

Адрес:
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2,
тел. (495) 939-16-82
e-mail: dean@phys.msu.su

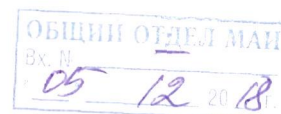
О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу Куроедова Алексея Анатольевича «ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Исследование процессов горения твердых топлив обусловлено в первую очередь разработкой ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ). В последнее время получили развитие различные устройства, использующие процесс горения твердых топлив: твердотопливные газогенераторы, например: для автомобильных подушек безопасности под, твердотопливные химические и газодинамические лазеры, твердотопливные системы пожаротушения. Одной из важнейших проблем функционирования этих устройств является неустойчивость рабочих процессов, протекающих в камере сгорания. Данная проблема в различных её проявлениях имеет давнюю историю и возникла одновременно с началом разработки и эксплуатации первых ракетных двигателей на твёрдом топливе более пятидесяти лет назад. Решению этой проблемы посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ и накоплен богатый опыт по изучению этой проблемы. В настоящее время, в связи с разработкой нового поколения РДТТ и использования новых высокоэнергетических топлив интерес к проблеме неустойчивости увеличивается.

В результате исследований установлено, что неустойчивость рабочего процесса в энергетических установках на твёрдом топливе в общем случае может иметь акустическую и неакустическую природу. Акустическая неустойчивость рабочего процесса связана с появлением периодических колебаний давления, обусловленных возбуждением звуковых волн в камере сгорания. Низкочастотная акустическая неустойчивость в РДТТ имеет газодинамическую нелинейную природу. Высокочастотная акустическая неустойчивость скорее всего является следствием взаимодействия резонансных волн, генерируемых в камере сгорания, с поверхностью горения заряда твёрдого топлива. Неустойчивость процесса течения в РДТТ ухудшает внутриваллистические характеристики двигателя и может привести к снижению эффективности работы или разрушению конструкции двигателя. Наибольшую опасность сегодня представляет низкочастотная акустическая неустойчивость режима работы энергетической установки твердого топлива (ЭУТТ), которая проявляется в основном в продольном направлении камеры сгорания. В настоящее время появление как низкочастотной, так и высокочастотной неустойчивости плохо прогнозируется и не удается точно рассчитать параметры реального колебательного процесса.

Поэтому работа Куроедова А.А. посвященная комплексному исследованию неустойчивости рабочего процесса в твердотопливных энергетических установках **является актуальной**. Несомненным достоинством этой работы является сочетание экспериментальных, аналитических и численных методик к изучению очень сложного явления.



Работа состоит из введения, заключения и четырех глав, списка источников и приложения.

В введении сформулированы основные цели и задачи исследования, обоснована актуальность, достоверность, практическая ценность и основные положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

В первой главе производится анализ проблемы неустойчивости рабочего процесса в энергетических установках и история теоретического и экспериментального решения этой проблемы начиная с 30-ых 40-ых годов двадцатого века. В основном эти работы стимулировались развитием ракетной техники. Далее в первой главе приводится литературный обзор по тематике работы. Отдельно проведен обзор экспериментальных и теоретических исследований низкочастотной неустойчивости, линейной и нелинейной высокочастотных неустойчивостей. Наиболее подробно рассмотрены полуаналитические методы расчета характеристик высокочастотной неустойчивости а именно: метод Калика и энергетический подход. В области экспериментальных методов большое внимание уделено литературе по экспериментам на специальной установке для определения акустической проводимости зоны горения топлива – так называемой Т-камере. В обзор также включены экспериментальные работы на импедансных трубах, установках с магнитным расходомером, микроволновой метод.

Вторая глава посвящена разработке и реализации методик теоретического исследования неустойчивых режимов работы твердотопливных энергетических установок.

В разделе 2.1 автор излагает модификацию полуаналитической энергетической методики исследования линейной неустойчивости рабочего процесса (в основном продольной акустической неустойчивости). Данная методика основана на анализе баланса энергии малых возмущений и решении линеаризованных дифференциальных уравнений, описывающих движение продуктов сгорания в камере с учётом влияния процессов горения, теплообмена и потерь энергии возмущений в сопловом блоке, демпфирования возмущений стенками камеры и другими физическими и химическими факторами.

Баланс энергии возмущений в камере определяется на основе расчёта поля основных физических величин: давление и скорость из дифференциальных уравнений движения несжимаемой жидкости типа Громеки-Лэмба и уравнения неразрывности.. Параметры возмущений малой амплитуды получаются из уравнения изменения энергии возмущений по времени правая часть которого представляет собой сумму источников акустической энергии и ее диссипации в рассматриваемой полости с проницаемыми стенками. Оценка линейной устойчивости производится по знаку коэффициента затухания получаемого в результате интегрирования уравнения изменения энергии возмущений по объёму и осреднению по времени. В качестве оператора осреднения по времени автор использовал как среднеинтегральное значение на интервале, так и выражение с экспонентой в подинтегральной функции.

В разделе 2.2 автор излагает методику исследования неустойчивости рабочих процессов, основанную на численном решении линеаризованных уравнений, описывающих динамику продуктов сгорания в камере твердотопливной энергетической установки. Исходно рассматривается система уравнений Навье-Стокса для нестационарных двумерных течений вязкого газа в дивергентной форме. Затем консервативные переменные представляются в виде суммы стационарного слагаемого и пульсационного (амплитуда пульсационного намного меньше номинального значения стационарного). После подстановки суммарных консервативных переменных и пренебрежения членами более высокого порядка малости исходная система уравнений

распадается на две – систему описывающую квазистационарное течение в камере сгорания и систему, описывающую пульсационное течение, накладываемое на стационарное решение.

Для решения первой системы уравнений автор применяет метод установления с пространственной аппроксимацией по методу Галеркина с разрывными базисными функциями (невязкие потоки через боковые грани расчетных ячеек определяются по методу Лакса -Фридрихса) и с аппроксимацией по времени методом Рунге-Кутты второго порядка. Алгоритм расчета реализован на нерегулярной расчетной сетке с треугольными ячейками полученной с помощью триангуляции Делоне в двумерной области с криволинейными границами.

Вторая система уравнений относительно пульсационных величин, после линейаризации и пренебрежения диссипацией и теплопроводностью для диссипации энергии возмущений малой амплитуды, преобразуется к виду линейаризованных уравнений Эйлера. В качестве граничных условий характеризующих акустические свойства стенки сопла и камеры сгорания используются значения акустических импедансов, а для зоны горения - безразмерная акустическая проводимость. В целом линейаризованная система дискретизируется и численно решается так же как система для основных стационарных величин.

В главе 3 описывается предлагаемая автором методика измерения акустической проводимости зоны горения топлива. Для определения акустических свойств зоны горения автор использует доработанную им импульсную Т-камеру. Особенностью установки является возможность варьирования частоты продольных колебаний в камере за счет использования съемных секций на установке. В разделе 3.2 описывается методика определения акустической проводимости зоны горения безметалльных и металлизированных топлив. В конечном итоге акустическая проводимость определяется по значениям двух коэффициентов затухания и двум частотам колебаний для двух импульсов в одном эксперименте (один импульс подается во время основного периода работы установки, а другой после выгорания зарядов в камере сгорания). В разделе 3.3 приводится оценка погрешности акустической проводимости и функции отклика давления зоны горения. В разделе 3.4 приведены результаты экспериментальных исследований автора по измерению акустической проводимости безметалльных и металлизированных составов твердых топлив. Автор проводил исследования на двух составах топлив (одно безметалльное, а другое металлизированное) и результаты сравнил с результатами других авторов для четырех близких по составу топлив и схожих условий. Анализ этого сравнения показывает, что экспериментальная методика автора **корректна** и дает **достоверные результаты**.

В главе 4 представлены результаты численного исследования устойчивости рабочего процесса в твердотопливных энергетических установках. Используются два метода описанных в главе 2. В разделе 4.1 с помощью модифицированного энергетического метода исследованы характеристики устойчивости для трех типов энергетических установок (малой, средней и большой тяги). Показано, что два используемых способа осреднения параметров дают качественно подобные результаты. В разделе 4.3 проведено тестирование второй методики исследования продольной неустойчивости рабочего процесса в линейном приближении путем сопоставления численных результатов с экспериментальными результатами. Проведены расчеты для пяти энергетических установок с безметалльными топливами. Получено удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных по коэффициенту затухания и частоте реализуемых колебаний. Проведены исследования сходимости по сетке численного алгоритма. В разделе 4.4 численно исследована устойчивость рабочего процесса в установке большого удлинения и двухкамерной

установке с металлизированным топливом. В разделе 4.5 исследована двухкамерная многосопловая твердотопливная энергетическая установка с звездообразным каналом внутри наполнителя.

В Заключении обобщены основные результаты и приведены выводы. Полученные результаты являются **новыми**, а выводы – **обоснованными**.

Основные достижения автора следующие:

1. Предложена и реализована **новая** схема экспериментальной установки для определения некоторых акустических свойств зоны горения твердых топлив с двумя вспомогательными генераторами давления.

2. Впервые проведены эксперименты по определению акустической проводимости зоны горения **новых** металлизированных и безметалльных топлив.

3. Реализована две полуаналитических методики (энергетическая и основанная на решении линеаризованных уравнений) определения линейной высокочастотной неустойчивости рабочего процесса в камере сгорания.

4. Предложена и реализована комплексная методика исследования устойчивости рабочего процесса с учетом влияния конденсированной фазы и основанной на сочетании численных и экспериментальных подходов.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается сравнением с численными результатами других авторов и экспериментальными результатами. Проведен значительный объем вычислительной работы по тестированию и настройке численного алгоритма, в связи с чем, выводы работы мне представляются обоснованными. Библиографический обзор содержит 173 источника (147 англоязычных), распределен по всем главам и включает наряду с классическими и современные работы.

По работе можно сделать следующие замечания:

1. Представление некоторых источников в списке литературы не соответствует ГОСТ.

2. Введение некоторых аббревиатур предшествует их расшифровке, что усложняет восприятие текста.

3. Имеются опечатки в текстах автореферата и диссертации.

4. Некоторые пункты литературного обзора, представленные в первой главе диссертации, не имеют прямого отношения к исследованию автора.

5. В Главе 2 при сравнении результатов расчета с использованием энергетической методики не представлены экспериментальные значения коэффициентов затухания.

6. Из текста Главы 3 диссертации неясно, с какой погрешностью определялись значения акустической проводимости и функции отклика, экспериментально полученные другими авторами.

7. В диссертации не указано, как влияет погрешность определения значений акустической проводимости на значения коэффициента затухания для конкретных установок.

8. В четвертой главе диссертации представлена всего одна тестовая задача для верификации численного метода.

Работа написана понятным языком с использованием общепринятой терминологии. Последовательность изложения соответствует логике научного поиска от простых случаев к более сложным, от физической модели к численному эксперименту. Автореферат отражает основные результаты работы, стиль изложения, хотя и не лишен некоторых недостатков, позволяет понять основные моменты

исследования. Основные результаты диссертации опубликованы в трех журналах из списка ВАК и в трудах научно-технической конференции по профилю работы.

Несмотря на указанные замечания, диссертация представляет собой **завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему**. Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для науки и практики. Выводы и рекомендации достаточно **обоснованы**. Работа отвечает требованиям Положения ВАК РФ о порядке присуждения научным и научно-педагогическим работникам ученых степеней, а ее автор Куроедов А.А. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент,
кандидат физико-математических наук,
доцент Физического факультета Московского
государственного университета им. М.В. Ломоносова,
mail: ivanovmsu@physics.msu.ru , тел: +7 (495) 939 44 28

Иванов - Иванов Игорь Эдуардович

Подпись доцента, к.ф.-м.н. И. Э. Иванова подтверждаю.
Декан Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
Профессор Сысоев Н.Н.



_____ 2018 г.