



**МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
(МГУ)**

Ленинские горы, Москва,
ГСП-1, 119991
Телефон: 8-495-939-10-00
Факс: 8-495-939-01-26

24.02.2023 № 207-23/013-03

На № _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор ФГБОУ ВО «Московский
государственный университет имени
М.В. Ломоносова»

Федянин Андрей Анатольевич



_____ 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию **Мокрина Сергея Николаевича**
на тему: **«Пределы горения бедных смесей газов во встречных потоках»**,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности
1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Диссертация изложена на 94 страницах машинописного текста, включая 27 иллюстраций. Список цитируемой литературы содержит 65 наименований.

Во введении проведено обоснование актуальности и практической значимости рассматриваемых в диссертации задач. Сформулированы основные цели исследования: теоретическое и экспериментальное исследование пределов распространения предварительно перемешанных растяженных пламен, анализ неустойчивых режимов горения и определение областей их существования. Достигание цели осуществлялось путем решения следующих задач:

1. исследование линейной пространственной устойчивости фронта пламени и выявление определяющих параметров и областей неустойчивости;
2. численное моделирование пространственных структур волн горения, стабилизированных между двумя противоточными щелевыми горелками;
3. экспериментальное выявление режимов горения и пределов существования растяженных пламен, стабилизированных в плоском канале;
4. формулировка математической модели и результаты численного моделирования растяженных пламен, стабилизированных в плоском канале с теплопроводящими стенками;

Перечисленные вопросы ранее не исследовались и составляют научную новизну представляемой к защите работы.

Достоверность и обоснованность обеспечивается корректностью применяемых математических моделей, строгой постановкой задач и соответствием полученных результатов с имеющимися в литературе результатами теории, численного моделирования и экспериментальными данными. Экспериментальные исследования проводились с использованием зарекомендовавших себя методов и современного научного оборудования, в том числе внесённого в реестры средств измерений РФ. Систематические и случайные погрешности экспериментов учтены с помощью классических методов статистической обработки данных. Достоверность полученных результатов подтверждена воспроизводимостью полученных данных. Полученные результаты согласуются с современными представлениями об изучаемых процессах, находятся в качественном и количественном соответствии с литературными данными по объектам исследований.

Практическая ценность предложенные в работе модели и методы их анализа могут найти применение в дальнейших теоретических и численных исследованиях широкого класса задач теории горения газов. Результаты исследования устойчивости растяженных пламен позволяют дополнить теорию диффузионно-тепловой неустойчивости пламени и способствуют развитию фундаментальной теории горения. Экспериментальные и численные данные о пределах существования бедных пламен могут найти применение в области пожаро- и взрывобезопасности.

В первой главе кратко описаны механизмы затухания растяженных предварительно перемешанных пламен. Перечислены эффекты, влияющие на формирование пределов горения предварительно перемешанных смесей газов. Приводится обзор работ, посвященных исследованиям по теме диссертации.

Во второй главе приведены результаты теоретических исследований автора в рамках упрощенной диффузионно-тепловой модели. Приведена математическая постановка задачи описания растяженных пламен в рамках диффузионно-тепловой модели и описаны стационарные режимы горения.

В третьей главе приведено сравнение результатов численного и теоретического исследования пламен предварительно перемешанных смесей газов с малыми числами Льюиса в потоке, создаваемом двумя встречно направленными щелевыми горелками. Показана возможность существования следующих режимов горения: двойные плоские пламена, ячеистые пламена и "трубки" пламени. Определены области параметров задачи, в которых возможна реализация указанных режимов горения. С помощью численно моделирования и теоретического анализа были определены области существования выявленных режимов горения в плоскости концентрация топлива / параметр растяжения. Исследова-

но влияние числа Льюиса на формирование неустойчивых режимов горения. Было установлено, что с уменьшением числа Льюиса расширяются диапазоны параметров растяжения и коэффициентов избытка воздуха, при которых могут существовать противоточные пламена.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных и численных исследований растяжённых предварительно перемешанных пламен, стабилизированных в плоском канале с теплопроводящими стенками. Приведены результаты экспериментальных работ, проведенных на разработанной и запатентованной автором противоточной щелевой горелке, которая позволяет экспериментально исследовать горение как предварительно перемешанных, так и диффузионных пламен при малых коэффициентах растяжения в условиях нормальной гравитации. Эксперименты продемонстрировали существование двух принципиально различных устойчивых режимов горения: «удаленное пламя» и пламя вблизи застойной зоны. На диаграмме коэффициент растяжения / коэффициент избытка топлива были определены области существования обнаруженных режимов горения, а также границы существования пламени. Было показано, что форма границы пределов существования пламени, стабилизированного в канале, отличается от С-образной кривой, характерной для обычных растяженных пламен. Эксперименты проводились на установке, состоящей из противоточной горелки, регуляторов массового расхода газа с блоком управления, подключенным к персональному компьютеру. В качестве противоточных горелок были использованы щелевые горелки, установленные горизонтально друг напротив друга на расстоянии $2L=50$ мм, размер каждой щели 40×5 мм. В каждой горелке было проделано по два шлица для установки кварцевых пластин таким образом, чтобы образовался плоский канал. Размеры кварцевых пластин - 50×50 мм, толщина - 1.4 мм. Для создания однородных потоков газа в корпус горелок были засыпаны керамические шарики диаметром ~ 1 мм, которые были прикрыты четырьмя слоями сетки из нержавеющей стали. Для поддержания постоянной температуры входящего газа использовалась система водяного охлаждения, закрепленная на корпусе горелки. В результате, начальная температура свежей смеси не превышала 50°C . Для того, чтобы температура входящего газа была всегда постоянной, на корпусе горелок была смонтирована система охлаждения. Для контроля температуры и определения стационарного состояния системы в центре одной из кварцевых пластин была закреплена хромель-алюмелевая термопара, показания которой считывались с контроллера. Точность измерения температуры $\pm 1^\circ\text{C}$, использовались термопарные контроллеры Omron E5CB. Сверху и сбоку от горелки были установлены цифровые фотокамеры.

В работе были определены пределы существования пламени в диапазоне коэффициентов растяжения от 44 до 10 с^{-1} . Коэффициент растяжения $a=V_0/L$

определялся как отношение начальной скорости свежей смеси на входе в канал V_0 к половине расстояния между горелками L . В ходе эксперимента были выявлены различные режимы горения. Так при сравнительно высоких значениях $\sim 0,8$ коэффициента избытка топлива и $\sim 40 \text{ с}^{-1}$ пламена стабилизировались вдали от застойной зоны. Однако с уменьшением коэффициента избытка топлива (при фиксированном параметре растяжения) расстояние между пламенами уменьшалось. При некотором критическом значении ϕ фронты пламени сдвигались вниз по потоку и стабилизировались вблизи застойной зоны. Фронт пламени при этом оставался плоским и непрерывным. Дальнейшее уменьшение коэффициента избытка топлива вело к уменьшению расстояния между пламенами, и при некотором значении ϕ происходило гашение.

Была предложена упрощенная математическая модель, описывающая предварительно перемешанные противоточные пламена, стабилизированные в узком зазоре между двумя теплопроводящими пластинами. В рамках разработанной модели выполнено численное моделирование стационарных состояний растяженных пламен и определены области параметров, соответствующие устойчивому горению. Результаты численного моделирования качественно согласуются с данными эксперимента. В частности, численно получена ε -образная форма границы области существования горения в плоскости концентрация топлива / параметр растяжения, которая отличается от C-образной кривой, соответствующей противоточным пламенам в открытом пространстве. Анализ численных результатов позволил выявить механизмы гашения пламени на разных ветвях кривой пределов горения.

По работе есть следующие замечания:

1. Вывод о влиянии на скорость пламени лишь потерь тепла на стенках предварителен, необходимо в дальнейшем учитывать химическое влияние адсорбции радикалов и пристеночных реакций, а также турбулизацию потока из-за взаимодействия со стенкой.
2. Хотелось бы видеть критерий устойчивости по времени численного метода.

Указанные замечания ни в коей мере не снижают высокий уровень проведенного исследования. Результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. Экспериментально исследованы пределы существования и режимы горения двойных растяженных противоточных метано-воздушных пламен при малых значениях коэффициента растяжения в условиях земной гравитации. Эксперименты выполнены на щелевой противоточной горелке с плоским каналом, специально разработанной для выполнения экспериментов.

Автореферат соответствует содержанию диссертации. Основные результаты опубликованы в 7 печатных работах в периодических изданиях, рекомен-

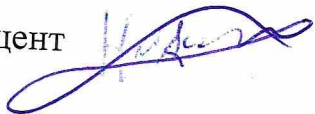
дованных ВАК для представления основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора или кандидата наук. Имеется 1 патент (Роспатент).

Таким образом, диссертация Мокрина Сергея Николаевича является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, а также изложены новые научно обоснованные технические, технологические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв составлен к.ф.-м.н., доцентом кафедры газовой и волновой динамики механико-математического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова» Никитиным Валерием Федоровичем.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании кафедры газовой и волновой динамики механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова протокол № 2 от «24» февраля 2023 г.

к.ф.-м.н., доцент



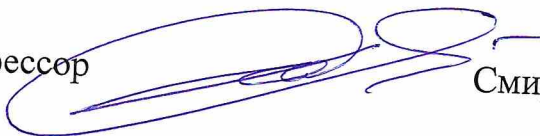
Никитин В.Ф.

н.с.



Михальченко Е.В.

Зам. зав. кафедрой газовой и волновой динамики, д.ф.-м.н., профессор



Смирнов Н.Н.

Зам. декана механико-математического ф-та, д.ф.-м.н., профессор



Иванов О.А.