

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию 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.

1. Актуальность темы диссертации

Вопросы распространения детонационных волн в газовых горючих смесях с учетом их взаимодействия со стенками, исследование особенностей распространения детонационных волн в различных режимах является актуальной темой исследования. Диссертация Трилиса А.В. посвящена выявлению физических процессов, сопровождающих распространение детонационной волны при ее поступательно-вращательном движении по горючей смеси. Актуальность темы также определяется тем, что на основе использования непрерывной вращающейся детонации ведутся разработки новых энергетических установок, основанных на детонационном сжигании топлива, работы по созданию ракетного двигателя повышенной эффективности.

В диссертации Трилиса А.В. подробно исследуется влияние акустических волн на распространение детонационной волны. Анализируется устойчивость детонационной волны к возмущениям, которые в обязательном порядке возникают при работе устройств подачи топлива в кольцевую камеру сгорания, внутри камеры сгорания и на выходе.

В связи с этим тема диссертационной работы Трилиса А.В., связанная с указанными направлениями исследований, является актуальной.

2. Общая характеристика диссертации

Общий объем диссертации 94 страницы. Состоит из введения, трех глав, одного приложения, заключения, списка литературы.

Во **Введении** приведена общая характеристика работы. Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, изложены основные идеи и методы, используемые в диссертации, определена практическая ценность результатов. Представлен обзор теоретических и экспериментальных работ по непрерывной вращающейся детонации, спиновой детонации, работ, содержащих методы и подходы к описанию устойчивости пламени.

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

дефлаграционного горения от давления и температуры получен вывод о том, что скорости горения в диапазоне от дефлаграции до детонации для топливо-кислородных и топливо-воздушных смесей в зависимости от начальных условий образуют единую поверхность в параметрах давление-температура-скорость.

Вторая глава посвящена исследованию акустических свойств газовой двухслойной структуры с разными температурами. Такие структуры возникают на границе исходной смеси и продуктов реакции. Конкретно автор исследует устойчивость границы раздела при горении в кольцевом канале. В такой конфигурации возникают неустойчивые колебания и окружные волны с малыми амплитудами, распространяющиеся вдоль кольцевого канала поперёк течения горючей смеси.

Исследование проведено с использованием анализа эволюции малых возмущений. Автор провел анализ развития возмущений для двух типов граничных условий: постоянство давления на границах кольцевого канала и не протекания. Анализ уравнений для возмущений проведен методом Фурье. Задача решена в двух и трехмерной постановке. В расчётах использовались параметры для канала плоско-радиальной кольцевой камеры сгорания Б.В. Войцеховского. Для нее имеются экспериментальные данные, где наблюдались режимы непрерывной вращающейся детонации с тремя и четырьмя волнами. На основе проведенных в акустическом приближении получены вращающиеся окружные волны возмущения границы раздела слоев с конечным количеством пучностей по угловой координате, получены скорости вращения этих волн. Скорость их перемещения выше, чем скорость звука в холодном газе. Определена зависимость скорости вращающихся в камере возмущений от положения границы раздела смесей горючее-продукты реакции. Результаты качественно соответствуют результатам экспериментальных наблюдений Б.В. Войцеховского.

В третьей главе рассматривается задача линейной модовой устойчивости цилиндрического фронта дефлаграционного горения, распространяющегося навстречу радиально расходящемуся дозвуковому потоку горючей смеси в кольцевой камере сгорания. В постановке задачи исследования учитывается возможность проникновения акустических возмущений из области продуктов сгорания в область течения холодной смеси. Влияние системы подачи учитывается с помощью соответствующих граничных условий. Уравнение для возмущений решалось методом разделения переменных Фурье. Решение получено в виде мод колебаний и волн с определённой частотой и произвольными постоянными амплитудами. Также в главе приведены результаты расчёта малых возмущений горения для параметров кольцевой камеры Б.В. Войцеховского. Для разных условий на границе получены квазисобственные частоты колебаний и волн. Получены условия затухания возмущений и их распространения. Получена механика колебаний и волн в области исходной холодной смеси и на фронте горения. Проанализировано влияние скорости втекания смеси на скорость вращения

окружных волн. Скорости вращения всегда больше (в 2-5 раз) скорости звука в холодной горючей смеси перед фронтом горения и близки к скорости звука в продуктах реакции за фронтом горения.

Получены и проанализированы зависимости скоростей роста по времени неустойчивых мод и зависимости скоростей вращения волн возмущения фронта горения от скорости подачи горючей смеси на начальной границе течения. Показано, что для неустойчивых колебаний с низшим радиальным номером i , соответственно, максимальной возможной длиной волны увеличение скорости потока в камере может привести к прекращению нарастания амплитуды.

В **Заключении** представлены выводы, следующие из диссертационной работы.

В **приложении** представлены подробности преобразования граничных условий на фронте горения.

3. Достоверность и научная новизна результатов диссертации

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием известных физических и математических моделей горения и детонации, акустики движущейся неоднородной среды, использованием классических методов для получения аналитических решений. Компьютерные программы, реализующие методы решения уравнений математических моделей, основаны на известных, апробированных алгоритмах. Результаты анализа поставленных задач качественно согласуются с экспериментальными данными наблюдений.

Новизна результатов: 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. 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 координаты, получены скорости вращения этих волн. Предложена математическая модель линейной модовой устойчивости цилиндрического фронта горения Чепмена-Жуге в радиально расходящемся потоке с малым числом Маха. Получены аналитические выражения для акустических мод колебаний и волн.

4. Значимость результатов для науки и практики

Результаты работы позволяют выявить новые закономерности в механизме появления и распространения поперечных квазидетонационных волн в плоско-радиальной кольцевой камере сгорания. Полученные аналитические решения могут быть использованы в качестве частных случаев для тестирования численных алгоритмов решения задач с учетом акустических колебаний при распространении детонационной волны.

Полученные результаты дают объяснение появлению волн неустойчивости при распространении поперечных детонационных волн в плоскорадиальной кольцевой камере сгорания, могут быть использованы при проектировании детонационных двигателей с непрерывной вращающейся детонацией и анализе экспериментальных результатов.

5. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, выносимых на защиту.

Обоснованность результатов диссертационного исследования, положений, выводов и рекомендаций обеспечивается современным уровнем и непротиворечивостью его исходных теоретических положений, применением надежных и апробированных аналитических методов решения уравнений математической физики в частных производных второго порядка, методов численного решения, корректной интерпретаций полученных результатов. Обоснованность научных положений и выводов исследования подтверждается сопоставлением собственных результатов с данными литературы.

6. Полнота опубликования результатов исследований.

Результаты работы опубликованы достаточно полно. Опубликованы 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 4 статьи в материалах всероссийских и международных конференций, в 2 тезисах докладов всероссийских и международных конференций.

7. Автореферат

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

8. Замечания по диссертационной работе.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Обзор научно-технической литературы по вопросам распространения поперечных детонационных волн автором был сделан достаточно кратко. В автореферате и диссертации говориться «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 ...». Однако конкретных источников научно-технической информации в интервале времени с 2007 по 2017 г в диссертации приведено 14 с учетом работ автора и его научного руководителя.

2. В диссертации указывается о возможной скорости распространения вращающихся окружных волн возмущения границы раздела слоёв со скоростью, превышающей скорость звука в горячем слое, однако не раскрывается физическая сторона этого явления.

3. В экспериментах по непрерывной спиновой детонации инициирование процесса всегда производится в одной точке кольцевого канала. Из текста диссертации не вполне понятно почему для возмущений выбрана в качестве исходной конфигурация аксиально-симметричного цилиндрического фронта горения и стационарного потока.

4. На рисунках 1.6 б-1.9 б представлены поверхности горения для смеси ацетилена с воздухом и кислородом, водорода с воздухом и кислородом. Утверждается, что «поверхность скоростей общая». Однако из указанных рисунков этого не видно. Хотя на рисунках 1.6 а-1.9 а это хорошо видно. Не понятна цель построения рисунков 1.6 б-1.9 б.

5. На рисунках 3.3 и 3.4 представлены распределения возмущений для различных мод. Однако на рисунках нет обозначений представляемых величин, а также не обозначено положение границы, разделяющей продукты горения от исходной смеси реагентов.

9. Общая характеристика диссертационной работы

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости представленных результатов и общей положительной оценки работы. Замечания продиктованы интересом к полученным результатам, а также дальнейшему развитию работы.

Считаю, что диссертационное исследование вносит существенный вклад в развитие исследований по горению и детонации газовых смесей, физико-химической гидромеханики, гидродинамической устойчивости (пп. 8, 13 паспорта специальности), соответствует специальности 01.02.05 – механика жидкости газа и плазмы.

Считаю, что диссертация Трилиса Артема Валерьевича «Акустические колебания и устойчивость цилиндрического фронта горения в плоско-радиальной кольцевой камере сгорания» соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, п. 9, утвержденным постановлением Правительства РФ от 24.09.13 г. № 842, а ее автор Трилис А.В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Профессор кафедры математической физики Федерального
государственного автономного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский Томский
государственный университет»,
доктор физико-математических наук,
01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

 14.02.2018

Крайнов Алексей Юрьевич

Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36
тел. 8(3822)52-98-45

email: akrainov@ftf.tsu.ru



ПОДПИСЬ
УДОСТОВЕРЯЮ

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ТГУ

Н. А. САЗОНТОВА

