

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора Шибкова Валерия Михайловича на диссертацию Селезнева Романа Константиновича «Расчетно-теоретические исследования газодинамики и горения в камерах прямооточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) и гиперзвуковых прямооточных воздушно-реактивных двигателей (ГПВРД)», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работы Р.К. Селезнева посвящена построению моделей газодинамических и физико-химических процессов, протекающих внутри камер сгорания гиперзвуковых прямооточных воздушно-реактивных двигателей, и разработке вычислительных методов и компьютерных кодов для проведения численных экспериментов в рамках построенных моделей.

Актуальность работы обусловлена практическим интересом к проблеме создания гиперзвуковых летательных аппаратов, оснащенных прямооточными двигателями со сверхзвуковой скоростью течения в камере сгорания. ГПВРД является простейшим бескомпрессорным реактивным двигателем. Он состоит из входного устройства, в котором поступающий воздух претерпевает сжатие из-за высокой скорости аппарата; камеры сгорания, где происходит сжигание топлива; сопла, через которое происходит выход выхлопного газа со скоростью, большей скорости поступающего воздуха, что и создает тягу двигателя. Для эффективной работы ГПВРД поток газа должен сохранять сверхзвуковую скорость на всех участках своего пути в двигателе. Высокая скорость делает сложным управление потоком внутри камеры сгорания. Вся проходящая со сверхзвуковой скоростью через камеру сгорания топливно-воздушная смесь должна иметь достаточно времени для сгорания с целью последующего расширения в сопле и порождения тяги.

Экспериментальные лабораторные и летные исследования связаны с множеством технических трудностей, а также требуют больших объемов финансовых затрат. Поэтому все большую роль начинает играть математическое моделирование процессов, происходящих в камерах сгорания прямооточных воздушно-реактивных двигателей. Необходимо отметить важность правильного описания процессов горения, что приводит к необходимости подбора и анализа адекватных моделей химической кинетики. Особо остро стоит проблема создания физико-математических моделей, описывающих смешение топлива и окислителя, воспламенение и стабилизацию горения. Разработка таких вычислительных моделей и соответствующих численных методов является в настоящее время весьма актуальной задачей.

Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы и двух Приложений.

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.

Во **второй главе** описаны и реализованы термодинамические модели ПВРД и ГВРД, основанные на анализе интегральных термодинамических соотношений. С помощью этих моделей производятся термодинамические расчеты и определяются удельные параметры (сила тяги, удельный импульс, удельная тяга, эффективность).

В **третьей главе** рассмотрены вопросы, связанные с моделированием горения водорода и метана, на примере задачи калориметрической бомбы. Приведен обзор существующих методов решения систем уравнений химической кинетики. Особое внимание уделяется обобщенному методу Ньютона. Рассматривается проблема поиска оптимального шага по времени.

Четвертая глава посвящена выводу и подробному описанию квазиодномерной методики расчета течения в канале ГПВРД. Описан алгоритм оценки дальности полета летательного аппарата, а также интегральных характеристик гиперзвукового прямооточного воздушно-реактивного двигателя.

В **пятой главе** проводится многопараметрические расчеты физических параметров в рабочем тракте импульсного детонационного двигателя. Выявлены условия реализации импульсного режима детонационного горения.

В **шестой главе** описывается двумерная модель горения в сверхзвуковом потоке. Проводится сравнение результатов расчетов по двумерной модели с результатами квазиодномерного моделирования и экспериментальными данными. Проведено моделирование процесса горения водородо-воздушной смеси при периодическом вдуве холодного воздуха поперек основного сверхзвукового потока.

В **Заключении** сформулированы основные выводы, полученные в диссертации.

В **Приложении А** описана структурированная база данных экспериментов термогазодинамических прототипов ПВРД и ГПВРД.

В **Приложении В** представлены данные для различных кинетических схем.

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. Основные результаты работы достаточно полно опубликованы в реферируемых журналах, а также в сборниках научных трудов.

Научная значимость работы заключается в следующем:

- Создана база данных экспериментальных установок, предназначенных для изучения газодинамики и горения в камерах сгорания ГПВРД.
- Проведен расчет термогазодинамических параметров двигательной установки с использованием приближенных термодинамических моделей.
- Разработан обобщенный метод Ньютона, примененный автором для решения систем уравнений газовой динамики и химической кинетики.
- Создана серия авторских компьютерных кодов, предназначенных для численного моделирования газодинамических процессов в камерах сгорания гиперзвуковых летательных аппаратов.
- Проведены многопараметрические расчеты газодинамических процессов в рабочем тракте импульсного детонационного двигателя.
- Проведены численные исследования газодинамических процессов в камере ГПВРД с помощью двумерного кода NERAT-2D. Показано, что место воспламенения топлива совпадает с местом взаимодействия слоя смешения и отраженной ударной волны.
- Численно продемонстрирована возможность управления процессом горения при варьировании угла подачи топлива.

Основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются новыми и представляют значительный научный и практический интерес.

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: ЦАГИ имени профессора Н.Е. Жуковского, АО Корпорация «Московский институт теплотехники», ЦИАМ имени П.И. Баранова, ОАО ВПК «НПО Машиностроения».

Полученные результаты могут быть применены также в ОИВТ РАН, МРТИ РАН, ИОФ РАН, МФТИ, НИИМех МГУ и на физическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова.

Диссертация Селезнева Романа Константиновича является законченным научным исследованием, выполнена на достаточно высоком уровне, полученные им основные результаты являются надежными, достоверность их подтверждается многочисленными экспериментальными результатами российских и зарубежных авторов.

Тем не менее, считаю необходимым указать на определенные недостатки работы.

1. В третьей главе диссертации автор представляет результаты математического моделирования горения водорода в кислороде при использовании нульмерной задачи, так называемой «калориметрической бомбы». На стр. 96 представлен рис. 64, на котором сравниваются результаты вычислений временной зависимости концентрации паров воды, образующейся при сжигании водорода при начальном давлении 1 атм и начальной температуре 880 К. Расчет проведен при использовании пяти различных кинетических схем, разработанных в разных лабораториях. Видно, что период индукции (по наработке воды), рассчитанный по различным кинетическим схемам горения водорода, изменяется почти на шесть порядков величины. В тексте диссертации следовало бы дать интерпретацию такого большого расхождения и выявить кинетическую схему, которая, по мнению автора, наиболее реально отражает кинетику горения водорода.
2. На стр. 97-98 представлено сравнение результатов расчета горения метана с экспериментальными данными. Следовало бы пояснить причину некоторого расхождения данных математического моделирования и экспериментальных результатов.
3. В работе имеются незначительные опечатки и описки. Так на рис. 73 (стр.112 в тексте диссертации) и на рис. 8 (стр.14 в автореферате) параметры на выходе из сопла обозначены P_4 , T_4 и V_4 , их следует заменить на P_5 , T_5 и V_5 . В подписи к рис. 85 приведена фраза «размеры указаны в миллиметрах», которая не имеет отношения к этому рисунку. После каждого сравнения рассчитанных данных с экспериментальными автор многократно повторяет одну и ту же фразу: «видно хорошее соответствие полученных результатов с экспериментальными значениями». На рисунках и в таблицах размерность давления представлена в разных системах единиц. Желательно было бы использовать в диссертации одну и ту же систему единиц.

Приведенные замечания не снижают в целом хорошего впечатления от рассматриваемой работы и ее научной ценности.

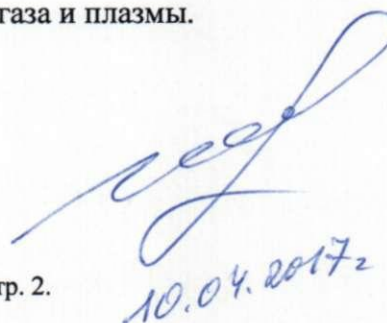
Основные положения, выносимые на защиту, соответствуют выбранной теме и подробно обоснованы в диссертации. Достоверность результатов подтверждается публикациями в российских и зарубежных научных изданиях и докладами на конференциях. Квалификационная ценность результатов исследований признана российским и международным научными сообществами. Полученные в диссертации результаты являются новыми, а выводы – обоснованными. Основные результаты диссертации в полной мере опубликованы в научных журналах и трудах российских и международных конференций.

Заключение

Диссертация написана на понятном языке с использованием общепринятой терминологии. Автореферат правильно и полно отражает основное содержание диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в журналах из списка ВАК и сборниках трудов научно-технических конференций по профилю работы.

Считаю, что рецензируемая диссертационная работа «Расчетно-теоретические исследования газодинамики и горения в камерах прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) и гиперзвуковых прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ГПВРД)» представляет собой законченную 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 сотрудникам ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Селезнева Романа Константиновна, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Профессор физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук



10.04.2017²

В.М.Шибков

Рабочий адрес: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
Рабочий телефон: 8 (495)939-13-37 или 8(495)939-25-47
E-mail: shibkov@phys.msu.ru

Подпись В.М.Шибкова удостоверяю.

Декан
физического факультета МГУ
профессор



Н.Н.Сысоев