

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
Казакова Кирилла Александровича
на тему: «Теория сильнонелинейных эффектов в газовых средах»
по специальности 1.3.3. Теоретическая физика**

Диссертационная работа Казакова Кирилла Александровича посвящена аналитическим и численным исследованиям распространения ламинарных пламён предварительно перемешанных смесей газов в приближении узкого фронта пламени.

1. Актуальность темы диссертации. Интерес к исследованию ламинарных пламён связан с большим числом практических приложений в различных областях, среди которых энергетика, наземный и авиационный транспорт, пожаровзрывобезопасность и др. Несмотря на значительное развитие фундаментальных представлений о процессах горения и существенный прогресс вычислительной техники, многие вопросы теории горения по-прежнему остаются открытыми. Это связано как со сложной кинетикой химических реакций, так и с широким спектром пространственных и временных масштабов, что существенно затрудняет численные исследования даже с использованием современных суперкомпьютеров. В связи с этим развитие аналитических подходов и вывод уравнений, описывающих распространение пламени в рамках различных упрощающих предположений представляет как фундаментальный, так и практический интерес. *Актуальность* данной диссертационной работы связана с выводом уравнений, описывающих распространение пламён предварительно перемешанных смесей газов в гидродинамическом приближении и получением решений этих уравнений для ряда практически значимых случаев, таких как распространение пламени в широких вертикальных и горизонтальных трубах.

2. Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, пятнадцати глав, заключения и списка литературы из 210 наименований. Работа изложена на 255 страницах, включая 69 рисунков и 6 таблиц.

Во *введении* обосновывается актуальность, новизна, научная и практическая значимость задач, рассматриваемых в диссертации. Сформулированы цели работы и основные положения, выносимые на защиту.

В *первой главе* приведен обзор развития моделей распространения пламени в гидродинамическом приближении, предполагающем изменение гидродинамических величин скачком на поверхности, разделяющей несгоревшую смесь и продукты горения. Нормальная скорость движения этой поверхности (фронта пламени) считается заданной. Также в этой главе изложены основные идеи оболочечного описания, предложенного автором для вывода уравнений для фронта пламени. Во *второй главе* продемонстрирована возможность однозначного определения положения поверхности гидродинамического разрыва относительно физического фронта пламени конечной толщины, в котором скорость газа и давление меняются непрерывно.

В *третьей главе* описана вспомогательная процедура осреднения газодинамических уравнений и уравнения эволюции поверхности разрыва при наличии мелкомасштабных возмущений фронта пламени.

Главы *четвёртая и пятая* посвящены описанию двух различных способов вывода нелинейного интегро-дифференциального уравнения (мастер-уравнения), связывающего форму фронта пламени и распределение скорости газа на фронте. Показано, как предлагаемое оболочечное описание даёт возможность определить основные характеристики тонкого ламинарного пламени (форму и скорость), не решая полностью задачу о течении газа в областях свежей смеси и продуктов горения. В *шестой и седьмой* главах исследуются предельные случаи мастер-уравнения в приближении малого коэффициента расширения (θ). В частности, продемонстрирован переход к уравнениям Сивашинского и Сивашинского-Клавена. Выведено уравнение с учётом вкладов четвёртого порядка $O((\theta - 1)^4)$. Показано, что уравнение для положения фронта стационарного пламени с произвольным коэффициентом теплового расширения не может быть слабонелинейным.

В *восьмой* главе выведенное ранее мастер-уравнение применяется для исследования тонкого ламинарного пламени, стабилизированного в высокоскоростном потоке газа с помощью стержня. Путем разложения по малому параметру $1/U$, где U - скорость потока, получена система ОДУ для скорости и положения фронта пламени. Форма пламени, полученная в результате численного решения этой системы, хорошо согласуется с данными экспериментов. В *девятой* главе исследуется распространение ламинарных пламён в широких горизонтальных трубах. Обнаружено, что система ОДУ, полученная из мастер-уравнения с помощью разложения по параметру $1/U$, имеет два решения. Решения типа II представляют собой наклонное пламя, часто наблюдаемое при распространении пламён в горизонтальных трубах, а решение типа I — наклонное пламя с перегибом. В *десятой* главе существование такого типа пламён было подтверждено с помощью специально поставленных экспериментов. Теоретические результаты находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными, как полученными в работах автора, так и представленными в литературе.

В *одиннадцатой* главе исследуется распространение околопредельно бедных метано-воздушных и пропано-воздушных пламён в вертикальных трубах. Предложен возможный механизм гашения пламени, связанный с торможением продуктов горения из-за влияния естественной конвекции.

В *двенадцатой* главе система оболочечных уравнений решается численно в общем случае произвольной нелинейности. Это позволило установить влияние различных физических эффектов на форму фронта пламени и скорость газа на фронте, а также оценить границы применимости слабонелинейной теории. Показано (до диаметров трубы $< 200L_c$), что стационарные эффекты могут объяснить рост скорости ламинарного пламени, наблюдаемый при увеличении ширины трубы. В *тринадцатой* главе оболочечное описание используется для вывода мастер-уравнения в нестационарном случае. Показано, что дисперсионное соотношение Ландау–Дарье, уравнение Маркштейна для пламени в переменном поле тяжести и

уравнение Сивашинского–Клавена являются частными случаями полученного мастер-уравнения. В *четырнадцатой* главе с помощью нестационарного мастер-уравнения показано, что конфигурация тонкого ламинарного V-пламени с плоским фронтом по обе стороны от удерживающей точки является неустойчивой. Этот результат находится в согласии с экспериментальными данными. В *пятнадцатой* главе оболочечный подход применяется для описания ускорения тонких ламинарных пламён в горизонтальных трубах. Дано качественное и количественное объяснение наблюдаемой динамики метано-воздушных пламен. В *заключении* сформулированы основные результаты диссертационной работы.

3. Научная новизна диссертационной работы. В диссертации впервые выведены нелинейные стационарные и нестационарные уравнения для положения фронта тонкого ламинарного пламени и распределения скорости газа на нём. На основании этих уравнений впервые построено замкнутое описание двумерных ламинарных пламён с произвольным коэффициентом расширения в гидродинамическом приближении. Теоретически предсказан новый режим стационарного распространения пламени в горизонтальной трубе, отличительной особенностью которого является наличие фрагмента фронта пламени, вогнутого относительно свежей смеси. Впоследствии существование этого режима горения было подтверждено экспериментально. Впервые выполнен анализ устойчивости сильнонелинейного тонкого ламинарного V-пламени в трубе и показана его неустойчивость. Впервые предложено объяснение различия в величине ускорения ламинарных метано-воздушных пламён при их распространении в гладких открытых горизонтальных трубах вблизи пределов воспламенения и в стехиометрических смесях.

4. Научная и практическая значимость полученных результатов. Представленные в диссертации результаты позволяют определять форму ламинарных пламён и их скорость для широкого класса практически значимых задач, для которых выполняется приближение узкого фронта. К таким задачам

относится, например, распространение крупномасштабных пламён и горение предварительно перемешанных смесей в трубах и камерах сгорания. Возможность получения результатов путём численного решения нелинейного мастер-уравнения без необходимости полного решения уравнений газовой динамики позволяет предсказывать поведение пламени в случаях, когда детальное численное моделирование невозможно в силу большого объёма вычислений. Последовательный и математически строгий подход к построению нелинейной модели вносит несомненный вклад в развитие фундаментальной теории горения.

5. Обоснованность и достоверность научных положений, результатов и заключений диссертации. Вывод всех основных уравнений, полученных в диссертации, основан на применении точных преобразований уравнений газовой динамики с помощью известных методов математического и функционального анализа. В некоторых случаях представлены несколько альтернативных подходов к выводу уравнений, приводящих к одинаковым результатам. Для выведенных уравнений рассмотрены предельные случаи и разложения по малым параметрам, и продемонстрирован их переход к известным ранее слабонелинейным уравнениям теории распространения тонких пламён. Результаты численного моделирования сопоставляются с данными экспериментов, как известными из литературы, так и полученными при участии автора. Во всех случаях продемонстрировано хорошее согласие между численными и экспериментальными результатами. Все научные положения и выводы диссертации следуют из представленных аналитических и численных результатов.

6. Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в 17 статьях в высокорейтинговых рецензируемых научных изданиях и обсуждались в многочисленных российских и международных научных семинарах, где работа проходила апробацию.

По диссертации имеются следующие замечания:

1. В главе 9 численные результаты сопоставляются с экспериментальными данными единственной работы, опубликованной в 1932 году. В то же время распространение пламён в горизонтальных трубах активно исследовалось на протяжении последних нескольких десятилетий. Сравнение с более современными экспериментальными данными, а также результатами прямого численного моделирования (см., например, M.Liberman, et.al., *Combust. Theory Modelling* 7 (2003) 653–676) способствовало бы более убедительной верификации и валидации полученных решений. В частности, представляет интерес сравнение форм пламени в решениях типа I и II с формой пламени, приведённой в процитированной выше работе.

2. Одним из основных выводов главы 11, посвященной исследованию околопределных бедных пламён, является то, что «решающим фактором затухания пламени является торможение продуктов горения в центре трубы» (стр. 157 диссертации). В то же время, при концентрации топлива меньше некоторого критического значения, пламёна гаснут и в горизонтальных трубах, и в условиях невесомости. В этих случаях торможение продуктов, связанное с естественной конвекцией, отсутствует. В связи с этим непонятно, почему делается вывод о решающем влиянии торможения потока, в то время как гашение пламени может наступать раньше и быть связано с многочисленными факторами, не учитываемыми в используемой модели (такими как химическая кинетика, радиационные теплотери и др.), влияние которых не зависит от ориентации трубы и наличия силы тяжести.

3. Представляется необходимым более подробное описание выбора значений констант Маркштейна (которые могут сильно различаться в литературе) для численного моделирования, поскольку в работе демонстрируется сильная зависимость решений от этих параметров.

4. При распространении расходящихся сферических пламён и пламён в широких каналах фронт пламени может представлять собой фрактальную структуру (см., например, Ю.А. Гостинцев и др. *Физика горения и взрыва* 24,

(1988), 63-70). В этом случае процедура осреднения при наличии мелкомасштабных возмущений, описанная в главе 3, может быть неприменима, что может ограничивать возможности нестационарного мастер-уравнения (глава 15) в описании таких пламён и их ускорения за счёт фрактального роста площади поверхности пламени.

5. В главах 9 и 10 при сопоставлении форм поверхности пламени, полученных численно и экспериментально, выбирается один из нескольких экспериментальных снимков. В то же время кажется, что в экспериментах пламя не является полностью стационарным и его снимки в разные моменты времени не идентичны. Более корректным кажется осреднение формы поверхности пламени по нескольким экспериментальным снимкам.

6. В главе 11 (стр. 148) указано, что «... более устойчивым является режим с большей скоростью». Непонятно, что значит «более устойчивым», желательно более строгое определение.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Тема диссертационного исследования соответствует пунктам 5 и 10 паспорта научной специальности 1.3.3. Теоретическая физика (по физико-математическим наукам): 5. Теория конденсированного состояния. Изучение различных состояний вещества и физических явлений в них. Статистическая физика. Теория фазовых переходов. Физическая кинетика. 10. Теория неравновесных систем. Теория хаоса и турбулентности. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.3. Теоретическая физика (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой

степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель К.А. Казаков заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук

ЗАВЕДУЮЩИЙ лабораторией физико-математического моделирования процессов горения

ФГБУН «Институт теоретической и прикладной механики

им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук»

ФУРСЕНКО Роман Викторович

подпись

Дата подписания 16.01.2026.

Контактные данные:

тел.: , e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.02.05 - механика жидкости газа и плазмы

Адрес места работы:

630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ

им. С.А. ХРИСТИАНОВИЧА

Тел.: 8(383)3303905; e-mail: admin@itam.nsc.ru

Подпись сотрудника д.ф.-м.н. Фурсенко Р.В. удостоверяю:

Ученый секретарь ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН) к.ф.-м.н.

З. Кратова