

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Якуша Сергея Евгеньевича  
на диссертацию Мельниковой Ксении Сергеевны  
«Горение ультра-бедных составов водородно-воздушных смесей на больших  
пространственных масштабах», представленной на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 –теплофизика и  
теоретическая теплотехника

Диссертационная работа Мельниковой К.С. посвящена решению задач численного моделирования нестационарных пламен водородовоздушных смесей в условиях существенного влияния силы тяжести и при низких концентрациях горючего газа в смеси. **Актуальность** исследований в этой области во многом продиктована возрастающим интересом к водороду как к экологичному виду топлива, имеющему ряд преимуществ перед традиционными углеводородными горючими (нулевой карбоновый след). Однако уже на современном этапе становятся ясными и значительные трудности перехода к водородной энергетике, обусловленные физико-химическими свойствами водорода и его высокой реакционной способностью. Проблемы безопасности, связанные с водородом, имеют важное значение и в других отраслях, таких, как атомная энергетика, где образование и накопление взрывоопасных водородовоздушных смесей может проходить в ходе тяжелых аварий. Рассматриваемые в диссертации околопредельные (ультра-бедные) смеси представляют большой интерес, поскольку их горение обладает рядом особенностей по сравнению с хорошо изученными случаями горения и детонации стехиометрических смесей. Кроме того, именно такие смеси можно ожидать на стадии начального развития аварий.

В рассматриваемой диссертационной работе методом исследования нестационарных режимов горения ультрабедных смесей водород-воздух служит численное моделирование, выполненное на основе математической модели в приближении малых чисел Маха. Рассмотрены режимы горения в условиях существенного влияния гравитационной конвекции, определены границы их реализации, проведено сравнение результатов моделирования с известными экспериментальными данными.

**Структура** диссертационной работы является достаточно общепринятой. Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, а также список литературы из 128 наименований. Работа изложена на 109 страницах машинописного текста, хорошо иллюстрирована, содержит 28 рисунков.

Во **введении** обоснована актуальность темы и необходимость проведения исследований для ультрабедных смесей, сформулированы цели и задачи исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Здесь же рассмотрена методология исследования, положения, выносимые на защиту, описан личный вклад автора.

В **первой главе** сформулирована математическая модель и представлен вычислительный алгоритм ее реализации. Моделирование проводится в двумерной нестационарной постановке, обосновано применение приближение малых чисел Маха вследствие невысоких скоростей горения ультрабедных смесей. Закон сохранения энергии записан относительно энтальпии, для аппроксимации зависимостей теплоемкости компонент от температуры используются табличные данные. Коэффициенты переноса находятся по стандартным соотношениям молекулярно-кинетической теории, при этом

используются средние по смеси коэффициенты диффузии. Для описания горения водорода используется детальная кинетическая схема, содержащая 21 обратимую реакцию для 8 компонент (вплоть до  $\text{H}_2\text{O}_2$ ). В целом принятый подход и метод его численной реализации соответствуют современному уровню вычислительных моделей медленного горения,

**Вторая глава** посвящена изложению результатов численного моделирования горения ультра-бедных составов водородно-воздушных смесей. Глава содержит обзор литературы по горению бедных смесей водорода. Проанализирован режим очагового горения, в котором вследствие недостаточной концентрации топлива единый фронт пламени распадается на отдельные очаги, имеющиеся экспериментальные данные, в том числе наблюдения распространения пламен в узких каналах. Собственно содержание главы составляют расчеты формирования и распространения шарика пламени в полуограниченном пространстве, заполненном ультра-бедной водородно-воздушной смесью при нормальных условиях. Рассматривается горение, инициированное как вблизи горизонтальной поверхности, так и в угловой конфигурации. Правильность работы модели и программы продемонстрирована в расчетах нормальной скорости горения обедненных водородно-воздушных смесей. Детально проанализирована трансформация очага горения, всплывающего под действием сил плавучести, включая распад фронта на несколько очагов и их дальнейшее взаимодействие, приводящее к ускоренному движению вторичных очагов.

Важным разделом данной главы является описание экспериментов, проведенных в ОИВТ РАН и проведение соответствующих валидирующих расчетов. Показано, что расчеты воспроизводят характерную двухочаговую конфигурацию, наблюдаемую экспериментально. Обсуждается подобие всплывающего очага при горении ультрабедных смесей и пузырька в жидкости.

В **третьей главе** на основании численных расчетов исследованы пределы горения ультра-бедных водородно-воздушных смесей. Найден нижний концентрационный предел горения водородно-воздушной смеси при нормальных условиях оценен в  $5,25 \pm 0,25\%$  объемного содержания водорода в условиях земной гравитации. Как и предыдущая, глава начинается с обзора литературы по пределам горения водорода. Интересным элементом исследования является сравнение нижнего концентрационного предела распространения пламени в условиях нормальной и микрогравитации. Результаты расчетов хорошо согласуются с известными экспериментальными данными.

Наконец, в **четвертой главе** проводятся аналогии между всплывающими очагами горения ультрабедных смесей и газовыми пузырьками, свободно всплывающими в жидкости. Для этого проведены дополнительные расчеты всплытия пузырька легкого газа в атмосфере, выполненные в предположении несмешивающихся газов. Различные формы наблюдались в расчетах при варьировании начального радиуса пузырька и степени расширения газа, они обобщены на плоскости «число Рейнольдса-число Фруда».

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы работы.

В целом диссертация выполнена на высоком уровне, полученные результаты обладают несомненной **научной новизной**. Среди наиболее важных результатов можно отметить детальный численный анализ нестационарных режимов горения ультрабедных водородовоздушных смесей с распадом фронта горения на отдельные очаги, выявление механизмов проявления неустойчивости и определение нижнего концентрационного предела горения водорода в условиях нормальной и микрогравитации, оригинальное сопоставление конвективных пламен с всплывающими пузырьками газа.

Развитие авторских программных кодов для моделирования горения в условиях конвекции и с учетом детально-кинетических схем свидетельствует о высокой квалификации автора. Не вызывает сомнений и существенный личный вклад автора в проведенные исследования, вошедшие в диссертацию, включая постановку задач, проведение расчетов и анализ результатов.

**Фундаментальное значение** проведенных исследований состоит в изучении тонких механизмов погасания пламени в условиях ультрабедных смесей, для которых невозможно стационарное фронтное горение, выявлении роли вихревых течений в деформации и разрыве единого фронта на отдельные очаги, классификации формы всплывающих очагов в условиях конвекции.

Полученные данные по концентрационным пределам воспламенения имеют несомненное **прикладное значение**, что связано в первую очередь с потребностями в такой информации для оценки опасностей аварийных ситуаций при производстве, хранении и транспортировке водорода, при авариях на АЭС. Кроме того, количественная информация о пределах возгорания водорода может найти применение при проектировании датчиков водорода и систем его рекомбинации. Результаты диссертации могут быть использованы в институтах Российской академии наук, занимающихся проблемами горения и безопасности (ИБРАЭ РАН, ИПМех РАН, ФЦ ХФ РАН, ОИВТ РАН), а также в прикладных организациях в области пожаровзрывобезопасности (ВНИИПО МЧС РФ, Академии ГПС МЧС РФ).

**Достоверность результатов** диссертации подтверждается хорошим соответствием результатов численного моделирования процессов горения 6 % водородовоздушной смеси, с результатами эксперимента, проведенного в ОИВТ РАН (Глава 2). Также расчеты по определению нижнего концентрационного предела распространения горения хорошо согласуются с известными экспериментальными данными (Глава 3). Основные результаты работы достаточно полно изложены в 6 публикациях в ведущих научных изданиях, рекомендованных ВАК. Результаты работы докладывались на российских и международных научных конференциях.

По содержанию диссертации можно высказать следующие **замечания**.

1. В названии главы 2 говорится о моделировании горения ультра-бедных составов водородно-воздушных смесей на больших пространственных масштабах. Представленные в работе ламинарные пламена имеют размер порядка нескольких сантиметров, они несомненно не являются пламенами большого масштаба. На наш взгляд, следовало более точно использовать терминологию.
2. Большинство расчетов в диссертации проведено в плоской двумерной постановке, тогда как при очаговом или искровом зажигании следует ожидать истинно трехмерные, или близкие к осесимметричным пламена. Влияние геометрии задачи отчасти обсуждается в диссертации, где оно указано как одна из возможных причин различий в скорости всплывания очага. Полученные в расчетах пламена, даже после их распада на очаги, выглядят достаточно симметричными, так что оправданным было бы провести сравнительные расчеты в осесимметричном приближении.
3. На стр. 19 энтальпия смеси  $h_s$  неверно названа энтальпией образования, кроме того, указанная величина – это удельная массовая, а не молярная энтальпия.

Высказанные замечания не влияют на высокую положительную оценку диссертационной работы и не снижают общей значимости проведенных исследований. На основании всего вышесказанного можно сделать **закключение** о том, что диссертация «Горение ультра-бедных составов водородно-воздушных смесей на больших пространственных масштабах» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9-11 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., ред.11.09.2021г. а ее автор Мельникова Ксения Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв составил

Директор Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,  
Заведующий лабораторией термогазодинамики и горения  
д.ф.-м.н.



Сергей Евгеньевич Якуш  
«01» апреля 2022 г.

Адрес электронной почты: yakush@ipmnet.ru, тел +7(495)434-34-83

Организация - место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, ИПМех РАН). 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1. <http://www.ipmnet.ru/>

Подпись С.Е. Якуша удостоверяю

Ученый секретарь ИПМех РАН  
к.ф.-м.н.



М.А. Котов

119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1, +7 (495) 434-22-10, kotov@ipmnet.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, ИПМех РАН) 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1. +7 (495) 434-00-17, ipm@ipmnet.ru