

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, директора исследовательского центра «Аэрокосмические двигатели и химмотология» федерального автономного учреждения «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» Арефьева Константина Юрьевича на диссертационную работу 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

На этапе современного развития технологий создания силовых установок для внутриатмосферных летательных аппаратов большую роль играет энергетическая эффективность, т.е. степень полноты использования химической энергии, запасенной в единице массы топлива. Одной из проблем, связанных с созданием двигателей для внутриатмосферных летательных аппаратов, является теоретический предел энергетической эффективности силовых установок, который связан, в том числе, с термодинамическим циклом рабочего процесса. В связи с этим проявляется интерес к созданию силовых установок на новых принципах организации горения, которые могут обеспечить более полное использование энергетики топлива. К таким принципам можно отнести и организацию горения топлива в детонационном режиме.

В связи с этим применение импульсно–детонационных двигателей (далее – ИДД) и непрерывно–детонационных двигателей (далее – НДД) рассматривается сегодня как один из возможных путей повышения энергоэффективности различных типов аэрокосмических двигателей. Однако создание таких двигателей невозможно без надлежащего проектирования их проточного тракта с учетом конструктивных ограничений и режимов эксплуатации. Из этого следует, что крайне **актуальной** задачей, рассмотренной в диссертации А.Э. Зангиева, является поиск способов организации эффективного рабочего процесса в прямооточных воздушно реактивных импульсно–детонационных и непрерывно-детонационных двигателях. Решение этой задачи базируется

на разработке высокоточных вычислительных методов, позволяющих существенно сократить затраты при проектировании образцов силовых установок с последующей экспериментальной проверкой в полунатурных и натурных условиях.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка сокращений и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 135 страницах. Изложение материала в диссертации соответствует требованиям к научным работам, содержит 69 поясняющих рисунков и 17 таблиц. Библиография из 152 наименований отражает ключевой перечень известных современных исследований в рассматриваемой автором области науки.

Во введении автором 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 представлен обзор и анализ известных работ по организации управляемой детонации газообразных и жидких горючих в трубах и кольцевых камерах сгорания, а также по численным методикам расчета импульсной и непрерывной детонации. Автор отмечает, что к настоящему времени, несмотря на детальные исследования принципов организации рабочего процесса в ИДД, сведений о практическом применении ИДД в литературе нет, однако имеются реальные возможности создания ИДД с быстрым переходом горения в детонацию (ПГД) на любой топливной паре вплоть до топливно-воздушной смеси (ТВС) метана.

Вторая глава посвящена описанию физико-математической модели многофазного турбулентного реагирующего течения, сформированной автором на основе существующих и оригинальных подходов. Турбулентное течение вязкого сжимаемого газа в работе описывается усредненными по Рейнольдсу уравнениями сохранения с источниковыми членами для взаимной увязки с химическими превращениями и межфазным взаимодействием.

Для моделирования фронтального турбулентного горения А.Э. Зангиев использовал метод явного выделения фронта пламени. Для расчета вкладов объемных

реакций в химические источники - метод частиц (метод Монте-Карло), в котором при расчете скорости химических реакций в турбулентном потоке учитываются влияние турбулентных пульсаций температуры и концентрации реагентов на среднюю скорость химических превращений. Уравнения математической модели замкнуты калорическим и термическим уравнениями состояния, а также начальными и граничными условиями. Все теплофизические параметры газа считаются переменными.

Течение дисперсной фазы автор описал методом лагранжевых квазичастиц. Для решения уравнений использован сопряженный алгоритм «метод SIMPLE – метод частиц». Для моделирования окисления водорода применяется проверенная одноступенчатая глобальная кинетика с предэкспоненциальным множителем, который является функцией давления и энергии активации, зависящей от коэффициента избытка горючего. Моделирование задержек самовоспламенения в воздушных смесях пропана проводится с помощью глобального кинетического механизма, состоящего 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. Самовоспламенение таких смесей в условиях детонационного горения автором предложено рассчитывать по модельной кинетике низко- и высокотемпературного самовоспламенения суррогата.

В третьей главе отражены результаты авторской разработки и оптимизации экспериментальной модели ИДД на жидком горючем для дозвукового полета. Исследования А.Э. Зангиева позволили спроектировать и изготовить экспериментальный образец ИДД, который испытан на стендах с присоединенным воздухопроводом и свободным воздушным потоком. Проведены испытания, которые включали отработку различных способов зажигания и повышения уровня турбулентности на участке ускорения пламени, применение доступных активных добавок к жидкому горючему, позволяющих сократить длину пламени. Скорость набегающего потока в испытаниях с присоединенным воздухопроводом

варьировалась от 20 м/с до 100 м/с, а в испытаниях с обдувом свободным воздушным потоком - до 270 м/с. Максимальная рабочая частота ИДД составляет 15 Гц. На основе испытаний автором создана карта рабочих режимов ИДД.

При участии автора проведены бросковые испытания двигателя в составе модельного летательного аппарата, в результате которых зарегистрирован набор скорости и высоты полета. Это свидетельствует о наличии положительной эффективной тяги и работоспособности рассматриваемого А.Э. Зангиевым двигателя.

В четвертой главе рассматривается другой тип воздушно-реактивного детонационного двигателя – НДД – и приводятся результаты расчетно-экспериментальных исследований рабочего процесса.

Здесь автор пытается решить основную проблему создания воздушно-реактивного НДД для низких чисел Маха полета – низкое отношение давления торможения в набегающем потоке воздуха к давлению в КС. В частности, авторские расчеты для одноконтурной конфигурация НДД показывают, что при сохранении рабочего процесса с одной детонационной волной происходит значительное нарушение работы входного устройства с выбиванием прямого скачка уплотнения и потерей значительного расхода воздуха и, соответственно, эффективности двигателя.

В соответствии с разработанным на основе трехмерных численных расчетов А.Э. Зангиевым был сконструирован экспериментальный образец НДД. Испытания этого образца НДД проведены при обдуве свободным воздушным потоком с числом Маха $M = 1.5, 2.0$ и 2.5 . Измеренная эффективная тяга НДД показала, что с повышением числа Маха и давления торможения набегающего воздушного потока реализуются более эффективные режимы с высокочастотным продольно-пульсирующим и непрерывным спиновым детонационным горением водорода.

Использование исследуемой автором комбинации физических принципов позволяет улучшить устойчивость работы входного устройства двигателя при малых скоростях набегающего потока и обеспечить высокую эффективность силовой

установки.

Ключевая составляющая **научной новизны** работы, по мнению оппонента, заключается в:

– выявлении ранее не известных закономерностей рабочего процесса в воздушно–реактивном импульсно-детонационном двигателе на жидком горючем, полученных на основе расчетно-экспериментального исследования и реального дозвукового полета в составе летательного аппарата;

– результатах многовариантных численных расчетов и испытаний в сверхзвуковом воздушном потоке демонстратора прямоточного воздушно-реактивного непрерывно-детонационного двигателя на водороде;

– доказательстве возможности применения НДД при низких скоростях сверхзвукового набегающего воздушного потока (ниже $M = 1.5$).

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в том, что автором созданы научные основы проектирования прямоточных 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.

Апробация подтверждена участием автора с докладами по тематике работы на ежегодных конференциях Отдела горения и взрыва ФИЦ ХФ РАН, ежегодных научных сессиях НИЯУ МИФИ, семи всероссийских и международных коллоквиумах и семинарах. Основные результаты диссертации ранее опубликованы в 6 рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Полученные автором результаты можно считать достаточно **достоверными**, так как они проверены путем прямого сравнения расчетных и экспериментальных

данных, в том числе полученных в исследованиях, представленных в диссертации и в работах других авторов.

По диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**:

1. В используемой автором математической модели дробление и испарение капель жидкого топлива описывается упрощенно. В частности, не в полной мере учитывает влияние сложной ударно-волновой структуры, возникающей в результате детонационного горения топлива на фазовые переходы и деструкцию капель. Это может привести к некоторым отличиям относительно реальных физических процессов.

2. Мало внимания уделено описанию методик проведения эксперимента. Остался не до конца понятным способ прогнозирования тяги двигателя по результатам проведенных измерений. Следует подчеркнуть, что изменение после подачи топлива силы, действующей на объект испытаний, не является тягой двигателя, рассчитываемой по внутренним параметрам. Необходимо учитывать входной импульс потока воздуха.

3. Представляется целесообразным больше внимания уделить сопоставлению распределения газодинамических параметров по тракту двигателя, полученных с помощью расчетов и экспериментов. Это позволило бы более детально оценить точность проведенных расчетов.

4. Отсутствует сопоставление с рядом исследований других авторов. В частности с данными, опубликованными по результатам модельных испытаний каналов с детонационным горением, проведенных в ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова». Несмотря на то, что в опубликованных статьях рассмотрены ограниченные режимы по температуре воздуха на входе, сравнение известных эмпирических данных с результатами, представленными в диссертации могло бы быть полезным для аналитического сопоставления и определения особенностей предложенного автором метода организации рабочего процесса.

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки работы и не влияют на основные результаты. Диссертация А.Э. Зангиева является

законченной научно-квалификационной работой, включающей новые научные результаты, их обоснование и приложение к практическому применению. Цель работы достигнута.

Диссертация соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, и «Изменений, которые вносятся в Положение о присуждении ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 21.04.2016 № 335. Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой разработаны и обоснованы принципы пульсирующей и непрерывной спиновой детонации в камерах сгорания ПВРД, с учетом различных режимов горения. Автор диссертации Зангиев Алан Эльбрусович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 — химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Официальный оппонент:

директор исследовательского центра «Аэрокосмические двигатели и химмотология»,
доктор технических наук



М.П.

Арефьев Константин Юрьевич

«25» октябрь 2023 г.

Федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»)

Адрес: 111116, Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 2

Телефон: +7 (495) 362-49-50

E-mail: kyarefev@ciam.ru

<http://www.ciam.ru/>