



Акционерное общество

**МИТ «КОРПОРАЦИЯ**

**«МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ТЕПЛОТЕХНИКИ»**

Березовая аллея, д.10, Москва, Россия, 127273  
Телефон: (499) 907-37-74, Телефакс: (499) 907-37-29;  
e-mail: mitemail@umail.ru

Утверждаю

Генеральный конструктор  
академик РАН

Ю.С. Соломонов



от \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



**ОТЗЫВ**

ведущей организации на диссертацию Селезнева Романа Константиновича «Расчетно-теоретические исследования газодинамики и горения в камерах прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) и гиперзвуковых прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ГПВРД)» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертация Селезнева Р.К. посвящена разработке расчетно-теоретических методов и созданию базы данных энергетических установок, предназначенной для изучения газодинамических процессов и горения в камерах ПВРД и ГПВРД.

**Актуальность темы**

Актуальность темы диссертации определяется необходимостью создания расчетно-теоретической базы проектирования камер сгорания прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) и гиперзвуковых прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ГПВРД). Математическое моделирование становится важным практическим методом решения прикладных газодинамических гиперзвуковых задач, ввиду того, что проведение физических экспериментов в данной области связано с множеством технических трудностей и требует больших финансовых затрат. Также наблюдается нехватка доступных и хорошо документированных, а также структурированных экспериментальных и расчетных данных, что затрудняет оценку достоверности (валидация) и проверку безошибочности реализации (верификация) разрабатываемых физико-химических и термогазодинамических моделей.



001034

Моделирование газодинамики высокоскоростных течений требуют учета как традиционных процессов термогазодинамики, так и специфических для ПВРД и ГПВРД. При определенных режимах работы двигателя особо остро стоит проблема правильного описания смешения топлива и окислителя, воспламенения и стабилизации горения. При этом камеры сгорания ПВРД и ГПВРД имеют сложную пространственную форму. Большое количество способов подачи топлива и важность правильного описания процессов горения, приводит к необходимости подбора и анализа адекватных моделей химической кинетики. На повестке дня стоит задача расчета не только квазистационарных, но и нестационарных эффектов.

Решение проблемы математического моделирования гиперзвукового потока с горением в полном объеме в настоящее время чрезвычайно сложно. Поэтому, прорабатываются подходы к решению отдельных частных задач. Это позволяет получить важную информацию об особенностях структуры газового потока внутри камер сгорания ПВРД и ГПВРД, а также проводить оценку эффективности разрабатываемых силовых установок.

### **Краткий анализ содержания работы.**

Представленная к защите диссертация структурирована следующим образом:

Во *введении* обоснована актуальность темы исследований. Сформулирована цель и кратко изложена структура диссертации.

В *первой главе* дано описание созданной в диссертации структурированной базы данных экспериментальных установок, предназначенных для изучения термогазодинамических процессов в ПВРД и ГПВРД. Большое количество экспериментальных установок, включенных в базу данных диссертационной работы дает возможность теоретического исследования широкого спектра расчетно-теоретических моделей газодинамики горения в ПВРД и ГПВРД

Во *второй главе* описаны и реализованы термодинамические модели ПВРД и ГПВРД. Представленные модели основаны на анализе интегральных термодинамических соотношений. С помощью этих моделей на начальном этапе проектирования двигательной установки (ДУ) производятся термодинамические расчеты и определяются удельные параметры (сила тяги, удельный импульс, удельная тяга, эффективность). Проведено исследование зависимости удельного импульса от высоты и скорости полета при заданной геометрии, основанной на термодинамической методике ГПВРД.

В *третьей главе* представлены результаты решения систем кинетических уравнений на примере решения нульмерной задачи (калориметрической бомбы) горения оксида углерода и водорода. В данной главе приведен обзор существующих методов решения систем уравнений химической кинетики (УКХ). Особое внимание уделяется обобщенному методу Ньютона. Рассматривается проблема поиска оптимального шага по времени.

*Четвертая глава* содержит подробный вывод системы уравнений квазиодномерной модели ГПВРД из законов сохранения массы, импульса и энергии. Указана особенность построенной модели вблизи звуковых скоростей В данной главе производится валидация и верификация описываемой модели. Описан алгоритм оценки дальности ЛА, и оценки интегральных характеристик ГПВРД на примере эксперимента X-51A.



В пятой главе проводится многопараметрические расчеты физических параметров в рабочем тракте импульсного детонационного двигателя (ИДД). были выполнены двухпараметрические расчеты (по давлению и температуре) и обнаружена область, в которой реализуется незатухающий колебательный режим детонационного горения. Было обнаружено, что при определенных значениях параметров установки колебания имеют постоянную амплитуду и частоту.

В шестой главе описывается двумерная модель горения в сверхзвуковом потоке. Была численно продемонстрирована возможность управлять процессом горения, варьируя угол подачи топлива. Проводится сравнение результатов расчетов по двумерной модели, с результатами квазиодномерного моделирования и экспериментальными данными. Проводится исследование влияния угла вдува топлива в эксперименте Бароуса - Куркова на задержку воспламенения топлива. Вдув топлива под некоторым углом к потоку меняет угол падения отраженной ударной волны и приводит к тому, что воспламенение происходит значительно раньше. В результате увеличения точности расчетов путем измельчения сеток было обнаружено возникновение нестационарной картины горения. Продемонстрировано, что последовательное измельчение сеток приводит к возникновению пульсаций, которые можно трактовать, как турбулентные пульсации. Проведено моделирование процесса горения водородо-воздушной смеси при периодическом вдуве холодного воздуха поперек основного сверхзвукового потока.

В заключении кратко формулируются основные выводы, полученные в диссертации.

### **Степень достоверности результатов проведенных исследований**

Обоснованность и достоверность расчетно-теоретических моделей и использованных методов расчета подтверждается физической обоснованностью постановок задач и строгим аналитическим характером их рассмотрения с применением современных теоретических концепций и математических средств физической и химической механики, сравнением собственных численных результатов с расчетами других авторов, а также соответствием расчетных и экспериментальных данных.

### **Оценка новизны и практической значимости**

Отметим основные результаты автора, являющиеся новыми и представляющими, на наш взгляд, значительный научный и практический интерес:

1. Выполнен анализ экспериментальных и расчетно-теоретических работ по исследованию процессов, протекающих внутри камер ПВРД и ГПВРД. На основе этого анализа дано описание собранной базы данных энергетических установок, моделирующих термогазодинамические процессы в ПВРД и ГПВРД.
2. Представлены результаты расчетов по исследованию газодинамических и термодинамических характеристик ГПВРД и ПВРД. В отличие от двумерных и трехмерных моделей, расчетное время которых может занимать несколько

дней и больше, термодинамические модели позволяют провести оценку основных характеристик ДУ за несколько минут. Полученные результаты обладают наглядностью, а их анализ заметно упрощается.

3. Разработан обобщенный метод Ньютона, применяемый для решения жестких систем уравнений, в том числе в газовой динамике, для решения уравнений химической кинетики, с использованием которого выполнено численное исследование кинетики горения компонент топлив для модельных задач теории ПВРД и ГПВРД.
4. Разработана газодинамическая квазиодномерная модель ГПВРД. Проведена валидация и верификация полученных газодинамических распределений на группе известных экспериментальных и расчетных данных. С использованием созданной квазиодномерной модели была разработана методика расчета дальности полета на примере ГЛА Х-51.
5. С использованием разработанного авторского кода проведены многопараметрические газодинамические расчеты в рабочем тракте импульсного детонационного двигателя и была обнаружена область, в которой реализуется импульсный режим детонационного горения.
6. Проведены двумерные численные исследования газодинамических процессов в камере ГПВРД. Было обнаружено, что место воспламенения топлива в эксперименте Бароуса - Куркова совпадает с местом взаимодействия слоя смешения и отраженной ударной волны. Была численно продемонстрирована возможность управлять процессом горения, варьируя угол подачи топлива. Проведено сравнение результатов расчета по двумерному и квазиодномерному коду для эксперимента HyShot-2.

Полученные в диссертации результаты, разработанные газодинамические модели и составленная база данных, а также изложенные методы расчета могут быть использованы в организациях, занимающихся вопросами газодинамики и горения в ПВРД и ГПВРД. В числе таких организаций: АО «Корпорация „Московский институт теплотехники“» (МИТ), ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, ЦИАМ им. П.И. Баранова, ОАО «ВПК «НПО Машиностроения», КТРВ.

#### **Замечания по диссертационной работе**

1. В разработанной в диссертационной работе базе данных экспериментальных установок, предназначенных для изучения газодинамики и горения в камерах

ПВРД и ГПВРД отсутствуют экспериментальные установки, где в качестве горючего выступает твердое топливо.

2. Несмотря на удобство использования базы данных экспериментальных установок, хотелось бы иметь возможность сортировки включенных в нее элементов по классификационным признакам.
3. В разработанную квазиодномерную модель включены две модели смешения, однако не вполне понятны преимущества сверхзвуковой модели смешения перед моделью смешения с “замороженными” химическими реакциями.
4. В шестой главе подробно описывается разработанная двумерная модель, однако численному методу решения данной системы уделяется мало места.

В диссертации затронуты весьма интересные, важные и актуальные проблемы. Отмеченные замечания не умаляют всех достоинств работы.

### **Заключение**

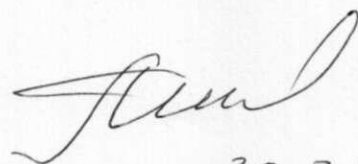
Работа является законченной и выполнена автором на высоком научном уровне. Проведенные научные исследования можно охарактеризовать как научно-обоснованный систематический анализ важной фундаментальной и прикладной задачи разработки расчетно-теоретических моделей газодинамики и горения в камерах ПВРД и ГПВРД. Представленные в работе исследования достоверны, выводы и рекомендации обоснованы.

Диссертационная работа содержит достаточное количество исходных данных, имеет пояснения, рисунки, графики, примеры, подробные расчеты, написана технически квалифицированно и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом имеются выводы.

Основные этапы работы, выводы и результаты представлены в автореферате, соответствующем содержанию диссертации.

По актуальности рассмотренных проблем, научной новизне решенных задач и практической значимости полученных результатов диссертационная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК Российской Федерации к кандидатским диссертациям, а ее автор Селезнев Роман Константинович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Главный научный сотрудник  
доктор технических наук, профессор



А.А. Шишков

30.3.2017