

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Зангиева Алана Эльбрусовича на тему: «Математическое моделирование рабочего процесса в прямоточных детонационных двигателях», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Диссертационная работа Зангиева А.Э. посвящена математическому моделированию рабочего процесса в детонационных двигателях прямоточной схемы, поиску путей организации детонационного режима и разработке макетов-демонстраторов прямоточных воздушно-реактивных детонационных двигателей. В работе рассматриваются перспективные схемы силовых установок, в которых реализуется эффективное преобразование внутренней энергии рабочего тела в полезную работу при помощи управляемой детонации.

Работы по созданию детонационных двигателей проводятся по всему миру. Исследователей привлекает то, что идеальный рабочий цикл Зельдовича (со сжиганием топлива в детонационной волне) имеет термодинамический КПД, превосходящий КПД цикла Брайтона, характерного для современных ВРД. Детонационные двигатели обладают и другими преимуществами. Однако реализация детонационных двигателей на практике сталкивается с многочисленными трудностями, обусловленными прежде всего сложностью управления таким быстрым и высокоэнергетичным процессом, как детонация. На практике рабочий цикл двигателя ухудшается из-за неидеальности процесса, из-за его неравномерности и других эффектов. Достижение приемлемых характеристик процесса возможно только за счет глубокого понимания физической картины течения и действующих в двигателе физических механизмов. Поэтому создание работающего двигательного устройства с управляемой детонацией является большим научным событием.

В диссертации А.Э.Зангиева показано теоретически (средствами численного моделирования) и подтверждено на практике (в испытаниях образцов-демонстраторов), что эффективную реактивную тягу (т.е. превышение внутренней тяги над внешним сопротивлением двигателя) можно создавать, используя периодическое генерирование детонационных волн в камере сгорания на дозвуковых скоростях полета и непрерывное вращение детонационного фронта в канале кольцевой геометрии на сверхзвуковых.

Продемонстрировано, что сложные переходные нестационарные процессы, протекающие в таких устройствах (включая такое сложное для описания явление, как переход горения в детонацию) можно успешно моделировать, используя описанную в диссертации технологию, учитывающую как фронтальные, так и объемные химические превращения, а также взаимодействие турбулентности с горением. Проведено сравнение расчетов с экспериментами на моделях разных пространственных масштабов, которое показало, что расчеты по данной технологии с неплохой точностью предсказывают характеристики рабочего процесса в исследуемых устройствах.

На основе многовариантных численных расчетов разработан облик компактного демонстратора прямоточного воздушно-реактивного ИДД на жидком углеводородном горючем с воздухозаборным устройством для условий дозвукового полета. Была экспериментально доказана возможность создания положительной суммарной силы, действующей на беспилотный летательный аппарат в движении при сжигании реакционной смеси в дискретных детонационных волнах.

На основе численных расчетов разработан облик компактного демонстратора прямоточного воздушно-реактивного непрерывного детонационного двигателя на водороде с воздухозаборным устройством для условий сверхзвукового полета. Также теоретически и экспериментально доказана возможность работы НДД с положительной эффективной тягой

при скоростях набегающего воздушного потока в диапазоне чисел Маха от  $M = 1.5$  до 2.5, когда классические ПВРД оказываются неэффективными.

Исследование обнаружило высокую неравномерность параметров течения в камере сгорания с выраженными локальными максимумами. Кроме того, оказалось, что ударные волны, выходящие из камеры сгорания, могут достигать входа в ВЗУ, и вводить его в срывной режим работы прямоточного двигателя. Учитывая особенности рабочего процесса, диссертант предложил схему устройства изолятора, способного практически полностью погасить негативные ударные воздействия, выходящие из входного сечения камеры сгорания.

Автореферат и публикации автора достаточно полно раскрывают содержание работы, основные результаты актуальны и прошли неоднократную апробацию на Всероссийских и международных конференциях. Выводы обоснованы.

К автореферату можно высказать следующие замечания:

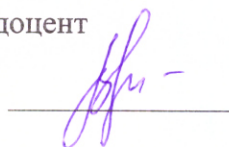
1. На стр.5 автореферата сказано, что для описания течения используются “усредненные по Рейнольдсу” уравнения Навье-Стокса. Однако рассматриваются существенно сжимаемые течения, в которых осреднение по Рейнольдсу порождает много дополнительных членов, которые требуют замыкания. Ознакомление с выложенным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

Указанные замечания не снижают научной ценности диссертации. Достижение описанных результатов невозможно на инженерном уровне знаний. Требуется глубокое понимание физических механизмов и газодинамических свойств детонационных волн, что и продемонстрировано диссертантом и полностью подтверждает его научную квалификацию. Работа выполнена на отличном научном уровне и полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор работы Зангиев Алан Эльбрусович заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Заместитель начальника Лаборатории № 14 (Лаборатория физического и численного моделирования течений с турбулентностью и горением) Отделения аэродинамики силовых установок Центрального аэрогидродинамического института имени проф. Н.Е. Жуковского (ФГУП “ЦАГИ”)

доктор физико-математических наук, доцент

Власенко Владимир Викторович



13.11.2023

Контактные данные:

Тел. +7 (495) 556-44-53, e-mail: vlasenko.vv@yandex.ru.

Адрес места работы:

140180 Россия, Московская область, г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1

Подпись В.В. Власенко заверяю.

Ученый секретарь Диссертационного совета ЦАГИ



М.А. Брутян