

*На правах рукописи*

**Мельникова Ксения Сергеевна**

**«Горение ультра-бедных составов водородно-воздушных смесей на  
больших пространственных масштабах»**

Специальность 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, зав. лаб. № 15.2 «Вычислительная физика» Объединенного института высоких температур Российской академии наук

Киверин Алексей Дмитриевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, директор, зав. лаб. «Термогазодинамики и горения» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

Якуш Сергей Евгеньевич

доктор физико-математических наук, зав. лаб. «Физико-математического моделирования процессов горения», Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук  
Фурсенко Роман Викторович

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук

Защита состоится “27” апреля 2022 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.193.01 при ФГБУН ОИВТ РАН по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, экспо-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ОИВТ РАН [www.jiht.ru](http://www.jiht.ru)

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2022 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета 24.1.193.01

кандидат физико-математических наук

А.В. Тимофеев

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 2022

Диссертация посвящена исследованию методами численного моделирования процесса распространения пламени в ультра-бедных водородно-воздушных смесях на больших масштабах объемах.

### **Актуальность темы**

На сегодняшний день темы, связанные с особенностями развития горения в водородно-воздушных смесях являются актуальными, с одной стороны, по причине востребованности водородосодержащих газовых смесей в качестве источника энергии для различных отраслей промышленности и энергетики, а с другой стороны, в виду связанных с эксплуатацией водорода вопросов пожаро- и взрывобезопасности. Согласно современной концепции развития альтернативной энергетики, основанной на признанной необходимости переоценки существующей зависимости от ископаемого топлива, водород является одним из наиболее перспективных топлив в виду следующих особенностей: водород самый легкий элемент с самой высокой теплотворной способностью; водород является устойчивым и нетоксичным топливом, и в отличие от нефтепродуктов, природного газа или угля, он является экологически чистым энергоносителем, так как единственным продуктом его экзотермической реакции с кислородом является вода.

Однако, учитывая высокую химическую активность водорода, проектирование и эксплуатация объектов, на которых возможны случаи выброса и аккумуляции водорода, требуют тщательного анализа возможных сценариев развития аварийных ситуаций и разработки средств эффективного подавления взрыва.

### **Цели и задачи работы**

Основной целью диссертации является выявление методами детального численного моделирования механизмов, определяющих распространение горения в ультра-бедных водородно-воздушных газовых смесях. Для достижения цели исследования в работе решались следующие задачи:

1. Выбор математической модели и вычислительного алгоритма для оптимального решения методами численного моделирования задач о развитии горения в ультра-бедных водородно-воздушных смесях.
2. Двухмерное детальное моделирование пламен, распространяющихся под действием гравитационного поля в водородно-воздушных смесях обедненного состава.
3. Исследование влияния концентрации водорода в ультра-бедной водородно-воздушной смеси на устойчивость пламени в условиях земной гравитации и микрогравитации.

4. Сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными данными, полученными в лаборатории физической газовой динамики ОИВТ РАН.
5. Двухмерное моделирование восходящего движения химически неактивных легких газовых пузырьков в более тяжелом окружающем газе для дополнительной интерпретации роли силы Архимеда и конвективных течений в эволюции очагов горения.

### **Научная новизна работы**

Впервые проведено крупномасштабное численное моделирование процесса развития очага ультра-бедного горения в условиях земной гравитации, что позволило рассмотреть развитие физических процессов, определяющих устойчивость горения ультра-бедных смесей в отсутствии влияния внешних границ, и таким образом выделить роль базовых физических механизмов влияющих на устойчивость ультра-бедного очага горения.

Впервые сформулирован механизм распада очага ультра-бедного горения за счет развития конвективного течения на масштабах очага.

Впервые на основе расчетов химически неактивных газовых пузырьков получена классификация различных режимов горения водородно-воздушных смесей с составом близким к нижнему концентрационному пределу. Полученные результаты обобщены в форме диаграммы на плоскости безразмерных чисел Рейнольдса и Фруда, на основе которой выделены области устойчивого и неустойчивого режимов распространения пламени.

**Теоретическая и практическая значимость работы** определяется новыми результатами в области теории горения и взрыва, которые могут быть использованы для исследования задач пожаро- и взрывобезопасности технических систем, использующих в качестве топлива смеси на основе водорода. Предложенный подход к численному исследованию газодинамических течений в приближении малой сжимаемости применим для различных смесей, характеризующихся избытком или недостатком топлива, развитие горения в которых сопровождается газодинамическими процессами малой интенсивности.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Результаты численного моделирования горения ультра-бедных водородно-воздушных смесей в приближении малой сжимаемости.
2. Детальное описание процесса распространения горения в ультра-бедных составах водородно-воздушных смесей в свободном пространстве, в условиях земной гравитации.

3. Механизм развития неустойчивости очагов ультра-бедного горения вблизи нижнего концентрационного предела, в условиях земной гравитации.
4. Результаты количественного определения нижнего концентрационного предела горения водородно-воздушной смеси в свободном пространстве в условиях земной гравитации.
5. Классификация режимов горения, полученная на основе расчетов химически неактивных газовых пузырьков, позволяющая выделить область устойчивого горения ультра-бедных водородно-воздушных смесей в свободном пространстве.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Качественные и количественные оценки, полученные численно, были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными в лаборатории физической газовой динамики ОИВТ РАН, и дали хорошее согласие с экспериментальными данными по динамике очага ультра-бедного горения на крупных масштабах.

Расчеты ультра-бедного горения в условиях микрогравитации и оценка нижнего концентрационного предела находятся в хорошем согласии с известными экспериментальными и расчетно-теоретическими данными.

Количественная оценка нижнего концентрационного предела горения водорода в воздухе находится в хорошем согласии с известными экспериментальными данными.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих научных конференциях: V Минский международный коллоквиум по физике ударных волн, горения и детонации (Минск, Белоруссия, 2017), XXIII- International Conference on Equations of State for Matter (Эльбрус, 2018), 8<sup>th</sup> International Symposium on Nonequilibrium Processes, Plasma, Combustion and Atmospheric Phenomena NEPCAP 2018 (Сочи, 2018), XIX Школа молодых ученых ИБРАЭ РАН (Москва, 2018), XXXIV International conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (Эльбрус, 2019), 27<sup>th</sup> International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (Пекин, Китай, 2019), XV Всероссийский симпозиум по горению и взрыву (Москва, 2020).

### **Личный вклад автора**

Автором диссертации лично выполнена разработка новой методики расчета горения ультра-бедных составов в приближении малых чисел Маха, проведены математическое моделирование и обработка расчетных данных. Автор принимал активное участие в

обсуждении полученных результатов, их интерпретации и написании научных статей по теме исследования.

### **Публикации**

Основные результаты квалификационной работы опубликованы в 11 печатных изданиях, 6 из которых в журналах, рекомендованных ВАК, 5 - в сборниках и трудах конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 109 страниц машинописного текста и 28 рисунков. Список литературы включает 128 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и направления исследований.

**В первой главе** обоснован выбор математической модели и вычислительного алгоритма, используемых для моделирования процессов горения в ультра-бедных водородно-воздушных смесях. Детальное исследование процессов, сопровождающих горение ультра-бедных водородно-воздушных смесей в неограниченном пространстве, указывает на относительно малую интенсивность формирующихся в ходе развития процесса течений. В таком случае целесообразно решать задачу о динамике среды в приближении малой сжимаемости (малых чисел Маха).

Для воспроизведения особенностей развития динамических процессов в реагирующей среде в системе нестационарных уравнений газодинамики [I] учтены вязкость [1,2], теплопроводность [1,2], многокомпонентная диффузия [2] и выделение тепла за счет химических реакций. В работе использовалась современная кинетическая схема горения водородно-воздушной смеси, включающая 21 обратимую элементарную реакцию между 8 компонентами  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $OH$ ,  $HO_2$ ,  $H_2O_2$  [3]. Система уравнений газодинамики в совокупности с табличными уравнениями состояния среды позволили получить решения, содержащие в себе информацию обо всех процессах, сопутствующих явлению распространения горения в реагирующей газовой смеси [VI].

В математическую модель не включались модели подсеточной турбулентности, так как размер вычислительной ячейки позволял разрешать мелкие вихри. Решение системы уравнений выполнялось с помощью алгоритма, предложенного в работе [4].

**Вторая глава** посвящена исследованию особенностей динамики горения ультра-бедного водородно-воздушного пламени. Рассмотрен процесс горения водородно-воздушной смеси с объемным содержанием водорода 6% внутри двухмерной расчетной области 500 мм×300 мм с жесткой непроницаемой стенкой снизу и открытыми граничными условиями сверху и по бокам, моделирующими развитие процесса в неограниченном пространстве, а также в области, ограниченной жесткими непроницаемыми стенками снизу и слева [1]. Размер расчетной ячейки декартовой сетки составлял 0.2 мм, чего оказывается достаточно для корректного воспроизведения характерных масштабов, на которых развивается химическая реакция горения ультра-бедной водородно-воздушной смеси.

На рисунке 1 представлены стадии эволюции шарика пламени в ультра-бедной смеси. Сразу после воспламенения, образуется сферический очаг горения в области воспламенения. На этой ранней стадии процесс определяется в большей степени диффузией водорода из окружающей среды в область реакции, таким образом, очаг горения представляет собой классический шарик пламени, наблюдаемый в условиях микрогравитации [5]. В соответствии с теоретическим анализом подобных задач, устойчивость пламени на начальных стадиях главным образом поддерживается за счет потерь тепла на стенки. В процессе горения очаг расширяется до критических размеров, и основную роль начинает играть подъемная сила, определяющая всплытие горячих продуктов горения в атмосфере непрореагировавшей смеси. С этого момента основным механизмом, влияющим на дальнейшую динамику очага горения, является конвективное всплытие очага в гравитационном поле (рис. 1а).

На рисунке 2 представлена зависимость радиуса кривизны и скорости всплытия основного очага горения с течением времени. Анализ этой зависимости показал, что начальная стадия всплытия шарика пламени характеризуется постоянным значением ускорения ведущей точки очага горения (наивысшая точка на поверхности очага горения).

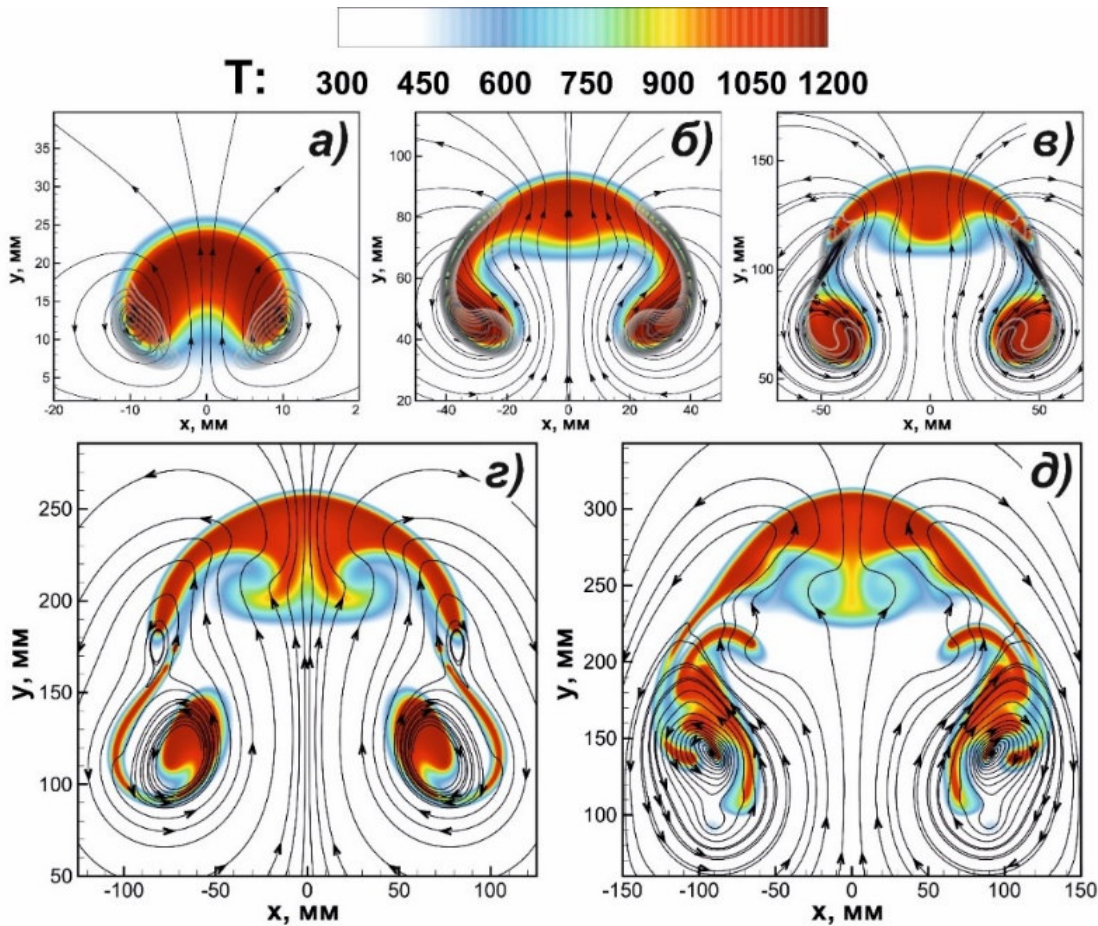


Рисунок 1. Эволюция структуры ультра-бедного водородно-воздушного пламени. а – 100 мс, б – 350 мс, в – 500 мс, г – 800 мс, д – 950 мс. Цветом показано поле температуры [I]

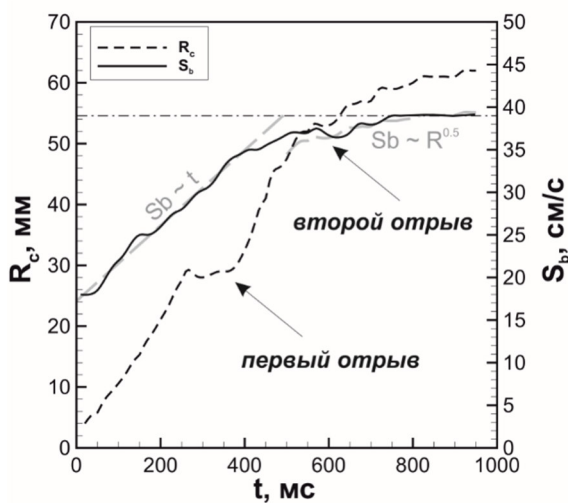


Рисунок 2. Зависимость радиуса кривизны и скорости всплытия основного очага горения с течением времени. Теоретическое значение скорости всплытия газового пузыря в ограниченном пространстве 38,9 см/с (отмечено пунктиром) при радиусе кривизны 62 мм [I].

Вследствие наличия вихревых потоков, пламя растягивается, что приводит к формированию характерной шапкообразной формы очага горения (рис. 1б). Подобно



всплывающему пузырю с малым значением поверхностного натяжения, шапкообразная структура очага не является устойчивой. Боковая поверхность очага горения подвержена воздействию сдвиговых течений, что ведет к её локальному растяжению и разрыву, в результате этого от основного очага отрываются два дополнительных вторичных очага горения (рис. 1 б,в). По сравнению с динамикой газовых пузырей в жидкости, где пузыри не меняются в размерах, дополнительные очаги горения ультра-бедной водородно-воздушной смеси представляют собою активные зоны горения, становясь крупнее при потреблении свежей смеси [I].

После отрыва дополнительных очагов горения, наблюдается снижение темпа ускорения основного очага горения (рис.2). Стадия линейного роста, которая наблюдалась на ранней стадии процесса и до 400 мс, сменяется нелинейной стадией, которая характеризуется следующими друг за другом отрывами вторичных очагов.

Анализ представленных результатов показывает, что после первого отрыва очага радиус кривизны становится постоянным для короткого периода времени, приводя к временному замедлению роста скорости (рис.2). После отрыва, очаг горения представляет собой линзообразный шарик пламени, который развивается аналогично шарика пламени на начальной стадии.

Согласно рисунку 2 вскоре после второго отрыва наблюдается стагнация скорости пламени, скорость всплытия очага горения при этом больше не зависит от последующих отрывов отделенных горящих очагов с поверхности основного и от взаимодействия с ними. К этому времени, основной очаг горения принимает линзообразную форму с почти постоянным радиусом кривизны вблизи оси симметрии.

Качественные и количественные оценки, полученные численно, были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными в лаборатории физической газовой динамики ОИВТ РАН. Эксперименты по развитию очагов ультра-бедного горения в больших объемах были проведены на двух экспериментальных установках: лабораторном стенде и в цилиндрической стальной камере ВБК-2 [II,III].

На рисунке 3 и 4 представлены результаты измерения скорости всплытия и радиуса кривизны очага с течением времени. Сравнение результатов эксперимента и численного моделирования показывает качественное совпадение характерных особенностей эволюции очага горения в ультра-бедной водородно-воздушной смеси. Однако, существуют некоторые количественные различия в динамике восходящего шарика пламени. Разница между значениями скорости подъема, полученными в эксперименте и расчете, связана с тем, что математическое моделирование проводилось в двухмерной плоской постановке.

По причине того, что плотность газа претерпевает скачок на поверхности очага, движение шарика пламени может быть качественно описано, с помощью теории всплывающего газового пузыря в ограниченном пространстве. Теоретический анализ динамики замкнутых пузырей показал, что переходная динамика замкнутого пузырька может быть описана через соотношение для скорости подъема пузырька  $u = Fr \sqrt{gR} \tanh(\delta \sqrt{g/R_0 t})$ , где  $Fr$  - число Фруда, определяющее отношение сил инерции к силе тяжести,  $R_0$  – начальный радиус пузыря,  $\delta$  - размерность системы ( $\delta=2$  для двухмерных пузырей,  $\delta=3$  для трехмерных пузырей) [6]. Поскольку сила инерции пропорциональна площади поверхности пузырька, а сила плавучести пропорциональна объему пузырька, число Фруда можно оценить из геометрических соображений как  $Fr = \frac{\delta - 1}{\delta}$ . Таким образом, для трехмерных пузырьков с одинаковым радиусом кривизны конечная скорость всплытия больше в  $Fr_{3D}/Fr_{2D} = 4/3$  раз. При горении ультра-бедной смеси установившийся радиус кривизны очага горения в двухмерной и трехмерной постановках также оказывается различным. Таким образом, конечная скорость всплытия в реальном эксперименте больше в  $Fr_{3D} \sqrt{R_{t3D}} / (Fr_{2D} \sqrt{R_{t2D}}) \approx 1.5$  раза.

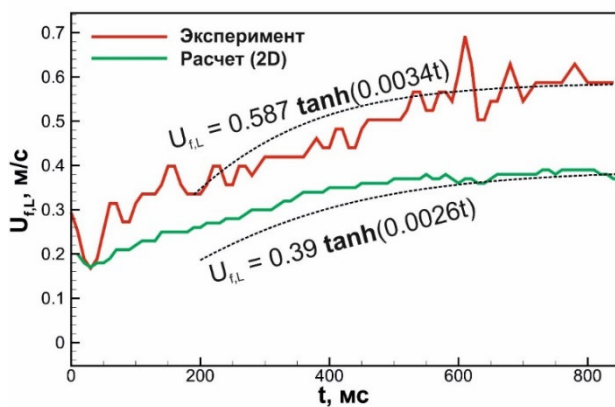


Рисунок 3. Зависимость скорости верхней точки очага горения, измеренная в эксперименте (красная сплошная линия) и полученная из расчета (зеленая сплошная линия). Пунктирные линии соответствуют закону аппроксимации зависимости скорости от времени, применимому к

переходной стадии подъема газового пузыря в жидкости [III].

Временная зависимость радиуса кривизны поверхности пламени вблизи высшей точки представлена на рисунке 4. Немонотонное поведение радиуса кривизны пламени связано с явлениями разрушения очага горения, которые приводят к временному замедлению роста радиуса кривизны.

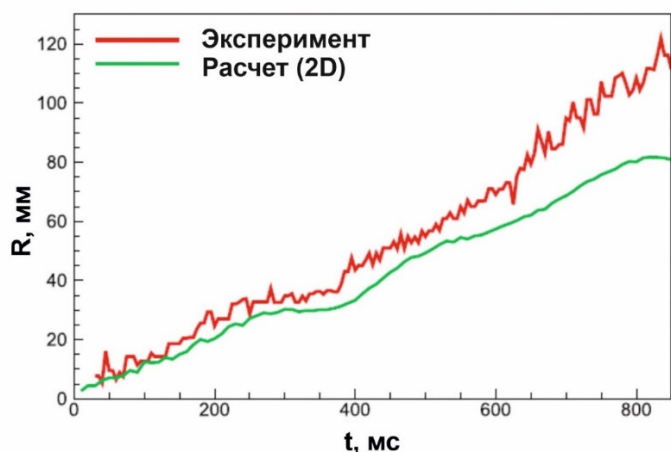


Рисунок 4. Изменение во времени радиуса кривизны очага горения вблизи верхней точки очага [III].

**В третьей главе** представлены результаты исследования пределов горения ультра-бедного водородно-воздушного пламени [V]. Для количественного определения пределов существования горения в водородно-воздушных смесях были проведены вычислительные эксперименты для смесей с объемным содержанием водорода 3-10 %. В рамках проведенного исследования показано, что устойчивость очага горения, развивающегося в ультра-бедных водородно-воздушных смесях, определяет широкий спектр физических факторов. Горение в форме стационарного сферического шарика пламени, в условиях микрогравитации, может быть устойчивым даже в смесях с меньшим содержанием водорода, чем нижний концентрационный предел для свободно распространяющегося пламени. Согласно полученным результатам, устойчивое ультра-бедное горение смесей с содержанием водорода менее 9 % по объему, может быть получено в условиях земной гравитации, где устойчивость очагов горения, главным образом, определяется конвективным движением, устанавливающимся уже на начальной стадии развития процесса. Конвективные потоки газовой смеси в форме вихревых структур взаимодействуют с очагом горения и определяют растяжение поверхности пламени. Этот эффект становится причиной локального разрыва поверхности пламени и дальнейшего его погасания. В результате, концентрационные пределы устойчивого горения в условиях микрогравитации -  $3,45 \pm 0,05\%$ , в условиях земной гравитации  $5,25 \pm 0,25\%$ , что согласуется с результатами экспериментов, приведенными в [7-9].

**В четвертой главе** построена классификация возможных путей развития горения ультра-бедных водородно-воздушных смесей [IV]. Результаты, представленные в работе, показали, что даже небольшое изменение (менее 1 %) концентрации водорода в смеси, приводит к существенному различию в структурах ультра-бедного пламени. Поэтому, для построения диаграммы режимов развития очагов ультра-бедного горения была решена вспомогательная задача для инертной среды о всплытии легкого газа в атмосфере тяжелого.

На основе результатов, полученных для химически неактивных газовых пузырей, построена диаграмма на плоскости безразмерных чисел Рейнольдса и Фруда, а также выделена область устойчивого распространения горения. Траектории развития очагов горения на плоскости чисел Рейнольдса и Фруда отмечены стрелками на рисунке 5, и эти траектории не являются линейными. Анализ диаграммы показал, что траектории пламени стремятся к двум пределам. Первый предел соответствует низкому значению числа Фруда,  $Fr < 1$  и высокому значению числа Рейнольдса. Вторым пределом характеризуется высоким значением числа Фруда  $Fr > 1$  и низким значением числа Рейнольдса.

Низкое значение числа Фруда  $Fr < 1$  характерно для устойчивых режимов развития очагов пламени, невосприимчивых к развитию неустойчивости Рэлея-Тейлора в условиях земной гравитации. Было показано, что многоочаговая структура пламени водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 5,5% и шапкообразный очаг с содержанием водорода 6,0% не подвержены влиянию неустойчивости Рэлея-Тейлора. Для такого типа ультра-бедного пламени эффективная площадь горения увеличивается вместе со скоростью всплытия, а скорость всплытия увеличивается медленнее или с тем же приращением, что и квадрат площади продуктов сгорания. С другой стороны, вторым пределом, характеризующимся высоким  $Fr$  и низким  $Re$ , относятся к пламенам в более бедных составах, характеризующихся структурами с небольшими очагами (5,0%  $H_2$ -воздух и 4,5%  $H_2$ -воздух с  $R_0 = 2$  мм). В таком пламени конвективные потоки вызывают сильный эффект гашения горения. При этом наблюдается уменьшение эффективной площади пламени после каждого случая разрушения поверхности очага горения. Таким образом, эквивалентный радиус пламени быстро уменьшается, а число Фруда увеличивается. Интересно отметить, что процесс горения в водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 5,5% имеет петлю на траектории на плоскости чисел Рейнольдса и Фруда. Траектория входит в область с возможностью разрыва пламени из-за неустойчивости Рэлея-Тейлора. Такое поведение отражает формирование многоочаговой структуры на начальных этапах развития пламени, во время которых эффект конвективного гашения проявляется наиболее сильно, а эффективная площадь горения существенно уменьшается. После первого разрыва поверхности очага он восстанавливается и продолжает распространяться. Следует отметить, что скорость подъема очага горения определяется степенью расширения продуктов горения, которая практически постоянна в рассматриваемом диапазоне содержания водорода. Таким образом, именно скорость горения и способность противостоять конвективному охлаждению во время растяжения и разрушения очага определяют различие траекторий в плоскости чисел  $Re$  и  $Fr$  для разных смесей. Этим

объясняется смещение предела воспламенения с увеличением начального радиуса зоны воспламенения  $R_{0,b}$ .

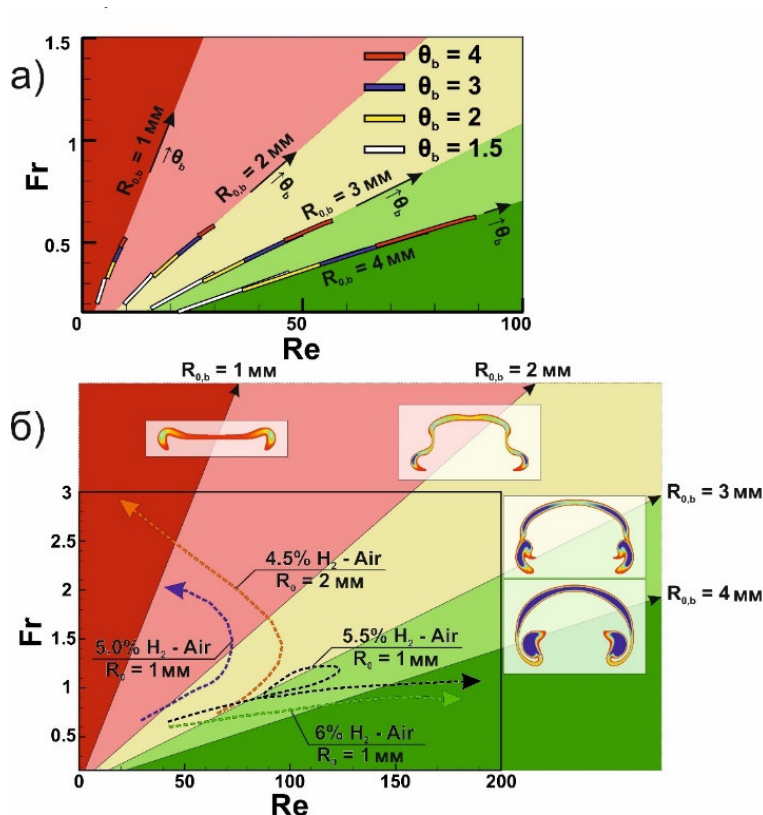


Рисунок 27. Диаграмма в координатах Re-Fr. а) Линейные сегменты соответствуют расчетам химически неактивных газовых пузырьков. Линейные аппроксимации этих сегментов делят плоскость на пять областей. Начальный радиус пузыря определяет наклон линейного участка, коэффициент расширения  $\theta_b$  определяет начальную точку и длину линейного участка. Стрелки указывают направление увеличения  $\theta_b$ . Линейные сегменты отмечены цветом: белый  $\theta_b=1.5$ , желтый  $\theta_b=2.0$ , синий  $\theta_b=3.0$ , красный  $\theta_b=4.0$ . б) Траектории распространения пламени на диаграмме Re-Fr для водородно-воздушных смесей с различным содержанием водорода: зеленая — 6%,  $R_0 = 1 \text{ мм}$ , черная — 5.5%,  $R_0 = 1 \text{ мм}$ , оранжевая — 4.5%,  $R_0 = 2 \text{ мм}$ , синяя — 5.0%,  $R_0 = 1 \text{ мм}$ . Структуры газовых пузырьков различных радиусов  $R_{0,b}=1-4 \text{ мм}$  изображены снаружи диаграммы [IV].

**В заключении** приведены основные результаты диссертации:

1. Показано, что ведущую роль в динамике пламени в ультра-бедных водородно-воздушных смесях играют газодинамические течения, сформированные при всплытии очага горения в гравитационном поле. Из-за наличия вихревых потоков, фронт пламени растягивается и разрушается на более мелкие очаги. Первичный разрыв фронта пламени в

наивысшей точке фронта, расположенной на оси симметрии всегда приводит к гашению пламени (в водородно-воздушных смесях с содержанием водорода 5% и менее). В более активных смесях с содержанием водорода 5,5 % и более первичный отрыв очагов горения осуществляется с боковой поверхности пламени. Отделившиеся очаги здесь являются активными зонами горения, поэтому наблюдается устойчивое горение в виде сложной многоочаговой структуры пламени. Устойчивое горение, характеризующееся отрывом очагов горения с боковой поверхности пламени, наблюдается для ультра-бедных смесей с содержанием водорода 5.5 – 9.0%.

2. Продемонстрирован способ подавления образования вторичных очагов пламени и снижения скорости всплытия очага горения, с помощью теплоотвода к стенкам.

3. Продемонстрировано хорошее согласие проведенных расчетов с экспериментальными данными по динамике всплытия очага горения, его топологии.

4. Определены значения концентраций водорода в ультра-бедных водородно-воздушных смесях на больших пространственных масштабах, при которых не наблюдается затухание очагов горения. На основе математического моделирования в условиях микрогравитации нижний концентрационный предел оценен как  $\approx 3,45 \pm 0,05$  %, а в условиях земной гравитации -  $5,25 \pm 0,25$ %. Базовым механизмом, определяющим критические условия горения, является неустойчивость очагов ультра-бедного горения по отношению к формируемому вихревому течению, разрушающему целостность очага в наивысшей точке фронта пламени, расположенной на оси симметрии. Фронт пламени под действием вихревого течения разрушается в своей наивысшей точке на мелкие очаги, которые с течением времени гаснут.

5. Проведена классификация режимов устойчивого и неустойчивого горения ультра-бедных водородно-воздушных смесей на основе аналогии «пламя-пузырек» и на основе совместного анализа динамики газовых пузырьков в приближении несмешивающихся газов и динамики очагов ультра-бедного горения. Выявлено два основных сценария развития горения в ультра-бедных водородно-воздушных смесях в зависимости от содержания водорода в смеси.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chemkin collection / R. J. Kee [et al.]. — San Diego, CA: Reaction Design, Inc., 2000.
2. Hirschfelder J., Curtiss C., Bird R. B. Molecular theory of gases and liquids. — New York: Wiley, 1964. — 1280 p.

3. An experimental and detailed chemical kinetic modeling study of hydrogen and syngas mixture oxidation at elevated pressures / Keromnes A., Metcalfe W.K., Heufer K.A. et al. // *Combustion and Flame*. — 2013. — Vol. 160(6). — P. 995–1011.
4. McGrattan, K. Fire Dynamics Simulator: Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model / K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka et al. // Tech. Rep. NIST Special Publication 1018-1, Gaithersburg, MD: U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2019.-171 p.
5. Stationary premixed flames in spherical and cylindrical geometries / Ronney P.D., Whaling K.N., Abbud-Madrid A. et al. // *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. — 1994. — Vol. 32. — P. 569-577.
6. Kull, H. Theory of the Rayleigh-Taylor instability / H. Kull // *Physics Reports*. — 1991. — Vol. 206(5). — P. 197–325.
7. Project SAFEKINEX 2002 Report on the experimentally determined explosion limits, explosion pressures and rates of explosion pressure rise Contractual deliverable No. 8 (Berlin: Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM)).
8. Ronney, P. D. Near-limit flame structures at low Lewis number / P. D. Ronney // *Combustion and Flame*. — 1990. — Vol. 82(1). — P. 1–14.
9. Wu, M. S. Detailed numerical simulation of flame ball structure and dynamics / Wu M.S. , Ronney P.D., Colantonio R. , VanZandt D. // *Combustion and Flame*. — 1999. — Vol. 116. — P. 387-397.

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

- I. Yakovenko, I.S. Large-scale flame structures in ultra-lean hydrogen-air mixtures / Yakovenko I.S., Ivanov M.F., Kiverin A.D., *Melnikova K.S.* // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2018. — Vol. 43. — P. 1894-1901. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.138
- II. Динамика очагов горения в ультра-бедных водородно-воздушных смесях в крупных масштабах в условиях земной гравитации / Володин В.В., Голуб В.В., Киверин А.Д., *Мельникова К.С.*, Микушкин А.Ю., Яковенко И.С. // *Горение и взрыв*. — 2019. — № 2(12). — С. 53-59. DOI:10.30826/CE19120207
- III. Volodin, V.V. Large-scale dynamics of ultra-lean hydrogen-air flame kernels in terrestrial gravity conditions / Volodin V.V., Golub V.V., Kiverin A.D., *Melnikova K.S.*, Mikushkin A.Y., Yakovenko I.S. // *Combustion science and technology*. — 2020. — P. 225-34. DOI: 10.1080/00102202.2020.1748606

- IV. Yakovenko, I. Ultra-Lean Gaseous flames in terrestrial gravity conditions / Yakovenko I., Kiverin A., *Melnikova K.* // *Fluids*. — 2021. — Vol. 6(21). — 1058113. (ISSN 2311-5521). DOI: 10.3390/fluids6010021
- V. Kiverin, A.D. On the structure and stability of ultra-lean flames / A. D. Kiverin, I.S. Yakovenko, *K. S. Melnikova* // *Journal of Physics: Conference series*. — 2019. — V. 1147. — 012048.
- VI. Kiverin, A.D. Peculiarities of mathematical modeling of combustion of hydrogen flames / A. D. Kiverin, *K. S. Melnikova*, K. O. Minaev, A.E.Smygalina, I.S. Yakovenko // *Journal of Physics: Conference series*. — 2019. — V. 1348. — 012091.

**Мельникова Ксения Сергеевна**

**Горение ультра-бедных составов водородно-воздушных смесей на больших пространственных масштабах**

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.