

ОТЗЫВ

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»

Диссертация Куроедова А.А. посвящена разработке комплексной методики исследования устойчивости рабочего процесса в энергетических установках твердого топлива (ЭУТТ) в линейной постановке, в том числе, методики экспериментального определения акустической проводимости зоны горения твердого топлива.

Актуальность работы.

Несмотря на относительную простоту конструкции ЭУТТ по сравнению с энергетическими установками на жидком топливе, разработчикам ЭУТТ приходится решать сложные задачи обеспечения работоспособности установки и выполнения требований технического задания в условиях жестких ограничений. Одной из наиболее сложных проблем, требующих комплексного подхода, является обеспечение устойчивости рабочего процесса на всех режимах работы ЭУТТ. Из теории и практики создания ЭУТТ известно, что в определенных условиях в камере сгорания (КС) могут возникать колебания давления, приводящие к так называемым нерасчетным (нештатным) режимам работы. В ряде случаев эти колебания могут приводить к погасанию заряда твердого топлива и прекращению работы ЭУТТ, либо к аномальному росту давления в КС, который может закончиться разрушением ЭУТТ.

Известны два вида колебательной неустойчивости: низкочастотная неустойчивость, которая характерна для малогабаритных ЭУТТ специального назначения, и проявляется в виде колебаний давления с

частотами от нескольких Гц до десятков Гц, и высокочастотная (акустическая) неустойчивость, при которой колебания давления происходят на одной из акустических частот камеры сгорания ЭУТТ. В зависимости от габаритов ЭУТТ частоты акустических колебаний давления в КС могут лежать в широком диапазоне: от нескольких сотен Гц до нескольких кГц.

Опасность акустической неустойчивости при работе ЭУТТ связана с несколькими факторами: (1) она приводит к нерасчетному (нештатному) режиму работы ЭУТТ; (2) колебания давления в КС могут существенно деформировать диаграмму давления и, как результат, существенно (непропорционально амплитуде колебаний давления) повысить максимальное давление, которое определяет прочностные характеристики конструкции и, следовательно, ее массовое совершенство; (3) колебания давления в КС, а значит, и тяги ЭУТТ приводят к дополнительным вибрационным нагрузкам на конструкцию ЭУТТ и изделия в целом.

Причиной акустической неустойчивости в ЭУТТ является резонанс собственных акустических колебаний продуктов сгорания в КС и колебаний массоприхода от горения твердого топлива.

Механизм акустической неустойчивости был понят еще в 50-е годы 20-го века, т.е. на ранней стадии развития ЭУТТ. За прошедшие годы во всем мире было выполнено более тысячи исследований (как экспериментальных, так и теоретических) акустической неустойчивости в ЭУТТ. Несмотря на это, в настоящее время не существует надежной методики, способной предсказать возникновение акустической неустойчивости в конкретной ЭУТТ, и спрогнозировать диаграмму давления с учетом акустических колебаний в КС.

Это связано, в первую очередь, с отсутствием адекватных моделей нестационарного горения твердых топлив (как баллистических, так и смесевых). По этой причине, основным методом определения характеристик нестационарного горения твердых топлив в настоящее время остается

экспериментальный, а среди них, наиболее широко используемым, является, так называемая, Т-камера.

При таком подходе одной из главных проблем является совмещение экспериментальных данных по нестационарному горению твердого топлива, полученных с использованием Т-камеры, и методик расчета нестационарного течения (в общем случае двухфазных) продуктов сгорания твердого топлива в проточном тракте ЭУТТ заданной конфигурации.

С учетом сказанного, можно сделать вывод, что тематика диссертационной работы является актуальной как с теоретической, так и с практической точек зрения.

Достоверность результатов исследования подтверждается сопоставлением результатов расчета, полученных по предложенной методике, с данными экспериментальных исследований и результатами расчетов, проведенных с использованием других методик. Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается планированием эксперимента и качественным экспериментальным оборудованием.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что

1. уточнена схема экспериментальной установки для определения акустических свойств зоны горения твердых топлив с использованием вспомогательных камер генерации импульсов давления;

2. на доработанной автором экспериментальной установке проведено измерение акустической проводимости зоны горения безметалльного и металлизированного топлив;

3. предложена модификация энергетической методики определения устойчивости рабочего процесса в ЭУТТ в линейной постановке;

4. предложена комплексная методика исследования в линейной постановке устойчивости рабочего процесса в ЭУТТ с осесимметричной проточной частью с учетом влияния частиц конденсированной фазы продуктов сгорания твердого топлива.

Практическая значимость данной работы заключается в том, что предложенная методика расчета позволяет прогнозировать устойчивость рабочего процесса к возмущениям давления малой амплитуды в ЭУТТ, работающих как на безметальных, так и на металлизированных топливах. Разработанная экспериментальная методика позволяет определять акустическую проводимость и функцию отклика зоны горения по давлению в широком диапазоне частот. Применение комплексной методики позволяет оценивать возможность перехода от устойчивого режима к неустойчивому в процессе работы конкретной ЭУТТ за счет изменения геометрии КС при выгорании заряда твердого топлива.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 54-ой, 55-ой и 56-ой открытой конференции Московского физико-технического института в 2011, 2012, 2013 гг., а также на научных семинарах и конференциях Центра Келдыша. Основные результаты работы отражены в 4-х публикациях, в том числе, в 3-х - из перечня ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, приложения и списка использованной литературы. Общий объем диссертации – 146 машинописных листов, работа содержит 80 рисунков, 14 таблиц и список используемой литературы из 173 наименований.

Кратко рассмотрим содержание диссертационного исследования.

Во введении диссертации кратко описана проблема акустической неустойчивости рабочего процесса в ЭУТТ.

В первой главе приведен обзор литературы по существующим направлениям исследования устойчивости рабочего процесса в ЭУТТ. Представлена классификация видов неустойчивости. Рассмотрены основные подходы к исследованию устойчивости в линейном приближении. Описаны методы экспериментального определения акустической проводимости зоны

горения твердого топлива. На основе проведенного литературного обзора сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе представлено описание двух методик определения устойчивости рабочего процесса в ЭУТТ в линейной постановке. В рамках первой (энергетической) методики исследование устойчивости течения в КС выполняется с использованием уравнения изменения энергии возмущения. В качестве тестового возмущения рассматривается первая продольная мода собственных колебаний продуктов сгорания в проточной части КС. Вторая методика определения устойчивости рабочего процесса в ЭУТТ в линейной постановке, развиваемая в работе Куроедова А.А., сводится к решению линеаризованной системы уравнений Эйлера, описывающих динамику продуктов сгорания. Параметры основного квазистационарного течения в различные моменты времени рассчитываются отдельно. В качестве граничных условий для линеаризованной системы уравнений задаются значения акустической проводимости зоны горения топлива, определяемые экспериментально.

Третья глава посвящена описанию доработанной автором экспериментальной установки для измерения акустической проводимости зоны горения топлива. Установка представляет собой модифицированную классическую Т-камеру. По торцам Т-камеры с внутренней её стороны располагаются образцы топлива торцевого горения, а с внешней стороны крепятся дополнительные вспомогательные камеры, необходимые для генерации двух последовательных импульсов давления. В эксперименте фиксируется давление у поверхности горения образцов топлива. По полученным экспериментальным данным определяются коэффициенты затухания указанных импульсов давления, с помощью которых рассчитываются акустические характеристики зоны горения твердого топлива. В главе подробно описываются конструкционные особенности установки, методика проведения эксперимента, способ последующей обработки полученных экспериментальных данных, а также оценивается

погрешность измерений. Приводятся значения коэффициентов затухания, действительной части акустической проводимости и функции отклика зоны горения по давлению для безметального и металлизированного составов в диапазоне частот до 1000 Гц для трёх давлений в камере сгорания. Полученные данные сопоставляются с данными других авторов.

В четвертой главе диссертации представлены результаты исследований устойчивости рабочего процесс в различных ЭУТТ, проводимых с помощью модифицированной энергетической методики, и предложенной автором методики, основанной на численном решении линеаризованных уравнений Эйлера методом Галеркина с разрывными базисными функциями. Проводится сравнение результатов расчетов устойчивости трех тестовых ЭУ с осесимметричной проточной частью КС, полученных в рамках энергетической методики. Представлены результаты верификации метода разрывных функций Галеркина, проводимой на тестовых задачах определения собственных колебаний в областях простой формы. Представлены результаты расчетов коэффициентов затухания возмущений для шести модельных ЭУТТ с цилиндрическими зарядами, выполненных с использованием разработанной автором методики. Все рассматриваемые ЭУ работают на безметальных топливах; акустические характеристики рассчитываемых топлив взяты из литературы. Отклонения полученных результатов от экспериментальных значений не превышают 25%. Приводятся также результаты расчетов для ЭУТТ с зарядом из металлизированного топлива, акустические свойства зоны горения которого были получены автором с использованием доработанной экспериментальной установки. В конце четвертой главы представлены результаты расчетов устойчивости рабочего процесса в ЭУТТ с каналом сложной формы, в которой используется безметальное топливо. Показано, что во время работы таких установок может возникать потеря устойчивости рабочего процесса и появление колебательных режимов.

В заключении формулируются основные результаты работы.

По диссертационной работе и автореферату Куроедова А.А. можно сделать следующие замечания:

1. Автор ограничился лишь линейным анализом акустического процесса в РДТТ, который позволяет определить только критические условия возникновения акустической неустойчивости, но не позволяет рассчитать ее влияние на внутрибаллистические и тяговые характеристики РДТТ. В реальных конструкциях по ряду причин не удается полностью устранить акустическую неустойчивость. Поэтому возникает необходимость определения внутрибаллистических параметров РДТТ с учетом незатухающих акустических колебаний давления, в частности, амплитуды этих колебаний и их влияния на кривую давления. Такой анализ требует решения нелинейной задачи, которая в данной работе не рассматривается.

2. В работе проведен анализ акустической устойчивости для нескольких РДТТ с разными конструкциями зарядов. Показано, что для одних конструкций (двухкамерная установка и многосопловая ЭУ) рабочий процесс является неустойчивым в течение всего времени работы, в то время как для ЭУ большого удлинения, рабочий процесс вначале является устойчивым, а затем происходит потеря устойчивости. Этот вывод представляет практический интерес, однако, в данной работе отсутствует экспериментальное подтверждение полученных расчетных результатов, что не позволяет оценить их достоверность.

3. Результаты диссертационной работы Куроедова А.А. опубликованы в ведомственном журнале Труды МАИ. Несмотря на то, что данный журнал входит в список ведущих рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, было бы полезно опубликовать результаты диссертации в ведущих российских и международных научных журналах, индексируемых в системах Web of Science и Scopus. Это позволило бы более широкой научной общественности ознакомиться с результатами данной работы.

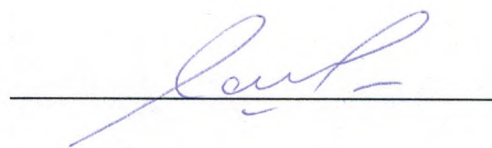
Данные замечания не влияют на положительную оценку работы. Автореферат и публикации автора достаточно полно отражают содержание диссертации.

Заключение

Диссертация Куроедова Алексея Анатольевича на тему «Исследование линейной неустойчивости рабочего процесса в энергетических установках твердого топлива» является законченным научным исследованием, в котором получены новые актуальные результаты. Диссертация соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Куроедов Алексей Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - «Механика жидкости, газа и плазмы». Автореферат соответствует содержанию диссертации.

«03» декабря 2018 г.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного
учреждение науки Институт проблем механики
им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук



Рашковский Сергей Александрович

Подпись Рашковского Сергея Александровича удостоверяю

И.о. ученого секретаря ИПМех РАН,

к.ф.-м.н.



Котов Михаил Алтаевич

Почтовый адрес: 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук
Тел.: 8 906 031 88 54
E-mail: rash@ipmnet.ru