

«Утверждаю»

Директор ИБРАЭ РАН

д.ф.-м.н.

« 31 »

Л.В. Матвеев

2022 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Мельниковой Ксении Сергеевны тему  
«Горение ультра-бедных составов водородно-воздушных смесей на  
больших пространственных масштабах»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и  
теоретическая теплотехника

**Актуальность темы работы.** Содержание диссертационной работы Мельниковой Ксении Сергеевны составляет исследование условий воспламенения и горения водородовоздушных смесей при низком содержании водорода. Актуальность работы связана с тем, что такие смеси, создающие опасность взрыва, могут возникать во многих современных производствах: в атомной энергетике (пример - Фукусима), в химических технологиях с получением и использованием водорода, а также в связи с расширяющейся в настоящее время тенденцией использования водорода в качестве экологически чистого энергоносителя. Проектирование и анализ безопасности таких производств требует количественных оценок условий возникновения и последствий горения водорода. Исследование условий горения бедных, околопредельных смесей имеет высокую важность, поскольку этот процесс, хотя и не может сам по себе привести к серьёзным последствиям, может служить инициатором горения и взрыва более богатых и опасных смесей.

**Оценка содержания диссертации и ее завершенности.** В диссертационной работе поставлено и решено несколько конкретных задач.

1. Расчётное исследование горения сверхбедных водородовоздушных смесей, сопоставление расчетных результатов с экспериментальными (глава 2).
2. Расчётное определение нижнего предела распространения горения водородовоздушной смеси с учётом особенностей горения при низком содержании водорода. (глава 3).
3. Детальное исследование механизма развития пламени и классификация режимов горения околопредельных смесей на основе аналогии с всплывающими пузырьками (глава 4).

Важной частью работы является выбор и обоснование физической модели рассматриваемого явления. Этому посвящена глава 1. Скорость реакции и скорости возникающих движений при околопредельных концентрациях водорода малы. Автором вполне разумно и обоснованно выбрано для описания таких движений приближение слабой сжимаемости и численный алгоритм его реализации. Это позволило избежать необходимости разрешать акустические возмущения и проводить расчет с большим временным шагом. Проведен тщательный анализ и выбор схемы химической кинетики, работающей в том числе при низких температурах, а также способов расчёта коэффициентов переноса в многокомпонентных газовых смесях. Разработанная автором на этой основе расчётная программа верифицирована на экспериментальных данных по измерению нормальной скорости фронта пламени в водородовоздушных смесях различного обогащения.

Каждая глава диссертации предваряется весьма подробным, полным и качественным литературным обзором, и это производит хорошее впечатление о квалификации автора.

Расчётным путём подтверждено, что при низкой концентрации водорода (<9%), когда распространение пламени в виде фронта невозможно, горение всё же происходит, но в виде всплывающих нагретых пузырьков. Определяющими процессами здесь являются тепловая конвекция и диффузия водорода в зону горения. Сопоставление расчётных результатов

исследования динамики таких пузырьков с данными специально поставленных в ИВТАН экспериментов показало адекватность созданной автором физической модели и её способность описывать явления, сопутствующие горению сверхбедных смесей.

На основе этой модели автором установлены тонкие детали развития горения в виде всплывающих горячих газовых пузырьков. Как показано автором, существует несколько режимов эволюции таких пламён в зависимости от начальной концентрации водорода в смеси и граничных условий. Впервые расчётным методом установлены причины разрушения пламени в форме квазисферического пузыря и в конечном счёте – прекращения горения в объёме. Установлен и нижний концентрационный предел существования горения в виде всплывающих газовых пузырей.

Эволюция очагов горения в околопредельных смесях в существенной мере определяется конвективными газодинамическими течениями вокруг локально нагретого объёма газа. Поэтому имеется глубокая аналогия между этими очагами и пузырьками легкого газа, всплывающими в тяжёлом. С использованием этой аналогии автором впервые предложена классификация режимов развития квазисферических очагов горения. На плоскости безразмерных чисел Рейнольдса и Фруда выделены области устойчивых и неустойчивых режимов горения.

**Научная новизна.** Представленные в диссертации результаты работы являются новыми. К полученным впервые результатам может быть отнесено определение расчётным путём нижнего концентрационного предела горения ультрабедных водородовоздушных смесей, а также выявление причин прекращения горения при концентрации водорода ниже нижнего предела. Впервые на основании аналогии квазисферических очагов воспламенения и сплывающих пузырей лёгкого газа предложена классификация режимов горения в таких очагах.

**Обоснованность и достоверность научных результатов.** Достоверность полученных результатов обеспечивается тем, что

разработанная автором физическая модель, алгоритм численной реализации верифицированы путем сопоставления расчётных результатов с многочисленными экспериментальными данными по нормальной скорости распространения пламени в водородовоздушных смесях. Об обоснованности представленных результатов говорит также сравнение расчётных данных с данными экспериментов ИВТАН по горению сверхбедных смесей. Выводы автора не вызывают сомнений.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Полученные автором и представленные в диссертации новые результаты, такие как расчётная оценка нижнего концентрационного предела, классификация режимов, представляют практический интерес с точки зрения анализа и обоснования безопасности объектов, на которых возможны утечки и выбросы водорода в атмосферу.

Предложенный в работе подход к моделированию горения околопредельных смесей на основе приближения малой сжимаемости может применяться и для анализа других газодинамических течений с малыми скоростями.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.** Материалы работы могут быть использованы при проектировании и анализе безопасности объектов производства, хранения, транспортировки и использования водорода.

**Апробация работы и публикации.** Материалы диссертации неоднократно докладывались автором и обсуждались на российских и международных конференциях. Содержание диссертации с достаточной полнотой опубликовано в журналах из перечня ВАК Минобрнауки России - 6 статей.

**Личный вклад автора** – разработка физической модели, решение численных задач, анализ полученных результатов представляется решающим.

**Замечания.** 1. Все расчёты выполнены в двумерной плоской (x-y) постановке. Понятно, что трёхмерные расчёты слишком затратны, но в данном случае осесимметричные 2D расчёты (r-z) были бы более адекватны, тем более, что без гравитации стационарное диффузионное горение теоретически возможно только в сферической геометрии, но не в цилиндрической.

2. Термодиффузия в модели не учитывается из-за малости коэффициента термодиффузии, который пропорционален малой мольной доле водорода. Но по крайней мере в бинарной смеси термодиффузия влияет на распределение компонента, доля которого мала.

3. На стр. 22 отсутствует ссылка на источник, откуда взято выражение для коэффициентов переноса в многокомпонентной газовой смеси.

4. В тексте используется на мой взгляд неудачный термин «термодиффузионная неустойчивость». Он создаёт впечатление, что причина неустойчивости есть явление термодиффузии, хотя это не так. Лучше использовать термин «диффузионно-тепловая неустойчивость».

**Заключение.** Работа выполнена на высоком научном уровне, изложена четко и понятно, хорошо оформлена. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

На основании изложенного считаем, что диссертационная работа **Мельниковой Ксении Сергеевны** представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая по научному уровню, новизне, актуальности и практической значимости соответствует требованиям к кандидатским диссертациям, установленным п. 9-11 Положения о порядке присуждения учёных степеней, утвержденным постановлением № 842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г., ред. 11.09.2021г..

Считаем, что автор работы **Мельникова Ксения Сергеевна** заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Отзыв на диссертацию подготовлен на основании заключения, сделанного в результате обсуждения диссертации на заседании Отделения анализа безопасности ядерных энергетических установок (протокол № 3 от 17 марта 2022).

Заведующий отделением  
анализа безопасности ядерных энергетических  
установок ИБРАЭ РАН  
д.т.н.



Киселев Аркадий Евгеньевич

115191, г. Москва,  
Большая Тульская ул., д. 52,  
(495)955-23-24, ksv@ibrae.ac.ru

Отзыв составил зам. заведующего отделением  
анализа безопасности ядерных  
энергетических установок ИБРАЭ РАН  
д.ф.-м.н.



Семёнов Владимир Николаевич.

115191, г. Москва,  
Большая Тульская ул., д. 52,  
(495)955-22-59, sem@ibrae.ac.ru

Подписи В.Н. Семёнова, А.Е. Киселева, удостоверяю  
Ученый секретарь  
ИБРАЭ РАН  
К. Т. Н.



В.Е. Калантаров