

ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

о диссертационной работе
Трилиса Артема Валерьевича

«Акустические колебания и устойчивость цилиндрического фронта горения в плоско-радиальной кольцевой камере сгорания», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05. - «Механика жидкости, газа и плазмы»

Трилис Артем Валерьевич обучался под моим руководством в аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН), в настоящее время работает младшим научным сотрудником лаборатории газовой детонации ИГиЛ СО РАН.

Тематика диссертационной работы касается выявления физических процессов, сопровождающих распространение детонационной волны (ДВ) при ее поступательно-вращательном движении по горючей смеси. Еще в 20-годах прошлого столетия был экспериментально обнаружен спиновый режим детонации, не укладывающийся в рамки классической теории детонации и долгие годы считавшийся экзотическим. Экзотика заключалась в том, что на внутренней закопченной стенке детонационной трубы регистрировался спиралевидный след после прохождения по трубе детонационной волны, что явно противоречило принятой тогда гипотезе о плоском фронте ДВ. 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 колебаний продуктов детонации (основной корень функции Бесселя для цилиндрической системы координат).

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 детонационной волны при радиальном истечении смеси из центрального отверстия и распространении ДВ по кольцевому каналу. Основной загадкой этого процесса являются заметно меньшие скорости распространения вращающихся волн по сравнению с классической скоростью детонации.

В последние годы ведущие страны (США, Япония, Франция, Китай и др.) охватил бум по созданию нового перспективного двигателя на детонационном режиме сжигания топлива для авиационной и ракетно-космической отрасли. В России общепризнанным лидером в исследованиях вращающейся детонации (судя по цитированием) является Институт гидродинамики. Было предложено много схем, проведены сотни экспериментов, создан ряд расчетных программ... Получены многочисленные экспериментальные подтверждения того, что скорость вращающейся детонации редко наблюдается совпадающей с классической величиной, чаще всего она фиксируется существенно меньшей. 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.

Перед А.В. Трилисом была поставлена задача проанализировать роль горячих продуктов сгорания и их основные акустические свойства на примере течений в плоско-радиальной кольцевой камере сгорания, когда фронт горения является заведомо неплоским. При выполнении этого задания Соискателем рассмотрены и решены следующие задачи:

1. установлена зависимость скорости дефлаграционного горения от давления и температуры смеси. Следует особо подчеркнуть, что речь идет не о нормальной скорости пламени (определенной в искусственных условиях с большим уровнем потерь), а о дефлаграционном горении с максимумом энтропии как наиболее вероятностном процессе распространения горения. Зависимость скорости дефлаграционного горения выведена из известного в теории детонации свойства: прямая Рэлея-Михельсона из точки начального состояния смеси, касающаяся детонационной адиабаты, одновременно представляет собой дефлаграционную касательную, проведенную из состояния на ударной адиабате, присущего химпiku ДВ;
2. решена задача о поведении в кольцевом канале границы раздела области холодной смеси (ближе к центру) и области горячих продуктов сгорания. Подобная граница раздела возникает при инициировании смеси уже после первого пробега инициирующей волны по кольцевому каналу. На начальном этапе такую границу можно рассматривать как окружность постоянного радиуса, соосную с внутренним и внешним радиусами кольцевого канала. Большая разница в скоростях звука в горячих продуктах и холодной смеси является основной причиной неустойчивости этой границы. В данной конфигурации возникают неустойчивые колебания и окружные волны с малыми амплитудами, распространяющиеся (бегущие) вдоль кольцевого канала. С течением времени неустойчивости развиваются во вращающиеся поперечные квазидетонационные волны. 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. Обнаружены 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. Показано, что при увеличении углового номера моды скорости вращения окружных волн уменьшаются, а при увеличении радиального номера - увеличиваются. Установлено, что 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 располагаться в диапазоне выше скорости звука в горячем слое. Это качественно согласуется с поведением вращающихся квазидетонационных волн в кольцевом канале, скорости которых лежат в диапазоне от заниженных величин вплоть до скорости идеальной детонации Чепмена-Жуге.
3. На основном этапе численно-аналитических исследований решалась более близкая к реальной ситуации задача модовой устойчивости цилиндрического фронта дефлаграционного горения в радиально расходящемся потоке горючей смеси. Следует отметить, что дозвуковая скорость втекания 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. Соискатель учёл данное влияние на систему подачи с помощью соответствующих граничных условий. Следует отметить, что в большинстве расчетных кодов, посвященных вращающейся ДВ, задается постоянство параметров истечения и обратное влияние продуктов детонации не учитывается. Соискателем проанализирован начальный (линейный) этап развития неустойчивости изначально гладкого кольцевого фронта дефлаграционного пламени (как

границы слоёв свежей смеси и горячих продуктов горения в плоско-радиальной кольцевой камере). В результате решения вышеописанной задачи обнаружено, что существуют квазисобственные частоты, которые описывают возрастающие или убывающие по времени колебания и волны. Установлено, что если в системе подачи горючей смеси существуют малые 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. Выявлены основные моды аксиальных колебаний. Показано, что при увеличении углового номера моды (количество локальных пучностей) скорости вращения окружных волн возмущения фронта горения уменьшаются, а при увеличении радиального номера - увеличиваются. Установлено, что скорости вращения окружных волн при увеличении локальных пучностей от одной до четырёх всегда больше скорости звука в холодном слое, а при увеличении радиального номера моды могут располагаться в диапазоне выше скорости звука в горячем слое. Если постоянным задать массовый расход горючей смеси на начальной границе подачи (возмущение расхода равно нулю), то фронт горения устойчив. Отметим, что данный вывод можно было сделать из физической постановки задачи до расчётов, так как стационарный радиально расходящийся поток горючей смеси и фронт горения задаются постоянным расходом. Устойчивость фронта горения, следующая из расчёта в случае постоянства расхода для возмущений в системе подачи смеси, свидетельствует о корректности выбранной модели.

4. На следующем этапе проанализировано влияние скорости истечения смеси (а, следовательно, и влияние положения фронта горения в кольцевом канале) на характеристики процесса. Установлена качественная корреляция расчётных значений с экспериментальными значениями скоростей вращения квазидетонационных волн, в том числе - занижение скорости вращения по сравнению с классической величиной скорости детонации. Решена задача неустойчивости цилиндрического фронта дефлаграционного горения в кольцевом канале, разделяющем областя натекающей из центра холодной смеси и области горячих продуктов сгорания, вытекающих наружу из кольцевого канала.

Достоверность перечисленных результатов подтверждается строгими математическими выкладками и доказательствами. Соискатель постоянно проводил сравнительный анализ работ других авторов. Основные результаты диссертационной работы прошли процедуру рецензирования и опубликованы в 5 статьях (из них 1 без соавторов) в журналах, рекомендованных ВАК. В настоящее время Соискатель принимает участие в выполнении проектов РНФ и РФФИ. Результаты диссертационной работы докладывались на научных семинарах в ИГиЛ СО РАН, в ЦАГИ, неоднократно представлялись на международных и российских конференциях. На конкурсе работ молодых ученых ИГиЛ СО РАН, проводившемся в 2016 году, доклад по материалам диссертационной работы занял первое место.

А.В. Трилис зарекомендовал себя как увлеченный исследователь, способный к самостоятельной плодотворной работе. Хорошо владеет математическим аппаратом и методами численного моделирования. Активен и в общественной жизни – является членом профсоюзного комитета Института, курирующим жилищные вопросы молодых сотрудников.

Считаю, что представленная к защите диссертация «Акустические колебания и устойчивость цилиндрического фронта горения в плоско-радиальной кольцевой камере сгорания» удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Трилис Артем Валерьевич заслуживает присуждения ученой

степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05. -
«Механика жидкости, газа и плазмы».

Научный руководитель

Заведующий лабораторией газовой
детонации ИГиЛ СО РАН

д.ф.-м.н.
(01.04.17 - «Химическая
физика, горение и взрыв,
физика экстремальных
состояний вещества»)

Васильев Анатолий Александрович

630090, г. Новосибирск, проспект Лаврентьева, д. 15
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики
им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук
Тел. 8 (383) 333 20 27, 8 913 936 75 70
E-mail: gasdet@hydro.nsc.ru

Подпись А. А. Васильева заверяю
Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН
к.ф.-м.н.

И. В. Любашевская

07.11.2017

