

На правах рукописи



Смыгалина Анна Евгеньевна

**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ГОРЮЧИХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ВОДОРОДА НА РЕЖИМЫ
ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) и в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования “Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)” (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Киверин Алексей Дмитриевич**, кандидат физико-математических наук, Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, заведующий отделом вычислительной физики.

Официальные оппоненты: **Медведев Сергей Павлович**, доктор физико-математических наук, Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (ИХФ РАН), заведующий лабораторией гетерогенного горения.

Титова Наталия Сергеевна, кандидат физико-математических наук, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова (ЦИАМ им. П.И. Баранова), начальник отдела “Физика неравновесных процессов и физико-химическая кинетика”.

Ведущая организация: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН).

Защита состоится « 17 » апреля 2019 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.110.02 ОИВТ РАН, 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2, экспозал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ОИВТ РАН, <https://jiht.ru/>.

Отзывы на автореферат просьба присылать по адресу: 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2, ОИВТ РАН.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.110.02 ОИВТ РАН
д.ф.-м.н.



Васильев М.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В настоящей работе изложены результаты исследований влияния состава газовых смесей на основе водорода на режимы их горения и пределы воспламенения. Исследования выполнены методами вычислительной газовой динамики.

Актуальность темы исследования

Концентрации горючего и окислителя, а также величина относительного содержания этих компонент, наряду с параметрами, характеризующими состояние смеси, полностью определяют условия возникновения того или иного режима горения либо возникновения горения вообще. Проблема фундаментального исследования процессов воспламенения и горения смесей различных составов является одной из первостепенных задач современной физики горения и взрыва, которая в первую очередь становится актуальной при решении практических вопросов.

Основные результаты диссертации касаются вопросов воспламенения и горения газообразного водорода. Вопрос о нижнем концентрационном пределе воспламенения водорода является актуальным в задачах обеспечения безопасности атомной энергетики, поскольку водород может выделяться в неконтролируемо больших объемах при развитии аварий на атомных электростанциях. При этом наиболее важным является определение минимально возможной концентрации водорода, ниже которой воспламенение возникнуть не может. Постоянно расширяющаяся тенденция использования водорода в качестве топлива либо добавки к углеводородным топливам сделала также актуальным вопрос о безопасном хранении водорода. При разгерметизации баллона высокого давления, содержащего водород, возможно самовоспламенение водорода при его истечении в атмосферу. В этом случае воспламенение возникает в разогретом слое за ударной волной, формируемой при расширении струи водорода. Здесь, одним из важнейших вопросов является определение предела давления в баллоне, при котором аварийный выброс водорода независимо от диаметра отверстия не приводит к самовоспламенению смеси. При этом предельное давление ограничивает скорость подачи водорода, определяющую состав смеси или концентрацию водорода в потенциальной зоне воспламенения.

В настоящее время водород представляется одним из наиболее перспективных топлив, поскольку продуктом горения водорода является вода, которая вновь может быть преобразована в водород. Также водород при горении проявляет себя как одно из наиболее чистых с экологической точки зрения горючих: в продуктах не содержатся токсичные и вредные для экологии вещества, выделяющиеся в больших количествах при горении углеводородных топлив. В то же время горение водорода как вещества, обладающего наибольшей теплотой сгорания, может протекать в режимах, представляющих чрезвычайную опасность при практическом использовании. При

исследовании горения водорода в двигателях с искровым зажиганием к таким потенциально опасным режимам относятся детонация и стук, характеризующиеся скачками давления, приводящими к быстрому износу двигателя. В настоящей работе рассматриваются подходы по обеспечению оптимальных режимов работы двигателя на водороде, заключающиеся в использовании малых добавок низкоактивных веществ к водороду либо в использовании бедных водородно-воздушных смесей. Отдельно рассматриваются вопросы эффективности работы двигателя при использовании таких составов смесей на основе водорода.

Цели и задачи настоящей работы

Основной целью диссертации является исследование влияния состава смесей на основе водорода на развитие процессов воспламенения и обеспечение оптимальных режимов горения. В работе рассматриваются следующие задачи:

1) Определение нижнего концентрационного предела устойчивого воспламенения водорода как его минимальной концентрации, ниже которой невозможно поддержание развития экзотермических реакций горения. Для решения такой задачи в работе предложен новый метод, основанный на концепции Я.Б. Зельдовича о спонтанной волне горения, при этом решение задачи сводится к одномерной постановке.

2) Исследование влияния локального поля концентрации водорода на его самовоспламенение при истечении водорода из объема высокого давления в канал, заполненный воздухом. Конкретные характеристики поля концентрации водорода определяются скоростью подачи водорода в канал, задаваемой в настоящей работе длительностью раскрытия диафрагмы. В рамках решения задачи получено описание механизма возникновения очагов воспламенения и детально рассматривается влияние газодинамических процессов на установление условий, необходимых для развития самовоспламенения.

3) Определение минимальных добавок низкоактивных веществ: метана, водяного пара, избытка воздуха, к водородно-воздушной смеси оклостехиометрического состава, обеспечивающих отсутствие детонационных режимов сгорания в двигателе с искровым зажиганием.

4) Исследование влияния концентрации низкоактивных добавок к водороду: метана, водяного пара, избытка воздуха на параметры работы двигателя.

Научная новизна настоящей работы

Разработан новый метод определения нижнего концентрационного предела воспламенения горючих смесей на основе концепции Я.Б. Зельдовича о спонтанной волне горения. С использованием предложенного метода получено определение нижнего концентрационного предела воспламенения водорода.

Описан ранее не обсуждаемый механизм образования очагов воспламенения при истечении водорода под высоким давлением в канал, заполненный воздухом. При

этом особенности постановки задачи заключались в задании конечного времени раскрытия диафрагмы, разделяющей камеры высокого и низкого давлений, а также задании относительно невысоких начальных давлений водорода. В работе выделены два различных типа очагов воспламенения, впервые подтверждающие недавние экспериментальные результаты, представленные в литературе.

Предложен метод подавления детонационных режимов сгорания в двигателе, работающем на водороде, состоящий в использовании малых по объему добавок низкоактивных компонент к водороду. Определены необходимые величины добавок к водородно-воздушной смеси оклостехиометрического состава. Исследованы зависимости параметров работы двигателя от состава смеси при больших по отношению к минимальным величинах добавок.

Теоретическая и практическая значимость работы определяется новыми результатами в области классической теории горения и взрыва, составляющих базис для широкого круга прикладных задач воспламенения и горения газообразных смесей. Предложенный подход к определению нижнего концентрационного предела может быть использован для теоретического анализа принципиальной возможности воспламенения смесей различных составов. Выявленные механизмы формирования очагов воспламенения водорода при его истечении под высоким давлением в канал составляют основу интерпретации этого явления, что представляет первостепенную важность при составлении критериев для задач водородной безопасности. Описанный в работе подход по предотвращению детонационных режимов сгорания в двигателе с искровым зажиганием, заключающийся в использовании небольших по объему добавок низкоактивных веществ к оклостехиометрической водородно-воздушной смеси, имеет непосредственное практическое значение для разработки перспективных компонентов водородной энергетики. Полученные зависимости режимов сгорания смесей на основе водорода от содержания добавок: метана, водяного пара, избытка воздуха могут быть использованы для разработки оптимальных параметров и условий функционирования двигателей с искровым зажиганием для расширения практического использования таких двигателей, обладающих рядом преимуществ по сравнению с двигателями, работающими на традиционных топливах.

Положения, выносимые на защиту

Метод определения нижнего концентрационного предела устойчивого воспламенения горючих смесей на основе решения одномерной задачи о развитии волны воспламенения на градиенте концентрации.

Результаты численного моделирования по развитию горения в условиях неравномерного пространственного распределения горючей компоненты.

Механизм возникновения очагов воспламенения водорода при его истечении под высоким давлением через раскрывающуюся диафрагму в канал, заполненный воздухом.

Метод подавления детонационных режимов сжигания водорода в двигателе с искровым зажиганием за счет использования добавок метана, водяного пара и избытка воздуха.

Количественные и качественные закономерности сгорания смесей на основе водорода в двигателе с искровым зажиганием и оценка эффективности получаемых режимов.

Степень достоверности и апробация результатов

Поскольку общим для рассматриваемых в диссертации задач являлось выявление достоверных с качественной и количественной точек зрения зависимостей режимов воспламенения и горения от заданного состава горючей смеси на основе водорода, в рамках исследования была проведена валидация и верификация используемых математических моделей, компьютерных кодов и алгоритмов. В частности, были проведены тестовые расчеты основных величин, характеризующих развитие процессов горения: времени индукции и скорости ламинарного пламени, в диапазонах начальных условий и составов смесей, соответствующих исследуемым режимам. Результаты расчетов были сопоставлены с соответствующими экспериментальными данными, представленными в литературе.

Результаты решенных в рамках диссертационного исследования задач сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными, в том числе с уникальными данными, полученными в ОИВТ РАН.

Основные результаты работы докладывались автором на следующих научных конференциях: Международная конференция “Фундаментальные и прикладные задачи механики” (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017), XXVIII-XXXII International conference on interaction of intense energy fluxes with matter (Эльбрус, 2013, 2015, 2017), XXIX, XXXI International conference on equations of state for matter (Эльбрус, 2014, 2016), 7-9 всероссийских конференциях “Необратимые процессы в природе и технике” (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013, 2015, 2017), 36th International Symposium on Combustion (Seoul, 2016), 7th International conference “Photosynthesis research for sustainability” (Пушино, 2016), Международном конгрессе “Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность” (Москва, 2015), Международной конференции “Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы” (Махачкала, 2015), 7th European combustion meeting (Budapest, 2015), Международной конференции “Физико-математические проблемы создания новой техники” (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014), 6th International symposium on non-equilibrium processes, plasma, combustion and atmospheric phenomena (Сочи, 2014), конференции в рамках Летней суперкомпьютерной академии (Москва, ВМК МГУ,

2014), XXV Симпозиуме “Современная химическая физика” (Туапсе, 2013), 54й конференции “Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном информационном обществе” (Москва, МФТИ, 2011), а также на семинаре Лаборатории водородных энергетических технологий ОИВТ РАН (21 апреля 2015, Москва).

Личный вклад автора

Вклад автора в работы, вошедшие в диссертацию, является одним из основных. Автор принимала активное участие в постановке конкретных задач. Ею собственноручно выполнены все необходимые модификации компьютерных кодов для решения поставленных задач, проведена валидация кодов, уточнение используемых моделей для расчета транспортных коэффициентов, адаптация кода для проведения моделирования с использованием детальных механизмов химической кинетики, проведены тесты на сходимость для разбираемых задач. Автором выполнено компьютерное моделирование поставленных задач, проведен анализ полученных результатов и их сопоставление с литературными и экспериментальными данными. Автор принимала активное участие в обсуждении и интерпретации результатов, формулировке и обосновании выводов, вошедших в диссертацию.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 31 печатном издании, 4 из которых в журналах, рекомендованных ВАК, 27 – в сборниках тезисов и трудах конференций.

Структура и содержание глав диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Диссертация содержит 120 страниц, 2 таблицы и 37 рисунков. Список литературы включает 98 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена актуальность темы исследования, степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи работы, ее научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость, изложены методология и методы исследования, указаны положения, выносимые на защиту, приведены степень достоверности и апробация результатов.

Первая глава диссертации посвящена описанию математических моделей и численного подхода для проведения исследований в рамках сформулированных задач.

В качестве математической модели использовалась система уравнений газодинамики Навье – Стокса для многокомпонентного сжимаемого газа с учетом процессов переноса: вязкости, теплопроводности, диффузии, а также химического превращения, задаваемого согласно выбираемым из литературы механизмам химической кинетики. Численное решение системы уравнений газодинамики проводилось с использованием модифицированного лагранжево-эйлерова метода, имеющего первый порядок точности по времени и второй порядок точности по пространству.

Особенность рассматриваемых задач, заключающаяся в выяснении влияния состава горючей смеси на возникновение качественно различных режимов горения и воспламенения, а также количественном определении составов, обеспечивающих необходимые характеристики протекания горения, и условий для самовоспламенения делает крайне важным проведение проверки используемых моделей для подтверждения достоверности воспроизводимых с их использованием процессов. Горение наиболее полно характеризуется длительностью химического превращения, выражаемой временем индукции и скоростью ламинарного пламени. В связи с этим в ходе валидации и верификации численного подхода проводился расчет этих величин в рамках нульмерной и одномерной постановок, соответственно, с заданием начальных условий, близких к условиям, характерным для основных задач диссертации. Расчеты проводились при повышенных давлениях, в широком диапазоне температур, при задании различной степени обеднения смеси и различных составов: смесей водорода с водяным паром и метаном. Результаты сопоставлялись с экспериментальными данными из литературы, и для рассмотренных условий получено удовлетворительное согласие результатов расчетов и экспериментов.

Из числа моделей, лежащих в основе расчетов, модель химического превращения, состоящая из уравнений для химических реакций и соответствующих данным реакциям величин для расчета констант скоростей реакций, в наибольшей степени определяет кинетику протекания горения, выражаемую, как указывалось выше, временем индукции и скоростью ламинарного пламени. Таким образом, для наиболее достоверного воспроизведения процесса горения в условиях конкретной задачи, проводился выбор модели для соответствующих условий путем расчета указанных величин по нескольким моделям и сопоставления результатов расчетов. В настоящей работе модели, или механизмы химической кинетики, выбирались из литературных источников.

Во второй главе представлено исследование нижнего концентрационного предела воспламенения водородно-воздушной смеси.

Описана практическая значимость проблемы, состоящая в обеспечении безопасного функционирования объектов атомной энергетики, обусловленная возможностью выделения водорода в неконтролируемо больших объемах при

окислении топливных оболочек и последующей разгерметизацией контейнента, в случае чего оказывается необходимым определение минимальной концентрации водорода в его смеси с воздухом, ниже которой невозможно поддержание развития экзотермической реакции горения.

Рассмотрены различные теоретические подходы к определению понятия нижнего концентрационного предела воспламенения, представленные в литературе, а также экспериментальные методы его определения. Вопрос об определении фундаментального концентрационного предела воспламенения водорода, как и других горючих, является до сих пор открытым. Существенно более разработанными являются задачи определения концентрационных пределов воспламенения и распространения пламени в камерах заданных конфигураций, содержащих потенциально воспламеняемую смесь [1,2].

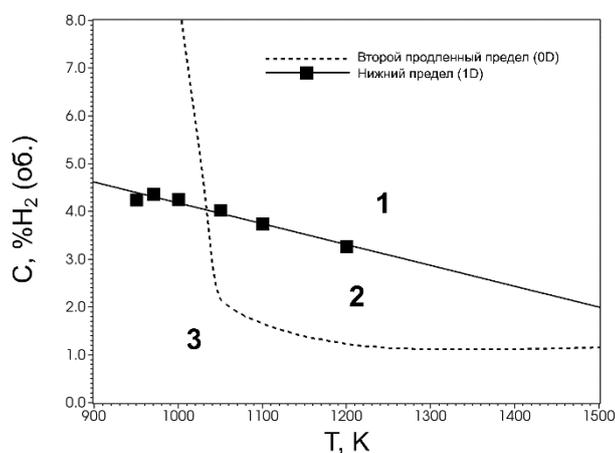


Рис. 1. Нижний концентрационный предел, определенный в рамках нульмерного и одномерного приближений, в зависимости от температуры поджига.

1 – область условий для воспламенения, устойчивого к газодинамическим возмущениям, 2 – область условий неустойчивого воспламенения, 3 – условия для отсутствия воспламенения.

Оценка нижнего концентрационного предела воспламенения проводилась первоначально в нульмерном приближении – на основе совместного решения системы уравнений химической кинетики и уравнения для изменения температуры. В рамках такого подхода в диапазоне изменений концентрации и температуры рассчитывалось время индукции и время протекания экзотермической стадии реакции. Равенство этих двух величин определяло с учетом задаваемого начального давления 1 атм так называемый “продленный второй предел воспламенения”, характеризующий пограничное состояние смеси, способной к воспламенению. Обнаружено, что при достаточно высоких температурах поджига, от 1100 К, предельная концентрация для наличия воспламенения составляет около 1% содержания H₂ по объему (рис. 1), что существенно ниже неоднократно определенного в экспериментальных работах значения 4% H₂, об.

На основе полученных данных представилось целесообразным провести определение нижнего концентрационного предела в постановке, более приближенной к реальным условиям, – с учетом газодинамических процессов. Предложен одномерный подход, основанный на теории о спонтанной волне горения Я.Б. Зельдовича, в рамках которого в начальный момент времени в одномерной области при некоторой фоновой температуре и давлении задается линейный градиент концентрации водорода. В соответствии с выбранной постановкой самовоспламенение наступает по прошествии времени индукции в области с максимальной концентрацией. Далее происходит образование волны горения, распространяющейся в область с минимальной концентрацией. Помимо этого, формируются тепловая волна и волна сжатия, изначально поддерживаемые исключительно волной горения, но впоследствии по мере достижения фронтом волны горения областей со все более низкой концентрацией водорода, эти волны опережают волну горения, что указывает на смену режима распространения волны горения. Роль кинетики горения снижается, и далее энергия и импульс переносятся в пространстве исключительно за счет газодинамики. Таким образом, оказывается возможным определить минимальную концентрацию водорода, предельную для устойчивого распространения волны горения. Найденные величины для разных температур поджига составляют около 4% H₂, об. (рис. 1).

В завершении главы 2 приведено исследование по оценке предельной концентрации водорода, необходимой для стабильного распространения волны горения на любое расстояние от зоны инициирования горения. В случае однородного распределения концентрации предельное значение составляет около 10% H₂, об., что находится в согласии с известными экспериментальными данными. При задании неоднородного поля концентрации: небольшой области с однородной концентрацией от 4 до 10% и прилегающей области с нарастанием концентрации до 15%, по мере приближения волны реакции к области с большей концентрацией наблюдается постепенное развитие и установление стабильного распространения пламени. Данный результат имеет существенное практическое значение, поскольку показывает, что развитие пламени может происходить из области с концентрацией водорода ниже принятого значения 10%.

Третья глава диссертации посвящена исследованию механизма самовоспламенения водорода при его истечении под высоким давлением в канал, заполненный воздухом.

В главе приведен обзор по современному состоянию проблемы и основным представленным в литературе экспериментальным и расчетно-теоретическим результатам. Процесс самовоспламенения водорода при его истечении из камеры высокого давления подробно исследуется, экспериментально и теоретически, начиная с работы [3]. К настоящему времени достаточно подробно исследованы

критерии самовоспламенения по давлению [4-6], диаметру отверстия [5,6], геометрии камеры низкого давления [5]. Методами численного моделирования получено описание процесса, в основном, при высоких, свыше 100 атм, давлениях [4,7]. В настоящей диссертационной работе, основанной на выполненных в ОИВТ РАН экспериментах [6], анализируется влияние времени раскрытия диафрагмы на динамику, перемешивание и образование смеси, способной к воспламенению. Исследуются давления ниже 100 атм, поскольку представляет отдельный интерес определение критического давления, обеспечивающего отсутствие самовоспламенения водорода, что необходимо для его безопасного использования.

Описана постановка решаемой в настоящей работе задачи, основанная на экспериментах [6]. Процесс истечения исследовался при относительно невысоких давлениях, около 60 атм, при этом учитывался немгновенный выход водорода в канал низкого давления путем задания конечного времени раскрытия диафрагмы, разделяющей каналы высокого и низкого давлений. В рамках проведенного исследования время раскрытия выбиралось согласно экспериментально зарегистрированным временам ~ 20 мкс [6]. На стенках учитывалось торможение потока в виде условия прилипания.

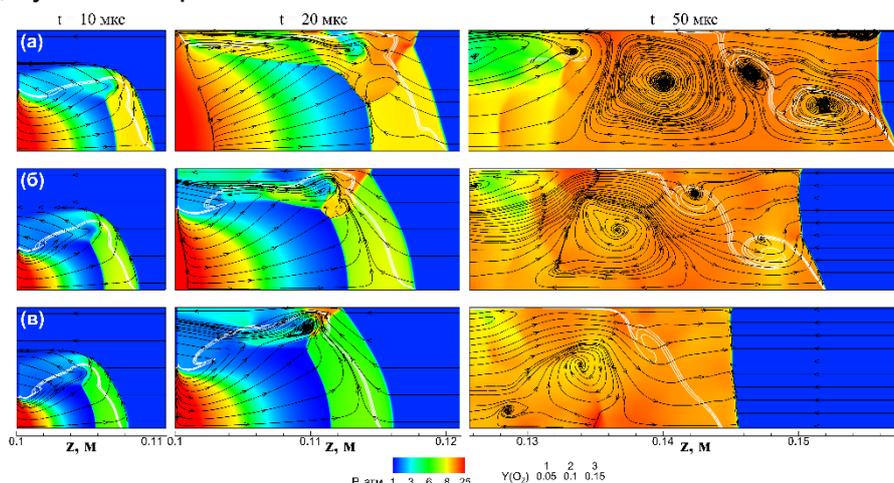


Рис. 2. Поля течений, давления и контуры мольной доли кислорода (белые линии) в струях, формирующихся при разных временах τ раскрытия диафрагмы: (а) $\tau = 20$ мкс, (б) $\tau = 30$ мкс, (в) $\tau = 40$ мкс. В вариантах, соответствующих каждому τ , рисунки, расположенные слева направо, соответствуют моментам времени $t = 10; 20; 50$ мкс.

Самовоспламенение в расчетах наблюдалось при давлении 60 атм и временах раскрытия не больше 30 мкс, а при давлении 50 атм самовоспламенение отсутствовало, что позволило считать давление 60 атм при заданной геометрии канала (диаметр 18 мм, длина 80 мм) предельным для возникновения самовоспламенения. Возникновение самовоспламенения происходило у стенки канала, при этом для наименьшего задаваемого времени раскрытия 20 мкс наблюдалось образование двух очагов, различных по механизму возникновения и

времени существования. Указанные результаты согласуются с экспериментами [6], а также с недавними экспериментальными работами [8].

Анализ развития струи водорода, основанный на сопоставлении процессов при различных временах раскрытия (рис. 2), позволил выявить особенности формирования условий самовоспламенения. Распространение течений в струе при конечном времени раскрытия диафрагмы происходит в радиальном и продольном направлениях. При меньших временах раскрытия струя подходит к боковой стенке, оставаясь практически параллельной ей, обеспечивая тем самым взаимодействие всей боковой поверхности струи с пограничным слоем, что интенсифицирует перемешивание водорода с воздухом в области подхода струи. За счет вязких напряжений, а также действия переотраженных ударных волн в этой области происходит нагрев перемешивающейся смеси и имеет место воспламенение. Однако, возникший очаг по мере продвижения струи к выходу из канала затухает из-за отсутствия доступа окислителя к области его инициирования. Второй очаг возникает на контактной поверхности водорода и разогретого за передней ударной волной воздуха в области большего опережения ударной волной контактной границы – вблизи стенки канала. Разность скоростей в головной части струи и на стенке канала обуславливает большую площадь контактной поверхности, что в свою очередь способствует росту сдвиговых неустойчивостей контактной поверхности и формированию вихревых течений, служащих основным средством перемешивания нагретого воздуха с водородом, поступающих в область очага. Непрерывная подача перемешанной смеси обеспечивает устойчивое развитие очага и приводит к выходу данного очага из канала.

В четвертой главе рассмотрена задача подавления детонационных режимов горения в двигателе с искровым зажиганием за счет использования малых добавок низкоактивных компонент к водороду.

Изложена концепция использования газообразного водорода, вырабатываемого в результате электролиза воды за счет энергии возобновляемых источников, в качестве топлива в двигателях с искровым зажиганием для элементов распределенных энергетических систем, в особенности систем, удаленных от глобальных систем энергоснабжения.

Приведены экспериментальные и теоретические результаты использования смесей с высоким содержанием водорода, в том числе стехиометрических и с добавлением метана, описанные в литературе [9-12]. Основное внимание в данных работах уделяется исследованию развития нештатных режимов горения, таких как стук, обратные вспышки, преждевременное воспламенение, в связи с чем предлагаются соответствующие регулировки параметров работы двигателя, например, угла опережения зажигания, степени сжатия. Кроме того, подробно исследуются вопросы эффективности топлива на основе водорода, проводимые, в

частности, в ходе сравнения показателей работы двигателя на данном виде топлива и на традиционных топливах. В настоящей работе ввиду предположения о выработке водорода от возобновляемых источников ограничения на объем используемого водорода не накладываются, поэтому рассматриваются составы, близкие к стехиометрии. Таким образом, вопросы эффективности в проводимом исследовании являются второстепенными в сравнении с необходимостью обеспечения штатных режимов работы двигателя посредством приготовления определенных составов.

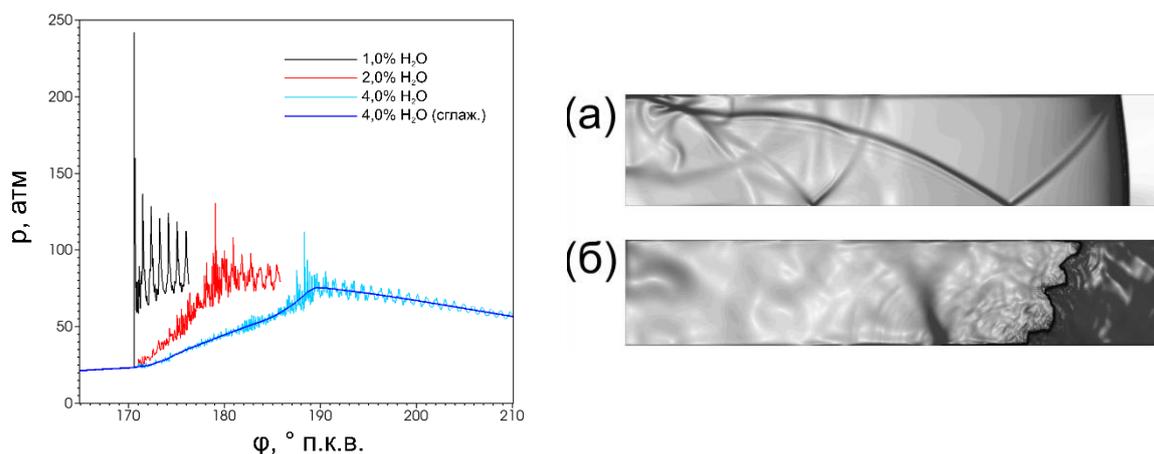


Рис. 3. (слева) Индикаторные диаграммы для смесей H₂ с добавлением водяного пара.

Рис. 4. (справа) Поле градиента плотности, показывающее особенности течения под движущимся поршнем (а) при детонации смеси с добавлением 1,0% H₂O, (б) при горении смеси с добавлением 2,0% H₂O. (нижняя граница – поверхность поршня; верхняя граница – дно цилиндра; правая граница – внешняя стенка цилиндра; левая граница – ось симметрии)

Представлена постановка задачи об определении составов смесей на основе водорода, обеспечивающих оптимальную работу двигателя. В качестве базового состава топливно-воздушной смеси выбрана стехиометрическая смесь водорода с воздухом (29,5% H₂, об. – 70,5% воздух). Добавление низкоактивных компонент, в качестве которых были выбраны метан, водяной пар, избыток воздуха, осуществлялось в виде замещения некоторого объема водорода в стехиометрической смеси объемами этих компонент. Основные параметры двигателя: 11,4 степень сжатия, 1500 об/мин угловая скорость вращения коленчатого вала. Выявлено существование детонационного режима горения (рис. 3, 4) для стехиометрической смеси и смесей с добавлением до 1,0% метана / 2,0% водяного пара / 3,0% избытка воздуха (соответствующий коэффициент избытка воздуха $\lambda=1,2$). Для смесей с большим содержанием указанных компонент имело место дефлаграционное сгорание, причем при повышении содержания добавок происходило постепенное устранение высокоамплитудных скачков давления, что видно из соответствующих индикаторных диаграмм (рис. 3).

Анализ эффективности работы двигателя при использовании составов с большим по отношению к указанным предельно допустимым содержанием компонент проводился на основе определения следующих показателей работы двигателя:

максимального давления p_{max} и угла поворота коленчатого вала (п.к.в.), соответствующего достижению p_{max} . При повышении содержания низкоактивных компонент наблюдалось закономерное уменьшение p_{max} и рост угла п.к.в. при p_{max} ; допустимыми же для долгосрочной работы двигателя являются рекомендуемые в различных источниках уровни максимального давления от 80 до 50 атм, а угол п.к.в. при p_{max} не должен превышать около 20° п.к.в. после верхней мертвой точки (ВМТ) ввиду понижения полезной работы и КПД двигателя при больших значениях данного угла. В таблице 1 приведены составы, отвечающие задаваемым условиям по p_{max} и углу п.к.в. при p_{max} . Изменение рассматриваемых показателей работы двигателя наиболее резко происходит при использовании в качестве добавки метана, наименее резко – при использовании избытка воздуха, что объясняется выбранным способом формирования смесей, при котором содержание воздуха фиксировано, 70,5%. Добавление метана приводит к тому, что смесь становится более богатой ($\lambda < 1$), поскольку для сгорания метана требуется больше окислителя, чем для водорода. Кроме того, сопоставление длительности химического превращения, выражаемое скоростью ламинарного пламени, показывает, что одинаковые скорости достигаются при значительно более высоком содержании воздуха в бедной водородно-воздушной смеси, чем в смеси водород-метан-воздух при содержании воздуха 70,5% в последней и варьировании содержания метана.

Таблица 1

Составы смесей, обеспечивающие максимальные давления, не превышающие рекомендуемых допустимых значений и соответствующие им углы п.к.в., отсчитываемые от положения ВМТ

	% CH ₄ % H ₂	φ	% H ₂ O % H ₂	φ	% изб. возд. % H ₂	φ
$p_{max} < 80$ атм	2,7 26,8	$12,4^\circ$	3,1 26,4	5°	4,2 25,3	$4,5^\circ$
$p_{max} < 60$ атм	3,2 26,3	25°	6,0 23,5	24°	7,5 22,0	22°
$p_{max} < 50$ атм	3,4 26,1	40°	6,3 23,2	33°	8,3 21,2	31°
$\varphi (p_{max}) < 20^\circ$ п.к.в.	3,0 26,5		5,4 24,1		7,5 22,2	

В главе приведено сопоставление расчетов, выполненных в постановке проведенных в ОИВТ РАН экспериментальных исследований при использовании в качестве топлива бедных водородно-воздушных смесей. Степень сжатия и угловая скорость вращения коленчатого вала двигателя в экспериментах составляли те же значения, что и в выполненных расчетах (11,4; 1500 об/мин). Удовлетворительное согласие экспериментальных и рассчитанных индикаторных диаграмм при $\lambda=1,5$

подтверждает достоверность представленных выше количественных результатов. В экспериментах начиная с $\lambda=1,4$ наблюдались “обратные вспышки” во впускном коллекторе, детонационные же режимы не наблюдались, что дополнительно подтверждает достоверность полученного предельного значения $\lambda=1,2$ при использовании избытка воздуха в качестве низкоактивной добавки.

В **заключении** диссертации сформулированы следующие основные выводы проведенных исследований:

- Определены значения нижнего концентрационного предела воспламенения водородно-воздушной смеси: (1) на основе анализа длительности эндо- и экзотермических стадий химического превращения, (2) с учетом развития газодинамических возмущений, инициированных протеканием экзотермических реакций при воспламенении, (3) с учетом условия устойчивого распространения волны дефлаграции в смеси однородного состава. Результаты для указанных вариантов составили $\sim 1\%$, $\sim 4\%$, $\sim 10\%$. Показано, что формирование устойчивой дефлаграционной волны возможно и при локальной концентрации водорода ниже 10% , в том случае если существует пространственно неоднородное возрастающее поле концентрации. В связи с этим целесообразно на практике использовать значение нижнего концентрационного предела устойчивого воспламенения ($\sim 4\%$).
- Выявлены два типа очагов самовоспламенения водорода при его истечении под относительно невысоким давлением (60 атм) в канал, заполненный воздухом, отличающиеся друг от друга как временем жизни, так и механизмами, инициирующими и поддерживающими горение водородно-воздушной смеси. При этом устойчивость очагов второго типа определяется формированием на боковой поверхности струи водорода вихревых течений, обеспечивающих непрерывную подготовку и подачу водородно-воздушной смеси в область очага горения.
- Получены количественные оценки критического давления водорода и времени раскрытия диафрагмы, необходимых для формирования устойчивого очага горения. Как показало проведенное исследование, для выбранной геометрии канала (диаметр 18 мм, длина 80 мм) самовоспламенение не может происходить при давлениях ниже 60 атм, а при давлении в 60 атм – при временах раскрытия диафрагмы больших 30 мкс. Давление 60 атм, таким образом, составляет нижнюю границу самовозгорания водорода для конкретной частной геометрии канала.
- Продемонстрировано подавление детонационных режимов сгорания оклостехиометрических смесей на основе водорода в двигателе с искровым зажиганием со степенью сжатия $11,4$ за счет использования малых в объемном соотношении добавок низкоактивных компонент: метана – $1,0\%$, водяного пара – $2,0\%$, избытка воздуха – $3,0\%$, при заданном способе формирования составов смесей, при котором содержание воздуха составляло фиксированное значение $70,5\%$.

- Получены зависимости основных параметров работы двигателя с заданными характеристиками при использовании составов с содержаниями добавок, большими определенных критических значений, при заданном способе формирования составов смесей. Наиболее сильная зависимость выявлена при использовании в качестве добавки метана. Определены составы, обеспечивающие параметры работы двигателя, оптимальные для достижения высоких КПД.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Hansen, O.R.* CFD-based risk assessment for hydrogen applications / *O.R. Hansen, P. Middha* // *Process Safety Progress*. 2008. Vol. 27(1). P. 29-34.
2. *Ren, S.* Influence of concentration distribution of hydrogen in air on measured flammability limits / *S. Ren, Q. Zhang* // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2015. Vol. 34. P. 82-91.
3. *Wolanski, P.* Investigation into the mechanism of the diffusion ignition of a combustible gas flowing into an oxidizing atmosphere / *P. Wolanski, S. Wojcicki* // *Proceedings of the Combustion Institute*. 1973. Vol. 14. P. 1217-1223.
4. Numerical study on the spontaneous-ignition features of high-pressure hydrogen released through a tube with burst conditions / *Lee H.J., Park J.H., Kim S.D.* et al. // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2015. Vol. 35. P. 2173-2180.
5. An experimental study on shock waves and spontaneous ignition produced by pressurized hydrogen release through a tube into atmosphere / *Duan Q.L., Xiao H.H., Gao W.* et al. // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. Vol. 40(25). P. 8281-8289.
6. *Golovastov, S.* The influence of diaphragm rupture rate on spontaneous self-ignition of pressurized hydrogen: Experimental investigation / *S. Golovastov, V. Bocharnikov* // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. Vol. 37(14). P. 10956-10962.
7. Effects of initial diaphragm shape on spontaneous ignition of high-pressure hydrogen in a two-dimensional duct / *Terashima H., Koshi M., Miwada C.* et al. // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014. Vol. 39(11). P. 6013-6023.
8. Study on self-ignition of high pressurize hydrogen released by rupture disk with various open area / *H.J. Lee, S.Y. Lee, H. Yoon, M.C. Jeong, I.S. Jeung* // *36th International Symposium on Combustion*. 2016.
9. Experimental study of the performance and emission characteristics of an adapted commercial four-cylinder spark ignition engine running on hydrogen-methane mixtures / *Dieguez P.M., Urroz J.C., Marcelino-Sadaba S.* et al. // *Applied Energy*. 2014. Vol. 113. P. 1068-1076.

10. Combustion analysis of a spark ignition engine fueled with gaseous blends containing hydrogen / *Moreno F., Arroyo J., Munoz M., Monne C.* // International Journal of Hydrogen Energy. 2012. Vol. 37. P. 13564-13573.
11. *Verhelst, S.* Hydrogen-fueled internal combustion engines / *S. Verhelst, T. Wallner* // Progress in energy and combustion science. 2009. Vol. 35. P. 490-527.
12. Comparison of the renewable transportation fuels, hydrogen and methanol formed from hydrogen, with gasoline – Engine efficiency study / *Vancoillie J., Demuynck J., Sileghem L.* et al. // International Journal of Hydrogen Energy. 2012. Vol. 37. P. 9914-9924.

**ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ
В ЖУРНАЛАХ ИЗ ПЕРЕЧНЯ ВАК**

- I. Об использовании водорода в качестве топлива для двигателей в энергетическом цикле удаленных производственных объектов / *Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Смыгалина А.Е., Зайченко В.М.* // ЖТФ. 2018. № 88(1). С. 147-150.
- II. Mechanism of self-ignition of pressurized hydrogen flowing into the channel through rupturing diaphragm / *Ivanov M.F., Kiverin A.D., Smygalina A.E., Golub V.V., Golovastov S.V.* // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42(16). P. 11902-11910.
- III. Горение смесей на основе водорода в газопоршневом двигателе / *Смыгалина А.Е., Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Зайченко В.М.* // Известия РАН. Энергетика. 2015. № 2. С. 120-130.
- IV. *Иванов, М.Ф.* Воспламенение водородно-воздушной смеси вблизи нижнего концентрационного предела / *М.Ф. Иванов, А.Д. Киверин, А.Е. Смыгалина* // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». 2013. № 1(48). С. 89-108.

Смыгалина Анна Евгеньевна

**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ГОРЮЧИХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ВОДОРОДА НА РЕЖИМЫ
ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ**

Автореферат

Подписано в печать		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л.	Усл.-печ.л.
Тираж 100 экз.	Заказ N	Бесплатно

ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2