

## «УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН) доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН

  
С.Е. Якуш  
«26» 10 2022 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**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**

Одной из ключевых проблем создания высокоскоростных средств водного транспорта является кавитационное разрушение лопастей винтов и импеллеров при превышении определенного порога скорости, значительно снижающее ресурс двигательных установок и накладывающее существенные ограничения на их эксплуатационные параметры. Поэтому актуальным научно-исследовательским и прикладным направлением в настоящее время является разработка силовых двигательных установок, основанных на принципах реактивного движения, позволяющих обойти данную проблему. С этой точки зрения диссертационная работа Садыкова Ильяса Александровича, посвященная созданию новых способов организации реактивного движения за счет прямого преобразования химической энергии топлива в кинетическую энергию движения воды, обладает высокой актуальностью и представляет несомненный теоретический и практический интерес.

Целью диссертационной работа И.А. Садыкова является разработка научных основ проектирования движителей с прямым преобразованием химической энергии топлива в кинетическую энергию направленного

движения жидкости. В основе таких движителей лежит взаимодействие ударных/детонационных волн или волн горения с водной средой.

В работе рассмотрены два способа реализации подобных движителей. Первый способ реализуется в импульсно-детонационном гидрореактивном движителе (ИДГРД), состоящем из детонационной трубы и водовода. В детонационной трубе периодически генерируются волны газовой детонации, которые, входя в водовод, взаимодействуют с механической смесью забортной воды и газов от предыдущего цикла, выталкивая ее из водовода, создавая тягу. Второй способ реализует модернизацию технологии «газовой смазки» днища судна, заключающейся в вентилировании газом профилированных полостей (каверн) в днище судна для снижения гидродинамического сопротивления при движении. Предлагается подавать в каверну воздух и топливо, и организовывать в ней непрерывное или пульсирующее горение/детонацию. Это позволит не только снижать гидродинамическое сопротивление, но и создать подъемную и толкающие силы, которые можно использовать при движении судна. Преимуществом таких движителей перед современными аналогами (винт, водомет с механическим рабочим устройством) является отсутствие скоростного ограничения, вызванного кавитационным разрушением лопастей.

В качестве **наиболее значимых результатов** можно выделить следующие:

1. Экспериментально показано, что гидрореактивную тягу можно создавать периодическим воздействием детонационных волн на сжимаемую газосодержащую водную среду в водоводе ИДГРД. Тяга и удельный импульс при этом достигали 36 Н и 400 секунд, соответственно.

2. Решена проблема межциклового неидентичности с помощью управляемой продувки детонационной трубы с повышением тяговых характеристик на 40-120% при уменьшении массогабаритных параметров движителя.

3. Экспериментально подтверждена возможность создания подъемной и толкающей сил при горении топливовоздушной среды в модельной каверне. Проведена проверка физико-математической модели на экспериментах разных масштабов.

4. Проведенные натурные испытания показали возможность создания тяги как с помощью ИДГРД, так и «активной» газовой каверной.



Полученные результаты представляются крайне важными и актуальными. Исследование вносит существенный вклад в развитие теоретических основ двухфазных реагирующих течений, а также обладает высоким потенциалом практического применения для проектирования полномасштабных движителей и судов с активными газовыми кавернами.

**Структура и содержание диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и списка цитируемой литературы.

Во **введении** раскрываются актуальность и научная новизна работы, определяются цель и основные задачи исследования, перечисляются основные положения, выносимые на защиту.

**Первая** глава содержит обзор литературы. Рассмотрены схемы гидрореактивных движителей, в которых используется прямое преобразование запасенной энергии в кинетическую энергию движения жидкости, их физические принципы действия и перспективы применения. Представлено современное состояние вопроса создания устойчивых днищевых газовых каверн для катеров и судов. Описаны исследования, посвященные взаимодействию ударных и детонационных волн (ДВ) со сжимаемыми газосодержащими водными средами с пузырьками инертного или химически активного газа.

Во **второй** главе представлены разработанная модель движителя с различными водоводами и экспериментальный стенд. Описаны методики измерений в экспериментальных исследованиях тяговых характеристик ИДГРД. Были получены зависимости тяги и удельного импульса от частоты работы ИДГРД. Проведен анализ полученных результатов и были сделаны следующие выводы: увеличение скорости проточной воды в водоводе увеличивает тягу ИДГРД благодаря повышению наполняемости водовода; тяга также зависит от длины водовода, причем существует оптимальное значение длины; дополнительные устройства в водоводе могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на тяговые характеристики. Была подобрана наиболее эффективная в рамках исследований конфигурация водовода.

**Третья** глава посвящена исследованию обнаруженной в главе 2 проблемы межциклового неидентичности, заключающейся в отличии тяговых характеристик в первом и последующих циклах. Установлено, что эта проблема связана с проникновением жидкости в детонационную трубу, которое, в свою очередь, вызывается разрежением в трубе после рабочего



цикла вследствие охлаждения продуктов детонации и инерционного движения водного заряда в водоводе. Для решения данной проблемы представлены две новых модели ИДГРД. Первым решением проблемы стало перекрытие доступа в детонационную трубу при возникновении в ней разрежения благодаря работе пластинчатого клапана, установленного в водоводе. Это позволило снизить межцикловую неидентичность, однако в таком случае терялась часть полезной работы, совершаемой ударной волной, которая разрушалась о закрытый клапан. Окончательным решением проблемы стала управляемая продувка детонационной трубы, которая нейтрализовала разрежение после рабочего цикла и значительно повысила стабильность циклов.

**Четвертая** глава посвящена вопросу организации горения в «активных» газовых кавернах в днище судна. Исследован процесс горения над свободной поверхностью воды с последующей генерацией тяги в моделях различных форм и масштабов: полуограниченном цилиндрическом объеме и модели каверны без обводов судна. Сравнение экспериментальных результатов с численными расчетами показало хорошее согласие и позволило рекомендовать использующуюся физико-математическую модель для проектирования крупномасштабных судов с активными кавернами. Проведены натурные испытания модели судна с активной газовой каверной. Показано, что при организации горения топливно-воздушной смеси под днищем движущейся модели судна можно генерировать тягу.

**Теоретическая и практическая значимость** проведенных автором исследований заключается в разработке и экспериментальном подтверждении возможности практической реализации двух перспективных способов создания гидрореактивной тяги для высокоскоростных судов: посредством периодического воздействия детонационных волн на сжимаемую газосодержащую водную среду в водоводе ИДГРД и путем организации горения в «активной» газовой каверне, распложенной в днище судна. Кроме того, была экспериментально проверена физико-математическая модель двухфазных реагирующих течений. Проведенное сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными данными позволило рекомендовать эту физико-математическую модель для проектирования крупномасштабных движителей и судов с активными газовыми кавернами.

Полученные результаты полностью отражены в 4 публикациях в российских и международных изданиях, входящих в перечень ВАК. Материалы диссертации прошли апробацию на всероссийских и



международных конференциях. Автореферат диссертации достаточно полно отражает основное содержание диссертации.

Работа выполнена автором самостоятельно, на высоком научном и методическом уровне. Результаты работы, наряду с очевидной научной новизной, имеют практическую направленность.

По содержанию диссертационной работы можно высказать следующие **замечания:**

1. На наш взгляд, название диссертационной работы является чересчур общим: в работе речь идет не о новых принципах, а, скорее, о детальном исследовании нескольких способов получения направленного движения жидкости при сгорании топлива (детонационная труба, горение в днищевой каверне).

2. В обзоре работ по исследованию передачи импульс от ударной волны к пузырьковой среде стоило бы отметить, что зависимость импульса от объемного газосодержания имеет максимум, лежащий выше 30 % в области газосодержаний, которые не исследовались в работе.

3. В главе 4 не приведены данные по уровню турбулентности, что затрудняет оценку целесообразности использования уравнений Навье-Стокса с осреднением по Рейнольдсу в физико-математической модели. Вполне вероятно, что влияние турбулентности в каверне будет слабым, особенно если учесть, что скорость пламени в экспериментах близка к ламинарной.

4. Для оценки практической применимости предлагаемых решений, основанных на использовании энергии детонации, важно было бы оценить уровень создаваемых при работе двигателя шумов и сопоставления их с шумом традиционных двигателей. Такие оценки могли быть получены в проведенных автором экспериментальных исследованиях.

### **Заключение**

Приведенные замечания не снижают высокую научную и практическую значимость диссертационной работы И.А. Садыкова, в которой проведены экспериментальные исследования и сопровождающие численные расчеты движителей, основанных на прямом преобразовании энергии горения топлива в кинетическую энергию направленного движения жидкости.

Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, и

