

**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 и численно-аналитическому 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 пламени, 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 эффектна, 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 пламен. Обсуждаются модели Жданова- Трубникова, Бычкова и др. §1.5. Частные нестрогие модели искривлённых пламен. «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.

Диссертацию читать весьма интересно. Хорошо видно, что диссертант заинтересован в работе и проявил незаурядную настойчивость в исследованиях. Замечания, отмеченные по ходу написания отзыва, не

снижают ее высокого уровня и имеют характер следующих пожеланий в дальнейших исследованиях . 1. Вести изложение более тщательно обоснованно, в частности акцентируя процедуру обезразмеривания. 2. осуществить переход к трехмерному случаю. 3. Осуществить переход на кинетический уровень описания. Это подымет исследования на новый уровень. Таким образом, диссертация отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а соискатель К.А. Казаков несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

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

Контактные данные: тел.: 8(915)3506413, e-mail: vicveden@yahoo.com

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: vicveden@keldysh.ru

Подпись ведущего научного сотрудника
ФИЦ ИПМ им. М.В.Келдыша РАН д.ф.м.н.
Веденяпина Виктора Валентиновича..

яю:

Ученый секретарь
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

А.А.Давыдов