

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ГНУ

«Объединенный институт
материаловедения НАН Беларуси»



С.Н. Поддубко

“ 12 ” 12 2023 г.

ОТЗЫВ

оппонирующей организации на диссертацию Чернухо И.И.

«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

Диссертационная работа Чернухо И.И. посвящена экспериментальным и численным методам исследования инициирования детонации для создания импульсного детонационного двигателя (ИДД), а именно:

- разработке малоразмерной установки реактивного типа для экспериментального исследования способов подачи компонентов и течения смеси, процессов воспламенения и импульсного инициирования детонации в гетерогенных смесях распылённого жидкого топлива;

- исследованию газодинамических параметров и структуры нестационарного течения в предкамере и в канале субкритических размеров малоразмерной импульсной детонационной установки;

- определению времен задержки воспламенения и установлению условия устойчивого воспламенения гетерогенных смесей «жидкое топливо–кислород» и «жидкое топливо–воздух–кислород» в малоразмерной импульсной детонационной установке с учетом изменений значимых факторов;

- определению физико-химических и конструктивных параметров, обеспечивающих оптимальный переход горения в детонацию в малоразмерной импульсной детонационной установке при сжигании смесей «жидкое топливо–воздух–кислород»;

- установлению степени интенсивности детонации и определению значимости факторов, оказывающих влияние на реактивную тягу малоразмерной импульсной детонационной установки.

Диссертация представляется впервые. Содержание диссертационной работы и приведенные результаты полностью соответствуют пункту 4 (Гидродинамика и химия горения) и пункту 6 (Ударные волны в химически реагирующих средах. Детонация) раздела «Области исследований» паспорта специальности 01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества и отрасли «физико-математические науки». Диссертация может представляться к защите на совете по защите диссертаций Д 01.13.01.

2. Актуальность темы диссертационной работы

Для увеличения тяговых характеристик существующих реактивных двигателей к настоящему времени практически исчерпаны все имеющиеся возможности, как в плане выбора новых перспективных топливных компонентов, так и в конструктивных новшествах. Одним из возможных путей увеличения тяговых характеристик реактивного двигателя является переход от цикла с подводом тепла при постоянном давлении к циклу с управляемым детонационным сжиганием топлива. Проблема инициирования детонации в камерах субкритических размеров с диаметром, соизмеримым с шириной детонационной ячейки, представляет несомненный научный и прикладной интерес. Необходимость применения детонации для получения реактивной тяги, наряду с растущими запросами на малоразмерные летательные аппараты, требует развития новых эффективных методов инициирования импульсной детонации в каналах субкритических размеров.

В этой связи диссертация Чернухо И.И., посвященная экспериментальным и численным методам инициирования детонации и исследованию физико-химических процессов, сопровождающих распространение детонационных волн в реагирующих смесях жидкого топлива с воздухом и кислородом в малоразмерной импульсной установке, является достаточно актуальной, а ее результаты имеют большое научное и практическое значение.

3. Научный вклад соискателя в разработку научной проблемы с оценкой его значимости

Диссертационное исследование Чернухо И.И. в большей степени является экспериментальной научной работой, которая содержит ряд новых результатов. В то же время соискателем использованы численные методы исследования, адекватно прогнозирующие и описывающие полученные экспериментальные результаты. Среди значимых результатов, полученных соискателем, следует отметить экспериментальные и численные исследования по разработке оригинального способа инициирования

детонации в малоразмерной импульсной установке с каналом субкритических размеров, основанного на синергическом эффекте при совместном действии ряда физико-химических и геометрических факторов (нагрев установки до $T_0 > 50^\circ\text{C}$, установление в предкамере препятствия-ускорителя, обогащение топливно-воздушной смеси кислородом до $[\text{O}_2/\text{воздух}] \geq 1,8$, эквивалентное отношение смеси в диапазоне $\phi = 0,95-2,10$). Данный эффект позволил сократить преддетонационное расстояние на $\sim 60\%$ и, тем самым, увеличить частоту импульсов детонационного режима с 50 Гц до 80 Гц при длине субкритического канала установки 200 мм. На основе этого эффекта общая длина реактивной установки была укорочена на 300 мм (с 640 мм до 340 мм), что является значимым прикладным результатом.

Другим важным результатом, полученным соискателем, является установление концентрационных пределов существования детонации в частотном режиме до 50 Гц в гептан-кислород-воздушной смеси в малоразмерной импульсной детонационной установке с каналом субкритических размеров, выраженных через коэффициент избытка горючего $\phi = 0,70-2,60$.

В диссертационной работе также установлены границы существования импульсного детонационного режима с частотой 50 Гц ($[\text{O}_2/\text{воздух}] \geq 0,70$, $\phi = 0,90-1,20$, наличие препятствия, угол раствора сопла 15°), обеспечивающего оптимальную величину реактивной тяги для двух видов топлива: для гептана – 180–210 Н; для керосина – 160–190 Н.

Таким образом, полученные в диссертационной работе Чернухо И.И. научные результаты являются новыми и позволяют расширить имеющиеся на сегодняшний день знания о методах инициирования детонации в установках субкритических размеров и об инструментах управления детонационного сжигания топлива с целью получения полезной кинетической энергии струи сгоревших газов.

4. Конкретные научные результаты (с указанием их новизны и практической значимости), за которые соискателю может быть присуждена искомая ученая степень

К значимым научным результатам диссертационного исследования, за которые соискателю Чернухо И. И. может быть присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук, следует отнести:

- Установление на основе зависимостей скорости распространения волны горения от концентраций компонентов концентрационных пределов детонации в частотном режиме до 50 Гц в гептан-кислород-воздушной смеси ($\phi = 0,70-2,60$) в малоразмерной импульсной детонационной установке с каналом субкритических размеров.

- Обнаруженный синергический эффект, основанный на совместном действии ряда физико-химических и геометрических факторов (нагрев установки до $T_0 > 50^\circ\text{C}$, установление в предкамере препятствия-ускорителя,

обогащение топливно-воздушной смеси кислородом до $[O_2/\text{воздух}] \geq 1,8$, эквивалентное отношение смеси в диапазоне $\phi = 0,95-2,10$). Это позволило сократить преддетонационное расстояние в малоразмерной импульсной детонационной установке на $\sim 60\%$ (300 мм) и, тем самым, получить импульсный детонационный режим с частотой до 80 Гц при длине субкритического канала 200 мм и общей длине установки 340 мм.

- Границы существования импульсного детонационного режима с частотой 50 Гц (наличие препятствия, $[O_2/\text{воздух}] \geq 0,70$, $\phi = 0,90-1,20$, угол раствора сопла 15°), установленные на основе выявленной взаимосвязи и зависимости скорости детонации жидких топлив (гептан и авиационный керосин) и тяги малоразмерной импульсной детонационной установки от физико-химических и геометрических параметров. Детонационный режим в указанных границах обеспечивает оптимальную величину реактивной тяги при использовании двух видов топлива: для гептана – 180–210 Н; для керосина – 160–190 Н.

Экспериментальная часть работы выполнена с применением разработанной соискателем методики, включающей определение условий и параметров экспериментов и контроль подачи компонентов смеси в предкамеру МИДУ. Изучались параметры детонационного режима горения жидких топлив с кислородом и воздухом в широком диапазоне изменения соотношения компонентов смеси, температурного режима установки и геометрии сопла. В ходе экспериментов определялись не только параметры детонации за один импульс, но и их средние значения по n циклам. По результатам каждой серии экспериментов рассчитывались сила тяги, скорость волны горения и коэффициент избытка горючего.

Новизна и достоверность результатов, полученных Чернухо И.И., сомнений не вызывает, поскольку они базируются на достаточно глубоком анализе результатов ранее выполненных исследований, применении высокоточных методов и методик исследований, использовании современных представлений в области газо- и гидродинамики, физики и химии горения, детонации.

5. Перспективы практической реализации результатов исследований

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

6. Опубликованность основных положений диссертации

По результатам исследований опубликованы 22 научные работы, в том числе 7 – в рецензируемых научных журналах, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Диссертация состоит из пяти глав с выводами по каждой из них, заключения, списка использованных источников, перечня публикаций соискателя и приложений.

Общий объем диссертации составляет 190 страниц, включая 96 иллюстраций, библиографический список на 12 страницах и 7 приложений на 28 страницах.

Содержание работы изложено в объеме, достаточном для уяснения сути проведенных исследований. Автореферат работы соответствует тексту диссертации. Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с требованиями ВАК. Замечаний к оформлению работы нет.

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

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования, опубликованные в научных изданиях работы, доклады на международных конференциях подтверждают научную подготовленность Чернухо И.И., свидетельствуют о соответствии научной квалификации соискателя ученой степени кандидата физико-математических наук, на которую он претендует. Им соблюдены все требования, предъявляемые к соискателям ученой степени кандидата физико-математических наук в соответствии с пунктами 18 и 20 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь.

9. Замечания по диссертационной работе

По содержанию диссертационного исследования имеются следующие замечания:

1. В диссертации численно исследованы нестационарные течения и газодинамические процессы в малоразмерной детонационной установке, но недостаточно изучен процесс формирования детонационно-способной смеси и его влияние на дальнейший переход горения в детонацию. Здесь важно понимать роль размера капель топлива в процессе зарождения детонации.

2. Показана возможность перехода горения в детонацию в канале субкритических размеров с диаметром 20 мм и длинами 500 и 200 мм при частотах 50 и 80 Гц, но нет информации о выборе этих размеров. Например, будет ли переход горения в детонацию при диаметре канала меньше 20 мм.

3. В диссертации нет обоснования выбора геометрических параметров и структуры препятствия, ускоряющего переход горения в детонацию, хотя

можно предположить, что его пористость и конфигурация должны влиять на процесс распространения фронта горения.

4. В разделе 3.2 приведен анализ погрешностей экспериментов с определением максимальных относительных отклонений измерения исследованных параметров (давления, температуры, скорости волны горения и др.). Однако для наглядности и графики, построенные на основе экспериментальных данных, следовало бы сопровождать указанием погрешности измерений.

Несмотря на указанные замечания, диссертационная работа заслуживает положительной оценки.

Заключение

Диссертационная работа Чернухо Ивана Ивановича «Импульсная детонация жидких топлив в малоразмерной установке реактивного типа» является законченной квалификационной научной работой, которая по уровню научной новизны и практической значимости соответствует требованиям п. 20 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, предъявляемым к диссертационным работам, а ее автору может быть присвоена ученая степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества ***за новые научно обоснованные результаты*** комплекса теоретических и экспериментальных исследований физико-химических процессов и геометрических факторов, обеспечивающих устойчивое инициирование и распространение детонации в смесях гептана и авиационного керосина с воздухом и кислородом в малоразмерной камере сгорания, ***включающие:***

- установление возможности инициирования детонации жидких топлив в частотном режиме до 50 Гц в малоразмерной импульсной детонационной установке с каналом субкритических размеров при использовании расположенных в предкамере ускоряющих препятствий;

- определение состава смесей, обеспечивающих максимальное ускорение фронта горения (детонационный режим), которые отвечают смесям околостехиометрического и незначительно обогащенного топливом состава ($\phi = 0,95 - 1,20$) при отношении кислорода к воздуху $\geq 0,5$;

- установление существенного влияния на инициирование детонации и длину перехода горения в детонацию смешения топлива и окислителя в предкамере, а также способа и характера поджига;

- возникновение синергетического эффекта от совместного использования нагрева стенок детонационной установки, профилированного препятствия и обогащения топливно-воздушной смеси кислородом, что позволяет сократить длину перехода горения в детонацию почти на 60%,

что в совокупности позволило развить представления о турбулентном горении и устойчивости детонационных волн в малоразмерных реактивных установках, а также разработать экспериментальный комплекс для

исследования импульсной детонации гетерогенных смесей в малоразмерной импульсной детонационной установке – прототип импульсного детонационного двигателя, что способствует решению прикладных задач, связанных с использованием детонационного горения в силовых установках для аэрокосмических технологий.

Эксперт назначен приказом №196 от 29 ноября 2023 г.

Доклад соискателя и отзыв на диссертацию заслушаны и обсуждены на заседании объединенного научно-технического семинара лабораторий Научно-технического центра «Технологии машиностроения и технологическое оборудование» ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» (протокол №9 от 12 декабря 2023 г.). Присутствовал 21 участник семинара.

В голосовании принимали участие 4 доктора наук и 10 кандидатов наук.

Результаты голосования: «за» – 14 – единогласно,
«против» – нет,
«воздержались» – нет.

Председатель,
д.ф.-м.н., профессор



В.А. Кукареко

Секретарь семинара,
к.т.н.



Н.Н. Максимченко

Эксперт,
д.т.н., профессор



М.А. Белоцерковский

С отзывом ознакомлен 14.12.2023

