

26 МАЯ, ПЯТНИЦА

Коммерсант.ru[®]

Водная ракета — новый движитель для скоростного флота

реактивное движение

12.05.2017

Максимальная скорость привычных водных транспортных средств ограничена. В их двигателях происходит не прямое преобразование химической энергии топлива в энергию движения воды: через преобразование в механическую энергию различного рода движителей (гребных винтов, турбин, насосов). Неизбежные при не прямом преобразовании потери приводят к ограничению на максимальную скорость — на уровне 100-130 км/ч (это связано с кавитацией, разрушающей лопасти винтов, импеллеров и др.). Но это ограничение преодолеть можно.

В Центре импульсно-детонационного горения (Центр ИДГ) при Институте химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (ИХФ РАН) разработаны, созданы и испытаны экспериментальные образцы прямого импульсно-детонационного гидрореактивного движителя, работающие на иных физических принципах и не имеющие мировых аналогов. В новом движителе происходит прямое преобразование химической энергии топлива в энергию движения воды. В результате надводному объекту сообщается гидрореактивная тяга, ускоряющая его до скоростей, недостижимых при использовании традиционных движителей. Отличительная особенность нового движителя — применение наиболее энергоэффективного и энергосберегающего рабочего цикла: цикла Зельдовича* с управляемым детонационным горением смеси моторного топлива с окислителем. Кроме того, в нем нет подвижных механических частей.

Расчеты

Экспериментальные образцы спроектированы специалистами ИХФ РАН на основе гидродинамических расчетов, позволивших оптимизировать параметры движителя. Конструкция и принцип работы движителя просты (рис. 1). Он представляет собой водовод (профилированную трубу с водозаборным устройством и соплом, погруженную в воду) с введенной в него импульсно-детонационной трубкой. Импульсно-детонационная трубка — сердце движителя — предназначена для генерации коротких, но очень интенсивных периодических импульсов давления в виде ударных волн, выходящих в водовод и выбрасывающих забортную воду из водовода через сопло. Каждый импульс давления в импульсно-детонационной трубке — это детонационная волна, образованная в результате зажигания топливной смеси и последующего быстрого, но управляемого перехода горения в детонацию — ускорения пламени от ~0,5 м/с до ~2000 м/с. Каждая ударная волна, выходящая в водовод, увлекает воду в движение к соплу и, следовательно, придает движителю импульс силы — реактивной тяги.

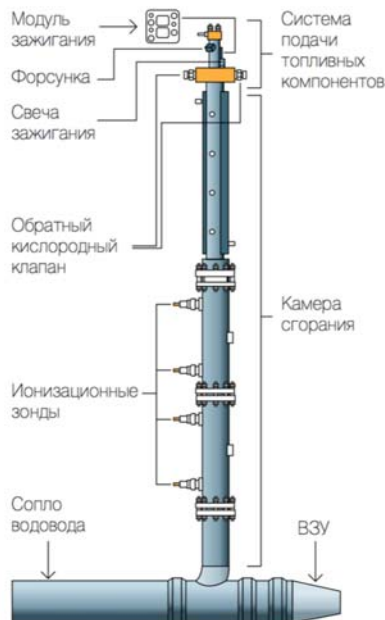


Рис. 1. Схема плоского прямооточного водометного движителя

Важнейший фактор, влияющий на передачу количества движения от ударной волны к воде, а значит, и на энергоэффективность, — это сжимаемость воды, которая сильно зависит от содержания в ней газов. Вода в таком движителе всегда насыщена пузырьками с газообразными продуктами детонации предыдущего цикла, а при высокой скорости — еще и кавитационными пузырьками. Сжимаемость пузырьковой среды велика, больше, чем сжимаемость чистого газа. Расчет показывает, что при газосодержании в 20-25% прибавка скорости воды за ударной волной в водоводе может достигать 30-40 м/с.

На рис. 2 показан пример расчета одного цикла (частота циклов 10 Гц) на установившемся режиме работы плоского прямооточного импульсно-детонационного гидрореактивного движителя (ИДГРД) при набегающем со скоростью 5 м/с потоке воды. Сверху вниз на шести картинках показана эволюция распределения объемной доли. Верхняя и нижняя картинки очень похожи, значит, начальные условия для каждого рабочего цикла хорошо воспроизводятся. К такому же выводу приводит рис. 3, на котором показана расчетная зависимость мгновенной тяги движителя от времени в первых семи рабочих циклах. Повторяемость формы импульсов достигается уже после двух-трех начальных "выстрелов", а средняя тяга в них положительна, то есть направлена против набегающего потока воды. Если разделить значение средней тяги на секундный расход топливной смеси, приходим к ключевому показателю энергоэффективности — удельному импульсу тяги. Расчеты показали, что такой прямооточный движитель может иметь удельный импульс на уровне 400 с при начальном давлении топливной смеси в импульсно-детонационной трубке, близком к атмосферному. Это выше, чем у самых современных ракетных двигателей (200-300 с на уровне моря) при очень высоком давлении в их камере сгорания.

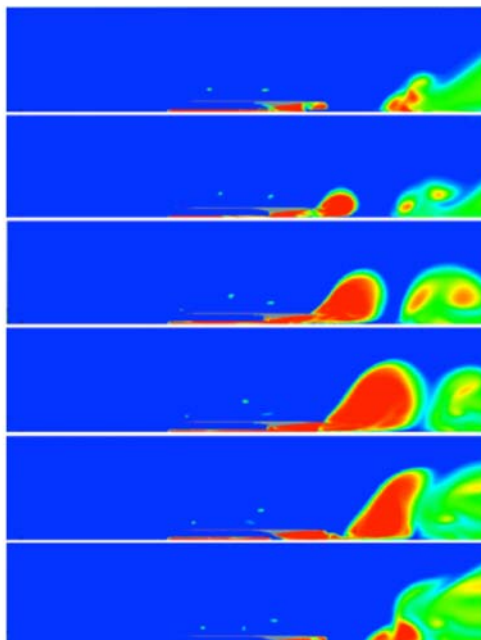


Рис. 2. Рабочий цикл прямооточного импульсно-детонационного гидрореактивного движителя при частоте 10 Гц. Красный цвет соответствует газу, синий — воде, а промежуточные цвета — воде с разным объемным газосодержанием. Расчет проведен для половины движителя

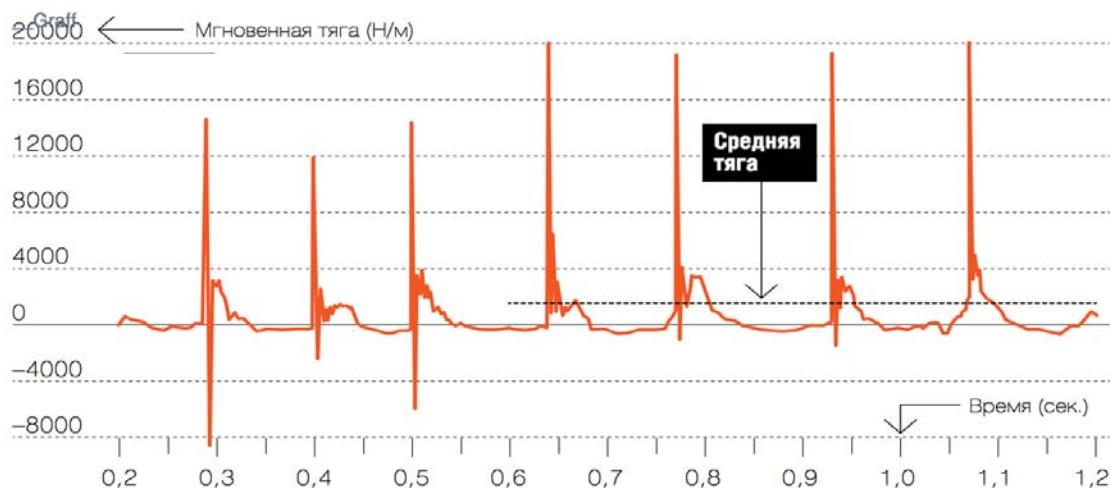


Рис. 3. Расчетная зависимость мгновенной тяги прямооточного импульсно-детонационного гидрореактивного движителя от времени при рабочей частоте 10 Гц. Горизонтальная штриховая линия — средняя тяга после нескольких первых циклов

Эксперименты

На рис. 4 показана схема экспериментального образца импульсно-детонационного гидрореактивного движителя (ЭО ИДГРД). Как и в расчетной схеме (см. рис. 1), ЭО состоит из импульсно-детонационной трубки и из прямооточного водовода с водозаборным устройством и соплом. Всего создано и испытано шесть ЭО ИДГРД разных конфигураций: пять в бесклапанном исполнении и один с механическим клапаном.

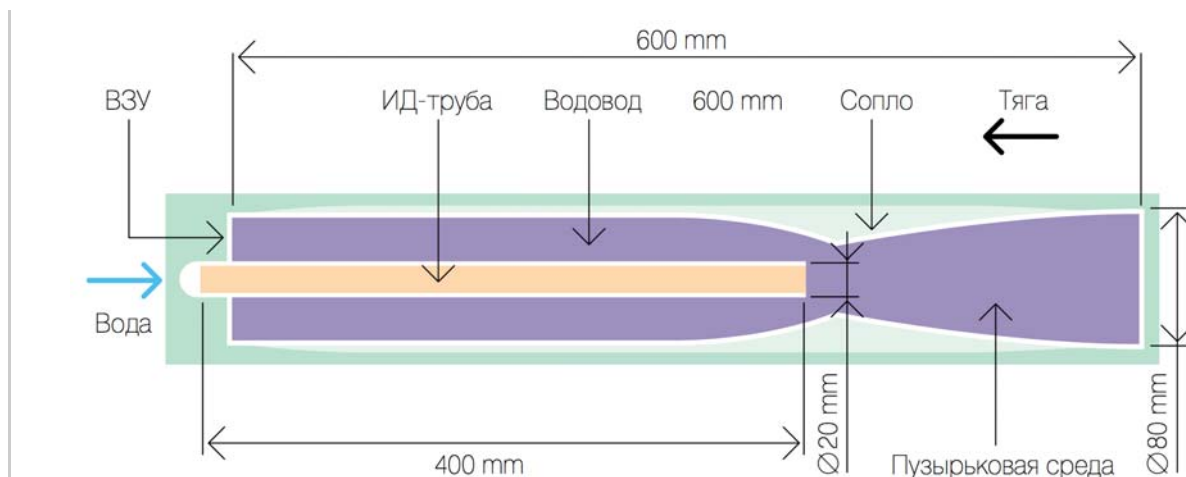


Рис. 4. Схема экспериментального образца прямооточного импульсно-детонационного гидрореактивного двигателя

Компоненты топлива — горючее (бензин) и окислитель (кислород) — подаются в импульсно-детонационную трубку отдельно. Чтобы исключить преждевременное воспламенение топливной смеси, непосредственно перед ее подачей в трубку кратковременно подается продувочный газ — азот.

Система зажигания состоит из электронного модуля зажигания и двух автомобильных свечей. Система управления включает блок управления и исполнительные устройства — электромагнитные клапаны подачи кислорода и азота, форсунки и модуль зажигания. Программное обеспечение блока управления позволяет задавать интервалы подачи топливных компонентов, продувочного газа и импульса зажигания.

Для организации быстрого перехода горения в детонацию и образования детонационной волны в импульсно-детонационной трубке установлены турбулизаторы-завихрители. Трубка изгибается, так что донорная детонационная волна выходит в сопло водовода соосно (параллельно) потоку воды и, трансформируясь в ударную волну, передает воде запасенное количество движения.

Для проведения огневых испытаний ЭО ИДГРД изготовлен испытательный стенд. Схема испытательного стенда — бассейна с системой создания затопленной струи воды — представлена на рис. 5. Для измерения тяги используется тягоизмерительная рама с датчиком усилия (рис. 6). При обтекании ЭО струей воды без подачи топливных компонентов показания датчика усилия принимаются за ноль, а при работе ЭО датчик измеряет тягу.



Рис. 6. Экспериментальный образец прямооточного импульсно-детонационного гидрореактивного двигателя на тягоизмерительной раме
Фото: Сергей Фролов

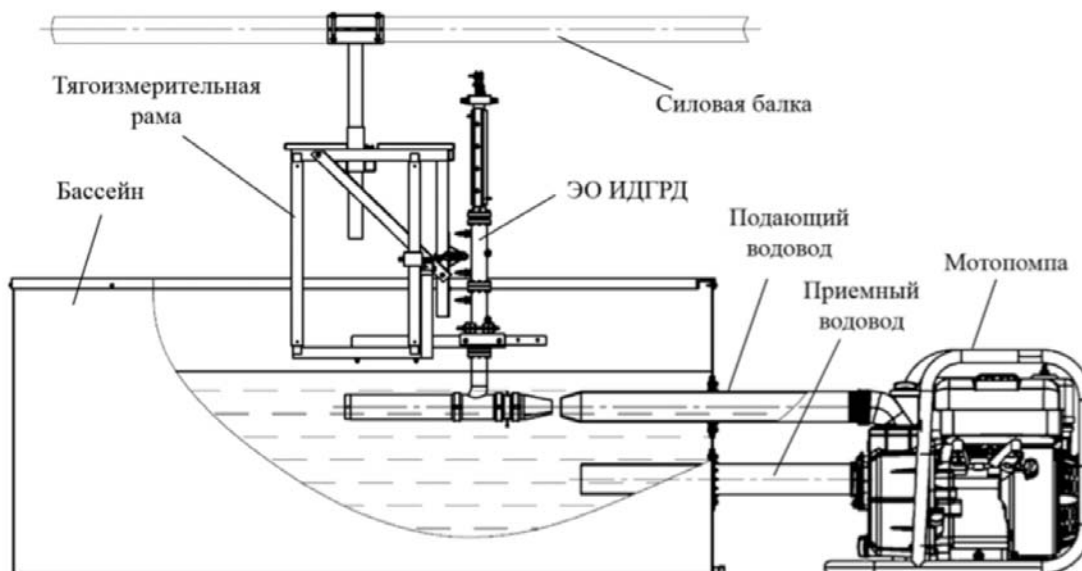


Рис. 5. Схема испытательного стенда

Система создания затопленной струи включает мотопомпу, а также приемный и подающий водоводы. Вода засасывается в мотопомпу через приемный водовод и вводится обратно в бассейн в виде затопленной струи через подающий водовод. Выходной диаметр сопла подающего водовода практически совпадает с входным диаметром водозаборного устройства ЭО, так что через него проходит большая часть водяного потока, и лишь небольшая часть обтекает ЭО снаружи. Таким образом, испытания проводятся в условиях, когда внешним гидродинамическим сопротивлением можно пренебречь.

На рис. 7 показаны примеры записей датчика усилия при работе ЭО ИДГР с частотой 1 и 20 Гц. Экспериментальные записи мгновенной тяги очень похожи на расчетные (см. рис. 3), причем средняя тяга в эксперименте также существенно положительна.

На рис. 8 показана итоговая экспериментальная зависимость основного показателя энергоэффективности движителя — удельного импульса тяги — от рабочей частоты для всех испытанных ЭО ИДГРД. Видно, что с увеличением рабочей частоты удельный импульс тяги в среднем снижается от ~ 1000 с при частоте 1 Гц до ~ 300 с при 20 Гц, причем при частоте 10 Гц эксперимент хорошо согласуется с расчетом (см. рис. 3). При этом средняя измеренная тяга возрастает с увеличением рабочей частоты от ~ 10 Н при частоте 1 Гц до ~ 40 Н при частоте 20 Гц. Как и в расчете, при экспериментальном определении тяги и удельного импульса первые рабочие циклы не учитывались. В отдельных сериях испытаний показано, что удельный импульс тяги возрастает с увеличением скорости набегающего потока. Это связано с улучшением наполнения водовода водой перед следующим рабочим циклом. Следует подчеркнуть, что во всех испытаниях начальное давление топливной смеси в импульсно-детонационной трубке было близким к атмосферному.

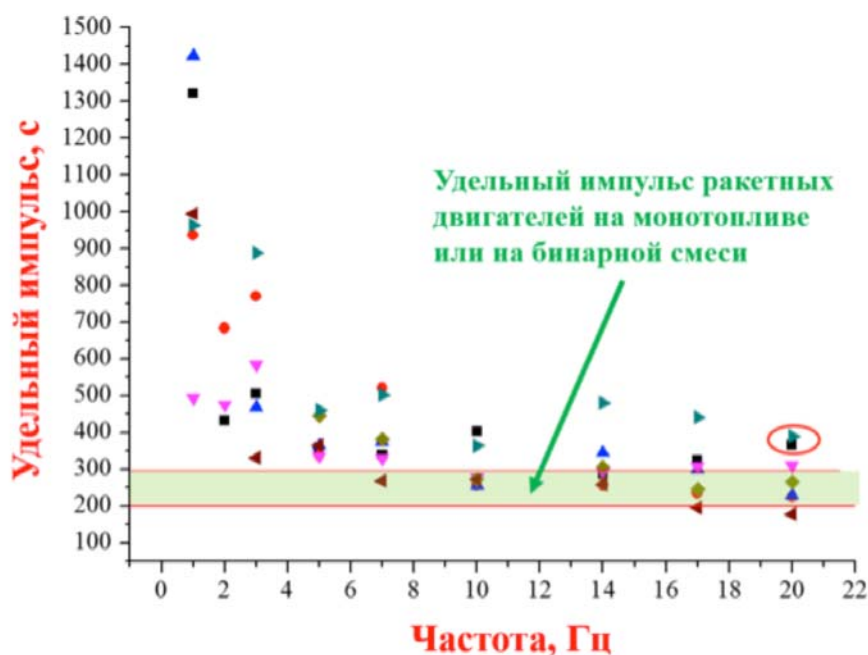


Рис. 8. Измеренные зависимости удельного импульса тяги экспериментального образца прямооточного импульсно-детонационного гидрореактивного движителя от рабочей частоты (разные значки для разных испытаний)

Отдельно отметим низкий уровень шума при работе ИДГРД и практически полное отсутствие вредных веществ в выхлопных газах. Низкий уровень шума связан с быстрым затуханием ударных волн в струе пузырьковой среды, а отсутствие вредных веществ — с использованием детонационного горения топлива, при котором высокотемпературные химические превращения происходят в режиме самовоспламенения с очень большой скоростью и высокой полнотой реакции.

Таким образом, впервые в мире спроектированы, изготовлены и испытаны ЭО движителя нового типа для скоростного водного транспорта — прямооточного ИДГРД с прямым преобразованием химической энергии топлива в движение воды.

Испытания проведены на специально разработанном стенде, позволяющем создавать набегающий поток воды со скоростью до 10 м/с. Для лучших образцов движителя экспериментально получены удельные импульсы тяги на уровне 1400 с при низкой рабочей частоте (1 Гц) и 400 с при высокой рабочей частоте (20 Гц). То есть удельный импульс оказался значительно выше, чем у современных жидкостных ракетных двигателей с высоким давлением в камере сгорания (до 200-300 атм.).

Создание практического ИДГРД должно стать одной из приоритетных задач для отечественного скоростного флота. Но новый движитель может использоваться и на тихоходных судах, особенно на мелководье и в арктических водах, где ледяная шуга вызывает эрозию гребных винтов. Он отличается энергоэффективностью, простотой конструкции, отсутствием видимых ограничений по быстроходности, чистотой выхлопных газов и низкой шумностью. Для него также характерны: простота регулирования тяги за счет изменения рабочей частоты, простота масштабирования тяги за счет укрупнения и/или изменения количества импульсно-детонационной трубок, простота регулирования вектора тяги без использования поворотных рулей, а также способность работать на любом топливе, причем при использовании воздуха в качестве окислителя.

Сергей Фролов, доктор физико-математических наук, Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, профессор НИЯУ-МИФИ

(По материалам проекта Минобрнауки "Разработка технологии создания гидрореактивной тяги в водометных двигателях высокоскоростных водных транспортных средств и создание стендового демонстрационного образца гидрореактивного импульсно-детонационного двигателя").

*О демонстрационном образце ракетного двигателя с детонационным горением, использующем цикл Зельдовича, "Наука" рассказывала в февральском номере.

Журнал "Коммерсантъ Наука" №3 (<http://www.kommersant.ru/nauka/110408>) от 12.05.2017, стр. 32