ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Садыкова Ильяса Александровича «Новые принципы преобразования химической энергии топлива в кинетическую энергию движения жидкости», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Диссертационная работа Садыкова Ильяса Александровича посвящена экспериментально-расчетному исследованию прямого преобразования химической энергии топлива в кинетическую энергию движения воды в с образованием тягового усилия. Рассматриваются как теоретические аспекты этого преобразования, так и вопросы практической реализации основанного на нем гидрореактивного движителя. Актуальность работы определяется необходимостью повышения энергетической эффективности движителей для высокоскоростных надводных и подводных аппаратов. Впервые исследованы два новых способа создания водного реактивного движителя. Первый способ заключается в циклическом воздействии газовой детонации на смесь забортной воды и продуктов сгорания от предыдущего цикла. Такой способ реализован в импульсно-детонационном гидрореактивном движителе (ИДГРД), состоящий из двух основных элементов – детонационной трубы и проточного водовода. В детонационной трубе, периодически заполняемой горючей газовой смесью, создается детонационная волна, распространяющаяся в сторону проточного водовода. Ударная волна и расширяющиеся продукты детонации выталкивают двухфазную пузырьковую среду из водовода с созданием реактивной тяги. Второй способ заключается в организации импульсного горения (дефлаграционного или детонационного) в профилированном объеме (каверне) под днищем судна. Такая каверна является камерой сгорания с одной подвижной стенкой в виде поверхности воды и не только выполняет традиционную функцию газовой смазки, но и позволяет создать подъемную и толкающие силы, которые можно использовать для движения судна. Теоретическая значимость диссертации заключается в том, что установлены основные физические механизмы рабочего процесса рассмотренных движителей и на основе их понимания предложены эффективные способы управления рабочим процессом для создания максимальной тяги. Созданные образцы движителей и их успешные испытания составляют основу практической значимости работы.

Диссертация Садыкова И.А. изложена на 133 страницах, построена традиционным образом и состоит из Введения, четырех Глав, заключения, списка сокращений и списка цитируемой литературы из 105 наименований. Результаты диссертации опубликованы в 17 печатных работах, из которых 4 входят в список ВАК. Публикации в достаточной степени отражают основные результаты работы.

Во **Введении** раскрыты актуальность и научная новизна работы, определены цель и основные задачи исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой Главе**, которая занимает почти половину диссертации, выполнен всесторонний и глубокий анализ имеющихся в научной литературе данных по способам организации и физическим основам работы водных движителей. Рассмотрены схемы водометных движителей с прямым преобразованием энергии в движение воды и проведен анализ конструкций, которые могут быть положены в основу нового детонационного водометного движителя. Сделан вывод о том, что наиболее перспективными по простоте конструкции и возможности использования штатных горючих следует считать движители класса "реактивная труба". Представлены современные способы снижения гидродинамического сопротивления плавательных аппаратов. Автор приходит к выводу, что наибольшим потенциалом развития обладает «газовая смазка», создаваемая при помощи газовых каверн под днищем судна. Рассмотрено современное состояние проблемы создания устойчивых газовых каверн. Проанализирована имеющаяся научная литература по взаимодействию ударных и детонационных волн с газосодержащими водными средами с пузырьками инертного или химически активного газа. Описана серия расчетных и экспериментальных исследований, выполненных коллективом под руководством С.М.Фролова в Институте химической физики РАН после 2010 г., которая послужила основой для работы автора. В ходе этих работ была сформулирована и опробована в расчетах физико-математическая модель для описания волновых процессов в пузырьковой среде и была создана экспериментальная установка (гидроударная труба) для исследования взаимодействия ударных волн с инертной пузырьковой водной средой. В расчетных исследованиях было показано, что импульс, переданный пузырьковой среде, в течение некоторого времени может значительно превышать импульс, переданный сплошной жидкости. Эксперименты позволили подобрать диапазоны частот и интенсивности ударных волн, а также уровня газосодержания пузырьковой среды, при которой передача импульса происходит эффективным образом.

Во **второй Главе** подробно описано, как был сформирован облик гидрореактивного двигателя нового типа – ИДГРД, в котором были устранены недостатки его далекого прототипа - детонационного ГРД В.А.Скрябина (патент 1994 г.). Для тестирования первой модели, ИДГРД-I, был создан экспериментальный стенд, допускающий весовые измерения тяги и гидродинамического сопротивления модели. Дано подробное описание стенда и организации измерений, которое демонстрирует высокие профессиональные качества автора диссертации как экспериментатора. Стенд позволил сопоставить шесть первоначальных вариантов облика двигателя. Наилучшим образцом был

признан образец с соплом 400 мм без дополнительных устройств, обладающий наименьшим внутренним гидродинамическим сопротивлением при неплохих тяговых характеристиках. Наконец, были выполнены натурные испытания, в которых надувная лодка с ИДГРД (вес в снаряженном состоянии вместе с испытателем 150 кг) разгонялась от нулевой скорости до 7 км/ч.

Третья Глава посвящена хорошо известному свойству импульсных детонационных двигателей – т.н. межцикловой неидентичности, которая заключается в том, что тяговые и частотные характеристики первого цикла существенно отличаются от характеристик последующих циклов. Автор направил свои усилия на установление физических причин межцикловой неидентичности, стремясь приблизить характеристики последующих циклов к высоким характеристикам первого цикла. Для этого была изготовлена экспериментальная модель с вертикальным прозрачным водоводом, которая позволила выявить картину физического процесса в детонационной трубе. Оказалось, что неидентичность связана с тем, что разрежение после прохода детонационной волны вызывает подсос воды в детонационную трубу, а также тормозит водную среду в водоводе после активной фазы цикла. Для устранения этих проблем были разработаны два новых образца двигателя. Сначала был рассмотрен ИДГРД-II с пластинчатым клапаном, который на активном этапе перекрывает водовод, а на пассивном перекрывает выход из детонационной трубы. Однако инерционность клапана приводила к заметному рассеиванию энергии ударной волны. Тогда был изготовлен ИДГРД-III с вращающимся продувочным клапаном, который запускал продувку детонационной трубы после прохода детонации для устранения разрежения. В результате межцикловая неидентичность существенно сократилась, а тяговые характеристики заметно повысились. Достигнуты прирост средней тяги и удельного импульса более чем в 2 раза при существенно более компактных габаритах устройства.

Четвертая Глава посвящена организации горения в «активных» газовых кавернах в днище судна. Предложен новый способ использования днищевой каверны, при котором она не только создает «газовую смазку» для снижения гидродинамического сопротивления судна, но и используется для создания тяги и подъемной силы. Впервые предложена физико-математическая модель реагирующего течения с полузамкнутым объемом над свободной поверхностью воды, отличающаяся тем, что ведется сквозной расчет всего течения (и воды, и газа в днищевой каверне) в рамках модели двух взаимопроникающих сплошных сред, при этом поверхность воды определяется изолинией с объемным содержанием воды $\alpha = 0.5$. Модель была валидирована – выполнено успешное численное моделирование лабораторного эксперимента с горением подготовленной топливо-воздушной смеси над свободной поверхностью воды, которая показала неплохую точность описания характеристик процесса, особенно в первой его части. Далее

была спроектирована и изготовлена лабораторная установка для исследования пульсирующего горения в модельной газовой каверне, погруженной в бассейн с покоящейся водой. В экспериментах для разных значений дифферента ковера, расхода топливо-воздушной смеси и частоты зажигания были зарегистрированы зависимости тяги и подъемной силы от времени. Выполненные автором трехмерные расчеты показали удовлетворительное согласование с экспериментом. Наконец, были проведены натурные испытания модели судна с «активной» газовой каверной. Модель разгонялась расположенным сзади модели катером-буксиром, соединенным с моделью тяговой штангой с весовым механизмом. После этого включалось пульсирующее горение в днищевой каверне, и измерялось тяговое усилие. Таким способом была экспериментально показана возможность организации горения под днищем судна с созданием тягового усилия.

Автореферат вполне отражает содержание диссертационной работы.

К работе имеется несколько замечаний.

1. В работе недостаточно обосновано пренебрежение массообменом между жидкостью и газом, которое используется в расчетных моделях. В ходе квазипериодической работы рассмотренных в диссертации устройств происходит разогрев жидкости, который должен вызывать процессы испарения. Следовало бы сопоставить характерные времена испарения с периодом рабочего процесса. Не исключено, что расхождение расчета и эксперимента к концу периода на рис.54 связано с этим эффектом.
2. Предложенный в Главе 4 численный метод сквозного расчета двухфазных течений, основанный на модели двух ваимопроникающих сплошных сред, должен давать погрешности в окрестности границы раздела двух чистых фаз (свободная поверхность воды). Оппоненту представляется более надежным явное выделение такой границы в расчете с применением подвижных сеток.
3. Для измерения *внутренней* тяги и *внутреннего* сопротивления ИДГРД в экспериментах (Главы 2 и 3) использовался водовод с диаметром сопла, равным диаметру водозаборника ИДГРД, что позволяло практически исключить попадание воды из водовода на внешнюю поверхность модели ИДГРД. Однако при истечении турбулентной пульсирующей струи из ИДГРД должна возникать эжекция внешней воды, которая будет порождать некоторое внешнее обтекание модели, существенно отличное от реальных условий. Это должно приводить к ошибкам в определении тяги. Возможно, имело смысл создавать обтекание всей модели (вплоть до поверхности воды и на некоторую глубину ниже модели) единым потоком, имитирующим условия движения катера. При этом в весовых испытаниях измерялась бы разница между *внутренней* тягой и *внешним* сопротивлением ИДГРД, т.е. та полезная сила, которая передается от двигателя на судно.

Указанные замечания не снижают практической и теоретической ценности диссертационной работы И.А. Садыкова. Проведённые исследования вносят существенный вклад в развитие теоретических основ двухфазных реагирующих течений и имеют практическое применение при проектировании полномасштабных движителей для высокоскоростных плавательных средств и судов с активными газовыми кавернами. Представленный материал демонстрирует высокую квалификацию автора и показывает его как полностью сложившегося самостоятельного исследователя с оригинальным мышлением.

Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, и «Изменений, которые вносятся в Положение о присуждении ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации №335 от 21 апреля 2016 года. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой. Автор диссертации Садыков Ильяс Александрович заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук, доцент,
заместитель начальника Лаборатории физического и численного моделирования
течений с турбулентностью и горением (Лаборатория №14)
Отделения аэродинамики силовых установок
Федерального автономного учреждения
«Центральный аэрогидродинамический институт имени проф.Н. Е. Жуковского»

В.В. Власенко

Подпись В.В. Власенко заверяю:
Ученый секретарь
Диссертационного совета
31.1.006.01 (Д 403.004.01) ЦАГИ
доктор физико-математических наук, доцент М.А.Брутян
«14» ноября 2022 г.

Адрес: 140180, Жуковский, ул. Жуковского, д. 1
Тел.: +7(495) 556-43-03
E-mail: info@tsagi.ru