

## УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель Генерального  
директора – заместитель Генерального  
конструктора АО «ВПК «НПО  
машиностроения», генеральный  
конструктор Оперативно-тактического  
вооружения ВМФ, доктор техн. наук



А.А. Дергачёв

2018 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации Акционерного общества «Военно-промышленная корпорация «Научно-производственное объединение машиностроения» на диссертационную работу Куроедова Алексея Анатольевича на тему «Исследование линейной неустойчивости рабочего процесса в энергетических установках твердого топлива», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертационная работа Куроедова А.А. посвящена разработке комплексной методики исследования линейной неустойчивости рабочего процесса в энергетических установках твердого топлива, в которую входит методика экспериментального определения акустической проводимости зоны горения топлива.

**Актуальность темы.** Учёт возможности перехода на неустойчивые режимы работы, сопровождающиеся автоколебаниями давления в камере сгорания двигателя, занимает важное место при проектировании энергетических установок твердого топлива (ЭУТТ). Данные явления наблюдались во многих установках и приводили к различным последствиям: от выхода из строя узлов и агрегатов систем управления до схода с расчетной траектории и разрушения ЭУТТ. Недостаточное внимание, уделяемое исследованию неустойчивости ЭУТТ на стадии проектирования установки, в дальнейшем может привести к увеличению материальных затрат и увеличению времени доработки изделия. Несмотря на многочисленные теоретические, расчётные и экспериментальные работы, посвященные исследованию различных аспектов неустойчивости рабочего процесса в ЭУТТ, существует ряд задач, не получивших в настоящее время удовлетворительного решения. К таким задачам относятся измерение акустических свойств зоны горения перспективных высокотемпературных металлизированных и безметалльных топлив, а также определение



устойчивости рабочего процесса в многокамерных и многосопловых ЭУТТ со сложной формой канала.

Можно выделить три основных подхода к исследованию неустойчивых режимов работы ЭУТТ: подход, основанный на использовании полуаналитических методик; подход, включающий в себя решение системы линеаризованных уравнений Эйлера (или системы уравнений Навье-Стокса) в частотной и временной областях для определения пульсаций давления в камере сгорания (КС) ЭУТТ; подход, заключающийся в непосредственном решении полных уравнений, описывающих динамику продуктов сгорания в камере ЭУТТ. Для полуаналитических методик и методик, основанных на решении линеаризованных уравнений Эйлера в частотной области, моделирование взаимодействия возмущений давления с поверхностью горения упрощается введением в рассмотрение акустической проводимости (или акустического импеданса) топлива, связывающей пульсации скорости и давления у поверхности горения. Измерения акустической проводимости могут быть выполнены в различных установках, к которым относятся Т-камера, установка с вращающимся клапаном, импедансная труба, СВЧ-камера и установка с магнитным расходомером. Однако не все указанные методы могут быть использованы для определения свойств металлизированных топлив. В работе Куроедова А.А. получил развитие второй подход, не требующий больших вычислительных ресурсов и предоставляющий относительно полную картину явления. Также Куроедовым А.А. предлагается схема импульсной Т-камеры, позволяющей определять акустическую проводимость как металлизированных, так и безметалльных топлив в широком диапазоне частот и давлений в КС.

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и приложения. **Во введении** диссертации приведена краткая характеристика проблемы неустойчивости рабочего процесса в ЭУТТ. На основе литературного обзора, представленного в первой главе, изложены цель работы, задачи диссертационного исследования, показаны практическая значимость, научная новизна, а также обоснована достоверность полученных результатов.

**В первой главе** приведен обзор литературы по существующим направлениям исследования неустойчивости рабочего процесса в ЭУТТ. Представлена классификация видов неустойчивости. Рассмотрены основные подходы к исследованию линейной неустойчивости. Описаны методы экспериментального определения акустической проводимости зоны горения топлива. На основе проведенного литературного обзора сформулированы цели и задачи исследования.

**Вторая глава** содержит описание двух подходов к определению устойчивости ЭУТТ к малым возмущениям, распространяющимся в неоднородном стационарном потоке. В рамках рассматриваемых подходов исследуется устойчивость рабочего процесса в ЭУТТ, состоящей из корпуса, внутри которого размещается топливо с цилиндрическим каналом. Вдв



продуктов сгорания (ПС), обусловленный горением топлива, осуществляется по нормали к поверхности горения.

К первому подходу определения устойчивости рабочего процесса в ЭУТТ относится **энергетическая методика**, являющаяся полуаналитической. В рамках данной методики исследуется устойчивость течения в КС к некоторому возмущению с использованием уравнения изменения энергии возмущения. Возмущение либо представляется в виде суперпозиции собственных мод колебаний в проточной части КС, либо может исследоваться устойчивость отдельной моды. **Вторая методика** определения линейной неустойчивости рабочего процесса в ЭУТТ, развиваемая в работе Куроедова А.А., сводится к решению линеаризованной системы уравнений, описывающих динамику продуктов сгорания с использованием значений акустической проводимости, определяемой экспериментально.

**Третья глава** посвящена описанию предлагаемой экспериментальной методики измерения акустической проводимости зоны горения топлива. Описываются схема экспериментальной установки, методика проведения эксперимента, а также способ последующей обработки полученных экспериментальных данных. Приводятся результаты по определению акустической проводимости безметалльного 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 методом Галеркина с разрывными базисными функциями. В первом параграфе проводится сравнение результатов расчетов устойчивости трех тестовых ЭУ, проводимых в рамках энергетической методики с использованием двух способов усреднения рабочих параметров в камере сгорания установки по времени. Во втором параграфе главы рассматриваются тестовые задачи определения собственных колебаний в областях простой формы, численно решаемые методом разрывных функций Галеркина. В третьем параграфе представлены результаты расчетов коэффициентов затухания шести модельных ЭУТТ с цилиндрическим наполнителем, проводимых с использованием разработанной автором методики. Все ЭУ работают на безметалльных топливах, акустические характеристики которых представлены в литературе. В четвертом параграфе приводятся результаты расчетов для ЭУ, где в качестве топлива используется металлизированное топливо, акустические свойства зоны горения которого были получены с использованием импульсной Т-камеры и представлены в третьей главы. В конце четвертой главы представлены результаты расчетов устойчивости ЭУТТ с каналом сложной формы, в котором используется безметалльное топливо.



**В заключении** диссертации отражены основные результаты работы.

В качестве **научной новизны** работы Куроедова А.А. можно выделить то, что автором была предложена схема импульсной Т-камеры для определения акустической проводимости зоны горения топлив, с использованием данной установки были определены акустические свойства зоны горения для безметалльного и металлизированного составов. Помимо этого, Куроедовым А.А. была предложена модификация энергетической методики определения устойчивости рабочего процесса в ЭУТТ, а также была разработана комплексная методика исследования устойчивости рабочего процесса в ЭУТТ с осесимметричной проточной частью с учетом влияния частиц конденсированной фазы продуктов сгорания топлива.

**Достоверность результатов**, полученных Куроедовым А.А., подтверждается сопоставлением результатов расчета, полученных по предложенной методике, с данными экспериментальных исследований и результатами расчётов, проведённых с использованием других методик. Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается тщательным планированием эксперимента и качественным экспериментальным оборудованием.

**Практическая ценность результатов** диссертационной работы заключается в том, что предложенная методика расчета позволяет прогнозировать устойчивость к возмущениям давления малой амплитуды ЭУТТ, работающих как на безметалльных, так и металлизированных топливах. Разработанная экспериментальная методика определения акустических свойств топлив позволяет определять акустическую проводимость и функцию отклика зоны горения по давлению в широком диапазоне частот реализуемых колебаний. Применение комплексной методики позволило установить возможность перехода на неустойчивые режимы двухкамерной многосопловой ЭУТТ при использовании безметалльного топлива.

**По содержанию исследования имеются следующие замечания:**

1. во второй главе диссертации недостаточно полно изложен численный метод решения дифференциальных уравнений в части формирования и заполнения глобальной матрицы массы, матрицы жесткости и потоковой матрицы;
2. в тексте не отражено влияние переходных процессов на акустические возмущения в камере сгорания;
3. в третьей главе диссертации на рисунках 3.11-3.17 следовало бы указать погрешности определения результатов, полученных другими исследователями;
4. текст диссертации содержит значительное количество опечаток.

Сделанные замечания не носят принципиального характера и не умаляют достижений автора.



Результаты работы Куроедова А.А. достаточно полно отражены в публикациях в научных изданиях. Используемые в работе методы обоснованы и соответствуют целям решаемых задач. Автореферат соответствует содержанию текста диссертации.

Диссертация и отзыв рассмотрены и одобрены на заседании секции №2 научно-технического совета АО «ВПК «НПО машиностроения», протокол №157 от 16.11.2018.

Рассмотренная диссертация представляет собой законченную научную работу в области течений сжимаемых сред в каналах сложной формы с проницаемыми стенками. Тематика диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы». Диссертация удовлетворяет всем требованиям Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842 «О порядке присуждения ученых степеней» и заслуживает положительной оценки, а её автор, Куроедов Алексей Анатольевич, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Главный научный сотрудник

АО «ВПК «НПО машиностроения»,  
доктор технических наук



Горский Валерий  
Владимирович

Заместитель начальника отдела

АО «ВПК «НПО машиностроения»,  
кандидат физ.-мат. наук



Плюснин Андрей  
Владимирович

Ученый секретарь секции НТС,  
кандидат физ.-мат. наук



Бондаренко Леонид  
Александрович

Акционерное общество «Военно-промышленная корпорация «Научно-производственное объединение машиностроения»

Адрес: 143966, Россия, Московская обл., г. Реутов, ул. Гагарина, д. 33

Тел.: +7 (495) 528-74-50, факс: +7 (495) 302-20-01

E-mail: [vpk@vpk.npomash.ru](mailto:vpk@vpk.npomash.ru)

Веб-сайт: <http://www.npomash.ru>