

**ОТЗЫВ официального оппонента  
о диссертации 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 посвящена аналитическому, численно-аналитическому и экспериментальному исследованию сильнонелинейных режимов распространения тонких ламинарных пламён в газовых смесях.. **Актуальность** диссертации определяется тем, что такие режимы часто встречаются в природе и технике. При этом их динамика естественным образом оказывается сильнонелинейной, что требует развития адекватных методов теоретического описания. Пламёна в газовых смесях находят многочисленные применения в науке и технике. На них основана работа двигателей внутреннего сгорания и ракетных двигателей, бунзеновские пламёна используются в лабораторных исследованиях физико-химических свойств газов. Так что актуальность не вызывает сомнений. Перейдем к характеристикам по главам. Диссертация устроена сложно: она состоит из введения (стр. 7-14), 15 глав, разбитых на 4 раздела (стр.15-219), списка литературы (стр.220-234) из 210 наименований, и математических приложений ( стр. 235-255).

Во введении (стр. 7-14) констатируется отставание теории от эксперимента и делается попытка обосновать такое отставание. Выделяются три обстоятельства (стр.8): различные масштабы, неустойчивости, подвижная граница. Читать весьма интересно. Но нельзя согласиться с этими доводами, так как, судя по всему, основной недостаток современного состояния теории пламени - отсутствие правильно подобранной математической модели: судя по всему, здесь требуется кинетическое описание. Также формулируются основные результаты диссертации. Отложим обсуждение этого вопроса до окончания обсуждения всех глав, а пока можно сказать, что автор сам

движется в направлении создания усовершенствованной модели пламени, но, кажется, здесь требуется более радикальный подход.

В главе 1 (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ОПИСАНИЕ ИСПОЛЪЗУЕМОЙ МОДЕЛИ) (стр. 15-33) даётся обзор теоретических исследований по нелинейной динамике пламён, обсуждаются основные трудности её аналитического описания, формулируется модель тонкого пламени, в рамках которой формулируется новый подход автора, и описывается структура диссертации. §1.1. Основные параметры, определяющие глобальную структуру пламени. Ссылка на Малларда и Ле-Шателье - две работы 1881 и 1883 годов эффективна, но выглядят анахронизмом (стр. 15). §1.2. Формулировка модели тонкого пламени. «Это приближение называется моделью Ландау-Дарье, или моделью бесконечно тонкого пламени [67-69]» (стр. 20). Замечательно, что обе работы Дарье [67-68]. не опубликованы, судя по ссылкам автора, что показывает на осведомленность автора, в отличие от работы Ландау 44 года. Возникает вопрос, откуда сведения? §1.3. Неустойчивость Ландау-Дарье и развитие модели тонкого пламени. Появляется интегро-дифференциальное уравнение Сивашинского (1.5). §1.4. Общие нестрогие уравнения теории искривлённых пламён. Обсуждаются модели Жданова-Трубникова, Бычкова и др. §1.5. Частные нестрогие модели искривлённых пламён. «Таким образом, в общем случае модель пузыря не имеет ни качественной, ни количественной применимости» (стр.29). §1.6. Проблема неоднозначности положения поверхности разрыва. «В Главе 2 будет доказано, что на самом деле положение поверхности разрыва относительно истинного фронта определено однозначно, и самосогласованное описание пламени в рамках модели тонкого пламени существует, по крайней мере, в первом порядке по ширине фронта» (стр.31). §1.7. Структура диссертационной работы. Эта структура как и все введение показывают глубокую эмпиричность теории пламени, и именно на создание более строгого математического аппарата направлена диссертация. Задача трудная и важная. Судя по-всему, тут нужно бы применить аппарат кинетических уравнений: модель газовой динамики это

уравнение с нераспределенными скоростями, а кинетический подход – с распределением по скоростям. Пламя – это холодная плазма, и уравнения типа Власова с химической кинетикой типа Больцмана здесь кажутся необходимыми как в основаниях теории, так и при выводе основных уравнений диссертации. Такие работы уже начаты, но не учитываются автором и, видимо, не были известны ему.

Часть I. Оболочечное описание тонких ламинарных пламён (стр.34-79) состоит из глав 2-5. Гл.2. САМОСОГЛАСОВАННОСТЬ МОДЕЛИ ТОНКОГО ПЛАМЕНИ [A14] ( это ссылка на авторскую работу [A14]). На стр. 38 идет ссылка на учебник Л.С.Понтрягина , когда, судя по тексту, оценивается отклонение решений на основе отклонения правых частей уравнения. Ссылка вскользь, нужно бы было указать точное место учебника, а доказательство при этом стало бы строже и яснее. Все это делает чтение затруднительным. Это касается и других мест диссертации. Выражение 2.9 для скачка z-компоненты ротора: неясно, откуда оно берется. Гл.3. УСРЕДНЕНИЕ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРЫ ПЛАМЕНИ [A10] (стр.41-44).Процедура осреднения (3.3) зависит от выбора гладкой функции, где в качестве примера оной предлагается гауссово распределение: неясно, насколько все дальнейшее зависит от выбора этой функции. «При этом подразумевается, что интегрирование в этих формулах распространено либо на область холодного газа, либо на область продуктов горения»( стр.42). Что это значит? Еще зависит и от области? На стр. 43 появляются основные уравнения (3.6-3.7), с которыми потом производятся математические упрощения – это уравнения несжимаемой жидкости. Насколько они применимы для пламени? Пламя – это холодная плазма, здесь более адекватны уравнения типа Власова.

Новый метод аналитического описания пламён развит в главах 4 и 5. Сначала сформулирована физическая идея о возможности голографического описания динамики пламени, которая затем реализована двумя существенно различными способами в простейшем случае стационарного двумерного

пламени и получено основное уравнение метода – мастер-уравнение. Это сделано точными преобразованиями фундаментальных газодинамических уравнений с использованием методов теории функций комплексного переменного и функций Грина.

гл. 4. ОБОЛОЧЕЧНОЕ ОПИСАНИЕ ДВУМЕРНЫХ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАМЁН [A3,A4] (стр.50-69)

Выписывается система уравнений Эйлера (4.1-4.2). После этого из них получаются основные следствия. Фраза «как известно, с точностью до аддитивной постоянной периодическое по  $x$  потенциальное поле либо экспоненциально убывает при  $|y| \rightarrow \infty$ , либо экспоненциально растёт» на стр. 64 требует либо обоснования, либо ссылки. Наконец, на стр. 68 получается одно из основных уравнений диссертации – мастер уравнение 4.38. Это уравнение связывает функцию фронта волны и двух компонент скорости.

Гл.5. ВЫВОД МАСТЕР-УРАВНЕНИЯ МЕТОДОМ ФУНКЦИЙ ГРИНА [A9].

Еще один вывод мастер-уравнения. Откуда такая терминология? Мастер-уравнение? В статфизике под мастер-уравнением Паули понимается совсем другое: это уравнение типа Лиувилля.

Раздел II. Тонкие ламинарные пламёна в слабонелинейном приближении (стр.79-94) состоит из двух глав 6. Слабонелинейное разложение мастер-уравнения [A4] и 7. Альтернативный вывод уравнения четвёртого порядка [A1,A2]. В качестве нетривиальной проверки полученного уравнения в главах 6 и 7 с его помощью воспроизводятся известные уравнения теории стационарных слабонелинейных пламён: в частности используется нетривиальное полюсное разложение со ссылкой на работу Туэла, Фриша и Хенона.

Раздел III. Сильнонелинейные режимы распространения тонких ламинарных пламён (стр. 95-173) состоит из глав 8-12. Начинается в гл.8 с анализа работ Я.Б.Зельдовича, Г.Г.Черного и др. Делается вывод, что при таком подходе нельзя удовлетворить всем граничным условиям ( стр. 97).

Гл. 9. ЛАМИНАРНОЕ ПЛАМЯ В ШИРОКОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ

[A10]. Вводится число Фруда, безразмерный параметр, он велик, кажется, по нему и стоит проводить разложение: неясно, где в уравнениях проводится обезразмеривание, чтобы разложения были корректны (стр. 112). Гл. 9 заканчивается сравнением с экспериментом. «Важнейшим выводом данной главы является существование двух существенно различных стационарных режимов распространения ламинарного пламени в горизонтальных трубах. Детальное сравнение с экспериментом в §9.6 показало, что на практике реализуются оба режима: при нормальных начальных условиях ламинарные пламена вблизи пределов воспламенения распространяются только в режиме типа I, тогда как в смесях, близких к стехиометрической, – только в режиме типа II. Смена режима происходит при промежуточных концентрациях.» (стр.130) Здесь опять, напрашивается более общее утверждение: этот порог должен быть безразмерным, чтобы утверждение приобрело минимально фундаментальный характер. И снова, впечатление о недостаточности модели газовой динамики для описания пламени. 10. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ

ОТКРЫТИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАМЁН С ПЕРЕГИБОМ ФРОНТА [A12] Решения типа I оказываются с перегибом (т.е. не выпуклы), и экспериментально удалось, кажется, обнаружить этот эффект. 11. ЛАМИНАРНОЕ ПЛАМЯ В ШИРОКОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ [A13,A14]. Анализируются процессы воспламенения и затухания.

Раздел IV - Нестационарные ламинарные пламена состоит из 3-х глав 13-15. В них даётся обобщение мастер-уравнения на нестационарные пламена, с помощью которого воспроизводятся классические уравнения слабонелинейных теорий Ландау–Дарье, Сивашинского–Клавена и Маркштейна. Затем мастер-уравнение используется для анализа устойчивости и ускорения пламен в открытых трубах. По результатам этого анализа дано качественное и количественное объяснение наблюдаемого поведения пламен в метано-воздушных смесях.

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. 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

**ВЕДУЩИЙ НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК**

ФГУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

**ВЕДЕНЯПИН Виктор Валентинович**

*подпись*

Дата подписания

20.01.20

Контактные данные: тел.: \_\_\_\_\_, e-mail: \_\_\_\_\_

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.01.02 - дифференциальные уравнения и математическая физика

Адрес места работы: 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 4

**ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ им. М.В. КЕЛДЫША**

Тел. 8(499)2207821; e-mail: \_\_\_\_\_

Подпись ведущего научного сотрудника ФИЦ ИП  
д.ф.-м.н. Веденяпина Виктора Валентиновича уд  
Ученый секретарь  
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН к.ф.-м.н.