



МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственный научный центр Российской Федерации

Федеральное государственное унитарное предприятие

«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ
АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени профессора Н.Е.Жуковского»
ФГУП «ЦАГИ»

140180 Московская обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1
тел.: (495)556-4205, факс: (495)777-6332

E-mail: <http://www.tsagi.ru>

ОКПО 07542112, ОГРН 1025001624471

ИНН / КПП 5013009056/501301001

15.02.2018 № 40/2-10-1115

“УТВЕРЖДАЮ”

Генеральный директор
ГНЦ ФГУП «ЦАГИ»

академик РАН

/ С.Л. Чернышев /

12 февраля 2018 г.

На № _____

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Трилиса Артема Валерьевича
«Акустические колебания и устойчивость цилиндрического фронта горения
в плоско-радиальной кольцевой камере сгорания», представленную
на соискание ученой степени кандидата физико–математических наук
(специальность 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»)

В диссертации Трилиса А.В. построена математическая модель, описывающая начальный этап формирования вращающихся поперечных волн горения в плоско-радиальной камере сгорания, разработанной Б.В.Войцеховским как способ реализации непрерывно вращающейся детонационной волны. В настоящее время непрерывно вращающаяся детонация (НВД) широко рассматривается как перспективный способ использования детонационного горения для сжигания топлива в воздушно-реактивных двигателях. Во всем мире ведутся исследования, направленные на создание двигателей с НВД, в этом направлении достигнуты успехи (в качестве примера можно указать на исследования, организованные С.М. Фроловым из ИХФ РАН), и исследования двигателей с НВД в значительной мере потеснили исследования другого типа детонационных двигателей – импульсных детонационных двигателей. Поэтому построение теорий, дающих аналитическое описание развития процесса в камерах сгорания с непрерывно вращающимися волнами детонации, является **весьма актуальным**.

03467

Специфической особенностью плоско-радиальной камеры сгорания Б.В.Войцеховского является то, что измеренная в эксперименте скорость поперечных вращающихся волн горения относительно горючей смеси почти в 2 раза меньше, чем минимальная скорость распространения классической детонации (скорость детонации Чепмена-Жуге), и близка к скорости звука в продуктах сгорания. В диссертации такие волны называются «квазидетонационными волнами». Построенная А.В. Трилисом математическая модель направлена на объяснение данной величины скорости вращающихся волн.

В диссертации фактически предполагается, что в непрерывном дозвуковом течении горючей смеси в камере сгорания Б.В.Войцеховского вдоль радиусов от центрального источника к наружному выходу после поджига возникает стационарная цилиндрическая волна дефлаграции (т.е. волна горения, движущаяся в радиальном направлении навстречу потоку горючей смеси с дозвуковой скоростью, равной локальной скорости этой смеси). В работе **впервые** в линейном приближении показано, что вызванные малыми (акустическими) возмущениями собственные колебания фронта такой цилиндрической волны могут совершать непрерывное вращательное движение вокруг оси камеры со скоростью, зависящей от частоты возмущений, а при определенных частотах возмущений могут еще и расти по амплитуде. Предполагается, что развитие таких колебаний после перехода в нелинейную стадию завершается формированием поперечных волн, наблюдавшихся в эксперименте.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения.

В обзоре литературы, содержащемся во **Введении**, приведены ссылки на важнейшие результаты, полученные по тематике диссертации за последние 75 лет: работы по теории детонации, экспериментальные данные по вращающейся и спиновой детонации, исследования по устойчивости и газодинамической структуре волн горения (общее число ссылок – 37).

Первая глава диссертации посвящена проблеме определения зависимости скорости волны дефлаграции от начальных параметров горючей смеси. В предшествующих исследованиях по устойчивости детонации авторы пытались учесть структуру пламени и увязать локальную скорость распространения пламени с локальной кривизной фронта. Вместо этого, в диссертации волна горения рассматривается как экзотермический скачок (разрыв, скрывающий в себе и область тепловыделения, и область переноса тепла за счет теплопроводности и турбулентной диффузии) в

предположении о достижении химического равновесия в продуктах сгорания. При этом **впервые** делается предположение, что волна горения в камере Б.В.Войцеховского является не нормальным ламинарным горением, а предельной дефлаграцией Чепмена-Жуге, распространяющейся с максимально возможной для дефлаграции скоростью (при максимальном возможном росте энтропии в волне). В первой главе показывается, что скорость дефлаграции Чепмена-Жуге слабо зависит от начального давления и прямо пропорциональна начальной температуре горючей смеси.

Во **второй главе** рассматривается упрощенная постановка задачи, в которой делается допущение, что радиальным движением газа в камере можно пренебречь. Это приводит к модельной задаче об устойчивости поверхности раздела двух цилиндрических концентрических слоев газа с разной температурой (слоя исходной смеси и слоя продуктов горения) к малым (акустическим) возмущениям.

Задача вначале решается в классической двумерной постановке, аналогичной теории неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Получено аналитическое решение, в котором амплитуды различных мод возмущений давления представляются в виде функций Ганкеля 1-го и 2-го рода. Найдены собственные частоты колебаний газа. Уже в этой постановке возникают вращающиеся собственные колебания поверхности раздела. Демонстрируется, что скорости вращения всегда выше скорости звука в исходной смеси и могут быть выше скорости звука в продуктах реакции. Показано, что скорости вращения возмущений оказываются ближе к экспериментальным, если на наружных границах слоев поставить условия непротекания, соответствующие стенкам углубления кольцевого канала в камере Б.В. Войцеховского.

Затем рассмотрена трехмерная постановка, в которой учитывается глубина кольцевого канала плоско-радиальной камеры. Здесь также получено аналитическое решение. Основные качественные особенности движения колебаний сохраняются, хотя появляются дополнительные трехмерные краевые эффекты.

В **третьей главе** задача решается в полной постановке – с учетом радиального течения газа. Сначала получается газодинамическое решение для начальной стационарной цилиндрической волны дефлаграции. Зависимость радиальной скорости от радиуса находится в предположении, что течение при некотором радиусе $R \geq R_0$ можно считать несжимаемым.

Далее на полученное решение накладываются малые возмущения. В области исходной смеси возмущенное течение предполагается безвихревым и изоэнтропическим,

а возмущения в продуктах сгорания находятся с учетом перепада параметров в предельной дефлаграции Чемпена-Жуге. Это позволяет ограничиться рассмотрением возмущенного течения только в исходной смеси. Рассмотрено три варианта постановки граничных условий на начальной поверхности течения $R = R_0$: условие постоянства (т.е. отсутствия возмущений) расхода, постоянства радиальной скорости и постоянства возмущений давления. Для этих трех случаев получено аналитическое решение, в котором амплитуды различных мод возмущений выражаются через функции Бесселя нецелого индекса. Получены частоты колебаний волны горения с отличной от нуля мнимой частью. Как и в рассмотренной в Главе 2 модельной задаче, скорости вращения собственных колебаний волны горения имеют тот же качественный характер, что и скорости поперечных волн в экспериментах для камеры Б.В.Войцеховского. Установлено, что при отсутствии возмущений расхода колебания устойчивы, а при наличии возмущений расхода есть неустойчивые моды колебаний, амплитуда которых нарастает со временем. Показано, что для неустойчивых длинноволновых собственных колебаний увеличение скорости потока в камере может привести к прекращению нарастания амплитуды. Данное наблюдение может иметь **значение в практических приложениях**.

Объем диссертации - 94 страницы, в том числе 27 рисунков и 10 таблиц. Список литературы включает 58 работ. По тематике диссертации автором опубликовано 11 работ, из которых 5 – в журналах, рекомендованных ВАК, в том числе 1 работа без соавторов. Полученные автором результаты были представлены на ряде отечественных и международных конференций; доклады автора по материалам диссертации были отмечены почетными дипломами. Автореферат и публикации достаточно полно отражают содержание диссертации. Диссертация, вне всякого сомнения, соответствует паспорту специальности 01.02.05 – “Механика жидкости, газа и плазмы”.

Работа производит хорошее впечатление. Материал диссертации изложен ясно и логично, хорошим языком. Некоторым недостатком является то, что автор уделяет существенно больше места математическим вопросам, чем физическим. Возможно, более ясное объяснение физических предпосылок, лежащих в основе построенной математической модели, позволило бы исключить некоторые из высказанных ниже замечаний. В автореферате этот дисбаланс несколько сокращен.

Можно отметить следующие недостатки диссертационной работы:

1. В экспериментах Б.В.Войцеховского и др. поджиг смеси производился в одной точке окружности, поэтому использование осесимметричного течения со

- стационарной сферической дефлаграцией в качестве базового поля для развития возмущений представляется недостаточно обоснованным.
2. В работе отсутствует физическое обоснование выбора предельной дефлаграции Чепмена-Жуге в качестве правила отбора для скорости волны горения и для определения перепада параметров на фронте волны. Остались нераскрытыми физические механизмы реализации дозвуковой волны горения, распространяющейся с максимально возможной скоростью.
 3. Хотя на линейном этапе роста некоторые из неустойчивых мод колебаний проявляют свойства, качественно подобные свойствам поперечных волн в экспериментах Б.В.Войцеховского и др., на нелинейной стадии поведение волн может измениться.

Несмотря на эти замечания, **научная ценность** диссертации не вызывает никаких сомнений. **Впервые** получено замкнутое математическое описание возможного сценария начального этапа развития поперечных вращающихся волн в плоско-радиальной камере сгорания. Решенная задача носит классический характер. В рамках постановки задачи (линейная стадия развития возмущений) **работа является вполне законченным исследованием**. При этом очевидны пути дальнейшего развития – переход к рассмотрению нелинейной стадии роста возмущений, исследование физических механизмов, которые могут вызвать описанный сценарий развития процесса. **Достоверность** полученных результатов определяется, с одной стороны, полученными точными решениями уравнений движения газа в рамках физически обоснованных упрощений, а с другой стороны – сопоставлением с экспериментальными данными по камере сгорания Б.В. Войцеховского.

Результаты диссертации могут быть использованы в институтах Российской академии наук, в которых ведутся теоретические и экспериментальные исследования устойчивости течений газа как с горением, так и без горения (Институте проблем механики РАН, Институте гидродинамики СО РАН, Институте теоретической и прикладной механики СО РАН), в Институте механики МГУ и др. Полученные аналитические решения могут использоваться для верификации компьютерных программ, моделирующих развитие возмущений в течениях газа с горением. Возможно также использование материалов диссертации в учреждениях высшего образования (Московский государственный университет, Московский физико-технический

институт, Московский инженерно-физический институт, Санкт-Петербургский политехнический университет, Новосибирский государственный университет) в образовательных курсах, посвященных газодинамике горения и теории устойчивости течений газа.

Заключение

В диссертации Трилиса Артема Валерьевича «Акустические колебания и устойчивость цилиндрического фронта горения в плоско-радиальной кольцевой камере сгорания» решена научная задача, имеющая важное значение для развития теоретических методов описания динамики волн горения. В диссертации предложено возможное объяснение не объясненным до сих пор экспериментальным результатам. Диссертация является законченным высококачественным научным исследованием. Она содержит новые подходы к решению задач устойчивости волн горения. Работа полностью соответствует требованиям постановления Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842 (с изменениями и дополнениями от 28.08.2017 г.) «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, Трилис Артем Валерьевич, несомненно, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв обсужден на заседании научного семинара НИО-1 ЦАГИ 8 февраля 2018 г.

Отзыв подготовил:

Заместитель начальника лаборатории №14
отделения аэродинамики силовых установок ЦАГИ,
к.ф.-м.н., доцент


В.В. Власенко

Подпись Власенко В.В. заверяю.

Ученый секретарь Диссертационного совета ЦАГИ


М.А. Брутян



Полное название организации: Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФГУП «ЦАГИ»)

Почтовый адрес (с индексом) организации: 140180, Россия, г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, 1

Телефон организации: 8 (495) 556-42-05

Адрес официального сайта организации в сети «Интернет»: <http://www.tsagi.ru>

Адрес электронной почты организации: info@tsagi.ru