

## Отзыв

Официального оппонента на докторскую 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 по  
специальности 01.02.05 - «Механика жидкости, газа и плазмы»

В диссертации рассматриваются актуальные задачи современной газовой динамики, связанные с исследованием процессов горения в технических устройствах. Актуальность таких задач определяется, например, потребностями совершенствования современных и разработки принципиально новых воздушно-реактивных двигателей, основанных на детонационном горении.

Включенные в диссертацию материалы находятся в русле исследований, проводимых в крупных научных центрах страны, и восходящих еще к классическим экспериментальным работам Б.В. Войцеховского по исследованию вращающихся поперечных детонационных волн в кольцевых камерах сгорания.

Представленные в диссертации результаты имеют важное практическое значение, поскольку дают новые знания об особенностях развития рабочего процесса в камерах сгорания, позволяют понять особенности протекания такого рода процессов сгорания топлив и определить требования к конструированию двигателей на их основе, провести качественный анализ эффективности устройств, работающих на детонационных процессах. Полученные результаты полезны для постановки экспериментов.

Диссертация состоит из введения, краткого содержания работы, трех глав, приложения, заключения и списка литературы из 58 ссылок.

Во введении указана актуальность докторской работы, сформулированы цели проведенного автором диссертации исследования, представлен обзор результатов ранее выполненных экспериментальных исследований процессов непрерывной спиновой (вращающейся) детонации, в том числе проведенных в Институте гидродинамики СО РАН Б.В. Войцеховским и др. в кольцевых камерах сгорания; методика исследований автора диссертации и результаты, полученные им для объяснения вышеуказанных экспериментов, результаты исследования устойчивости горения других авторов. Приведен список научных мероприятий, на которых были доложены и обсуждены результаты докторской работы. Дано краткое содержание работы.

В первой главе обсуждаются физические основы процессов детонационного и дефлаграционного горения. Для различных смесей в приближении химического равновесия реагентов и продуктов реакции приведены результаты расчетов зависимости скорости дефлаграции Чепмена-Жуте от начальных температуры и давления. Показано, что скорость дефлаграции линейно зависит от температуры. Показана непрерывность зависимости волны от начальных данных.

Во второй главе рассмотрено поведение малых возмущений в покоящейся смеси горючего и продуктов горения в кольцевом канале камеры сгорания. Получено решение этой задачи для гармонических возмущений, определена форма возмущенной границы сред горючее-продукты реакции. Показано существование вращающихся окружных волн возмущения границы раздела с конечным количеством локальных пучностей вдоль угловой координаты. Выполнен расчет возмущений для ацетилен-кислородной горючей смеси. Теоретически показано существование вращающихся окружных волн, значительно превосходящих по скорости звуковые волны в горючей смеси и продуктах реакции. Указано сходство таких волн с ранее наблюдаемыми в экспериментах Войцеховского, Михайлова и Топчияна.

Определена зависимость скорости вращающихся в камере возмущений от положения границы раздела смесей горючее-продукты реакции.

Трехмерная задача распространения возмущений при учете углубления кольцевого канала сведена к двумерной.

В третьей главе исследуется линейная модовая устойчивость стационарного цилиндрического фронта дефлаграционного горения Чепмена-Жуге в радиально расходящемся потоке горючей смеси в кольцевой камере сгорания. Установлено, что если на начальной границе подачи горючей смеси отсутствуют малые возмущения давления или возмущения радиальной скорости потока смеси, то существуют частоты и моды соответствующих колебаний и волн, для которых фронт горения является неустойчивым – есть растущие со временем возмущения. В отношении окружных волн возмущения фронта горения показано, что скорости их вращения при увеличении углового номера моды (количества локальных пучностей) уменьшаются, а при увеличении радиального номера – увеличиваются. Также показано, что 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 горячих продуктах реакции.

Получены и проанализированы зависимости скоростей вращения волн возмущения фронта горения от скорости подачи горючей смеси на начальной границе течения.

Приложение содержит преобразование системы граничных условий на фронте горения и формулировку выводов из проведенного исследования.

В заключении представлены основные выводы проведенного исследования.

Достоверность полученных результатов подтверждается их внутренней непротиворечивостью и использованием хорошо апробированных теоретических подходов и численных методов. Основные результаты работы опубликованы в изданиях из списка ВАК (5 публикаций), обсуждались и получили одобрение на российских и международных конференциях.

По поводу текста диссертации можно высказать замечания.

1. В достаточно полном обзоре литературы по исследуемому вопросу отсутствуют ссылки на монографию Зельдович Я.Б., Баренблatt Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, Наука, 1980.
2. Отсутствуют ссылки на работы сотрудников НИИ механики МГУ под руководством академика В.А. Левина по детонационным режимам горения топлив.
3. Язык диссертации, к сожалению, местами не отличается совершенством (например, выражения «взгляд на горение со стороны детонации»; «качественно совпадают» применительно к таким параметрам течения, как скорости, «покоящаяся стационарная волна», «описать числовое значение скорости», «самоподдерживающаяся скорость», «вклад в скорость горения», «линеаризация на покой», список можно продолжить). Малоудачным, на наш взгляд, является использование для изучаемого в диссертации технического устройства (камеры) наименование «плоско-радиальная кольцевая» ввиду противоречия терминов плоский и радиальный. По сути, камера является кольцевой, течение в ней радиальным. Кстати, автором также используется наименование для изучаемой им модели «кольцевой канал».
4. Стиль изложения материала в диссертации местами сложен для понимания. Так, например, указывается, что одним из способов описания устойчивости горения является представление его поверхностью разрыва. Что существует устойчивость горения с точки зрения диффузионно-тепловых процессов. Трудно понимаема фраза "условие равенства нормальных составляющих к границе возмущений" (стр. 12)
5. Сформулированное на странице 13 утверждение ставит знак равенства между акустическими и малыми возмущениями. Акустические возмущения являются, конечно, малыми, но не все малые возмущения являются акустическими.

6. На стр. 66 заостряется внимание на физическом смысле многозначности мод. Однако далее следуют рассуждения математического характера и физический смысл указанного явления не проясняется.
7. В Приложении формулируются выводы, которые потом пересказываются в иной форме в специальном заключительном разделе диссертации.

Указанные замечания не снижают общего качества диссертации. Полученные результаты в целом достоверны, основные выводы и заключения обоснованы.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Работа была заслушана автором отзыва. Автор диссертации владеет материалом.

Диссертационная работа является законченным научным исследованием и отвечает критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК, а ее автор Трилис Артем Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент,  
ведущий научный сотрудник НИИ механики МГУ  
к.ф.-м.н.



Богданов Андрей Николаевич

119121, Москва, Мичуринский просп., д. 1  
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова

(495) 9395977

bogdanov@imec.msu.ru

