

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Мельниковой Ксении Сергеевны

«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.

### 1. Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Мельниковой К.С. посвящена изучению особенностей горения ультра-бедных водородно-воздушных смесей в условиях земной гравитации. В настоящее время вопросы, связанные с особенностями процессов горения водородно-воздушных смесей, привлекают внимание исследователей поскольку такие смеси рассматриваются как перспективные источники энергии для различных отраслей промышленности и энергетики. Высокая химическая активность водорода требует тщательного анализа возможных сценариев развития аварийных ситуаций и разработки эффективных средств пожаротушения и подавления взрыва при проектировании и эксплуатации объектов, на которых возможны случаи выброса и аккумуляции водорода. Используемый автором комплексный подход, включающий в себя детальное математическое моделирование и сопоставление его результатов с экспериментальными данными, позволил на высоком научном уровне определить основные механизмы, определяющие динамику распространения пространственно локализованных очагов горения околопредельных водородно-воздушных смесей. Данные, представленные в диссертационной работе, несомненно **актуальны** и представляют как фундаментальный так и практический интерес.

### 2. Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 128 наименований. Работа изложена на 109 страницах и содержит 28 рисунков.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, освещена степень разработанности темы, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая значимость работы, а также изложены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертации дано подробное описание математической модели, описывающей процессы горения газовых смесей ультра-бедного состава, и численного метода, используемого для решения нестационарной системы уравнений

в частных производных. Основной сложностью при прямом численном моделировании горения горючих смесей является необходимость использования сеток высокого пространственного разрешения для аккуратного описания процессов, протекающих в узкой зоне химической реакции. Кроме того, для более точного воспроизведения количественных характеристик горения необходимо использовать детальные кинетические механизмы окисления водорода, включающие порядка 20 элементарных химических реакций между 8 компонентами. Вышеперечисленные факторы и ограниченность вычислительных ресурсов сужает возможности прямого численного моделирования. В частности, расчет процесса горения водородно-воздушной смеси в трехмерной геометрии возможен лишь в области малого размера. Детальное исследование пространственной структуры пламени и ее эволюции на больших пространственных и временных масштабах возможно только при двухмерной постановке задачи. Так же в первой главе автором обосновывается применимость приближения малой сжимаемости, которое используется в работе.

Во **второй главе** автор в первую очередь подробно освещает степень разработки темы исследования и представляет литературный обзор. Отмечается, что на сегодняшний день, в литературе недостаточно полно описана динамика горения ультра-бедных водородно-воздушных смесей в земных условиях. Далее автор представляет результаты решения задачи о горении ультра-бедной водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 6% по объему. В работе достаточно полно описан механизм распада очага горения на более мелкие за счет влияния газодинамических течений, вызванных естественной конвекцией, которая играет определяющую роль в динамике распространения локализованного очага горения. Приведены зависимости значения скорости восходящего движения очага горения и его радиуса кривизны от времени. Показано, что результаты численного моделирования удовлетворительно воспроизводят результаты эксперимента по горению ультра-бедной 6% водородно-воздушной смеси, проведенного в ОИВТ РАН.

**Третья глава** диссертации посвящена численному определению нижнего концентрационного предела распространения горения в условиях земной гравитации и микрогравитации. Представлен литературный обзор, описывающий факторы, влияющие на значение нижнего концентрационного предела распространения пламени. Автором описан механизм гашения ультра-бедного пламени в условиях земной гравитации, который заключается в воздействии вихревого течения на очаг горения, в результате чего при малой активности смеси возможны случаи разрыва очага горения на более мелкие и их постепенное затухание. Даны количественные оценки нижнего концентрационного предела горения водородно-воздушной смеси в условиях земной гравитации в  $5,25 \pm 0,25\%$ . Показано, что этот результат

находится в хорошем согласии с имеющимися экспериментальными данными и теоретическими оценками. Помимо этого, проведено сравнение динамики пламени и значения бедного концентрационного предела в условиях земной гравитации и микрогравитации, что способствует более глубокому пониманию роли естественной конвекции в исследуемых процессах.

**В четвертой главе** диссертации проведена классификация пространственных структур очагов горения ультра-бедных водородно-воздушных смесей в условиях земной гравитации. Диаграмма режимов горения ультра-бедных водородно-воздушных смесей построена на основе результатов, полученных при решении задачи о всплытии легкого газа в атмосфере тяжелого. Разработанная аналогия “пузырек-пламя” позволила провести классификацию различных режимов горения в околопредельных водородно-воздушных смесях. Автор показал, что существует широкий спектр возможных пространственных структур очагов горения, образующихся при горении ультра-бедных водородно-воздушных смесей. На структуру очага горения, а также на интенсивность горения влияют газодинамические потоки, возникающие в процессе восходящего движения очага горения под действием сил плавучести в условиях земной гравитации. В составах, близких к предельному, газодинамическое растяжение, связанное с вихревыми потоками, образующимися за восходящими продуктами сгорания, может привести к нарушению целостности фронта пламени.

На основе расчетов химически неактивных газовых пузырьков построена диаграмма на плоскости безразмерных чисел Рейнольдса и Фруда, на которой выделены области устойчивого и неустойчивого режимов горения. На основе результатов математического моделирования автор сделал вывод, что к области устойчивого горения можно отнести водородно-воздушные смеси с содержанием водорода более 5 %. К области неустойчивого горения можно отнести смеси с содержанием водорода менее 5 %.

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

### **3. Научная новизна диссертационной работы**

В диссертации впервые, с помощью методов детального численного моделирования, описана динамика горения ультра-бедных водородно-воздушных смесей на больших пространственных масштабах в условиях земной гравитации. Определены основные физические механизмы, влияющие на устойчивость и развитие процесса горения в рассмотренных постановках, выявлена определяющая роль газодинамических течений. Разработан оригинальный подход к классификации

различных режимов горения в околопредельных смесях. На основе расчетов химически неактивных газовых пузырьков автором получена диаграмма на плоскости безразмерных чисел Рейнольдса и Фруда, позволяющая выделить области устойчивого и неустойчивого режимов горения.

#### **4. Теоретическая и практическая значимость полученных результатов**

Теоретическая значимость определяется полученными новыми знаниями в области теории горения, а именно развитии фундаментальных представлений о процессах распространения пространственно локализованных очагов горения ультра-бедных горючих смесей и влиянии естественной конвекции на эти процессы. С практической точки зрения, полученные данные о динамике всплытия очага ультра-бедной смеси могут быть использованы при разработке систем пожаро- и взрывобезопасности при аварийных ситуациях на АЭС, в ходе которых водород, генерируемый в подверженной разрушению реакторной зоне, может накапливаться под куполом контейнента. При этом локальное содержание водорода в атмосфере вблизи нижней части реакторной зоны может соответствовать ультра-бедному составу, близкому к нижнему пределу воспламенения смеси. Результаты, полученные в исследовании, показывают, что нестационарное развитие очага горения и его конвективный перенос в условиях земной гравитации может стать причиной инициирования интенсивного горения в верхней части ограниченного объема, заполненной более богатой и химически активной смесью.

#### **5. Достоверность результатов**

Достоверность результатов подтверждается хорошим соответствием данных численного моделирования результатам экспериментов, проведенных в ОИВТ РАН. Оценка нижнего концентрационного предела распространения горения водородно-воздушной смеси находится в хорошем согласии с экспериментальными данными и данными математического моделирования, известными из литературы. Диссертация написана грамотным научным языком, с использованием общепринятой терминологии.

#### **6. Публикации, и апробация работы**

Основные результаты работы изложены в 6 публикациях в изданиях, индексируемых в базах данных «Web of Science» и рекомендованных ВАК, из них 3 в журналах Q1-Q3. Публикации в полной мере отражают все представленные в диссертации материалы. Результаты работы докладывались на ведущих российских и международных научных конференциях.

### **В качестве замечаний стоит отметить:**

1. В ряде мест в работе проводятся аналогии и соотнесение полученных результатов с известными из литературы результатами о “шариках пламени”. Такое сопоставление представляется не вполне корректным, поскольку одним из основных механизмов, определяющих поведение “шарика пламени” являются радиационные теплотери, которые в модели, используемой в диссертации, не учитываются.

2. Радиационные теплотери могут оказывать влияние на концентрационные пределы, однако в работе их влияние не учитывается и не обсуждается. Также не обсуждается обоснованность приближения отсутствия радиационных теплотерь, хотя например приближение малой сжимаемости, вызывающее гораздо меньше вопросов, подробно обосновано.

3. Из работы не ясно, при каких условиях (например, концентрациях водорода) волна горения существует в виде пространственно локализованного очага, а при каких происходит переход к непрерывному фронту пламени.

4. Аналогия “пузырек-пламя”, используемая в главе 4 вызывает ряд вопросов. В частности, каковы границы применимости этой аналогии, например, возможно ли описание перехода от очага горения к непрерывному фронту? Что является аналогом параметра концентрации водорода в данной аналогии?

5. Непонятно почему для снижения вычислительных затрат в работе выбрано использование весьма неочевидной аналогии “пузырек-пламя” вместо, например, проведения расчетов с одно-, двух- стадийной глобальной кинетикой, которые позволили бы получить качественные результаты не прибегая к аналогиям.

6. В работе упоминается влияние энергии источника зажигания на концентрационные пределы, однако численные результаты исследования влияния начальных условий на пределы воспламенения не приводятся.

Тем не менее, отмеченные замечания не влияют на высокую положительную оценку диссертационной работы и не снижают научную и практическую значимость проведенных исследований.

### **Заключение**

Диссертация «Горение ультра-бедных составов водородно-воздушных смесей на больших пространственных масштабах» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая по актуальности, объему, уровню выполнения, новизне результатов и остальным установленным критериям, полностью соответствует 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 официальный оппонент, заведующий лабораторией физико-математического моделирования процессов горения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН) доктор физико-математических наук, Фурсенко Роман Викторович.

«31» марта 2022 г.  Р.В. Фурсенко

Адрес: 630090, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1,  
тел.: 8-(383) 330-42-68, roman.fursenko@gmail.com

Подпись Р.В. Фурсенко и сведения удостоверяю

Ученый секретарь ИТПМ СО РАН,  
к.ф.-м.н.

 С.В. Кратова

Адрес: 630090, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1,  
тел.: 8-(383) 330-42-79, sci\_itam@itam.nsc.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН).

630090, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

8-(383) 330-05-67, info@sbras.ru

