

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Чернухо Ивана Ивановича «Импульсная детонация жидких топлив в малоразмерной установке реактивного типа», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.17– «химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества»

1. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представлена к защите

Диссертация Чернухо И.И. «Импульсная детонация жидких топлив в малоразмерной установке реактивного типа» соответствует паспорту специальности 01.04.17– «химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» по пунктам 1, 2, 4 и 6 области исследования (раздел III паспорта) и отрасли «физико-математические науки».

2. Актуальность темы диссертации

Диссертационное исследование посвящено изучению процесса инициирования детонации в малоразмерных (докритических) цилиндрических каналах и, в практическом аспекте, - реализации частотной детонации с высокими показателями частоты и тяги в таких системах. В исследованиях использована химическая система «гептан- воздух- кислород» и «авиационный керосин – воздух – кислород».

Исследование непосредственно относится к технической задаче создания детонационных- двигателей для авиационной и ракетной техники. Сама возможность использования детонационных режимов горения для повышения КПД реактивного двигателя и показателей удельной тяги высказывалась еще в середине 20 в. основоположниками теории детонации (Я.Б.Зельдович, К.И.Щелкин, А.С.Компанеев, А.Н.Дремин и др.). По оценкам С.М.Фролова [Тяжелое машиностроение 2003, №9, с.18] детонационный двигатель в идеале по сравнению с ПВРД обеспечит топливную экономичность до 30% при числе Маха полета 2.5. Однако практическая реализация таких проектов сталкивалась с большими трудностями, - прежде всего с трудностью надежного инициирования детонации в достаточно компактных устройствах с использованием традиционных топлив и поддержания непрерывного или квазинепрерывного частотного режима детонации. Существенные усилия в этом направлении были предприняты в более позднее время в Институте химической физики им.Н.Н.Семенова РАН (группа проф. С.М.Фролова), в некоторых специализированных предприятиях ГОАО ГНПП «Регион» и др. Активные работы продолжаются в научных

центрах США, Японии, Франции, Польши др. Заметный вклад в развитие проблемы внес и Институт тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАН Беларуси.

Основное направление исследований в этом направлении в мире связано с накоплением и теоретическим обобщением экспериментальных данных по условиям инициирования детонации, характеристикам перехода дефлаграции в детонацию при различных геометриях системы, для различных топлив и способов их образования. Существенный интерес представляет изучение инициирования и динамики детонационного горения традиционного авиационного топлива в виде капельной дисперсии в малоразмерных детонационных установках.

Диссертационная работа посвящена исследованию физико-химических процессов и геометрических факторов, обеспечивающих устойчивое инициирование и распространение детонации в смесях жидких топлив (гептан, авиационный керосин) с воздухом и кислородом в частотном режиме в малогабаритной камере сгорания, и выявлению их влияния на тяговые характеристики реактивной установки.

Таким образом проблема исследуемая в диссертационной работе является актуальной, она имеет очевидный практический и фундаментальный аспект.

3. Степень новизны результатов диссертации и научных положений, выносимых на защиту

Диссертационная работа имеет четкую структуру, последовательность решаемых задач соответствует поставленной цели.

Первая глава диссертации является обзорной, она показывает состояние исследований предмета диссертации, место диссертационного исследования в общей картине исследований детонационных двигателей, методы исследования термодинамических и гидродинамических процессов при инициировании и развитии детонации. Приводятся теоретические основы теории детонации. На основе изложенного обосновываются задачи диссертационного исследования.

Во второй главе описывается экспериментальный комплекс для исследования инициирования и развития детонации в малогабаритной трубе. Специфику комплекса определяет конструкция предкамеры сгорания, габариты детонационной трубы и геометрия выходного конического сопла. Дано детальное описание системы подачи топлива и инициирования горения, а также автоматической системы управления системой и снятия экспериментальных данных. Экспериментальный стенд с компьютеризированным управлением позволяет минимизировать влияние

человеческого фактора на эксперимент и тем самым повысить точность и надежность данных.

В третьей главе представлены новые экспериментальные данные по задержке воспламенения смеси «гептан-воздух-кислород» (далее -ГВК) от коэффициента избытка горючего, от степени обогащения кислородом (отношение кислород - воздух), а также от температуры стенок камеры сгорания. Показан характер и количественное влияние таких факторов как наличие турбулизирующего препятствия и обогащения кислородом на детонационное расстояние и скорость волны горения. Установлены новые качественно- количественные особенности динамики волны горения, в частности, - для гептано- воздушной смеси, обогащенной кислородом, скорости волны на трех измерительных базах близки, в то время как для керосин- воздушной смеси, обогащенной кислородом скорость возрастает по мере удаления от источника зажигания.

Интересными и практически важными представляются найденные закономерности влияния температуры стенок на детонационную длину и скорость волны горения. Сокращение длины перехода горения в детонацию при увеличении температуры стенок объясняется изменением характера распада струи гептана (увеличиваются числа Рейнольдса и Вебера), и соответствующим ускорением подготовки гептано- воздушно- кислородной смеси. Впервые продемонстрирован характер синергетического эффекта совместного влияния факторов преднагрева камеры, обогащения кислородом и препятствия- турбулизатора для малоразмерных детонационных установок в смеси «гептан- воздух-кислород».

В четвертой главе представлены исследования тяговых характеристик малоразмерной импульсной детонационной установки. Получены новые статистически обоснованные данные по зависимости тяговых характеристик от отношения «кислород/воздух» для гептана и керосина. Кроме главной зависимости от скорости волны горения получены данные о корреляции тяги и коэффициента избытка горючего, температурного состояния установки, отношения «кислород/воздух», геометрии сопла. Полученные данные позволили сделать четкие рекомендации по конструкции и режиму работы установки, обеспечивающей максимальную тягу.

В пятой главе представлены численные исследования газодинамических процессов в малогабаритной детонационной установке. Подробно описан метод расчета и модель подготовки горючей смеси. Визуализирован процесс высокоскоростного смешения компонентов горючей смеси, детализированы этапы инициирования горения и переход дефлаграции в детонацию, в частности зафиксировано и объяснено наличие нескольких фаз ускорения. Значительным научным достижением следует считать 3D моделирование системы, которое показывает область применения и точность 2D моделей детонационных двигателей. Сравнение численных и экспериментальных

данных показало хорошее совпадение интегральных показателей и работоспособность и адекватность сформулированной модели.

Таким образом, в диссертации получен большой объем новых научных экспериментальных данных, обобщенных в виде аналитических зависимостей и сформулированных рекомендаций по достижению высоких показателей скорости горения, частоты и тяги малоразмерной импульсной детонационной установки. Численное моделирование высокого разрешения позволило детализировать характеристики процессов инициирования и разгона волны горения.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Выводы и рекомендации, сделанные в диссертации получены на основе применения научно-обоснованных и принятых при исследовании проблем химической физики, горения и детонации методов, моделей, средств измерений, программных средств, технических и математических методов.

Экспериментальные исследования проведены с большим количеством индивидуальных пусков установки (экспериментальных точек), достаточным для обоснованного определения средних значений, трендов и дисперсий исследуемых величин.

Последовательность решаемых задач представляется обоснованной, результаты исследований глав 3, 4 и 5 согласуются между собой и соответствуют известным положениям теории горения и детонации.

Погрешностей в применении математического аппарата и при формулировке и применении численных методов и алгоритмов, а также при интерпретации результатов не выявлено.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию.

Научная значимость исследования заключается в получении массива экспериментальных данных по инициированию детонационного горения в импульсном режиме систем «аэрозоль гептан-воздух-кислород» и «аэрозоль керосин-воздух-кислород» в пространстве параметров концентрации, а также начальной температуры стенок камеры и геометрии препятствия — турбулизатора.

На основе экспериментальных данных получены параметрические зависимости позволившие определить геометрические, теплофизические и режимные параметры системы, обеспечивающие максимальную частоту устойчивой детонации в частотном режиме и тягу.

Обнаружены нелинейные функциональные связи между температурой стенок, коэффициентом избытка кислорода и турбулизацией потока в предкамере, обеспечивающие синергетический эффект ускорения волны горения в системе.

На основе экспериментальных данных и результатов детального 2-х и 3-х мерного моделирования системы уточнена качественно-количественная картина подготовки горючей смеси и перехода дефлаграции в детонацию. В частности, идентифицированы стадии первичного искрового нагрева, начала экзотермической реакции, самовоспламенения, прохождение волны горения по преднагретой от искры области, возникновение детонации, локальный перегрев за счет 3-х мерных эффектов наложения ударных волн, что увеличивает научные знания о процессах инициирования детонации в докритических каналах.

Практическая значимость результатов.

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при конструировании и разработке реактивных двигателей для малоразмерных высокоскоростных летательных аппаратов. Разработанные методы измерений и диагностики могут быть использованы в дальнейших экспериментальных исследованиях детонационного режима в импульсных установках с другой геометрией.

Материалы исследования могут быть использованы для проведения учебных занятий высокого уровня по методам и теории горения для студентов, магистрантов и аспирантов соответствующих специальностей.

Практическая значимость подтверждается актом об использовании результатов (б/н от 21.12.2018) в учебном процессе Белорусского государственного университета и актом внедрения (б/н от 07.05.2018) результатов в Научно-технологическом центре им. Короля Абдулазиза г. Эр-Рияд, Саудовская Аравия.

Экономическая значимость работы определяется экспортным потенциалом научных исследований в сложной и высокотехнологичной сфере – создание детонационных двигателей. Для более полной экономической реализации исследований необходимо взаимодействие с заводами и конструкторскими бюро производителей авиакосмической техники.

Социальная значимость результатов диссертационного исследования определяется поддержанием высокого мирового научной школы химической физики и горения в Республике Беларусь, созданием новых знаний и компетенций, которые могут быть использованы в области научно-технического образования, а также при разработке новых технологий сжигания топлива в энергетике и двигателестроении. В перспективе технологии детонационных двигателей позволят производить более скоростные и экономичные летательные аппараты для гражданских целей.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати.

Основные научные результаты диссертации полностью опубликованы в 22 печатных работах, в том числе: 7 статьях в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь; 15 тезисах докладов и материалов конференций.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.

Диссертационная работа имеет четкую понятную структуру. Материалы изложены последовательно в соответствии с сформулированными целями и задачами исследования. Существенных замечаний по форме и стилистике изложения не имеется. Автореферат достаточно хорошо отражает содержание диссертации.

Диссертация и автореферат диссертации оформлены в соответствии с Инструкцией, утвержденной постановлением ВАК РБ 28.02.2014 № 3 (в редакции постановления ВАК РБ 22.08.2022 № 5).

8. Замечания по диссертации.

Стилистически некоторые утверждения малосодержательны. Например, утверждение «...Показано, что смещение топлива и окислителя в предкамере, способ и характер поджига оказывают существенное влияние на инициирование детонации и длину перехода горения в детонацию» достаточно очевидно чтобы помещаться в раздел «научная новизна». Или (стр.144) «При моделировании...обнаружено явление вихреобразования в выходном сечении сопла. ...явление подтверждается экспериментальными данными.» А могло быть без вихреобразования?

Желательно оговаривать специфику использования терминов. Например А.Н.Дремин ряд других основателей теории детонации используют термин «пережатая», а не «пересжатая» детонация, как автор диссертации.

При исследовании влияния температуры стенок на инициирование детонации и динамику волны горения кроме влияния температуры на числа Re и We (уменьшение диаметра капель) было бы целесообразно обсудить связь с термическими механизмами испарения (что связано с понятиями температура вспышки, поверхностная энергия).

Вывод о синергетическом влиянии на динамику ПГД (коэффициент интенсивности детонации ψ) обоснован как отклонение от линейной зависимости ψ от управляющих факторов. В общем случае найденный эффект соответствует нелинейной перекрестной зависимости ψ от управляющих факторов. Это следовало бы обсудить.

В Главе 4 кроме основной зависимости от скорости волны горения экспериментально продемонстрирована корреляция тяги и температуры установки, отношения «кислород/воздух», коэффициента избытка топлива. Однако не сделана попытка связать данные факторы с усредненным состоянием продуктов сгорания на выходе (например энтальпией), что могло бы стать важным обобщением.

Имеется определенное количество синтаксических опечаток.

Сделанные замечания не снижают научной ценности и практической значимости полученных в диссертации результатов.

9. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует.

Анализ результатов, а также подходов и методов решения задач, сделанных выводов и, собственно, изложения материала исследования показывает, что научная квалификация Чернухо И.И. соответствует ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.17– «химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

10. Заключительная часть отзыва о диссертации.

Диссертация Чернухо И.В. «Импульсная детонация жидких топлив в малоразмерной установке реактивного типа», является законченной научной работой, выполненной на актуальную тему. Диссертация содержит новые, научно обоснованные, теоретические и экспериментальные результаты, которые относятся к решению важной научно-технической задачи – повышение энергетической эффективности, тяги, устойчивости работы и массогабаритных показателей малоразмерных импульсных детонационных установок.

Экспериментальная часть исследований проведена на технически сложном оборудовании, требующем точной синхронизации работы измерительных и исполнительных модулей и высокой квалификации исследователя.

Диссертация Чернухо И.В. соответствует требованиям, установленным главой 3 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.17– «химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» за научные результаты, включающие:

1. Зависимости скоростных режимов распространения волны горения от концентраций компонентов, позволившие установить концентрационные пределы существования детонации в частотном режиме до 50 Гц в гептано–кислородно–воздушной смеси ($\phi = 0,70–2,60$) в малоразмерной импульсной детонационной установке с каналом субкритических размеров

2. Способ инициирования детонации в малоразмерной импульсной детонационной установке, основанный на синергетическом эффекте, - взаимоусиливающем совместном действии факторов нагрева установки до $T_0 > 50^\circ\text{C}$, установления в предкамере препятствия-турбулизатора и обогащения топливно-воздушной смеси кислородом до $[\text{O}_2/\text{воздух}] \geq 1.8$ при эквивалентном отношении смеси в диапазоне $\phi = 0,95-2,10$, позволивший сократить преддетонационное расстояние на $\sim 60\%$ и получить импульсный детонационный режим с частотой до 80 Гц при длине субкритического канала установки 200 мм и сокращенной на 300 мм до 364 мм общей длине установки.

3. Экспериментально и численно выявленные корреляции тяги малоразмерной импульсной детонационной установки со скоростью детонации жидких топлив (гептан и авиационный керосин), степенью обогащения кислородом, коэффициентом избытка горючего, наличием препятствия- турбулизатора, угла раствора сопла, позволившие установить границы импульсного детонационного режима с частотой 50 Гц (наличие препятствия-турбулизатора, $[\text{O}_2/\text{воздух}] \geq 0,70$, $\phi = 0,90-1,20$, угол раствора сопла 15°), обеспечивающего оптимальную величину реактивной тяги, которая составила: для гептана – 180–210 Н (удельный импульс $J = 6116-7137$ с (МКГСС)); для керосина – 160–190 Н (удельный импульс $J = 5437-6456$ с (МКГСС)).

Официальный оппонент:
заведующий ОНИЛ “Инновационная энергетика” филиала Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательский политехнический институт»
доктор физико-математических наук, профессор
Доброго Кирилл Викторович

«19» декабря 2023 г.



Личную подпись Доброго Кирилл Викторович заверяю.

Начальник отдела кадров филиала Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательский политехнический институт»

Цыркунова Д.А.



С отзывом ознакомлен

19.12.2023

