

ТРИЛИС Артем Валерьевич

**АКУСТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ
ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ФРОНТА ГОРЕНИЯ
В ПЛОСКО-РАДИАЛЬНОЙ КОЛЬЦЕВОЙ
КАМЕРЕ СГОРАНИЯ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте гидродинамики имени М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН).

Научный руководитель:

Васильев Анатолий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Богданов Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории газодинамики взрыва и реагирующих систем научно-исследовательского института механики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Крайнов Алексей Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры математической физики физико-технического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Ведущая организация:

Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского

Защита диссертации состоится «___» _____ 2018 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 003.054.04 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики имени М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики имени М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН) и на сайте www.hydro.nsc.ru

Автореферат разослан «___» _____ 201 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.ф.-м.н., доцент

Рудой Е.М.

Актуальность проблемы

Тематика диссертационной работы касается выявления физических процессов, сопровождающих распространение детонационной волны (ДВ) при ее поступательно-вращательном движении по горючей смеси. Еще в 20-х годах прошлого столетия был экспериментально обнаружен спиновый режим детонации, не укладывающийся в рамки классической теории и долгие годы считавшийся экзотическим. Экзотика заключалась в том, что на внутренней закопченной стенке детонационной трубы регистрировался спиралевидный след после прохождения по трубе ДВ, что явно противоречило принятой тогда гипотезе о ее плоском фронте. Спиновую детонацию удалось объяснить в 50-х годах, когда в структуре фронта ДВ была обнаружена поперечная волна, которая и оставляла спиралевидный след при своем вращательно-поступательном движении вдоль детонационной трубы. А скорость вращения поперечной волны оказалась совпадающей со скоростью вращения основной моды аксиальных акустических колебаний продуктов детонации (основной корень функции Бесселя для цилиндрической системы координат). Таким образом, было установлено, что в спиновой ДВ распространение поперечной волны тесно связано с акустическими свойствами продуктов реакции.

Почти сразу вслед за открытием поперечной волны Б.В. Войцеховский предложил и реализовал способ сжигания горючей смеси в плоско-радиальной кольцевой камере сгорания в режиме постоянно вращающейся ДВ при радиальном истечении смеси из центрального отверстия. *Основной загадкой этого процесса являются заметно меньшие скорости распространения вращающихся волн по сравнению со скоростью детонации Чепмена-Жуге — скорости вращающихся волн чаще всего близки к скорости звука в горячих продуктах реакции.* В силу этого такие волны обычно называют квазидетонационными.

В последние годы ведущие страны (США, Япония, Франция, Китай и др.) интенсивно заняты созданием нового перспективного двигателя на детонационном режиме сжигания топлива для авиационной и ракетно-космической отрасли. В России общепризнанным лидером в исследованиях вращающейся детонации (судя по цитированиям) является Институт гидродинамики. Было предложено много схем, проведены сотни экспериментов, создан ряд расчетных программ...

Получены многочисленные экспериментальные подтверждения того, что скорость вращающейся детонации чаще всего фиксируется заметно меньшей по сравнению с классической величиной. Попытки связать занижение скорости с плохим смешением компонент смеси не согласуются с данными специальных экспериментов, где смесь была хорошо смешана заранее, а скорость все равно оказалась заниженной. Можно ожидать, что при распространении поперечной квазидетонационной волны в кольцевом канале также немаловажную роль будут играть акустические свойства горячих продуктов реакции.

Целями работы являются:

- анализ роли горячих продуктов сгорания и их основных акустических свойств на примере течений в плоско-радиальной кольцевой камере сгорания в случае заведомо неплоского фронта горения;
- моделирование и выявление особенностей начального (линейного) этапа развития вращающихся поперечных квазидетонационных волн в плоско-радиальной кольцевой камере сгорания.

В соответствии с представленными целями в работе решены следующие основные задачи:

- при пренебрежении радиально расходящимся дозвуковым потоком исследованы акустические свойства двух слоёв (исходной смеси и продуктов реакции) с разными температурами и их границы раздела, возникающих при горении в кольцевом канале;
- выведена система граничных условий на фронте горения Чепмена-Жуге, связывающая малые возмущения газодинамических параметров потока свежей смеси, продуктов горения и фронта горения.
- исследована линейная модовая устойчивость цилиндрического фронта горения в радиально расходящемся дозвуковом потоке плоско-радиальной кольцевой камеры сгорания.
- исследована механика неустойчивых поперечных окружных волн возмущения фронта горения, получены скорости вращения и скорости роста по времени амплитуды этих волн.

Научная новизна

Рассмотрен и смоделирован начальный этап развития вращающихся поперечных квазидетонационных волн в канале плоско-радиальной кольцевой камеры сгорания.

Исследованы акустические свойства слоёв холодной смеси и горячих продуктов реакции и их границы раздела, возникающих при го-

рении в кольцевом канале. Получены собственные моды и частоты радиальных и угловых колебаний. Показано существование вращающихся окружных волн возмущения границы раздела слоёв с конечным количеством локальных пучностей вдоль окружной (угловой) координаты и получены скорости вращения этих волн.

Получена система граничных условий на фронте горения Чепмена-Жуге, связывающая линейные возмущения параметров потока свежей горючей смеси и продуктов горения.

Предложена математическая модель линейной модовой устойчивости цилиндрического фронта горения Чепмена-Жуге в радиально расходящемся потоке с малым числом Маха. Получены квазисобственные частоты и аналитические выражения для акустических мод колебаний и волн.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

Механика акустических колебаний и волн, возникающих в слоях холодного и нагретого газов и на границе раздела в двухмерном и трёхмерном случаях.

Математическая модель линейной модовой устойчивости цилиндрического фронта горения Чепмена-Жуге в радиально расходящемся потоке плоско-радиальной кольцевой камеры сгорания с малым числом Маха. Результаты расчёта квазисобственных частот колебаний и волн возмущения цилиндрического фронта горения при различных способах подачи горючей смеси.

Результаты расчёта скоростей вращения поперечных окружных волн возмущения фронта горения. Сравнение полученных скоростей со скоростями звука в свежей горючей смеси и продуктах горения.

Установленные зависимости скоростей вращения поперечных окружных волн возмущения фронта горения от начальной скорости истечения горючей смеси, от углового и радиального номеров моды колебаний и волн.

Научная и практическая значимость результатов работы

Результаты работы позволяют выявить новые закономерности в механизме появления и распространения поперечных квазидетонационных волн в плоско-радиальной кольцевой камере сгорания.

Полученные аналитические решения рассмотренных задач могут быть использованы в качестве частного случая для тестирования численных алгоритмов решения более сложных и общих задач по данной

тематике исследований.

Достоверность результатов

Достоверность результатов исследований и научных выводов подтверждается использованием фундаментальных уравнений газовой динамики, акустики движущейся неоднородной среды, а также строгими математическими выкладками и доказательствами. Постановки рассмотренных задач базируются на соответствующих экспериментальных исследованиях. Компьютерные программы, реализующие методы решения уравнений математических моделей основаны на надёжных алгоритмах.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 50-ая Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2012); IX Всероссийская конференция молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск, 2012); 8 Международный семинар «Flame structure 2014» (ФРГ, г. Берлин, 2014); Всероссийская конференция «Нелинейные волны: теория и новые приложения» (Новосибирск, 2016); X Всероссийская конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2016) – **Доклад отмечен дипломом I степени**; XI Всероссийская конференция молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Шерегеш, 2017); Всероссийская конференция «Современные проблемы механики сплошных сред и физики взрыва», посвященная 60-летию ИГиЛ СО РАН (Новосибирск, 2017).

Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах лаборатории гидроаэроупругости ИГиЛ СО РАН (Новосибирск, 2013-2014); на спецсеминарах «Волны в неоднородных средах» кафедры гидродинамики Новосибирского государственного университета (Новосибирск, 2013-2017); на семинаре по физике и механике высокоэнергетических процессов ИГиЛ СО РАН под руководством академика РАН В.М. Титова (Новосибирск, 2017); на научном семинаре НИО-1 ЦАГИ (Жуковский, 2017). На конкурсе работ молодых ученых ИГиЛ СО РАН, проводившемся в 2016 году, доклад по материалам диссертационной работы занял **первое** место.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в

5 статьях в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, в том числе – одной статье без соавторов. Краткое изложение результатов содержится в опубликованных тезисах и материалах 7 конференций.

Личный вклад автора. Соискатель принимал участие в обсуждении постановки задач, самостоятельно разобрал и реализовал численно-аналитические методы решения, принимал активное участие в анализе полученных результатов. Проявил большую самостоятельность при выполнении исследований.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Каждая глава разделена на параграфы. Нумерация формул двухиндексная: первое число - номер главы, второе - порядковый номер в данной главе. Объём диссертации составляет 94 страницы, включая 27 рисунков и библиографический список из 58 наименований.

Благодарности. Автор считает своим долгом выразить глубокую благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н. А.А. Васильеву за постановку задач и внимание к работе. Автор также выражает благодарности д.ф.-м.н. С.В. Сухину и к.ф.-м.н. В.С. Юрковскому за оказанную помощь в работе.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность работы, изложены основные идеи и методы, используемые в диссертации, указаны цели работы и её практическая ценность. Также представлен обзор теоретических и экспериментальных работ по непрерывной вращающейся детонации, спиновой детонации и обзор работ, содержащих методы и подходы к описанию динамики и устойчивости пламён.

Первая глава посвящена исследованию зависимости скорости дефлаграционного горения от термодинамических параметров горючей смеси. Показано, что в приближении химического равновесия реагентов продуктов скорость дефлаграции Чепмена-Жуге линейно зависит от температуры горючей смеси:

$$D_{\text{def}} = \alpha T, \quad (1)$$

где α - коэффициент, зависящий от конкретной горючей смеси.

Следует особо подчеркнуть, что речь идет не о нормальной скорости пламени (определяемой в искусственных условиях с большим уровнем потерь), а о дефлаграционном горении с максимумом энтро-

пии как наиболее вероятностном процессе распространения горения. Соотношение (1) используется в дальнейшем при исследовании линейной модовой устойчивости цилиндрического фронта горения.

Вторая глава посвящена исследованию акустических свойств двух слоёв (исходной смеси и продуктов реакции) с разными температурами и их границы раздела, возникающих при горении в кольцевом канале.

Из экспериментальных наблюдений следует, что на начальном этапе поджига горючей смеси уже после первого пробега инициирующей волны по кольцевому каналу формируется граница раздела области холодной смеси (ближе к центру истечения смеси) и области горячих продуктов сгорания, которую можно рассматривать как окружность постоянного радиуса, соосную с внутренним и внешним радиусами кольцевого канала (рис. 1). Граница раздела трансформируется во фронт горения. В данной конфигурации возникают неустойчивые колебания и окружные волны с малыми амплитудами, распространяющиеся (бегущие) вдоль кольцевого канала поперёк течения горючей смеси. С течением времени неустойчивости развиваются во вращающиеся поперечные квазидетонационные волны.

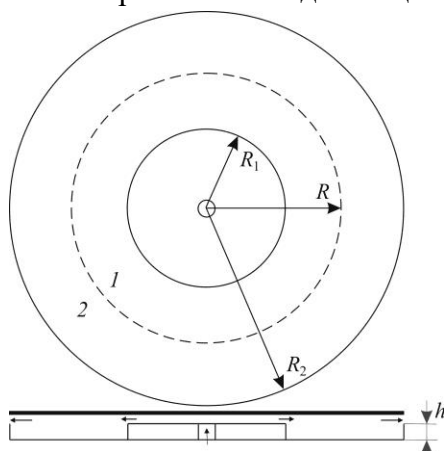


Рис. 1. Схематичное изображение канала в кольцевой камере сгорания. R_1 и R_2 - радиусы внутренней и внешней стенок, R - радиус границы раздела слоёв газов 1 и 2 с разными температурами, h - углубление канала.

Первый параграф содержит двухмерную постановку задачи. При пренебрежении радиально расходящимся дозвуковым потоком граница раздела делит газ на два покоящихся слоя с равными давлениями и

разными температурами (и, соответственно, плотностями). Газы в слоях считаются невязкими и термически совершенными, подчиняющиеся уравнению состояния идеального газа (Менделеева-Клапейрона) и имеющие не зависящие от температуры теплоёмкости. Акустические возмущения считаются установившимися и гармонически зависящими от времени. Для описания введена полярная система координат (r, φ) с началом в центре окружностей R_1 и R_2 .

Гармонические акустические возмущения давления описываются при помощи уравнений Гельмгольца и краевых условий, соответствующих физической постановке задачи:

$$\Delta \delta p_1 + \frac{\omega^2}{c_1^2} \delta p_1 = 0; \Delta \delta p_2 + \frac{\omega^2}{c_2^2} \delta p_2 = 0 \quad (2)$$

$$\delta p_j(r, \varphi, t) = \text{Re}(e^{-i\omega t} \delta p_j(r, \varphi)) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \delta p_1}{\partial r} = 0; r = R_1, \frac{\partial \delta p_2}{\partial r} = 0; r = R_2 \quad (4)$$

$$\delta p_1 = \delta p_2, \frac{\gamma_2 c_1^2}{\gamma_1 c_2^2} \frac{\partial \delta p_1}{\partial r} = \frac{\partial \delta p_2}{\partial r} = \rho_2 \omega^2 A(\varphi); r = R, \quad (5)$$

здесь ω - гармоническая частота колебаний, j - номер слоя, δp_j - возмущения давления, c_j^2 - квадрат скорости звука в слоях, γ_j - показатели адиабаты. Функция $A(\varphi)$ малая амплитуда возмущения границы раздела:

$$\tilde{R}(\varphi, t) = R + A(\varphi) \cdot e^{-i\omega t},$$

Нормальная скорость, которой в линейном приближении задаётся выражением:

$$D_n \equiv \frac{\partial \tilde{R}}{\partial t} = -i\omega A(\varphi) \cdot e^{-i\omega t}$$

Соотношения (4) имеют смысл условий непротекания на внутренней и внешней границах канала (углубление канала h в 10 раз меньше узкой щели для подачи горючей смеси, см. рис. 1). Соотношения (5) - это динамическое условие равенства возмущений давления на границе раздела слоёв и кинематическое условие равенства нормальных составляющих возмущения скоростей нормальной скорости движения границы в линейном приближении.

Задача (2)-(5) решались методом разделения переменных Фурье. В

результате решения получены собственные моды $\{k-l\}$ акустических колебаний и волн и соответствующие им собственные частоты ω_{kl} , где k - константа разделения переменных, целое число - угловой номер моды; l - натуральное число, радиальный номер моды. Возмущённая граница раздела горячего и холодного слоёв для моды $\{k-l\}$ имеет вид:

$$\tilde{R}(\varphi, t) = R + a^{(kl)} \exp\left[ik\left(\varphi - \frac{\omega_{kl}}{k}t\right)\right], \quad (6)$$

Из выражения (6) видно, что возмущённая граница раздела для моды $\{k-l\}$ имеет k локальных пучностей, вращающихся по окружности радиуса R с угловой скоростью ω_{kl}/k и линейной скоростью $V_{kl} = R\omega_{kl}/k$ (см. рис. 2). Иными словами, существуют вращающиеся окружные волны возмущения границы раздела слоёв.

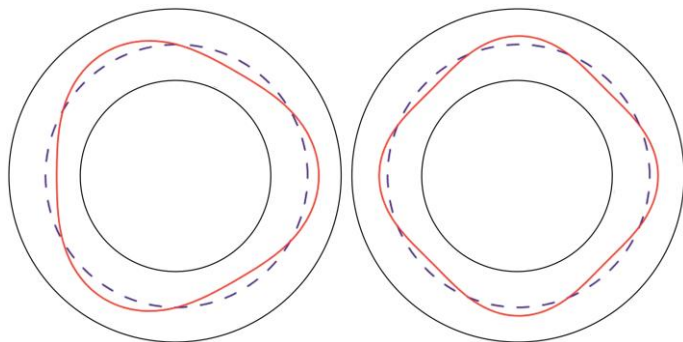


Рис. 2. Формы возмущённой границы раздела слоёв для мод $\{3-l\}$ (слева) и $\{4-l\}$ (справа). Пунктирная синяя линия - невозмущённая граница раздела R , красная линия - возмущённая граница раздела

На рис. 3 представлены скорости вращения окружных волн. В расчётах использовались параметры для канала плоско-радиальной кольцевой камеры сгорания Б.В. Войцеховского, на которой проводились экспериментальные наблюдения режимов непрерывной вращающейся детонации ацетилен-кислородной смеси с тремя и четырьмя волнами. Из рис. 3 видно, что скорости вращения всегда выше скорости звука в холодном слое (исходная смесь) и могут быть выше скорости звука в горячем слое (продукты реакции) при увеличении радиального номера моды.

Следует отметить, что скорость вращения пучностей по окружной координате, возникающая из акустических возмущений границы раз-

дела горячего и холодного слоёв, является скоростью точки контакта слоёв. Эта скорость может существенно отличаться от скорости звука, поэтому возможен сверхзвуковой режим вращения.

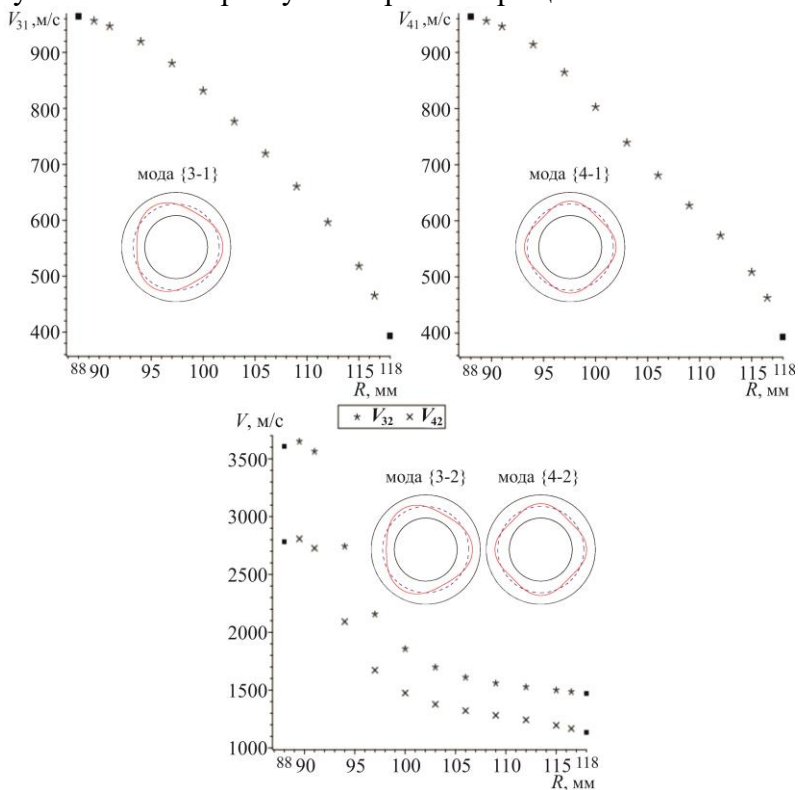


Рис. 3. Зависимости скоростей вращения окружных волн от расположения границы раздела в кольцевом канале. Квадратные чёрные метки - границы канала R_1 и R_2 .

Во втором параграфе приведено решение трёхмерной задачи при учёте углубления канала h . Для описания были выбраны цилиндрические координаты (r, φ, z) с началом в центре окружностей R_1 и R_2 , на верхней стенке канала. Гармонические по времени возмущения давления подчиняются уравнениям Гельмгольца, в которых оператор Лапласа записывается для цилиндрических координат. К краевым условиям (4)-(5) добавляются условия непротекания на верхней и нижней стенках кольцевого канала:

$$\frac{\partial \delta p_j}{\partial z} = 0; z = 0, -h.$$

Задача также решалась методом разделения переменных Фурье. Решение получено в виде мод $\{k-l-m\}$, где m - константа отделения переменной z , целое число - осевой номер моды. При $m=0$ трёхмерная задача переходит в двухмерную. В силу особенностей разделения переменных для собственных частот и скоростей вращения окружных волн справедливы следующие соотношения:

$$\omega_{klm} > \omega_{kl0} \equiv \omega_{kl}$$

$$V_{klm} > V_{kl0} \equiv V_{kl}$$

Для наглядности на рис. 4 представлены поверхности раздела слоёв в кольцевом канале для некоторых мод.

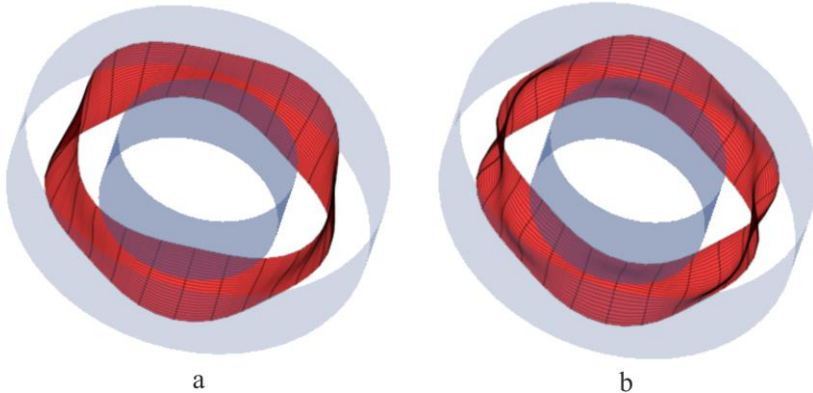


Рис. 4. Формы возмущённой поверхности раздела слоёв для мод $\{4-l-1\}$ (а) и $\{4-l-2\}$ (б). Серый цвет - внутренняя и внешняя стенки кольцевого канала.

В третьей главе рассматривается более близкая к реальной ситуации задача линейной модовой устойчивости цилиндрического фронта дефлаграционного горения, распространяющегося навстречу радиально расходящемуся дозвуковому потоку горючей смеси в кольцевой камере сгорания. Фронт горения рассматривается как бесконечно тонкая поверхность сильного разрыва газодинамических параметров. Такой подход справедлив, когда длины волн нестационарных возмущений много больше ширины зоны горения. Следует подчеркнуть, что под зоной горения здесь понимается не только собственно область химического превращения смеси в продукты, но и область в которой происходят процессы, отвечающие за распространение волны

дефлаграции (турбулизация, теплопроводность и т.д.).

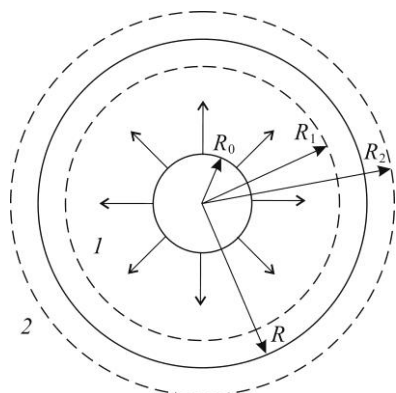


Рис. 5. Схема потока в кольцевой камере сгорания. Пунктирная линия - границы кольцевого канала.

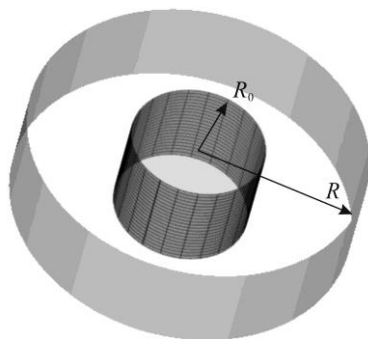


Рис. 6. Цилиндрический фронт горения.

В первом параграфе рассматривается горение в стационарном радиально расходящемся потоке. Стационарный цилиндрический фронт горения радиуса R делит течение на две области: 1 - область течения смеси и 2- область течения продуктов реакции (рис. 5-6). Реагенты и продукты считаются невязкими, нетеплопроводными и совершенными газами с постоянными теплоёмкостями. Течение считается везде изэнтропическим. При большом отношении давления в начальном ресивере для смеси к давлению в приёмном ресивере для продуктов реакции в сечении ресивера радиуса R_{in} достигаются критические параметры течения.

Уравнения, описывающие стационарные радиально расходящиеся течения смеси в полярных координатах, имеют вид:

$$u_j \frac{du_j}{dr} = -\frac{1}{\rho_j} \frac{dp_j}{dr}; \quad \frac{1}{r} \frac{d}{dr}(r\rho_j u_j) = 0; \quad p_j = A_j \rho_j^{\gamma_j}, \quad (7)$$

где u – это радиальная скорость, p – давление, ρ - плотность, γ - показатель адиабаты, A – постоянная, зависящая от термодинамических параметров на границах R_{in} и R ; индекс $j=1,2$ обозначает параметры течения в областях 1 и 2. Уравнения (7) являются законами сохранения импульса, массы и энергии, соответственно.

Известно, что *дозвуковые* решения уравнений (7) являются радиально расходящимися потоками, в которых числа Маха, $M_j = u_j / c_j$,

монотонно уменьшается с увеличением радиуса. На определенном радиусе R_0 области 1 число Маха достигает значения $1/3$. В дозвуковых потоках при числах Маха меньших $1/3$ относительные изменения плотности потока не превышают 4%, и их изменениями можно пренебречь.

Далее радиус R_0 для области 1 является начальным радиусом подачи смеси, а плотность потока в этой области - постоянной (рис. 5). Начальные газодинамические параметры потока на радиусе R_0 при числе Маха равном $1/3$ находятся из газодинамического решения уравнений (7), при условиях критического истечения (число Маха равно единице) на радиусе R_{in} . Число Маха в области 1, таким образом, является малым параметром задачи. Следует отметить, что в силу закона сохранения массы расход стационарных потоков, ρu , в каждом сечении r постоянен в областях 1 и 2 и равен расходу на границе R_0 .

При указанных выше предположениях в области 1 строится решение уравнений (7) с постоянной плотностью ρ_{01} :

$$u_1(r) = \frac{u_{01}R_0}{r}; p_1(r) = p_{01} + \frac{\rho_{01}u_{01}^2}{2} - \frac{\rho_{01}u_{01}^2R_0^2}{2r^2}; c_1^2(r) = \frac{\gamma_1 p_1(r)}{\rho_{01}} \quad (8)$$

На фронте горения ставятся стационарные условия экзотермического скачка и условие дефлаграции Чепмена-Жуге - условие касания прямой Михельсона и дефлаграционной ветви адиабаты энерговыделения. Это позволяет вычислить все газодинамические параметры за фронтом горения и построить газодинамическое решение уравнений (7) в области 2.

Условие стационарности фронта горения: скорость потока на радиусе R должна быть равна по модулю скорости горения Чепмена-Жуге относительно потока. Используя выражения (8) и соотношение (1), вычисляется радиус стационарного фронта R .

Второй параграф посвящён малым возмущениям горения. На все стационарные параметры накладываются малые возмущения с гармонической зависимостью от времени типа (3). На границе R_0 не предполагается схода вихрей и возмущений энтропии, поэтому возмущения в области 1 изоэнтропические, а поле возмущения скорости - потенциально (безвихревое). На фронте горения происходит выделение тепла, поэтому в области 2 возмущения в общем случае нельзя счи-

тять изоэнтропическими и потенциальными. Фронт горения и его скорость возмущаются так же, как и граница раздела слоёв неравномерно нагретых газов в первой главе, и обладает соответствующими особенностями (наличие вращающихся окружных волн, локальных пучностей и т.д.).

Следует отметить, что дозвуковая скорость втекания (подачи) горючей смеси в кольцевую камеру сгорания делает возможным проникновение акустических возмущений из области продуктов сгорания в область течения холодной смеси, оказывая влияние на систему подачи (и наоборот). Влияние системы подачи учитывается с помощью соответствующих граничных условий, описанных ниже.

Далее комплексные амплитуды возмущений в области 1 обезразмериваются с помощью начальных параметров стационарного потока (нижний индекс «01»):

$$\bar{\mathbf{u}}_1 = \frac{\delta \mathbf{u}_1}{c_{01}}; \bar{p}_1 = \frac{\delta p_1}{\gamma_1 p_{01}}; \bar{\rho}_1 = \frac{\delta \rho_1}{\rho_{01}}; \bar{c}_1^2 = \frac{c_1^2}{c_{01}^2}; \bar{T}_1 = \frac{\delta T_1}{\gamma_1 T_{01}}; \bar{\omega} = \omega \frac{R - R_0}{c_{01}};$$

$$\bar{A}(\varphi) = \frac{A(\varphi)}{R - R_0} \quad \bar{r} = \frac{r}{R - R_0}; \bar{t} = t \frac{c_{01}}{R - R_0}$$

Возмущения в области 2 обезразмериваются при помощи газодинамических параметров на фронте горения R со стороны области 2.

На нестационарном фронте горения ставятся общие граничные условия движущегося сильного разрыва, которые являются законами сохранения массы, импульса, энергии, а также кинематическое условие, связывающее нормальную скорость движения фронта со скоростью горения относительно потока горючей смеси. Возмущённая скорость горения в каждый момент времени является скоростью дефлаграции Чепмена-Жуге, и не зависит, например, от кривизны фронта горения, в отличие от модели Маркштейна. Используя безразмерные возмущения, общая система условий на фронте горения линеаризуется. В линеаризованной системе возмущения входят с коэффициентами, зависящими от значений параметров стационарных потоков в областях 1 и 2 на радиусе R .

Известно, что в режиме дефлаграции Чепмена-Жуге за фронтом горения массовая скорость потока продуктов реакции равна местной скорости звука в продуктах. При учёте этой особенности линеаризованная система условий на фронте горения существенно упрощается.

Условия для комплексных амплитуд возмущений параметров потока в области 1 на фронте горения имеют вид:

$$\begin{aligned}\bar{\rho}_1 &= 0; \bar{r} = \bar{R} \\ \bar{u}_{1r} &= -i\bar{\omega}\bar{A}(\varphi); \bar{r} = \bar{R}\end{aligned}\quad (9)$$

где $\bar{A}(\varphi)$ - малая амплитуда возмущения фронта горения. Отсюда следует, что достаточно решить задачу на поведение возмущений в области 1, чтобы узнать все особенности и свойства системы в целом.

Из общих уравнений акустики движущейся неоднородной среды получены уравнения для безразмерных комплексных амплитуд возмущений в области 1 (с точностью до первой степени малого числа Маха M_1):

$$\bar{\omega}^2 \bar{f} + \left(\frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} (\bar{r} \frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{r}}) + \frac{1}{\bar{r}^2} \frac{\partial^2 \bar{f}}{\partial \varphi^2} \right) = -2i\bar{\omega}M_1 \frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{r}} \quad (10);$$

$$\bar{p}_1 = \bar{\rho}_1 = i\bar{\omega} \cdot \bar{f} - M_1 \frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{r}} \quad (11)$$

$$\bar{\mathbf{u}}_1 = \bar{\nabla} \bar{f} \quad (12)$$

Для полной постановки задачи в области 1 нужно определить условие для возмущений на начальной границе R_0 , то есть каким образом устроена система подачи. Рассматривались три физические ситуации в системе подачи горючей смеси: 1 - отсутствуют возмущения расхода, 2 - отсутствуют возмущения радиальной скорости, 3 - отсутствуют возмущения давления.

В третьем параграфе выявлены и описаны основные свойства возникающих математических моделей линейной модовой устойчивости цилиндрического фронта горения в плоско-радиальной кольцевой камере.

Уравнение (10) решалось методом разделения переменных Фурье. Решение получено в виде мод колебаний и волн с определённой частотой $\bar{\omega}$ и произвольными постоянными амплитудами. При подстановке мод в соответствующие краевые условия задачи получается линейная однородная система уравнений на нахождение постоянных амплитуд. Как известно из теории линейных алгебраических уравнений, ненулевое решение этой системы существует, когда определитель матрицы системы равен нулю.

Условие равенства нулю определителя задёт уравнение, опреде-

ляющее *квазисобственные* частоты колебаний и волн - реальные части определяют частоту колебаний, а мнимые части квазисобственных частот определяют развитие колебаний по времени. Для каждого углового номера моды k существует набор квазисобственных частот $\bar{\omega}_{kl}$, соответствующих радиальным модам колебаний.

В четвёртом параграфе приведены результаты расчёта малых возмущений горения для параметров кольцевой камеры Б.В. Войцеховского. Для разных типов условий на границе R_0 получены квазисобственные частоты колебаний и волн. При отсутствии возмущений расхода в системе подачи все квазисобственные частоты имеют отрицательную мнимую часть. Так как использовалась гармоническая зависимость от времени типа (2), то это означает, что амплитуды колебаний и волн затухают по времени и фронт горения устойчив в данном случае.

Если в системе подачи отсутствуют возмущения радиальной скорости или возмущения давления, то существуют квазисобственные частоты с положительной мнимой частью, для которых фронт горения является неустойчивым.

Скорости вращения окружных волн возмущения фронта горения рассчитываются по формуле:

$$V_{kl} = \frac{c_{01} \operatorname{Re}(\bar{\omega}_{kl})}{k} \cdot \bar{R} \quad (13)$$

где c_{01} - скорость звука на границе R_0 .

Была изучена механика колебаний и волн в области 1 и на фронте горения. Проанализировано влияние скорости истечения смеси u_{01} (а, следовательно, и влияние положения фронта горения в кольцевом канале) на поведение скорости вращения окружных волн (см. рис. 7). Установлено, что скорости вращения всегда больше (в 2-5 раз) скорости звука в горючей смеси перед фронтом горения и близки к скорости звука в продуктах реакции за фронтом горения. Для мод с более высоким радиальным номером, скорости вращения окружных волн могут располагаться в диапазоне выше скорости звука в продуктах реакции.

Также были исследованы зависимости скорости роста по времени амплитуды неустойчивых мод. Установлено, что для мод с низшим радиальным номером при увеличении начальной скорости истечения

смеси скорость роста может становится отрицательной, то есть неустойчивость моды меняется на устойчивость.

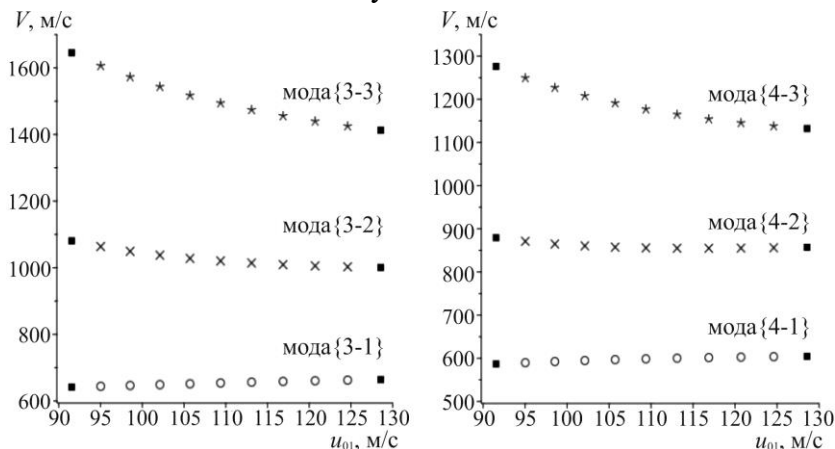


Рис. 7. Зависимость скоростей вращения окружных волн от начальной скорости потока для постоянного давления в системе подачи горючей смеси. Квадратные чёрные метки соответствуют внутренней и внешней границе кольцевого канала.

Основные результаты и выводы

1. Решена задача о поведении в кольцевом канале границы раздела области холодной смеси (ближе к центру) и области горячих продуктов сгорания. С помощью численно-аналитических методов изучена механика акустических колебаний и волн, возникающих в слоях неравномерно нагретых газов и на границе раздела в двухмерном и трёхмерном случаях. Получены собственные моды и частоты радиальных и угловых колебаний. В результате установлено, что:

- существуют вращающиеся окружные волны возмущения границы раздела слоёв с конечным количеством локальных пучностей вдоль окружной (угловой) координаты и получены скорости вращения этих волн. Количество локальных пучностей равно угловому номеру моды.

- при увеличении углового номера моды скорости вращения окружных волн уменьшаются, а при увеличении радиального номера - увеличиваются. При этом скорости вращения окружных волн при увеличении локальных пучностей от одной до четырёх всегда больше скорости звука в холодном слое (в 2-5 раз). А при увеличении радиального номера моды величины скоростей окружных волн могут распола-

гаться в диапазоне выше скорости звука в горячем слое.

2. На основном этапе численно-аналитических исследований решена более близкая к реальной ситуации задача модовой устойчивости цилиндрического фронта дефлаграционного горения в радиально расходящемся потоке горючей смеси. Получены квазисобственные частоты, которые, описывающие возрастающие или убывающие по времени колебания и волны. В результате установлено:

– если в системе подачи горючей смеси отсутствуют возмущения давления или возмущения радиальной скорости потока смеси, то существует дискретное множество частот и мод соответствующих колебаний и волн, для которых фронт горения является неустойчивым.

– при увеличении углового номера моды (количества локальных пучностей) скорости вращения окружных волн возмущения фронта горения уменьшаются, а при увеличении радиального номера - увеличиваются.

– скорости вращения окружных волн при увеличении локальных пучностей от одной до четырёх всегда больше скорости звука в горючей смеси, а при увеличении радиального номера моды могут располагаться в диапазоне выше скорости звука в продуктах реакции.

3. Вышеизложенные результаты качественно согласуются с поведением вращающихся квазидетонационных волн в кольцевом канале, скорости которых лежат в диапазоне от заниженных величин вплоть до скорости идеальной детонации Чепмена-Жуге.

Публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК

1. Васильев А.А., Трилис А.В. Скорость дефлаграционного горения при повышенных давлениях и температурах // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20. № 5. С. 615-622.

2. A V Trilis, A A Vasiliev and S V Sukhinin. Traveling circumferential unstable wave of cylindrical flame front [электронный ресурс] // Journal of physics: conference series. Vol. 722. 2016. DOI: 10.1088/1742-6596/722/1/012039.

3. А.В. Трилис. Моделирование поперечных детонационных волн в плоско-радиальном кольцевом канале // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12. № 2. С. 60-65.

4. А. А. Васильев, А.В. Пинаев, А.В. Трилис и др. Что горит в шахте:

метан или угольная пыль? // ФГВ. 2017. Т. 53. № 1. С. 11-18.

5. А.В. Трилис, С.В. Сухинин, А.А. Васильев. Устойчивость цилиндрического фронта пламени в кольцевой камере сгорания // Сиб. журн. индустр. математики. 2017. Т. 20. № 4. С. 67-79.

Сборники, труды и тезисы конференций

6. Трилис А. В. Скорость пламени и особенности горения углеводородных смесей // Материалы юбилейной 50-ой международной научной студенческой конференции: Математика. – Новосибирск: Изд-во НГУ. 2012. С. 116.

7. Трилис А.В. Зависимость скорости пламени в водородных смесях от давления и температуры // Доклады IX Всероссийской конференции молодых учёных по проблемам механики. Новосибирск: Изд-во ИТПМ СО РАН. 2012. С. 273-276.

8. A V Trilis and A A Vasiliev. Velocity of deflagration combustion at high pressures and temperatures [электронный ресурс]// Proceedings of 8th International Seminar on flame Structure. 2014. URL: <http://flame-structure-2014.com/wp-content/uploads/Artyom-Trilis.pdf>

9. А.В. Трилис, А. А. Васильев. Бегущие поперечные волны возмущения цилиндрического фронта горения // «Наука. Технологии. Инновации» сборник научных трудов в 9 частях, часть 2. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2016. С. 151-153.

10. Трилис А.В. Окружные волны возмущения цилиндрического фронта пламени в кольцевой камере сгорания // Тезисы докладов XI Всероссийской конференции молодых учёных по проблемам механики. Новосибирск: Параллель. 2017. С. 125-126.

11. Трилис А.В. Скорость роста по времени неустойчивых волн возмущения цилиндрического фронта горения // Тезисы докладов всероссийской конференции с международным участием, посвящённой 60-летию Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН «Современные проблемы механики сплошных сред и физики взрыва». Новосибирск: Изд-во ИГиЛ СО РАН. 2017. С. 95.