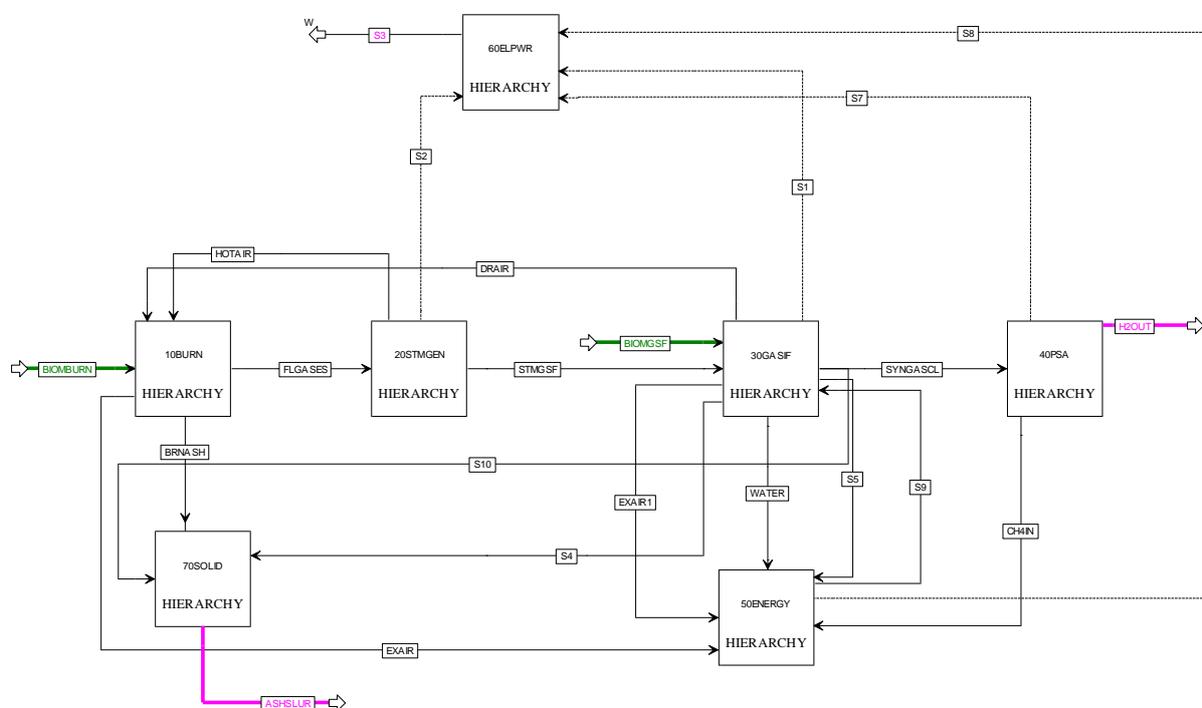


Рис. 1. Модельная схема для расчета стоимости водорода при паровой газификации биомассы.

В результате расчета приведенной на рис.1 схемы в программном комплексе Aspen Plus и проведения экономического расчета стоимости H_2 по методу ТЕРЕТ [2] установлено, что цена водорода может составлять около 6–7 евро/кг.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 20-79-00012).

Список литературы

1. Шевырев С.А., Стрижак П.А., Dietrich R-U., Богомолов А.Р. Паровая бескислородная газификация в условиях полигенерации // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 2. – С. 44–58.
2. Albrecht F.G., König D.H., Baucks N., Dietrich R-U. A standardized methodology for the techno-economic evaluation of alternative fuels – a case study // Fuel. – 2017. – Vol. 194. – P. 511–526.

ПАРОВАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ КУЗНЕЦКОГО УГЛЯ МАРКИ «Д» В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Шевырев С.А., Мажейко Н.Е., Якутин С.К.

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,
г. Кемерово, Россия

Технологиям глубокой переработки твердого топлива уделяется достаточно много внимания в связи с возможностью получения различных веществ, в том числе газовых смесей с высоким содержанием горючих газов – H_2 , CO , CH_4 . Одной из технологий глубокой переработки твердого топлива является процесс паровой бескислородной газификации. Осуществить паровую газификацию можно по представленному в литературе способу [1] при использовании перспективной модели двухстадийного газогенератора [2]. При этом для моделирования таких газогенераторов необходимо знать изменение в динамике характеристик получаемого газа и коксового остатка.

С этой целью были проведены исследования паровой бескислородной газификации кузнецкого каменного угля марки «Д» (табл. 1, 2) в кипящем слое. Результаты экспериментальных исследований состава газа при паровой газификации (температура пара $950^\circ C$) показаны на рис. 1.

Таблица 1. Технический анализ угля марки «Д».

$W^a, \%$	$A^d, \%$	$V^{daf}, \%$	$Q_{н.р.}, \text{МДж/кг}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$
5,6	3,27	43,72	26,69	0,182

Таблица 2. Элементный анализ угля марки «Д».

$C^{daf}, \%$	$H^{daf}, \%$	$N^{daf}, \%$	$S^{daf}, \%$	$O^{daf}, \%$
73,09	5,12	2,37	0,086	19,33

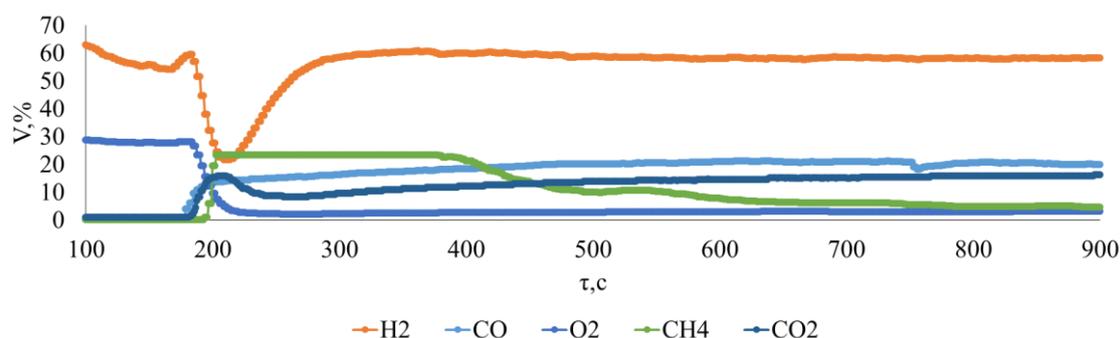


Рис. 1. Зависимости концентраций компонентов газа от времени при паровой газификации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 20-79-00012).

Список литературы

1. Шевырев С.А., Стрижак П.А., Dietrich R-U., Богомолов А.Р. Паровая бескислородная газификация в условиях полигенерации // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 2. – С. 44–58.
2. Karl J., Pröll T. Steam gasification of biomass in dual fluidized bed gasifiers: A review // Renewable and Sustainable Energy Rev. – 2018. – V. 98. – P. 64–78.

ОПЫТ ОСВОЕНИЯ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ГОРНОВОЙ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ В Г. ТОМСКЕ

Штегман А.В., Рыжий И.А.

ОАО «ВТИ», г. Москва, Россия

В современном мире особое внимание уделяется вопросам экологической безопасности при выработке электроэнергии, а также более эффективному топливоиспользованию. Для России, страны обладающей значительными генерирующими мощностями этот вопрос стоит достаточно остро, особенно учитывая тот факт, что значительная часть этой генерации - угольная. Одним из путей повышения эффективности использования угля с получением ценных продуктов является использование методов газификации с последующей переработкой синтетического газа. Настоящий доклад посвящен успешному опыту освоения установки горновой газификации.

В докладе будут затронуты следующие темы:

9. Историческая ретроспектива по исследованию процессов газификации силами ОАО «ВТИ».
10. Вопросы реализации проекта по строительству опытно-промышленной установки в г.Томске.
11. Результаты проведения испытаний и их анализ.
12. Перспективы развития и применения газификационных установок в России.
13. Возможность реализации на основе горновой газификации процесса Фишера-Тропша и получения жидких топлив.
14. Описание опытов с получением полукокса на экспериментальной установке газификации.
15. Перспективы производства из синтез-газа водородного топлива для использования в водородной экологически чистой энергетике.
16. Исследование методов очистки синтез-газа и выделения из него искоемых компонентов.
17. Описание подходов к моделированию процессов газификации в современных расчетных программах.
18. Экономический аспект газификации: эффективность и целесообразность.
19. Технологии газификации в программе развития угольной промышленности до 2035 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ ПЛАЗМЕННОГО РОЗЖИГА С ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТЬЮ ДЛЯ ГУСИНООЗЕРСКОЙ ГРЭС

Штегман А.В., Сосин Д.В.

ОАО «ВТИ», г. Москва, Россия

На большинстве угольных электростанций в качестве растопочного топлива используется мазут. Затраты на мазутное хозяйство, а также на сам мазут могут быть достаточно высокими. Поэтому длительное время различными учеными как в России, так и в странах СНГ, проводятся работы по поиску решений, снижающих затраты на растопочные операции и сокращающих потребление мазута. Особенно актуальной эта проблема стала в последние годы из-за устойчивой тенденции к росту цен на мазутное топливо. Одной из таких технологий является технология плазменного розжига, опробованная на котлах Гусиноозерской ГРЭС еще в 1994 – 1995 годах. Однако, у внедренной в те годы системы плазменного розжига был ряд недостатков, в основном связанных с надежностью использования ее основных узлов (электроды плазмотрона и внутренняя часть муфельной горелки). Настоящий доклад посвящен вопросам разработки и реализации улучшенной системы плазменного розжига с повышенной надежностью на Гусиноозерской ГРЭС, использующей плазмотроны постоянного тока, которая позволила повысить надежность оборудования в несколько раз. В докладе будут отражены следующие аспекты:

1. Проблемы при использовании действующих систем плазменного розжига, работающих с плазмотронами постоянного тока.
2. Вопросы конструктивных решений, позволяющих повысить надежность и эффективность систем плазменного розжига.
3. Вопросы математического моделирования воспламенения аэросмеси плазменной струей.
4. Вопросы связанные с испытаниями системы плазменного розжига.
5. Анализ полученных результатов.
6. Преимущества использования плазмотронов, работающих на постоянном токе по сравнению с плазмотронами, работающими на переменном токе.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АЭРОСМИСИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПОРИСТОЙ РАДИАЦИОННОЙ ГОРЕЛКОЙ

Штым К.А., Лесных А.В., Дорогов Е.Ю., Соловьева Т.А.

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

Разрабатываемое горелочное устройство должно обеспечивать устойчивое воспламенение аэросмеси в зоне примыкания пылеугольной горелки к топке, с учетом особенностей работы систем пылеприготовления с прямым вдуванием и промежуточным бункером пыли. Так как пилотная установка предполагается на Владивостокской ТЭЦ-2, то при опытном сжигании использовались бурые угли близкие по характеристикам к проектному углю станции.

Эксперимент проводился при организации устойчивого радиационного теплового потока мощностью $15\div 50$ Вт/см². На рис. 1 представлен вид экспериментальной установки с обозначенными зонами горения угольных частиц. В задачу эксперимента входило определение минимально возможного времени пребывания угольных частиц в зоне взаимодействия с лучистым потоком [1]. В результате исследований определены факторы влияющие на устойчивость воспламенения: концентрация пыли в аэросмеси, средний размер частиц, доля газа по отношению к углю, характеристики исходного топлива. На выходе из канала генератора – кварцевая трубка диаметром 400 мм – определялись: состав продуктов сгорания, температура потока, доля сгоревшего топлива в канале [2].



Рис. 1. Вид экспериментальной установки.

В процессе эксперимента использовалась скоростная видеосъемка, необходимая для определения точной скорости частиц различного размера и характерные зоны прогрева, воспламенения летучих и начала горения коксового остатка. По результатам видеосъемки скорость движения угольной пыли составила ≈ 20 м/с. При длине кварцевой трубки проточного реактора 400 мм, время пребывания угольных частиц, под воздействием теплового излучения радиационной газовой горелки, не превышало 0,02 с. При этих условиях доля выгорания горючих веществ угольных частиц составила в среднем 30%.

Работа выполнена при финансовой поддержке министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2020-80).

Список литературы

1. Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. – Энергоатомиздат, 1986.
2. A. Hashemi, M. Nikfar, and R. Motaghefard, “Experimental study of operating range and radiation efficiency of a metal porous burner”, (in English), Thermal Science, Article vol. 19, no. 1, pp. 11–20, 2015.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЕ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ПРЕДТОПКА**Штым А.Н., Штым К.А., Соловьева Т.А., Кулик А.В.**

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

При испытаниях котельных агрегатов, оснащенных циклонно-вихревыми предтопками (ЦВП) отмечено изменение эффективности смесеобразования при нагрузках больше 70% от номинальной.

Внутрициклонные исследования теплообмена, проведенные на ЦВП мощностью 65 МВт котла КВГМ-100-150, указывают на снижение температуры обмуровки в камере сгорания (КС) ЦВП с увеличением нагрузки [1]. Результаты исследований согласуются с результатами, полученными при аэродинамических исследованиях в условиях горения газообразного топлива [2]. Осевая составляющая W_x вектора полной скорости в пристенной части КС ЦВП существенно меньше тангенциальной составляющей W_ϕ . Наибольшие значения W_x отмечаются в осевой области ЦВП, формируемой выходным окном в топку котла – пережимом [3]. Осевые перемещения закрученного потока при горении возрастают с увеличением температуры потока и по мере продвижения потока от торцевой стенки КС ЦВП к пережиму ЦВП. Таким образом, на нагрузках котла более 70% от номинальной нагрузки, ЦВП работает в режиме камеры предварительного смесеобразования, теряя свойства предтопка, обеспечивающего предварительное сжигание топлива при стехиометрических условиях.

На ЦВП котла БКЗ-120-100 проведены исследования при организации предварительного смешения газа и воздуха в воздушных тангенциальных соплах. В результате работа ЦВП и котла характеризовалась устойчивой работой и без вибраций с оптимальными технико-экономическими показателями. При организации стехиометрических условий сжигания снижение эмиссии NO_x составило 40% и при $\alpha=1,4$ достигнуто значения 70 мг/м³. Исследования были остановлены при снижении нагрузки котла ниже 70%. Снижение скорости газовой смеси и распределение в связи с этим фронта пламени внутри воздушного сопла явилось причиной выгорания тангенциальных воздушных сопел.

С целью определения конструкции ЦВП с предварительным смесеобразованием и с высокой надежностью работы во всем диапазоне нагрузок проведены на лабораторной установке эксперименты с определением оптимальных скоростей ввода газовой смеси в сопловые входы ЦВП. Исследования позволили сделать заключение о рациональности организации системы предварительного смесеобразования газа с воздухом перед КС ЦВП [3].

С увеличением нагрузки на котле $\geq 70\%$ через сопла предварительного смесеобразования, расположенные в тангенциальных воздушных соплах, подводится газообразное топливо. Это решение позволяет эффективнее использовать объем КС ЦВП, заполняя его до 80% горячей средой, увеличить долю сжигаемого топлива при надежном охлаждении внутренней обмуровки КС ЦВП, улучшить условия теплообмена в топке и увеличить мощность котла.

Работа выполнена при финансовой поддержке министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2020-80).

Список литературы

1. Kulik, Aleksandr V., Dorogov, Evgenij Iu., Soloveva, Tatyana A., Shtym, Konstantin A. Experimental Study of Temperature Distribution in a Cyclone-Vortex Furnace // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2021. – Т. 14. – № 1. – С. 140–145.
2. К. Штым, Т. Соловьева. Influence of gas combustion upon swirled flow parameters // The 13th International Conference on Combustion & Energy Utilization (ICCEU). – Taiwan, 2016. P. 77–81.
3. Штым К.А., Соловьева Т.А. Совершенствование вихревого процесса сжигания природного газа // Тез. докл. V Всероссийская научная конференция "Теплофизика и физическая гидродинамика" с элементами школы молодых ученых. – Ялта, 2020.

ФИЗИКА И МАТЕМАТИКА САМОПОДРЫВА ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ПРИ ЗАПУСКЕ

Юрковский В.С.¹⁾, Сухинин С.В.¹⁾, Трилис А.В.¹⁾, Черемисин А.А.²⁾

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

²⁾ Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Показано, что самоподрыв при запуске РДТТ обусловлен возникновением и малой скоростью сильных разрывов гидроупругих гиперболических волн в камере сгорания. Приведен пример камеры сгорания РДТТ и расчет гиперболических волн в ней. Описаны рекомендации по борьбе с самоподрывом. Авторам неизвестны работы по физике и механике самоподрыва РДТТ.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ПММА НА ОСНОВЕ РЕДУЦИРОВАННОЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

Якуш С.Е.¹⁾, Коробейничев О.П.²⁾, Шмаков А.Г.²⁾, Большова Т.А.²⁾, Трубачев С.А.^{2,3)}

¹⁾ Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, г. Москва, Россия

²⁾ Институт химической кинетики и горения им. В.В.Воеводского СО РАН, г. Новосибирск, Россия

³⁾ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Изучение горения полимерных материалов представляет интерес как с точки зрения их применения в качестве топлива в прямоточных воздушно-реактивных и гибридных двигателях, так и с точки зрения пожаробезопасности, связанный с их широким распространением в современной окружающей среде. При горении твердых полимеров взаимосвязанные химические реакции протекают как в конденсированной фазе (пиролиз с образованием летучих компонент, по большей части – соответствующего мономера), так и в газовой фазе (горение летучих). В настоящей работе методами численного моделирования рассматривается горение полиметилметакрилата (ПММА) в атмосфере воздуха.

При термическом разложении ПММА под действием теплового потока образуется мономер MMA ($C_5H_8O_2$), причем эксперименты показывают, что степень превращения при пиролизе хорошо описывается аррениусовской зависимостью, а реакция имеет первый порядок. Горение MMA в воздухе протекает по цепному механизму, а для моделирования предложены различные кинетические схемы – от глобальной одностадийной необратимой реакции $C_5H_8O_2 + 6O_2 \rightarrow 5CO_2 + 4H_2O + 25.6$ МДж/кг [1], до детальных кинетических схем (например, схемы с 49 компонентами и 376 реакциями, использованной в [2] для моделирования горения жидкого MMA). В настоящей работе используется скелетный механизм газофазного горения MMA, содержащий 44 необратимые реакции для 29 компонент (включая нейтральный N_2).

Приведены примеры расчетов газофазного горения MMA в условиях естественной конвекции при заданном расходе, создаваемом круговым источником на поверхности или при наличии выступающей цилиндрической границы (чашечная горелка), результаты сопоставлены с полученными в [2] данными на основе более детальной кинетической схемы. Сравнения проводятся по температурным полям и полям концентраций компонент. Кроме того, приведено сравнение с результатами численных расчетов, проведенными на основе брутто-реакции [1].

Основная часть работы посвящена исследованию процесса распространения пламени над поверхностью плоского образца ПММА толщиной 5 мм. Использована сопряженная модель процессов в конденсированной и газовой фазах, в которой учитывается конвективный и радиационный нагрев образца, теплопроводность и химические реакции пиролиза в нем, создающие приток газообразного мономера (MMA) в атмосферу. Показано хорошее согласие полученной в расчетах скорости распространения пламени по поверхности образца ПММА и длины зоны пиролиза с измеренными в экспериментальной работе [3] (для горения ПММА без добавок). Кроме того, сопоставлены рассчитанные и наблюдающиеся экспериментально пространственные распределения радикала OH, характеризующие зону горения MMA.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 19-03-00611.

Список литературы

1. Bedir H., T'ien J.S. A computational study of flame radiation in PMMA diffusion flames including fuel vapor participation // 27th Symp. Combust. – The Combustion Inst. – Pittsburgh PA, 1998. – P. 2821–2828.
2. Shanmugasundaram D., Kumaran S.M., Trubachev S.A., Beshpalova A., Korobeinichev O.P., Shmakov A.G., Raghavan V. Burning characteristics and soot formation in laminar methyl methacrylate pool flames // Combust. Theory Model. – 2020. – V. 24. – P. 1153–1178.
3. Trubachev S.A., Korobeinichev O.P., Kostritsa S.A., Kobtsev V.D., Paletsky A.A., Kumar A., Smirnov V.V. An insight into the gas-phase inhibition mechanism of polymers by addition of triphenyl phosphate flame retardant // AIP Conference Proceedings. – 2020. – V. 2304 – P. 020019.

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ТЕРМИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ ТОПЛИВ И МАСЕЛ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Яновский Л.С., Ежов В.М., Ильина М.А.

ФГБУ «ИПХФ РАН», г. Черноголовка, Россия

В процессе окисления реактивного топлива под воздействием высокой температуры и каталитического действия металлов образуется осадок, а также растворимые и нерастворимые смолы. Во время окисления масел под воздействием высокой температуры, кислорода воздуха и каталитического действия металлов повышаются вязкость, кислотное число, образовывается нерастворимый осадок. Для сравнения уровня термоокислительной стабильности (ТОС) реактивных топлив и масел для авиационных ГТД необходимы данные по стойкости топлив и масел к окислению.

Получение зависимостей параметров топлива и масла от температуры и времени окисления является актуальной задачей.

Исследована ТОС топлив, а также масел со стандартным и повышенным уровнем ТОС на основе полиэфиров. Определены зависимости изменения параметров топлив и масел от температуры и времени окисления.

Рассчитаны коэффициенты E_a и A для зависимости параметров топлив и масел от температуры и времени окисления на основе уравнения Аррениуса, а также коэффициент γ для зависимости на основе правила Вант-Гоффа [1].

Построены зависимости температуры окисления топлив и масел от времени окисления, при которых достигаются предельно допустимые значения параметров топлива и масла с помощью обеих моделей. Сделано заключение об уровнях ТОС исследуемых топлив и масел. Определен критический параметр топлива и масла, обладающий наименьшим запасом качества. Определены температурные пределы критических параметров топлив и масла.

Проведена верификация полученных зависимостей в диапазоне температур и времени окисления на основе уравнения Аррениуса и правила Вант-Гоффа.

Список литературы

1. Жирякова М.В., Тифлова Л.А., Русакова Г.М., Скокан Е.В., «Задачи практикума по физической химии. Кинетика реакции в растворах»: методическая, разработка. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. Химический факультет, 20.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Яновский Л.С.^{1,2)}, Байков А.В.^{1,2)}, Жолудев А.Ф.²⁾, Заславский Г.Е.²⁾, Кислов М.Б.²⁾,
Пучковский И.В.²⁾, Попов К.В.²⁾, Шаров М.С.^{1,2)}

¹⁾ ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» РФ. г. Москва

²⁾ ФГБУН Институт проблем химической физики. РФ. МО г. Черноголовка

В докладе представлена математическая модель горения энергетического материала с высоким содержанием металла, предназначенного для газогенератора автономной комбинированной энергетической установки. Модель охватывает случаи горения энергетических материалов с ведущей реакцией в конденсированной фазе [1] и горения по общепринятой модели, когда основное тепло от процесса горения выделяется в газовой фазе [2]. Модель построена на численном решении уравнения теплопроводности для конденсированной среды, в которой для устранения «жесткости» получаемого решения, уравнение теплопроводности используется в форме уравнения Абеля [3]. Рассматриваемая модель учитывает дополнительное тепловыделение от окисления металла, входящего в состав энергетического материала. В ней принято предположение, что дополнительное тепловыделение от окисления металла локализуется в порах, которые образуются в конденсированной фазе энергетического материала (К-фазе) по мере разложения горючего и окислителя. В докладе приводятся результаты экспериментальных исследований модельных образцов энергетических материалов, показывающие, что окисление металла в условиях К-фазы происходит преимущественно за счет реакции металла с углеродом, который образуется при разложении горючего – связующего вещества. Окисление металла кислородом, выделяющимся при разложении окислителя, в условиях К-фазы играет второстепенную роль. Приводятся результаты численных расчетов, показывающие изменение основных параметров в К-фазе, локализацию процессов тепловыделения в ней и возможные изменения в случае повышения давления в объеме газогенератора.

В докладе приводятся результаты экспериментов с лабораторными образцами энергетических материалов, подтверждающие предположение, что окисление металлов в условиях К-фазы локализуется в порах, образующихся при нагревании твердого вещества энергетического материала в процессе горения.

Список литературы

1. Горение энергетических материалов с ведущей реакцией в конденсированной фазе / Синдицкий В.П., Егоршев В.Ю., Серушкин В.В., Филатов С.А. // Физика горения и взрыва. Т. 48. № 1. С. 89–109.
2. Шленский О.Ф., Маклашова И.В., Хищенко К.В. Горение и детонация материалов. – М.: Инновационное Машиностроение, 2018. 256 с.
3. Анализ процесса горения твердых металлизированных топлив /Абрамов М.А., Байков А.В., Воронцов А.В., Заславский Г.Е., Суровежко А.С. // Тепловые процессы в технике. Т. 12. № 10. С. 445–457.

НА ПРАВАХ РЕКЛАМЫ

РАСХОДОМЕРЫ И РЕГУЛЯТОРЫ ДАВЛЕНИЯ BRONKHORST®: ТОЧНЫЕ И АДЕЖНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ КОНТРОЛЯ ПОДАЧИ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ



Компания Bronkhorst High-Tech уже более 40 лет разрабатывает и производит измерители и регуляторы расхода и давления. Основной акцент инженеры компании делают на приборах, работающих с малыми расходами газов и жидкостей. Так, тепловые расходомеры газа могут измерять расходы от 0,014 н. л/мин (мл/мин при давлении 1 атм (абс) и температуре 0°C), а тепловые расходомеры жидкости – от 5 мг/ч. При этом продукция Bronkhorst® – это не только сверхмалые расходы. Тепловые расходомеры газа работают с расходами до 11 000 м³/ч, а кориолисовые расходомеры – до 600 кг/ч для жидкостей. Измерители давления Bronkhorst® в общей сложности покрывают диапазон от 2 мбар до 400 бар. Продукция Bronkhorst® успешно применяется как в лабораторных исследованиях, так и в «пилотных» установках, а также в производственном оборудовании.

Расходомеры «топовой» серии EL-FLOW Prestige обеспечивают исключительную точность измерения мгновенного расхода в диапазоне от 0,014 до 100 н.л/мин. Сам принцип измерения гарантирует малую погрешность показаний прибора при отклонении условий эксплуатации от условий калибровки. А реализованная в расходомерах EL-FLOW Prestige автоматическая коррекция показаний по температуре и давлению газа обеспечивает сохранение паспортной точности во всем рабочем диапазоне –10...+70°C и 0...100 бар (изб).

Один и тот же расходомер EL-FLOW Prestige может использоваться для работы с разными газами. Внутри прибора записана информация о свойствах 100 газов, конечный пользователь может сам переключить расходомер на новый рабочий газ из списка. Кроме того, есть возможность смещать шкалу измерения прибора в сторону больших или меньших значений. В итоге динамический диапазон измерения расходомера EL-FLOW Prestige достигает 150:1. Приборы имеют встроенный счетчик прошедшего количества газа и сигнализаторы (превышение расхода, малый расход, достижение предела счетчика и т.д.).

Настройки этих и целого ряда других параметров осуществляются через цифровой канал. Разработчики компании Bronkhorst High-Tech прекрасно осознают необходимость использования автоматизированных систем управления при построении современных исследовательских лабораторий и производственных участков. По умолчанию приборы оснащаются интерфейсом RS-232, по которому прибор можно подключать к COM-порту и управлять им с помощью ПК. Опционально продукция Bronkhorst® может оснащаться самыми разнообразными цифровыми интерфейсами: PROFIBUS DP, CANopen®, DeviceNet™, PROFINET, EtherCAT®, Modbus RTU,

ASCII или TCP/IP, EtherNet/IP, POWERLINK, FLOW-BUS. Также приборы имеют унифицированный аналоговый входной/выходной сигнал 0...5(10) В или 0(4)...20 мА.

Расходомеры Bronkhorst® выпускаются в двух вариантах исполнения: измерители или регуляторы. Во втором случае приборы оснащаются регулирующим клапаном, управляемым самим расходомером с помощью встроенного ПИД-регулятора. Конечному пользователю достаточно подать управляющий сигнал уставки (аналоговый или цифровой), а прибор сам будет подбирать сигнал на клапан, чтобы мгновенный расход максимально совпадал с заданным.

Следует отметить широкую номенклатуру доступных клапанов. Производитель предлагает регулирующие клапаны, которые могут контролировать даже самые малые расходы. Предлагаются варианты регулирующих клапанов, которые могут работать при малых перепадах давлениях. Такими клапанами комплектуются расходомеры специально разработанных серий LOW-DP-FLOW. Есть решение и для применений с высокими рабочими давлениями. Для расходомеров серии IN-FLOW High-Pressure выпускаются регулирующие клапаны, работающие при давлениях вплоть до 700 бар.

Еще один интересный продукт - электронные ротаметры газа серии MASS-VIEW. В отличие от часто встречающихся поплавковых ротаметров показания приборов MASS-VIEW практически не зависят от рабочих температуры и давления газа. И измеряют они не объемный расход газа при рабочих условиях, а массовый расход. При изготовлении в электронные ротаметры MASS-VIEW записываются 10 калибровок для наиболее популярных газов. При смене рабочей среды достаточно переключить ротаметр на новый газ с помощью графического дисплея и встроенного джойстика. Конструкция этих приборов позволяет легко заменять поплавковые ротаметры в технологических линиях. Приборы обладают большим динамическим диапазоном (вплоть до 1:500) и могут работать с расходами от 0,01 до 500 н. л/мин.

Серия расходомеров IN-FLOW в промышленном исполнении с классом пыле- и влагозащиты IP65 перекрывает диапазон расходов от 0,014 н. мл/мин до 500 н. м³/ч. Эти приборы могут как измерять, так и регулировать расход газа. А приборы серии IN-FLOW High Flow обеспечивают измерение расходов вплоть до 11 000 н. м³/ч.

Для измерения расхода жидкости компания Bronkhorst High-Tech предлагает приборы, использующие сразу три различных метода измерения: тепловые, кориолисовые и ультразвуковые. Технология тепловых расходомеров μ -FLOW позволяет создавать измерители и регуляторы сверхмалых расходов жидкости от 5 мг/ч. Минимальный расход, доступный кориолисовым расходомерам Bronkhorst® – 50 мг/ч. А ведь кориолисовые расходомеры – совершенно особый класс приборов. Они непосредственно измеряют массовый расход, проходящей через них среды. И эта среда может находиться как жидком, так и газообразном состоянии. Параллельно и независимо эти приборы могут измерять плотность рабочей среды, ее температуру. Все это могут кориолисовые расходомеры Bronkhorst® серии miniCORI-FLOW и CORI-FLOW.

Ультразвуковые расходомеры Bronkhorst® серии ES-FLOW работают в диапазоне от 4 до 1500 мл/мин. По сравнению с другими ультразвуковыми расходомерами, представленными на рынке, приборы ES-FLOW имеют уникально малое проходное сечение – всего 1,3 мм. Производитель разработал особую технологию Ultrasonic Wave Technology, которая дает возможность корректно измерять расход вне зависимости от рабочей жидкости. Вы можете перейти на использование новой жидкости без необходимости перекалибровки или какой-либо дополнительной коррекции показаний расходомера ES-FLOW.

Одна из наиболее популярных задач для жидкостных расходомеров – дозирование или микродозирование. Компания Bronkhorst High-Tech предлагает несколько подходов к их решению. Дозирование может осуществляться по объему (под управлением ультразвукового расходомера) или по массе (с тепловым или кориолисовым расходомером). В качестве исполнительного устройства, работой которого управляет расходомер с помощью встроенного ПИД-регулятора, может выступать регулирующий, отсечной клапан или шестеренчатый насос. Система с регулирующим клапаном требует подачи жидкости под давлением, а система с шестеренчатым насосом сама будет осуществлять дозирование и создавать избыточное давление после себя.

Важное преимущество систем дозирования на основе расходомера по сравнению с другими решениями – высокая точность и воспроизводимость процесса. Решение Bronkhorst® обеспечивает прямое (не косвенное) измерение прошедшего количества вещества с точностью расходомера, составляющей доли процента.

Система смешивания и испарения СЕМ (Controlled Evaporation and Mixing) – современное решение для генерации пара заданного состава. Она состоит из регулятора расхода жидкости, регулятора расхода газа и термостатируемого устройства смешения и испарения. Конструкция устройства смешения исключает формирование капель жидкости и вариацию состава пара на выходе, максимальная температура термостата составляет + 200°С. Отличительными особенностями СЕМ-системы являются точное дозирование жидкости и газа (массовый расход), быстрый отклик, очень стабильный поток пара.

Измерители давления серии EL-PRESS (лабораторное исполнение) и IN-PRESS (промышленное исполнение) могут комплектоваться датчиками абсолютного, избыточного или дифференциального давления. В зависимости от рабочих расходов они могут непосредственно встраиваться в магистраль (малые расходы) или устанавливаться в специальных отводах (большие расходы). Приборы могут оснащаться встроенным или отдельно стоящими регулируемыми клапанами. В этом случае в зависимости от конфигурации они могут регулировать давление «до себя», «после себя» или «в объеме».

Эксклюзивным дистрибьютором компании Bronkhorst High-Tech в России является ООО «Сигм плюс инжиниринг». Подробную информацию по продуктам Bronkhorst® Вы можете найти на нашем сайте www.massflow.ru. Также мы с удовольствием проконсультируем Вас по возможностям применения этих расходомеров в Вашей системе. Для этого позвоните нам по телефону, указанному ниже, или воспользуйтесь онлайн чатом на сайте.

ООО «Сигм плюс инжиниринг», г. Москва

Эксклюзивный дистрибьютор компании Bronkhorst® в России

тел.: +7 (499) 649-87-18

E-mail: sales@massflow.ru

сайт: www.massflow.ru

ОГЛАВЛЕНИЕ

Пленарные доклады

<i>Быстров Н.С., Емельянов А.В., Еремин А.В., Яценко П.И.</i> Исследования детальной кинетики распада и окисления различных углеводородных соединений методом АРАС, поддержанные квантово-химическими вычислениями	6
<i>Васильев А.А., Борискин А.А., Васильев В.А.</i> Возбуждение детонации распределенными инициаторами.....	7
<i>Завершинский И.П., Порфирьев Д.П.</i> Численное моделирование горения алюминия в ПВР	8
<i>Козлов В.В., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г.</i> Физические механизмы горения микроструй водорода.....	9
<i>Кузнецов Г.В., Стрижак П.А., Волков Р.С.</i> Особенности распыления композиционных жидких топлив на основе фильтр-кека каменного угля	10
<i>Прууэл Э.Р.</i> Модель уравнения состояния плотных реагирующих газов для условий взрыва	11
<i>Рыжков А.Ф., Богатова Т.Ф., Тугов А.Н., Масленников Г.Е., Осипов П.В., Никитин А.Д.</i> К разработке технологий снижения углеродного следа в энергетике и промышленности	12
<i>Смирнов Н.Н., Тюренкова В.В., Никитин В.Ф.</i> Суперкомпьютерное моделирование горения и взрыва полидисперсных смесей: проблемы и пути их решения.....	13
<i>Снегирев А.Ю.</i> Диффузионное горение в невесомости	15
<i>Суслов Н.И., Крюков В.А., Крюков Я.В., Чурашев В.Н.</i> ТЭК азиатской России: научное обеспечение и новая парадигма развития.....	16
<i>Фролов С.М., Сметанюк В.А., Садыков И.А., Силантьев А.С., Шамшин И.О., Аксенов В.С., Авдеев К.А., Фролов Ф.С.</i> Детонационный пароперегреватель для газификации промышленных и коммунальных отходов сильно перегретым водяным паром.....	17
<i>Цепенюк А.И., Кервишвили А.Р.</i> Результаты применения CFD-моделирования при разработке и модернизации котельного и технологического оборудования. Перспективы развития прикладных исследований.....	20
<i>Шмаков А.Г., Коробейничев О.П., Осипова К.Н., Князьков Д.А., Дмитриев А.М.</i> Химия и кинетика реакций горения и окисления альтернативных топлив	19
<i>Якуш С.Е., Рашковский С.А.</i> Вычислительные модели горения твердого топлива в прямоточных воздушно-реактивных двигателях	21

Доклады

<i>Агафонцев М.В., Касымов Д.П., Лобода Е.Л., Рейно В.В., Луценко А.В., Перминов В.В., Орлов К.Е., Мартынов П.С., Старосельцева А.А., Лобода Ю.А.</i> Полунатурные исследования влияния природных пожаров на атмосферу	24
<i>Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Крафт Я.В., Исмагилов З.Р.</i> Особенности лазерного зажигания микрочастиц углей	25
<i>Алексеенко С.В., Перепечко Л.Н.</i> Комплексные системы обращения с коммунальными и промышленными отходам	26
<i>Аникин Н.Б., Безгоднов Е.В., Давлетчин Ю.Ф., Мошкин Д.Л., Никифоров М.В., Пасюков С.Д., Попов И.А., Тараканов А.А., Тяктев А.А., Уфимцев Ю.С., Ушков А.В., Фролов Д.В., Симоненко В.А.</i> Исследовательский комплекс РФЯЦ-ВНИИТФ, предназначенный для получения экспериментальных данных по опасным факторам истечения, горения и взрыва водородосодержащих газовых смесей	27
<i>Антонов Д.В., Стрижак П.А.</i> Микровзрывная фрагментация капель в условиях близких к топливным технологиям.....	28
<i>Ануфриев И.С., Копьев Е.П., Садкин И.С., Мухина М.А.</i> Экспериментальное исследование характеристик горения гептана в высокоскоростной струе перегретого водяного пара	29

<i>Аньшаков А.С., Алтферов А.И., Домаров П.В., Фалеев В.А.</i> Плазменно-термическая газификация органических отходов	30
<i>Архипов В. А., Басалаев С.А., Порязов В.А.</i> Экспериментальное определение нестационарной скорости горения ВЭМ при сбросе давления.....	31
<i>Бабук В.А., Будный Н.Л., Низяев А.А.</i> Роль промежуточных структур в процессе горения высокоэнергетических конденсированных систем	32
<i>Бараньшин Е.А., Кривошеев П.Н., Миронов В.Н., Пенязьков О.Г.</i> Режимы горения слоев пористого кремния на подложке с кислородом и перхлоратом натрия	33
<i>Барбин Н.М., Кобелев А.М., Терентьев Д.И., Алексеев С.Г., Титов С.А.</i> Термодинамическое моделирование горения радиоактивного графита в водяном паре	34
<i>Беляев С.В., Глушков Д.О., Пleshко А.О.</i> Характеристики процессов микровзрывного диспергирования частиц гелеобразных топлив при зажигании в высокотемпературной воздушной среде.....	35
<i>Берсенева К.Г., Сидоркин В.Т., Тугов А.Н., Мошников А.Н., Верещетин В.А.</i> Совместное сжигание пиролизного газа и сланца на котле ТП-101	36
<i>Бойко Е.А., Страшиников А.В.</i> Развитие малой распределенной энергетики на основе когенерационных энергетических установок с газификацией твердого органического топлива	37
<i>Бордзиловский С.А., Караханов С.М., Микулянец Е.И., Пластинин А.В., Юношев А.С.</i> Влияние добавки алюминия на температуру детонации эмульсионного взрывчатого вещества	38
<i>Брызгалов О.В., Минаев С.С.</i> Численное моделирование динамики фронта пламени в рамках «flamelet» модели	39
<i>Бунев В.А., Коржавин А.А., Сеначин А.П., Сеначин П.К.</i> Задержка воспламенения топлива в водородном дизеле	40
<i>Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф.</i> Непрерывная многофронтная детонация смеси метан – нагретый воздух в кольцевой камере сгорания.....	41
<i>Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф.</i> Детонационное сжигание смеси авиационный керосин – воздух в кольцевой цилиндрической камере диаметром 503 мм при изменении ее геометрии.....	42
<i>Васильев А.А.</i> Детонационные волны в многотопливных смесях	43
<i>Волков С.Ю., Кобцев В.Д., Кострица С.А., Орлов С.Н., Смирнов В.В.</i> Исследование влияния фосфорсодержащих антипиренов на распространение пламени по полиметилметакрилату с помощью оптических методов: ПЛИФ и КАРС-спектроскопии	44
<i>Волкова Н.Н., Дашко Д.В., Жолудев А.Ф., Казаков А.И., Кислов М.Б., Набатова А.В., Яновский Л.С.</i> Закономерности горения и термического разложения твердых газогенерирующих композиций на основе высокоэнтальпийных полиядерных n-гетероциклических соединений и поли-2-метил-5-винилтетразола	45
<i>Вершинина К.Ю., Дорохов В.В., Романов Д.С., Стрижак П.А.</i> Многофакторный анализ энергетической утилизации угольных, нефтяных и растительных отходов в составе топливных суспензий.....	46
<i>Гайдукова О.С., Стрижак П.А., Мисюра С.Я.</i> Зажигание газовых гидратов при разных видах теплообмена.....	47
<i>Глотов О.Г., Замащиков В.В., Сурудин Г.С., Белоусова Н.С.</i> Первичные конденсированные продукты борсодержащих топлив при горении в аргоне и воздухе	48
<i>Глотов О.Г., Корчагин М.А., Белоусова Н.С., Беляева Д.Ю., Сухоруков А.В., Трубина С.В.</i> Горение пористых частиц титана и смесевых композиций с ними.....	49
<i>Голубев В.А., Платов И.В.</i> Комплексное использование углей и углесодержащих отходов	50
<i>Гончаренко Ю.Б., Кулик А.В., Цой К.А., Пономарева А.А.</i> Применение пористых горелок при сжигании угольной пыли.....	51

<i>Гореликов Е.Ю., Литвинов И.В., Шторк С.И.</i> Режимы обедненного горения предварительно перемешанного газового топлива в радиальной горелке	52
<i>Гуренцов Е.В., Дракон А.В., Еремин А.В., Колотушкин Р.Н., Михеева Е.Ю., Ходыко Е.С.</i> Исследование оптических свойств и структуры наночастиц сажи в зависимости от условий их образования.....	53
<i>Дац Е.П., Минаев С.С.</i> Численные оценки эффективности цилиндрических радиационных пористых горелок с осевой подачей топлива	54
<i>Деревич И.В., Клочков А.К.</i> Моделирование теплового взрыва системы частиц с экзотермической химической реакцией в однородной неизотермической изотропной турбулентности.....	55
<i>Дектерев А.А., Кузнецов В.А.</i> Численное моделирование горения пылеугольного топлива и ВУТ.....	56
<i>Дектерев Ар.А., Дектерев А.А., Минаков А.В.</i> Опыт моделирования турбулентного газового горения	57
<i>Делягин В.Н., Иванов Н.М., Мурко В.И.</i> Термическое обеззараживание и утилизация органосодержащих отходов, находящихся в различных агрегатных состояниях	58
<i>Дмитриев А.М., Осипова К.Н., Князьков Д.А., Шмаков А.Г.</i> Исследование механизма подавления сажи окисью пропилена	59
<i>Донской И.Г., Козлов А.Н., Свищев Д.А., Пензик М.В.</i> Экспериментальное исследование агломерации смесей древесных опилок и полиэтиленовых гранул при слоевом горении.....	60
<i>Донской И.Г., Мисюра С.Я.</i> Оценка пределов устойчивого диффузионного горения метана над слоем газового гидрата	61
<i>Дракон А.В., Еремин А.В., Кориунова М.Р., Михеева Е.Ю.</i> Сажеобразование при пиролизе этилена с добавками фурана и тетрагидрофурана	62
<i>Егоров Р.И., Белоногов М.В.</i> Аллотермическая газификация смесевых топлив на основе растительных компонентов.....	63
<i>Елсуков В.К., Латушкина С.В.</i> Особенности генерации бенз(а)пирена и оксидов азота при сжигании бурых углей в котлах с жидким шлакоудалением	64
<i>Елсуков В.К.</i> Взаимовлияние компонентов минеральной части Канско-Ачинских углей в технологиях камерного сжигания с учетом термодинамических и кинетических факторов	65
<i>Еремин И.В., Рашковский С.А., Костюшин К.В., Червакова А.В.</i> Численное моделирование обтекания конгломератов частиц бора высокотемпературным ускоряющимся потоком продуктов сгорания.....	66
<i>Загруднинов Р.Ш., Литвиненко Л.М., Никишанин М.С., Сеначин А.П., Сеначин П.К.</i> Новая технология окислительного вихревого пиролиза лузги подсолнечника и получение биоугля на стендовой установке.....	67
<i>Замураев В.П., Калинина А.П.</i> Горение углеводородных топлив в сверхзвуковом потоке при низких числах Маха	68
<i>Золотухина О.С., Арбузов В.А., Арбузов Э.В., Дубнищев Ю.Н., Лукашов В.В.</i> Исследование фазовых и температурных возмущений, индуцированных свечой методами гильберт-оптики	69
<i>Иванов В.С., Фролов С.М., Звезгинцев В.И., Зангиев А.Э. Шамшин И.О., Гусев П.А.</i> Прямоточный воздушно-реактивный двигатель с непрерывно-детонационным горением водорода и этилена: огневые испытания при числах Маха 1,5–2,5.....	70
<i>Киверин А.Д., Яковенко И.С.</i> Генерация и усиление волн сжатия при нестационарном горении	72
<i>Князьков Д.А., Дмитриев А.М., Большова Т.А., Герасимов И.Е., Шмаков А.Г.</i> <i>Коробейничев О.П.</i> Структура пламени пропилена при давлениях 2–5 атм. Масс-спектрометрическое исследование и химико-кинетическое моделирование	73
<i>Ковальногов В.Н., Федоров Р.В., Генералов Д.А., Хахалев Ю.А., Бондаренко А.А.</i> Моделирование горения комбинированного топлива для сокращения эмиссии загрязняющих веществ	74

<i>Козлов В.В., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Павленко А.М., Тамбовцев А.С., Шмаков А.Г.</i> Исследование режимов диффузионного горения микроструи водорода при одновременной подаче воздуха из соосно расположенной кольцевой щели.....	75
<i>Копьев Е.П., Садкин И.С., Мухина М.А., Шадрин Е.Ю., Шимченко С.Ю.</i> Экспериментальное изучение горения жидких углеводородов в условиях паровой газификации в присутствии газа разбавителя	76
<i>Коробейничев О.П., Палецкий А.А., Терещенко А.Г., Чернов А.А., Карпов А.И., Шаклеин А.А., Шмаков А.Г., Трубачев С.А., Глазнев Р.К., Барботько С.Л.</i> Распространение пламени по армированной стекловолкном эпоксидной смоле в потоке окислителя. эффект добавления антипиренов на ее горючесть	77
<i>Коробейничев О.П., Muthu Kumaran, Raghavan V., Трубачев С.А., Палецкий А.А., Шмаков А.Г., Глазнев Р.К., Чернов А.А., Терещенко А.Г.</i> Экспериментальное и численное исследование распространения пламени по слою хвои <i>Pinus Sylvestris</i>	78
<i>Коротких А.Г., Сорокин И.В., Архипов В.А.</i> Лазерное зажигание порошковых систем на основе Al и В.....	79
<i>Коротких А.Г., Сорокин И.В., Архипов В.А.</i> Влияние горючего-связующего вещества на характеристики зажигания ВЭМ, содержащих бориды алюминия.....	80
<i>Коротких А.Г., Годунов А.Б.</i> Многоступенчатый анализ кинетики окисления и воспламенение нанопорошков на основе алюминия	81
<i>Корценштейн Н.М.</i> Моделирование образования экологически опасных субмикронных частиц при сжигании твердых топлив	82
<i>Красноухов В.С., Загидуллин М.В., Порфирьев Д.П., Мебель А.М.</i> Исследование механизма реакции бензила и пропаргила.....	83
<i>Крафт Я.В., Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Исмагилов З.Р.</i> Пиролиз бурого угля под воздействием лазерного излучения	84
<i>Красинский Д.В.</i> Численное моделирование процессов турбулентного горения метана при вдуве паровой струи в осесимметричной горелке	85
<i>Крикунова А.И., Коссов Г.А.</i> Обработка изображений для оценки динамики фронта пламени	86
<i>Крикунова А.И., Сон Э.Е.</i> Особенности влияния гравитационных сил на устойчивость обратного конического пламени.....	87
<i>Кузнецов А.В., Бутаков Е.В., Плюснин П.Е., Матвеева А.Г.</i> Исследование процессов воспламенения, горения и термического разложения твердого композитного топлива уголь-дерево	88
<i>Кузнецов В.А., Дектерев Ар.А., Ануфриев И.С., Минаков А.В.</i> Расчетное исследование сжигания жидкого топлива в прямоточной испарительной горелке с подачей перегретого пара	89
<i>Жданова А.О., Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Копылов Н.П., Копылов С.Н., Сушкина Е.Ю., Стрижак П.А.</i> Характеристики осаждения твердых частиц продуктов горения материалов в помещениях.....	90
<i>Кузнецов Г.В., Стрижак П.А., Вершинина К.Ю., Няшина Г.С.</i> Математическое моделирование зажигания капли органоводоугольного топлива.....	91
<i>Кузнецов Г.В., Мисюкова А.Д., Янковский С.А.</i> Влияние доли древесной биомассы на времена задержки зажигания при ее термическом разложении в смеси с монгольским углем	92
<i>Кучанов С.Н., Кочергин Д.О., Белявская П.В.</i> Безмазутный розжиг пылеугольных котлов с электроионизационным воспламенением.....	93
<i>Кушниренко А.Г., Стамов Л.И., Михальченко Е.В., Смирнова М.Н., Тюренкова В.В.</i> Вычислительное моделирование камеры сгорания твердотопливного гибридного двигателя	94
<i>Ларионов К.Б., Калтаев А.Ж., Губин В.Е., Громов А.А.</i> Сжигание пирогенетической воды пиролизных производств в составе ВУТ.....	95
<i>Левин В.А., Журавская Т.А.</i> Влияние добавления аргона и озона на детонационное горение водородно-воздушной смеси.....	96

<i>Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В.</i>	
Формирование многоголовой вращающейся детонации.....	97
<i>Лецевич В.В., Пенязьков О.Г., Шимченко С.Ю.</i> Влияние неидеальных факторов на процесс самовоспламенения двухфазных топлив при низких температурах.....	98
<i>Литвиненко Ю.А., Литвиненко М.В.</i> Экспериментальное исследование диффузионного горения импактной микроструи.....	99
<i>Лобасов А.С., Шараборин Д.К., Толстогузов Р.В., Дулин В.М.</i> Высокоскоростная панорамная диагностика динамики поднятого турбулентного пламени в условиях внешнего периодического возмущения	100
<i>Матвиенко О.В., Луценко А.В., Касымов Д.П., Лобода Е.Л.</i> Математическое моделирование зажигания древесины точечным источником тепла	101
<i>Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Порязов В.А.</i> Исследование горения смесового твердого топлива с добавкой порошка бора.....	102
<i>Моисеева К.М., Крайнов А.Ю.</i> Исследование критических условий искрового зажигания газовой смеси порошка бора в пропано-воздушной смеси	103
<i>Молоканов А.А., Тарасов Г.А., Казаков А.И., Плишкин Н.А., Яновский Л.С., Варламова Н.И.</i> Кинетика газовой выделенной при термодеструкции углеводородных соединений	104
<i>Мурко В.И., Баранова М.П., Делягин В.Н.</i> Вихревой способ сжигания водоугольного топлива из шламов углеобогащения	105
<i>Никитин А.Д., Рыжков А.Ф.</i> Расчетное исследование паровоздушной газификации углей различной степени метаморфизма в двухступенчатом реакторе	106
<i>Никитин В.Ф., Михальченко Е.В., Стамов Л.И.</i> Моделирование ячеистой структуры в смесях ацетилен, этилен, водород с воздухом.....	107
<i>Няшина Г.С., Дорохов В.В., Стрижак П.А.</i> Удельные газовые антропогенные выбросы, образующиеся при горении перспективных суспензионных топлив.....	108
<i>Осипов А.В., Петров И.Я., Ушаков К.Ю., Богомолов А.Р.</i> Исследование термического превращения Барзасских углей в присутствии водорододонорного растворителя	109
<i>Осипова К.Н., Шмаков А.Г.</i> Структура и скорость распространения предварительно перемешанных пламен смесей аммиака с добавкой водорода	110
<i>Пинаев А.В., Пинаев П.А.</i> Взрывные и детонационные волны в смесях $\text{C}_2\text{H}_2/\text{H}_2/\text{O}_2$, $\text{C}_2\text{H}_2/\text{H}_2/\text{Air}$ с взвесьями частиц каменного угля.....	111
<i>Пляскина Н.И.</i> Тенденции развития энергетической политики и приоритетные направления энергосбережения.....	112
<i>Подшивалов А.И., Зарко В.Е., Кискин А.Б., Гришин Ю.А.</i> СВЧ-метод измерения динамических параметров процессов газификации и горения конденсированных веществ.....	113
<i>Пономарева А.А., Лесных А.В., Цой К.А., Минаев С.С., Штым К.А.</i> Физико-химические особенности термического разложения и горения угольных брикетов, содержащих промышленные отходы.....	114
<i>Прохоров Е.С.</i> О температуре плавления углерода, полученного при детонационном сгорании ацетилена	115
<i>Пузырев Е.М., Голубев В.А., Щербаков Ф.В.</i> Исследование процессов в КС, перспективные схемы для котлов.....	116
<i>Пузырев Е.М., Голубев В.А., Пузырев М.Е.</i> Технология «Торнадо» для пылеугольных котлов.....	117
<i>Рашковский С. А., Кузнецов В.Т., Басалаев С.А.</i> Пиролиз борсодержащих смесевых композиций при воздействии лучистой энергии	118
<i>Рыбакин Б.П., Никитин В.Ф., Михальченко Е.В.</i> Трехмерное моделирование детонационного двигателя с непрерывной детонационной волной.....	119
<i>Рыжков А.Ф., Каграманов Ю.А., Никитин А.Д., Масленников Г.Е., Вохмякова И.С.</i> Моделирование процесса кислородной конверсии метана с учетом сажеобразования	120
<i>Рябов Г.А.</i> Использование связанных между собой реакторов с циркулирующим кипящим слоем для получения водорода.....	121
<i>Седачева О.В., Абаимов Н.А., Рыжков А.Ф.</i> Исследование поточной двухступенчатой $\text{O}_2\text{-CO}_2$ газификации каменного угля методом CFD.....	122

<i>Симонов Е.В., Ждан С.А.</i> Моделирование непрерывной спиновой детонации смеси водород-воздух в режиме эжекции воздуха.....	123
<i>Скибина Н.П., Фарапонов В.В.</i> Исследование теплового состояния заряда, выполненного из полимерного легоплавкого материала, при воздействии сверхзвукового течения газа в проточном тракте ПВРД.....	124
<i>Сон Э.Е., Яновский Л.С., Ежов В.М., Куликов С.В., Червонная Н.А., Ильина М.А.</i> Исследование периода индукции воспламенения структурно-напряженных углеводородов с помощью ударной трубы	125
<i>Сутырин О.Г., Георгиевский П.Ю., Левин В.А.</i> Ударно-волновое инициирование детонации в горючем газе, содержащем локальную область повышенной плотности.....	126
<i>Сухинин С.В., Трилис А.В., Константинов А.П., Юрковский В.С., Черемисин А.А.</i> Физика и математическое описание бегущей, мерцающей и ползущей неустойчивостей горения в жаровых трубах в кольцевом канале гтд	127
<i>Сухинин С.В., Трилис А.В., Константинов А.П., Юрковский В.С., Черемисин А.А.</i> Термоакустические колебания как прекурсор неустойчивости горения в жаровых трубах в кольцевом канале	128
<i>Сыродой С.В., Кузнецов Г.В. Саломатов В.В.</i> Математическое моделирование процесса совметсного воспламенения частиц угля и биомассы.....	129
<i>Тарасов Г.А., Молоканов А.А., Яновский Л.С.</i> Утилизация хлорсодержащих отходов термическими методами.....	130
<i>Тесленко В.С., Дрожжин А.П.</i> Переход горения пропан-кислородной смеси в детонацию в щелевых зазорах	131
<i>Толстогузов Р.В., Лобасов А.С., Шараборин Д.К., Дулин В.М.</i> Измерение поля температуры методом плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции в потоке между пламенем Бунзена и плоской охлаждаемой преградой.....	132
<i>Трилис А.В., Константинов А.П., Сухинин С.В., Юрковский В.С., Черемисин А.А.</i> Результаты теоретических и экспериментальных исследований термоакустических колебаний около тонкостенных конструкций в каналах и трубах	133
<i>Троцюк А.В., Фомин П.А.</i> Разработка обобщенных двухстадийных моделей кинетики и численное моделирование детонационной структуры в двухтопливных газовых смесях	134
<i>Третьяков П.К., Тупикин А.В.</i> Режимы горения керосина в канале постоянного сечения при числе Маха $M=1.7$ на входе.....	135
<i>Трубачев С.А., Коробейничев О.П., Карнов А.И., Шаклеин А.А., Палецкий А.А., Терещенко А.Г., Шмаков А.Г., Глазнев Р.К., Wang Xin, Yuan Ni., Ni W.Z</i> Ингибирующий эффект добавки трифенилфосфата на распространение пламени по полиметилметакрилату	136
<i>Тугов А.Н.</i> Обоснование критерия энергоэффективности при актуализации справочника НДТ ИТС 9-2020 «Утилизация и Обезвреживание отходов термическими способами»	137
<i>Тугов А.Н., Сидоркин В.Т., Верещетин В.А., Штегман А.В., Берсенев К.Г.</i> Особенности конструкции и режимов работы Low-NOx горелок ВТИ-ЕНТЕН для сжигания пиролизных газов	138
<i>Федорова Н.Н., Гольдфельд М.А., Пикалов В.В.</i> Анализ колебаний давления в сверхзвуковых камерах сгорания.....	139
<i>Федяева О.Н., Востриков А.А.</i> Сжигание хлорсодержащих органических отходов: проблемы и возможные пути их решения с использованием суб- и сверхкритической воды	140
<i>Филимонова А.С., Зябрев А.С., Петров И.Я., Ушаков К.Ю., Богомолов А.Р.</i> Исследование процессов пиролиза и газификации отходов резинотехнических изделий	141
<i>Хорунженко А.С., Сатонкина Н.П.</i> Влияние структуры заряда на кинетику химических реакций при детонации тротила	142
<i>Шараборин Д.К., Лобасов А. С., Толстогузов Р.В., Дулин В.М.</i> Исследование Бунзеновского газочапельного пламени спирта оптически методами	143

<i>Хребтов М.Ю., Палкин Е.В., Мулладжанов Р.И., Шараборин Д.К., Лобасов А.С., Чикишев Л.М., Дулин В.М.</i> Численное и экспериментальное исследование особенностей нестационарной динамики потока в модельной КС ГТУ	144
<i>Чикишев Л.М., Толстогузов Р.В., Лебедев А.С., Дулин В.М.</i> Диагностика распыла топлива с применением локального времяпролетного метода	145
<i>Шамишин И. О., Казаченко М. В., Фролов С. М., Басевич В. Я.</i> Критические явления при переходе горения в детонацию в стехиометрических воздушных смесях метановодородного и пропановодородного горючего	146
<i>Шевырев С.А.</i> Оценка стоимости водорода при паровой газификации биомассы	148
<i>Шевырев С.А., Мажейко Н.Е., Якутин С.К.</i> Паровая газификация кузнецкого угля марки «Д» в кипящем слое	149
<i>Штегман А.В., Рыжгий И.А.</i> Опыт освоения опытно-промышленной горновой газогенераторной установки в г. Томске.....	150
<i>Штегман А.В., Сосин Д.В.</i> Результаты исследований по разработке системы плазменного розжига с повышенной надежностью для Гусиноозерской ГРЭС.....	151
<i>Штым К.А., Лесных А.В., Дорогов Е.Ю., Соловьева Т.А.</i> Определение оптимальных параметров аэросмеси при взаимодействии с пористой радиационной горелкой.....	152
<i>Штым А.Н., Штым К.А., Соловьева Т.А., Кулик А.В.</i> Предварительное смесеобразование в камере сгорания предтопка	153
<i>Юрковский В.С., Сухинин С.В., Трилис А.В., Черемисин А.А.</i> Физика и математика самоподрыва твердого топлива при запуске	154
<i>Якуш С.Е., Коробейничев О.П., Шмаков А.Г., Большова Т.А., Трубачев С.А.</i> Численное исследование горения пмма на основе редуцированной кинетической схемы	155
<i>Яновский Л.С., Ежов В.М., Ильина М.А.</i> Исследование кинетики термического окисления топлив и масел для авиационных ГТД.....	156
<i>Яновский Л.С., Байков А.В., Жолудев А.Ф., Заславский Г.Е., Кислов М.Б., Пучковский И.В., Попов К.В., Шаров М.С.</i> Моделирование горения металлизированных энергетических материалов.....	157

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Hu W.Z. 136
Muthu Kumaran 78
Raghavan V. 78
Wang Xin 136
Yuan Hu 136
Абаимов Н.А. 122
Авдеев К.А. 17
Агафонцев М.В. 24
Адуев Б.П. 25, 84
Аксенов В.С. 17
Алексеев С.Г. 34
Алексеенко С.В. 26
Алтферов А.И. 30
Аникин Н.Б. 27
Антонов Д.В. 28
Ануфриев И.С. 29, 89
Аньшаков А.С. 30
Арбузов В.А. 69
Арбузов Э.В. 69
Архипов В.А. 31, 79, 80
Бабук В.А. 32
Байков А.В. 157
Баранова М.П. 105
Бараньшин Е.А. 33
Барбин Н.М. 34
Барботько С.Л. 77
Басалаев С.А. 31, 118
Басевич В.Я. 146
Безгодов Е.В. 27
Белоногов М.В. 63
Белюсова Н.С. 48, 49
Белявская П.В. 93
Беляев С.В. 35
Беляева Д.Ю. 49
Берсенев К.Г. 36, 138
Богатова Т.Ф. 12
Богомоллов А.Р. 109, 141
Бойко Е.А. 37
Большова Т.А. 73, 155
Бондаренко А.А. 74
Бордзиловский С.А. 38
Борискин А.А. 7
Брызгалов О.В. 39
Будный Н.Л. 32
Бунев В.А. 40
Бутаков Е.В. 88
Быковский Ф.А. 41, 42
Быстров Н.С. 6
Варламова Н.И. 104
Васильев А.А. 7, 43
Васильев В.А. 7
Ведерников Е.Ф. 41, 42
Верещетин В.А. 36, 138
Вершинина К.Ю. 46, 91
Волков Р.С. 10, 90
Волков С.Ю. 44
Волкова Н.Н. 45
Востриков А.А. 140
Вохмякова И.С. 120
Гайдукова О.С. 47
Генералов Д.А. 74
Георгиевский П.Ю. 126
Герасимов И.Е. 73
Глазнев Р.К. 77, 78, 136
Глотов О.Г. 48, 49
Глушков Д.О. 35
Годунов А.Б. 81
Голубев В.А. 50, 116, 117
Гольдфельд М.А. 139
Гончаренко Ю.Б. 51
Гореликов Е.Ю. 52
Гришин Ю.А. 113
Громов А.А. 95
Губин В.Е. 95
Гуренцов Е.В. 53
Гусев П.А. 70
Давлетчин Ю.Ф. 27
Дац Е.П. 54
Дашко Д.В. 45
Дектерев А.А. 56, 57
Дектерев Ар.А. 57, 89
Делягин В.Н. 58, 105
Деревич И.В. 55
Дмитриев А.М. 19, 59, 73
Домаров П.В. 30
Донской И.Г. 60, 61
Дорогов Е.Ю. 152
Дорохов В.В. 46, 108
Дракон А.В. 53, 62
Дрожжин А.П. 131
Дубнищев Ю.Н. 69
Дулин В.М. 100, 132, 143, 144, 145
Егоров Р.И. 63
Ежов В.М. 125, 156
Елсуков В.К. 64, 65
Емельянов А.В. 6
Еремин А.В. 6, 53, 62
Еремин И.В. 66
Ждан С.А. 41, 42, 123
Жданова А.О. 90
Жолудев А.Ф. 45, 157
Журавская Т.А. 96
Завершинский И.П. 8
Загидуллин М.В. 83
Загрудинов Р.Ш. 67
Замашиков В.В. 48
Замураев В.П. 68
Зангиев А.Э. 70
Зарко В.Е. 113
Заславский Г.Е. 157
Звегинцев В.И. 70
Золотухина О.С. 69
Зябрев А.С. 141
Иванов В.С. 70
Иванов Н.М. 58
Ильина М.А. 125, 156
Исмагилов З.Р. 25, 84
Каграманов Ю.А. 120
Казаков А.И. 45, 104
Казаченко М.В. 146
Калинина А.П. 68
Калтаев А.Ж. 95
Караханов С.М. 38
Карпов А.И. 77, 136
Касымов Д.П. 24, 101
Квривишвили А.Р. 20
Киверин А.Д. 72
Кискин А.Б. 113
Кислов М.Б. 45, 157
Клочков А.К. 55
Князьков Д.А. 19, 59, 73
Кобелев А.М. 34
Кобцев В.Д. 44
Ковальногов В.Н. 74
Козлов А.Н. 60
Козлов В.В. 9, 75
Колотушкин Р.Н. 53
Константинов А.П. 127, 128, 133
Копылов Н.П. 90
Копылов С.Н. 90
Копьев Е.П. 29, 76
Коржавин А.А. 40
Коробейничев О.П. 19, 77, 78, 136, 155, 155
Коротких А.Г. 79, 80, 81
Корценштейн Н.М. 82
Корчагин М.А. 49
Коршунова М.Р. 62
Коссов Г.А. 86
Кострица С.А. 44
Костюшин К.В. 66
Кочергин Д.О. 93
Крайнов А.Ю. 102, 103
Красинский Д.В. 85
Красноухов В.С. 83
Крафт Я.В. 25, 84
Кривошеев П.Н. 33

- Крикунова А.И. 86, 87
Крюков В.А. 16
Крюков Я.В. 16
Кузнецов А.В. 88
Кузнецов В.А. 56, 89
Кузнецов В.Т. 118
Кузнецов Г.В. 10, 90, 91, 92, 129
Кулик А.В. 51, 153
Куликов С.В. 125
Кучанов С.Н. 93
Кушниренко А.Г. 94
Ларионов К.Б. 95
Латушкина С.В. 64
Лебедев А.С. 145
Левин В.А. 96, 97, 126
Лесных А.В. 114, 152
Лещевич В.В. 98
Литвиненко Л.М. 67
Литвиненко М.В. 9, 75, 99
Литвиненко Ю.А. 9, 75, 99
Литвинов И.В. 52
Лобасов А.С. 100, 132, 143, 144
Лобода Е.Л. 24, 101
Лобода Ю.А. 24
Лукашов В.В. 69
Луценко А.В. 24, 101
Мажейко Н.Е. 149
Мануйлович И.С. 97
Марков В.В. 97
Мартынов П.С. 24
Масленников Г.Е. 12, 120
Матвеева А.Г. 88
Матвиенко О.В. 101
Мебель А.М. 83
Микулянец Е.И. 38
Минаев С.С. 39, 54, 114
Минаков А.В. 57, 89
Миронов В.Н. 33
Мисюкова А.Д. 92
Мисюра С.Я. 47, 61
Михальченко Е.В. 94, 107, 119
Михеева Е.Ю. 53, 62
Моисеева К.М. 102, 103
Молоканов А.А. 104, 130
Мошкин Д.Л. 27
Мошников А.Н. 36
Мулляджанов Р.И. 144
Мурко В.И. 58, 105
Мухина М.А. 29, 76
Набатова А.В. 45
Низяев А.А. 32
Никитин А.Д. 12, 106, 120
Никитин В.Ф. 13, 107, 119
Никифоров М.В. 27
Никишанин М.С. 67
Нурмухаметов Д.Р. 25, 84
Няшина Г.С. 91, 108
Орлов К.Е. 24
Орлов С.Н. 44
Осипов А.В. 109
Осипов П.В. 12
Осипова К.Н. 19, 59, 110
Павленко А.М. 75
Палецкий А.А. 77, 78, 136
Палкин Е.В. 144
Пасюков С.Д. 27
Пензик М.В. 60
Пенязьков О.Г. 33, 98
Перепечко Л.Н. 26
Перминов В.В. 24
Петров И.Я. 109, 141
Пикалов В.В. 139
Пинаев А.В. 111
Пинаев П.А. 111
Пластинин А.В. 38
Платов И.В. 50
Плешко А.О. 35
Плишкин Н.А. 104
Плюснин П.Е. 88
Пляскина Н.И. 112
Подшивалов А.И. 113
Пономарева А.А. 51, 114
Попов И.А. 27
Попов К.В. 157
Порфирьев Д.П. 8, 83
Порязов В.А. 31, 102
Прохоров Е.С. 115
Прууэл Э.Р. 11
Пузырев Е.М. 116, 117
Пузырев М.Е. 117
Пучковский И.В. 157
Рашковский С.А. 21, 66, 118
Рейно В.В. 24
Романов Д.С. 46
Рыбакин Б.П. 119
Рыжий И.А. 150
Рыжков А.Ф. 12, 106, 120, 122
Рябов Г.А. 121
Садкин И.С. 29, 76
Садыков И.А. 17
Саломатов В.В. 129
Сатонкина Н.П. 142
Свищев Д.А. 60
Седачева О.В. 122
Сеначин А.П. 40, 67
Сеначин П.К. 40, 67
Сидоркин В.Т. 36, 138
Силантьев А.С. 17
Симонов Е.В. 123
Скибина Н.П. 124
Сметанюк В.А. 17
Смирнов В.В. 44
Смирнов Н.Н. 13
Смирнова М.Н. 94
Снегирев А.Ю. 15
Соловьева Т.А. 152, 153
Сон Э.Е. 87, 125
Сорокин И.В. 79, 80
Сосин Д.В. 151
Стамов Л.И. 94, 107
Старосельцева А.А. 24
Страшников А.В. 37
Стрижак П.А. 10, 28, 46, 47, 90, 91, 108
Суродин Г.С. 48
Суслов Н.И. 16
Сутырин О.Г. 126
Сухинин С.В. 127, 128, 133, 154
Сухоруков А.В. 49
Сушкина Е.Ю. 90
Сыродой С.В. 129
Тамбовцев А.С. 75
Тараканов А.А. 27
Тарасов Г.А. 104, 130
Терентьев Д.И. 34
Терещенко А.Г. 77, 78, 136
Тесленко В.С. 131
Титов С.А. 34
Толстогузов Р.В. 100, 132, 143, 145
Третьяков П.К. 135
Трилис А.В. 127, 128, 133, 154
Троцюк А.В. 134
Трубачев С.А. 77, 78, 136, 155
Трубина С.В. 49
Тугов А.Н. 12, 36, 137, 138
Тупикин А.В. 135
Тюренкова В.В. 13, 94
Тяктев А.А. 27
Уфимцев Ю.С. 27
Ушаков К.Ю. 109, 141
Ушков А.В. 27
Фалеев В.А. 30
Фарапонов В.В. 124
Федоров Р.В. 74
Федорова Н.Н. 139
Федяева О.Н. 140

Филимонова А.С. 141
Фомин П.А. 134
Фролов С.М. 17, 70, 146
Фролов Ф.С. 17
Хахалев Ю.А. 74
Ходыко Е.С. 53
Хорунженко А.С. 142
Хребтов М.Ю. 144
Цепенюк А.И. 20
Цой К.А. 51, 114
Червакова А.В. 66
Червонная Н.А. 125
Черемисин А.А. 127, 128,
133, 154
Чернов А.А. 77, 78

Чикишев Л.М. 144, 145
Чурашев В.Н. 16
Шадрин Е.Ю. 76
Шаклеин А.А. 77, 136
Шамшин И.О. 17, 70, 146
Шараборин Д.К. 100, 132,
143, 144
Шаров М.С. 157
Шевырев С.А. 148, 149
Шимченко С.Ю. 76, 98
Шмаков А.Г. 9, 19, 59, 73,
75, 77, 78, 110, 136, 155
Штегман А.В. 138, 150,
151
Шторк С.И. 52

Штым А.Н. 153
Штым К.А. 114, 152, 153
Щербаков Ф.В. 116
Юношев А.С. 38
Юрковский В.С. 127, 128,
133, 154
Яковенко И.С. 72
Якутин С.К. 149
Якуш С.Е. 21, 155
Янковский С.А. 92
Яновский Л.С. 45, 104,
125, 130, 156, 157
Яценко П.И. 6

XI Всероссийская конференция
с международным участием
ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА: ТЕОРИЯ,
ЭКСПЕРИМЕНТ, ПРИЛОЖЕНИЯ
ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ
9–12 ноября 2021 года
г. Новосибирск

ISBN 978-5-89017-069-9

Ответственные за выпуск:
к.т.н. Бутаков Е.Б.

Верстка:
Мартынец А.В.

Подписано в печать 25.10.2021 г. Печать офсетная.
Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Усл. Печ. 20 л.
Тираж 180 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