

МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Национальный
исследовательский ядерный
университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)»**

Каширское шоссе, д.31, г. Москва, 115409
Тел. (499) 324-77-77, факс (499) 324-21-11
<http://www.mephi.ru>

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор Федерального
государственного автономного
образовательного учреждения
высшего образования «Национальный
исследовательский ядерный
университет «МИФИ»

доктор физико-математических наук,
профессор



Нагорнов О.В.

На № _____ от _____

23.10.2023 № 97-5/23

«23» октября 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Зангиева Алана Эльбрусовича «Математическое моделирование рабочего процесса в прямооточных детонационных двигателях», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 — химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

В настоящее время энергоэффективность силовых установок с традиционными камерами сгорания на медленном горении практически достигла своего максимума, а дальнейшее, даже небольшое, повышение характеристик требует привлечения значительных вложений. Актуальным направлением научно-исследовательских и прикладных работ является разработка силовых двигательных установок, основанных на новых принципах организации горения, в том числе детонационного. Использование детонационных двигателей рассматривается как один из возможных путей повышения энергетических установок в том числе воздушно-реактивных двигателей. Активно ведется разработка вычислительных методов, позволяющих существенно сократить затраты при проектировании экспериментальных образцов силовых установок с детонационными камерами сгорания и определить области применения таких камер в новой технике. С этой точки зрения диссертационная работа Зангиева Алана Эльбрусовича, направленная на создание новых способов организации реактивного движения за счет преобразования внутренней энергии рабочего тела в работу посредством управляемой детонации, актуальна и представляет несомненный теоретический и практический интерес.

Целью диссертационной работы А.Э. Зангиева является определение способов организации эффективного рабочего процесса в прямооточных воздушно-реактивных двигателях с управляемым детонационным горением.

В работе Зангиева А.Э. рассмотрены две схемы реализации детонационного рабочего режима в подобных силовых установках. Первая схема – сжигание горючей смеси в периодических бегущих детонационных волнах. Такая схема реализована в импульсно-детонационном двигателе (ИДД). Вторая схема – сжигание горючей смеси в квазистационарном непрерывно-детонационном режиме. Такая схема реализуется в непрерывно-детонационном двигателе (НДД).

В качестве **наиболее значимых результатов** можно выделить следующие:

1) Создана и оптимизирована теоретическая модель эффективного ИДД на жидком горючем для дозвукового полета. Численная оптимизация конструкции ИДД проводилась в части смешения газового/жидкого топлива с воздухом, зажигания смеси и повышения уровня турбулентности по тракту для обеспечения быстрого ПГД.

2) Разработана и оптимизирована экспериментальная модель ИДД на жидком горючем для дозвукового полета. В результате экспериментальных исследований рабочего процесса в ИДД на жидком горючем выбрана его наилучшая компоновка и определены пути доработки конструкции для испытаний в составе полетной модели.

3) По результатам доработки конструкции ИДД проведены бросковые полетные испытания летательного аппарата с силовой установкой на основе дозвукового прямоточного воздушно-реактивного ИДД на жидком горючем.

4) С помощью многовариантных численных расчетов разработан облик компактного демонстратора прямоточного воздушно-реактивного НДД на водороде для условий сверхзвукового полета.

5) Многомерными расчетами и огневыми испытаниями доказана возможность работы НДД с положительной эффективной тягой при скоростях набегающего воздушного потока от $M = 1.5$ до 2.5.

Полученные результаты являются актуальными. Исследование вносит существенный вклад в развитие теоретических основ двухфазных реагирующих течений, а также создает перспективы практического применения детонационных камер сгорания в двигателях и энергетических установках.

Актуальность и новизна работы подтверждается тем, что по материалам диссертации сделаны три публикации в высокорейтинговом научном журнале. Несмотря на то, что каждая из семи работ, опубликованных по теме диссертации, имеет пять или более соавторов, ни одна из этих работ не включалась в списки работ в других диссертациях. Личный вклад автора в опубликованные работы не вызывает сомнения.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, формулировки основных результатов и выводов, списка сокращений и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 150 страницах и содержит 70 рисунков, 17 таблиц и библиографию из 152 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены основные цели и задачи работы и используемые методы исследования. Коротко описаны основные научные результаты, их научная новизна и приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ отечественной и зарубежной литературы по организации управляемой детонации газообразных и жидких горючих в трубах и кольцевых камерах сгорания, а также по численным методикам расчета импульсной и

непрерывной детонации. К настоящему времени, несмотря на достаточно глубокое изучение принципов организации рабочего процесса в ИДД, сведений о практическом применении ИДД в литературе нет, хотя имеются реальные возможности создания ИДД с быстрым переходом горения в детонацию (ПГД) на любой топливной паре вплоть до ТВС метана. Достаточно хорошо изучены структура течения, условия существования и основные свойства непрерывной детонации в кольцевых камерах сгорания. Проведен анализ геометрических и физико-химических параметров, определяющих непрерывную детонацию топливно-кислородных смесей (с газообразными, жидкими и твердыми горючими) и ТВС водорода и углеводородов вплоть до керосина. Проведены экспериментальные исследования непрерывной детонации в плоскорадиальных камерах сгорания диаметром от 20 до 500 мм с истечением продуктов к периферии и к центру КС.

Имеются сведения о физико-математических моделях горения для изучения процессов ПГД, стационарного распространения детонации, смешения, формирования и распространения непрерывно-детонационного рабочего процесса в кольцевых КС. В настоящее время активно ведутся работы по созданию и испытаниям макетов-демонстраторов двигателей с детонационным горением и поиску возможностей их применения в энергетических установках различного назначения, в том числе для создания новой техники.

Во второй главе описана физико-математическая модель многофазного турбулентного реагирующего течения. Течение вязкого сжимаемого газа описывается усредненными по Рейнольдсу трехмерными нестационарными уравнениями Навье–Стокса, энергии и неразрывности химических компонентов многокомпонентной смеси с источниками, описывающими химические превращения и межфазное взаимодействие. Турбулентные потоки вещества, количества движения и энергии моделируются с помощью стандартной k - ϵ модели турбулентности для сжимаемых течений. Для моделирования фронтального турбулентного горения используется метод явного выделения фронта пламени. Для расчета вкладов объемных реакций в химические источники используется метод частиц (метод Монте-Карло), в котором скорости химических реакций в турбулентном потоке учитывают влияние турбулентных пульсаций температуры и концентрации реагентов на среднюю скорость химических превращений. Уравнения математической модели замыкаются калорическим и термическим уравнениями состояния смеси идеальных газов с переменной теплоемкостью, а также начальными и граничными условиями. Все теплофизические параметры газа считаются переменными. Течение дисперсной фазы описывается методом лагранжевых квазичастиц.

Численное решение определяющих уравнений задачи проводится с использованием сопряженного алгоритма “метод SIMPLE – метод частиц”. Химические источниковые члены рассчитываются по неявной схеме с внутренним шагом интегрирования по времени. Для моделирования окисления водорода применяется проверенная одноступенчатая глобальная кинетика с предэкспоненциальным множителем, который зависит от давления, и энергией активации, которая зависит от коэффициента избытка горючего. Для моделирования задержек самовоспламенения в воздушных смесях пропана используется глобальный кинетический механизм, состоящий из 5 прямых и обратных реакций. Для расчета распространения турбулентного пламени в смеси воздуха с авиационным жидким топливом используется база данных по свойствам

ламинарного пламени в смесях суррогата жидкого горючего с воздухом при разных начальных температурах, давлениях и коэффициентах избытка горючего. Для расчета самовоспламенения таких смесей используется модельная кинетика низко- и высокотемпературного самовоспламенения суррогата. В качестве суррогата жидкого горючего используется смесь девяти нормальных алканов.

В третьей главе на основе результатов моделирования разработана и оптимизирована экспериментальная модель ИДД на жидком горючем для дозвукового полета. Численная оптимизация конструкции ИДД проводилась в части смешения газового/жидкого топлива с воздухом, зажигания смеси и повышения уровня турбулентности по тракту для ИДД для обеспечения быстрого ПГД.

В результате последующих экспериментальных исследований рабочего процесса в ИДД определены пути доработки конструкции, в том числе для испытаний в составе полетной модели. В ходе экспериментов отработаны различные способы зажигания и способы повышения уровня турбулентности на участке ускорения пламени, исследовано влияние доступных активных добавок к жидкому горючему, позволяющих сократить преддетонационное расстояние. Кроме того, проведена серия экспериментов с изменением скорости набегающего воздушного потока в широком диапазоне значений, что позволило подтвердить полученные в расчетах закономерности, определить параметры рабочих режимов ИДД, а также выбрать наилучшую компоновку ИДД. Все это позволило впервые в мире провести бросковые полетные испытания беспилотного летательного аппарата с силовой установкой на основе дозвукового прямоточного воздушно-реактивного ИДД.

По результатам таких расчетов спроектирован и изготовлен экспериментальный образец ИДД, который был испытан на стендах с присоединенным воздухопроводом и свободным воздушным потоком. Испытания включали отработку различных способов зажигания и повышения уровня турбулентности на участке ускорения пламени, применение доступных активных добавок к жидкому топливу, позволяющих сократить длину ПГД, а также подбор конструкционных материалов для уменьшения массогабаритных характеристик ИДД. На основе испытаний создана карта рабочих режимов ИДД.

По результатам доработки конструкции ИДД были проведены бросковые полетные испытания беспилотного летательного аппарата с силовой установкой на основе дозвукового прямоточного воздушно-реактивного ИДД на жидком горючем. Результаты бросковых испытаний показали, что при включении ИДД БПЛА набирает скорость. При включении ИДД скорость полета увеличивается, что говорит о положительной эффективной тяге силовой установки, установленной на БПЛА. Таким образом подтверждены результаты расчетов, показывающие перспективность использования ИДД для в качестве дозвуковых прямоточных тяговых установок и впервые продемонстрирована возможность полета с набором скорости и высоты БПЛА в компоновке с ИДД оригинальной конструкции. Стендовые испытания показали, что может являться основой создания БПЛА нового поколения с дозвуковыми прямоточными воздушно-реактивными двигателями.

В четвертой главе на основе многовариантных численных расчетов разработан облик компактного демонстратора прямоточного воздушно-реактивного ИДД на водороде

с воздухозаборным устройством для условий сверхзвукового полета и приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований рабочего процесса.

Для ускорения поисковых расчетов рассматривалось внутреннее и внешнее обтекание НДД безграничным набегающим потоком предварительно перемешанной стехиометрической водородно-воздушной смеси с числами Маха от 1.1 до 2.7 на уровне моря.

Расчеты показали, что НДД рассматриваемой схемы может обладать удельным импульсом (по топливу) выше 2500 секунд с положительной эффективной тягой. Последнее означает, что летательный аппарат, оборудованный таким двигателем такого типа, имеет перспективы осуществлять автономный сверхзвуковой полет, начиная с числа Маха, превышающего 1.3, что значительно меньше, чем у традиционных прямоточных двигателей с диффузионным горением топлива.

На основе разработанного облика НДД сконструирован, изготовлен и испытан экспериментальный образец НДД. Также на этом образце экспериментально впервые доказана возможность снижения минимальной скорости автономного полета прямоточного НДД до $M \leq 1.5$.

Теоретическая и практическая значимость проведенных автором исследований заключается в том, что расчеты процессов горения, детонации и переходных явлений могут применяться при проектировании силовых установок с детонационным горением, а также при решении задач пожаровзрывобезопасности. Математическое моделирование рабочего процесса в детонационных двигателях значительно сократит затраты на проектирование реальных силовых установок. Принципы, положенные в разработку обликов энергоэффективных ИДД и НДД, а также сами облики двигателей могут стать основой проектирования и масштабирования новых систем реактивного движения, работающих на детонационном горении газообразных и жидких горючих. Созданы и испытаны компактные демонстраторы ИДД и НДД, которые доказали перспективность своего применения в летательных аппаратах различного назначения. Показана возможность снижения числа Маха набегающего воздушного потока для НДД с воздухозаборным устройством до $M = 1.5$ с сохранением положительной эффективной тяги.

Полученные результаты полностью отражены в 6 публикациях в российских и международных изданиях, входящих в перечень ВАК. Материалы диссертации прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях. Автореферат диссертации достаточно полно отражает основное содержание диссертации.

Работа выполнена на высоком научном и методическом уровне. Результаты работы, наряду с научной новизной, имеют практическую направленность.

По содержанию диссертационной работы можно высказать следующие **замечания**:

1. В диссертации недостаточно подробно описаны численные методы решения системы уравнений Навье-Стокса, сохранения энергии и неразрывности химических компонент, не описан способ решения системы кинетических уравнений. Также следовало бы более подробно описать алгоритм расчета движения поверхности бесконечно тонкого фронта пламени.

2. Снижение давления оказывает значительное влияние на процессы перехода горения в детонацию в импульсно-детонационном двигателе. В диссертационной работе ни в расчетах, ни в экспериментах не была проведена оценка минимального давления атмосферного воздуха (высоты полета) разработанного макета ИДД.
3. В исследованиях воздушно-реактивного двигателя с непрерывно-детонационным горением в качестве топлива рассмотрен только водород, который сложно использовать при переходе к практическим приложениям. В диссертации не обсуждается вопрос, как полученные результаты исследований можно использовать для непрерывно-детонационных камер сгорания, работающих на углеводородных топливах.
4. В диссертации не приведено исследование уменьшения ошибки расчетов при последовательном измельчении сетки. Само по себе использование коммерческих пакетов или пакетов, созданных другими авторами, не гарантирует ни сходимости, ни приемлемой ошибки расчета на произвольной сетке, тем более что используемые в расчете сетки не являются достаточно мелкими. Некоторые особенности конструкции моделируются с числом ячеек менее 10 на характерный размер.
5. В диссертации используются сетки с числом ячеек около 1 миллиона. Это число является неожиданно малым, и при использовании современных высокопроизводительных систем должно быть на два или три порядка больше. Автор не объясняет, какая именно часть математической модели или этап алгоритма приводят к такому значительному замедлению.
6. Автор упоминает (в одном предложении на стр. 24), что стандартная $k-\epsilon$ модели турбулентности не обеспечивает достаточной точности для пристеночных течений. Однако алгоритм адаптации модели для таких течений не описан, и непонятно вносит ли это заметное улучшение в результаты при достаточно грубых сетках, использованных в расчете.

Приведенные замечания не снижают высокую научную и практическую значимость диссертационной работы А.Э. Зангиева, в которой проведены теоретические и экспериментальные исследования возможности и способов организации детонационного рабочего процесса в прямоточных воздушно-реактивных двигателях.

Заключение.

Диссертационная работа Зангиева Алана Эльбрусевича «Математическое моделирование рабочего процесса в прямоточных детонационных двигателях» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне, в которой разработаны и экспериментально проверены перспективные эффективные силовые установки на детонационном горении.

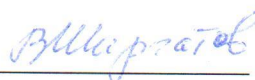
Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, и «Изменений, которые вносятся в Положение о присуждении ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации

№ 335 от 21 апреля 2016 года. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации, которое соответствует паспорту научной специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

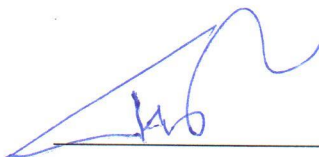
Автор диссертации Зангиев Алан Эльбрусович заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 — Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Диссертация соискателя рассмотрена совместном научном семинаре кафедр химической физики и суперкомпьютерного моделирования инженерно-физических процессов института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ 10.10.2023 г. Отзыв был одобрен по результатам голосования: «за» – 11 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.

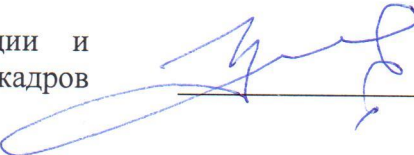
Отзыв подготовил заведующий кафедрой суперкомпьютерного моделирования инженерно-физических процессов Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ д. ф.-м.н.
Тел.: +7(910)445-21-62
e-mail: vashargatov@mephi.ru


В.А. Шаргатов

Заведующий кафедрой химической физики института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ д. ф.-м. н., профессор


С.А. Губин

Председатель совета по аттестации и подготовке научно-педагогических кадров НИЯУ МИФИ, д. ф.-м. н., профессор


Н.А. Кудряшов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Адрес: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31
Телефон: +7 495 788-5699, +7 499 324-7777
Сайт: [https:// mephi.ru/](https://mephi.ru/)
e-mail: info@mephi.ru