

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.243.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА ХИМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ
ИМ. Н.Н. СЕМЁНОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ФИЦ ХФ РАН), ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 15.11.2023, протокол № 10
о присуждении Зангиеву Алану Эльбрусовичу ученой степени кандидата
физико-математических наук

Диссертация «Математическое моделирование рабочего процесса в прямоточных детонационных двигателях» в виде рукописи по специальности 1.3.17 — химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества принята к защите 06 сентября 2023 года (протокол № 8) диссертационным советом 24.1.243.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, 119334, г. Москва, ул. Косыгина, д. 4, приказом Рособрнадзора № 105 н/к от 11 апреля 2012 года.

Соискатель **Зангиев Алан Эльбрусович** родился 27 мая 1989 года, гражданин Российской Федерации. В период с 01 сентября 2006 года по 29 февраля 2012 года обучался на физико-техническом факультете Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», где ему была присуждена квалификация «Инженер-физик» по специальности «Физика кинетических явлений». С 02 сентября 2013 года по 10 июля 2015 года Зангиев А.Э. обучался на

физико-техническом факультете Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», где ему была присуждена степень магистра по направлению «Физика быстропротекающих процессов». С 01 марта 2012 года по 30 сентября 2016 года Зангиев А.Э. работал в должности инженера-исследователя в лаборатории детонации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук С 03 октября 2016 года по 29 марта 2019 года Зангиев А.Э. работал младшим научным сотрудником лаборатории детонации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук. С 01 апреля 2019 года по настоящее время Зангиев А.Э. работает научным сотрудником лаборатории детонации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук.

В 2013 году Зангиев А.Э. был прикреплен к Федеральному государственному бюджетному учреждению науки Федеральному исследовательскому центру химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук для сдачи экзаменов кандидатского минимума, в том числе, по специальности 1.3.17 — химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Диссертация выполнена в лаборатории детонации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук.

Научный руководитель — **Иванов Владислав Сергеевич**, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук,

ведущий научный сотрудник лаборатории детонации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. **Быковский Федор Афанасьевич**, гражданин Российской Федерации, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории динамики гетерогенных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук

2. **Арефьев Константин Юрьевич**, гражданин Российской Федерации, доктор технических наук, директор исследовательского центра «Аэрокосмические двигатели и химмотология» Федерального автономного учреждения «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова»

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация — **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»**, г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном заведующим кафедрой суперкомпьютерного моделирования инженерно-физических процессов Института лазерных и пламенных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», доктором физико-математических наук **Шаргатовым Владимиром Анатольевичем**, заведующим кафедрой химической физики Института лазерных и пламенных технологий Федерального

государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», доктором физико-математических наук, профессором **Губиным Сергеем Александровичем** и председателем совета по аттестации и подготовке научно-педагогических кадров Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», доктором физико-математических наук, профессором **Кудряшовым Николаем Алексеевичем**, и утвержденном первым проректором Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», доктором физико-математических наук, профессором **Нагорновым Олегом Викторовичем**, указала, что:

1). В диссертации недостаточно подробно описаны численные методы решения системы уравнений Навье-Стокса, сохранения энергии и неразрывности химических компонент, а также не описан способ решения системы кинетических уравнений. 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 импульсно-детонационного двигателя.

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.

б) В диссертации на стр. 24 автор упоминает, что стандартная k - ϵ модель 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.

Соискатель имеет 50 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации — 7. Работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях — 6, общим объемом 4 печатных листа.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Frolov S.M., Aksenov V.S., Ivanov V.S., Shamshin I.O., Zangiev A.E. Air-breathing pulsed detonation thrust module: numerical simulations and firing tests // *Aerospace Science and Technology*. — 2019. — V. 89. — P. 275–287.

2. Ivanov V.S., Frolov S.M., Zangiev A.E., Zvegintsev V.I., Shamshin I.O. Hydrogen fueled detonation ramjet: Conceptual design and test fires at

Mach 1.5 and 2.0 // Aerospace Science and Technology. — 2021. — V. 109. — 106459: 1–12.

3. Ivanov V.S., Frolov S.M., Zangiev A.E., Zvegintsev V.I., Shamshin I.O. Updated conceptual design of hydrogen/ethylene fueled detonation ramjet: Test fires at Mach 1.5, 2.0, and 2.5 // Aerospace Science and Technology. — 2022. — V. 126. — 107602: 1–10.

На автореферат поступили отзывы:

1. Отзыв на автореферат диссертации, подписанный старшим научным сотрудником отдела 11 «Вычислительные методы и математическое моделирование» Федерального государственного учреждения Федерального исследовательского центра Института прикладной математики им М.В. Келдыша Российской академии наук, кандидатом физико-математических наук **Полехиной Рузаной Рамилевной**. Отзыв положительный. При чтении автореферата у автора возникли следующие замечания:

1). В автореферате содержится мало деталей о системе решаемых уравнений, численных методах, модели горения. Также нет данных о параметрах расчетных сеток, использовавшихся при моделировании.

2). По зависимости тяги от времени, представленной на рисунке 4, сложно оценить среднюю силу, действующую на импульсно-детонационный двигатель. На этом рисунке следовало бы указать средний уровень тяги для данного режима.

2. Отзыв на автореферат диссертации, подписанный заместителем начальника лаборатории физического и численного моделирования течений с турбулентностью и горением (№ 14) отделения аэродинамики силовых установок Федерального автономного учреждения Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н.Е. Жуковского, доктором физико-математических наук, доцентом

Власенко Владимиром Викторовичем. Отзыв положительный. При чтении автореферата у автора возникли следующие вопросы и замечания:

1). На стр. 5 автореферата сказано, что для описания течения используются «усредненные по Рейнольдсу» уравнения Навье-Стокса. Однако рассматриваются существенно сжимаемые течения, в которых осреднение по Рейнольдсу порождает много дополнительных членов, которые требуют замыкания. Ознакомление с выложенным в Интернете текстом диссертации показало, что автор, вне всякого сомнения, пользуется осреднениями по Фавру. Это следовало бы указать в автореферате.

2). На стр. 3 и 5 автореферата утверждается, что «для расчета вкладов объемных реакций в химические источники применяется метод частиц (метод Монте-Карло)». На самом деле метод частиц используется автором не для расчета вкладов объемных реакций, а для учета влияния турбулентности на средние скорости реакций при горении по объемному механизму.

3. Отзыв на автореферат диссертации, подписанный ведущим научным сотрудником отдела вычислительной математики Федерального государственного учреждения Федерального научного центра Научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук, кандидатом физико-математических наук **Семеновым Ильей Витальевичем.** Отзыв положительный. При чтении автореферата у автора возникли следующие вопросы и замечания:

1). В автореферате нет данных о проведении исследований влияния расчетной сетки и количества квазичастиц на результаты численного моделирования и выборе оптимальных параметров для серийных расчетов.

2). В ходе испытаний применялись активные добавки к жидкому горючему. Учитывались ли эти активные добавки в численных экспериментах?

3). Для ускорения расчетов при моделировании непрерывно-детонационного двигателя в качестве набегающего потока использовалась предварительно перемешанная стехиометрическая водородно-воздушная смесь. По результатам расчета на рисунке 10 видно, что реакции идут только в определенной области внутри камеры сгорания. Где проходила граница, на которой включался расчет химических реакций? Были ли проведены расчеты для бедных смесей и их сопоставление с результатами экспериментальных исследований?

4. Отзыв на автореферат диссертации, подписанный первым заместителем генерального директора Военно-промышленной корпорации Научно-производственного объединения машиностроения, доктором технических наук, профессором **Дергачевым Александром Анатольевичем**. Отзыв положительный. Замечаний нет.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что:

1. Официальный оппонент д.т.н. **Быковский Федор Афанасьевич** — автор известных научных работ по экспериментальному исследованию непрерывной детонации и физике ударных волн. Работы по данной теме опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях. Несомненно, Быковский Ф.А. является экспертом в области горения и детонации газоз-воздушных смесей, который может по существу оценить диссертационную работу, представленную Зангиевым А.Э.

2. Официальный оппонент д.т.н. **Арефьев Константин Юрьевич** является признанным специалистом в области тепловых химических двигателей для летательных аппаратов. Большой и разнообразный опыт, высокая научная квалификация Арефьева К.Ю. позволяют ему всесторонне оценить представленную диссертационную работу.

3. Ведущая организация **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный**

исследовательский ядерный университет МИФИ является одним из ведущих российских научных учреждений в области горения. Основными направлениями исследований НИЯУ МИФИ являются исследования горения и детонации, физика высокотемпературной плазмы, разработка аналитических моделей для исследования газодинамических течений. Высокая научная квалификация сотрудников НИЯУ МИФИ позволяет дать экспертную оценку представленной диссертационной работы.

Диссертационный совет отмечает, что в рассматриваемой работе диссертантом проведены многовариантные численные расчеты для прямооточных воздушно-реактивных детонационных двигателей на жидком горючем, позволившие разработать действующие макеты-демонстраторы для испытаний на экспериментальном стенде. Впервые был испытан импульсный детонационный двигатель в составе беспилотного летательного аппарата в условиях реального дозвукового полета. Экспериментально была доказана возможность применения непрерывно детонационного двигателя при низких скоростях сверхзвукового набегающего воздушного потока (с числом Маха ниже 1.5), недостижимых при использовании прямооточных воздушно-реактивных двигателей на медленном горении.

Теоретическая значимость исследования. Созданы научные основы проектирования прямооточных воздушно-реактивных двигателей нового поколения с детонационным циклом сжигания топлива. Разработанные методы физико-математического моделирования рабочего процесса с учетом вкладов фронтальных и объемных химических превращений можно использовать при проектировании и оптимизации как существующих, так и перспективных воздушно-реактивных двигателей.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики. Двигатели с детонационным циклом сжигания топлива обладают новыми характеристиками, недостижимыми при использовании классических схем организации рабочего процесса. Созданные в работе

макеты-демонстраторы прямоточных воздушно-реактивных двигателей могут быть использованы в качестве прототипов при проведении дальнейших НИОКР и ОКР предприятиями промышленности Российской Федерации.

Оценка достоверности результатов исследования. Достоверность результатов обеспечивается использованием апробированных измерительных методик, непротиворечивостью получаемых результатов и их удовлетворительным согласием с результатами численных расчетов, воспроизводимостью результатов при неизменных условиях экспериментов, а также широкой апробацией материалов диссертации на научных конференциях, совещаниях и семинарах. Ключевые результаты работы опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных рецензируемых журналах, что также подтверждает высокий уровень проведенного исследования.

Личный вклад соискателя состоит в личном участии на всех этапах исследования. Соискатель принимал непосредственное участие в постановке задач, проведении газодинамических расчетов, разработке и изготовлении экспериментальных установок, планировании и проведении экспериментальных исследований, анализе их результатов, а также в подготовке научных статей и представлении докладов на научных конференциях.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1) Для решения таких сложных задач обычно используют расчетные сетки со значительно бóльшим числом расчетных ячеек. Как вам удалось получить результаты приемлемой точности на относительно грубых сетках?

2) Вы представили две схемы детонационных двигателей: с импульсной и непрерывной детонацией. Какая из этих схем лучше?

Соискатель Зангиев А.Э. ответил на задаваемые ему вопросы и привел собственную аргументацию:

1) Для моделирования реагирующего течения использовались подсеточные модели распространения пламени и предпламенного самовоспламенения. Именно это позволило значительно уменьшить вычислительные затраты.

2) Каждая из этих схем имеет свои преимущества и недостатки. Схема с импульсной детонацией хороша для дозвуковых полетов, а схема с непрерывной детонацией — для сверхзвуковых.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, и «Изменениям, которые вносятся в Положение о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 335 от 21 апреля 2016 года, и принял решение присудить **Зангиеву Алану Эльбрусовичу** ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 — химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 23 человек, из них 12 докторов наук по специальности 1.3.17 — химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества, участвовавших в заседании, из 30 человек, входящих в состав совета, проголосовали:

за присуждение ученой степени — 23,

против присуждения ученой степени — нет,
недействительных бюллетеней — нет.

Председатель
диссертационного совета 24.1.243.02
доктор физико-математических наук



М.Г. Голубков

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.243.02
кандидат физико-математических наук

С.Ю. Сарвадий

15 ноября 2023 года