

УДК 534.222.2

ВОДОМЁТНЫЙ ДВИЖИТЕЛЬ С ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННЫМ ГОРЕНИЕМ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

© 2017 г. С. М. Фролов^{1,2,*}, В. С. Аксенов^{1,2}, И. А. Садыков²,
К. А. Авдеев¹, И. О. Шамшин^{1,2}

Представлено академиком РАН А. А. Берлиным 27.02.2017 г.

Поступило 27.02.2017 г.

Впервые спроектирован, изготовлен и испытан экспериментальный образец (ЭО) двигателя нового типа для водного транспорта — прямооточного импульсно-детонационного гидрореактивного двигателя (ИДГРД). Огневые испытания ЭО ИДГРД с камерой сгорания объёмом 2 л проведены на специально разработанном стенде с тягоизмерительным устройством, позволяющем создавать набегающий поток воды в виде затопленной струи со скоростью до 10 м/с. Экспериментально получен удельный импульс тяги от 370 с при высокой рабочей частоте (20 Гц) до 1200 с при низкой рабочей частоте (1 Гц), т.е. измеренный удельный импульс прямооточного ИДГРД оказался выше удельного импульса лучших современных жидкостных ракетных двигателей.

DOI: 10.7868/S0869565217210101

Идея о новом типе двигателя для скоростного водного транспорта — прямооточном импульсно-детонационном гидрореактивном двигателе (ИДГРД) впервые выдвинута в наших работах [1–3]. В ИДГРД гидрореактивная тяга создаётся импульсно-периодическими ударными волнами, выходящими в прямооточный водовод из камеры сгорания (КС), в которой происходит циклическое импульсно-детонационное сгорание топлива. В отличие от других известных двигателей в ИДГРД происходит прямое преобразование химической энергии топлива в кинетическую энергию направленного движения забортной воды, т.е. в нём отсутствуют какие-либо промежуточные подвижные элементы типа гребного винта, импеллера и т.д. В соответствии с расчётами и экспериментами [4] наибольшая эффективность передачи количества движения от ударных волн к забортной воде (наибольший удельный импульс) достигается при газосодержании воды в водоводе на уровне 20–25%, т.е. рабочее тело в водоводе — сжимаемая пузырьковая жидкость. Такое газосодержание воды может быть обеспечено газообразными продуктами детонации предыдущего цикла. Цель данной работы — разработка и испытания первого экспериментального образца (ЭО) прямооточного ИДГРД.

Принципиальная схема ЭО ИДГРД показана на рис. 1. Экспериментальный образец состоит из КС — стальной трубы внутренним диаметром 49 мм, объёмом 2 л — с системами подачи топливных компонентов, зажигания, диагностики детонации и управления и из прямооточного водовода — стальной трубы диаметром 80 мм — с коническим водозаборным устройством и сменным соплом.

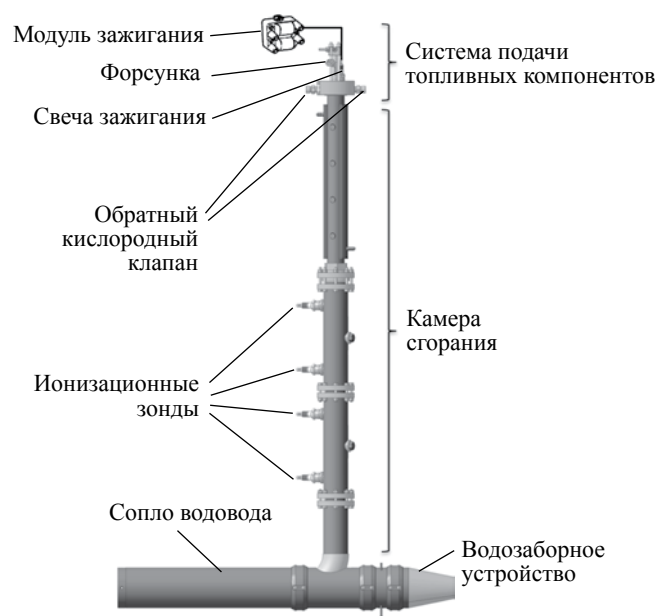


Рис. 1. Схема ЭО ИДГРД.

¹ Институт химической физики им. Н. Н. Семенова
Российской Академии наук, Москва

² Национальный исследовательский ядерный университет
“МИФИ”, Москва

*E-mail: smfrol@chph.ras.ru

Компоненты топлива – горючее (бензин Нефрас С2-80/120) и окислитель (газообразный кислород) – подаются в КС отдельно. Горючее впрыскивается в КС автомобильной форсункой, а окислитель подаётся через два канала диаметром 3 мм, оснащённых обратными клапанами. Горючее подаётся из топливного бака методом вытеснения. Избыточное давление в баке поддерживается постоянным на уровне от 1,5 до 3 атм, что соответствует производительности форсунки от 1,70 до 2,35 г/с. Кислород подводится к клапанам от кислородного редуктора БКО-50-4 под избыточным давлением 7 атм. Чтобы исключить преждевременное воспламенение свежей порции топлива в КС, перед подачей топливной смеси в КС кратковременно подаётся продувочный газ – азот. Азот подаётся под избыточным давлением 4,5 атм через один из кислородных каналов.

Система зажигания состоит из автомобильного электронного модуля зажигания и двух автомобильных свечей. Энергия зажигания не более 0,2 Дж. Система управления состоит из блока управления, построенного на основе микроконтроллера AtMega-328p, и исполнительных устройств – электромагнитных клапанов подачи кислорода и азота, форсунки и модуля зажигания. Программное обеспечение блока управления позволяет задавать временные интервалы подачи топливных компонентов (бензина и кислорода), продувочного газа (азота) и импульса зажигания, а также обеспечивает генерацию управляющих сигналов в частотном режиме.

Система диагностики быстропротекающего рабочего процесса в КС включает четыре ионизационных зонда и аналого-цифровой преобразователь, соединённый с персональным компьютером. Регистрация быстропротекающих процессов горения и детонации ионизационными зондами апробирована нами ранее и показала высокую эффективность [5]. В качестве ионизационных зондов использовались автомобильные свечи.

Для организации быстрого перехода горения в детонацию и образования детонационной волны в КС установлены турбулизаторы специальной формы [6]. Камера сгорания изгибается, чтобы ее выходное сечение было соосным с соплом водовода, так что донорная детонационная волна выходит в сопло водовода соосно потоку воды и, трансформируясь в ударную волну, передаёт воде запасённое количество движения.

Рабочий цикл в ЭО ИДГРД включает 4 стадии:

1) стадию заполнения КС и водовода (заполнение КС топливной смесью и водовода газосодержащей водной средой);

2) стадию формирования донорной детонационной волны в КС (зажигание горючей смеси, переход горения в детонацию и распространение донорной детонационной волны в КС);

3) стадию формирования импульсной гидроактивной струи (выход донорной детонационной волны из КС, образование и распространение акцепторной ударной волны в сопле водовода, вызывающее ускорение сжимаемой пузырьковой среды и её истечение из сопла с повышенной скоростью);

4) стадию продувки КС для подготовки следующего рабочего цикла (продувка КС азотом).

Поскольку стадии 2) и 3) относительно кратковременны, эффективное время рабочего цикла $\Delta\tau_{\text{ц}}$ складывается из характерных времён стадий 1) $\Delta\tau_{\text{т}}$ и 4) $\Delta\tau_{\text{п}}$, а также из времени скважности циклов – времени задержки между рабочими циклами $\Delta\tau_{\text{и}}$, т.е. $\Delta\tau_{\text{ц}} = \Delta\tau_{\text{т}} + \Delta\tau_{\text{п}} + \Delta\tau_{\text{и}}$. В этом случае рабочая частота ЭО равна $f \approx 1 / \Delta\tau_{\text{ц}}$.

Для проведения огневых испытаний ИДГРД нами спроектирован и изготовлен испытательный стенд. Схема испытательного стенда с системой создания свободной затопленной струи воды в бассейне представлена на рис. 2. Бассейн, выполненный из листовой нержавеющей стали толщиной 2,5 мм, имеет размеры 1,26 × 1,05 × 2,54 м. Для измерения тягового усилия, создаваемого ЭО ИДГРД, используется тягоизмерительная рама, состоящая из двух частей: неподвижного основания и подвески. К закреплённому на силовой балке неподвижному основанию крепится тензорезисторный датчик сжатия мембранного типа из нержавеющей стали. Максимальное измеряемое усилие датчика 5 кН. Экспериментальный образец ИДГРД крепится к подвеске, которая передаёт усилие на датчик. Подвеска притянута к неподвижному основанию блоком пружин. Такое предварительное нагружение датчика позволяет регистрировать продольную осевую нагрузку в обоих направлениях. Когда ЭО обтекается струёй воды без подачи топливных компонентов в КС, показания датчика усилия принимаются за ноль, а при работе ЭО датчик усилия измеряет тягу.

Система создания свободной затопленной струи воды в бассейне включает мотопомпу мощностью 9 л.с. и производительностью 1800 л/мин, а также приёмный и подающий водоводы диаметрами 110 мм, введённые в бассейн через сальники, обеспечивающие герметичность и осевую подвижность. Подающий водовод оборудован сужающимся коническим соплом. Вода засасывается в мотопомпу через приёмный водовод и вводится обратно в бассейн в виде затопленной струи через подающий водовод. Водозаборное устройство

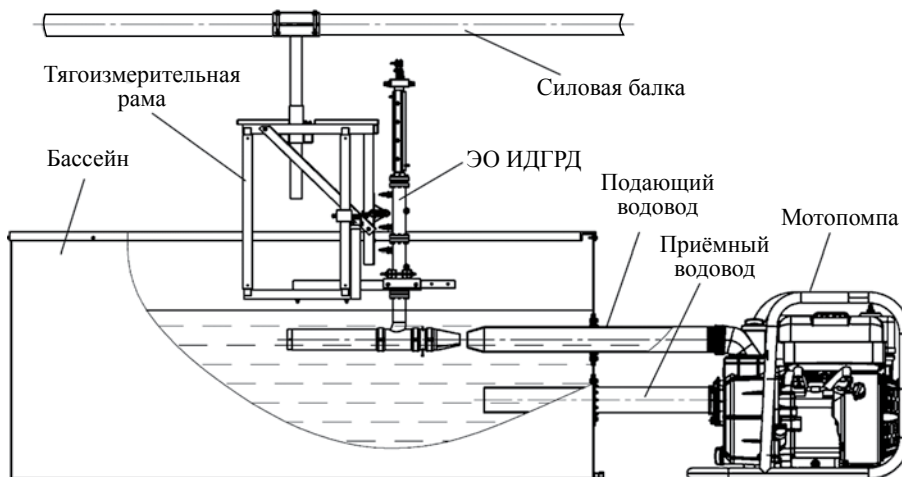


Рис. 2. Схема испытательного стенда.

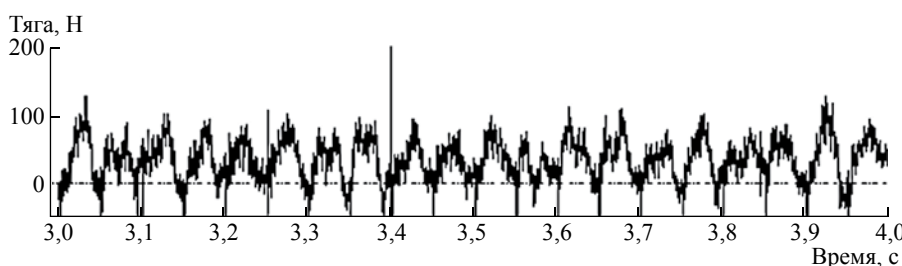


Рис. 3. Пример оциллограммы тягового усилия, создаваемого при работе ЭО ИДГРД, при скорости набегающего потока 10 м/с и частоте детонационных импульсов 20 Гц.

ЭО расположено по оси струи. Ось водовода ЭО расположена на глубине 35 см. Выходной диаметр конического сопла подающего водовода (49 мм) практически совпадает с входным диаметром водозаборного устройства ЭО, так что через водозаборное устройство проходит большая часть водяного потока и лишь небольшая оставшаяся часть потока воды обтекает ЭО снаружи. Таким образом, испытания ЭО ИДГРД проводятся в условиях, когда внешним гидродинамическим сопротивлением можно пренебречь.

На рис. 3 показан пример записи датчика усилия (тяги) при скорости набегающего потока воды 10 м/с и рабочей частоте ЭО 20 Гц. Отметим, что несколько первых рабочих циклов ЭО обычно значительно отличались от последующих рабочих циклов, что связано с разными начальными условиями в КС и в водоводе перед запуском ИДГРД. Начиная со 2–3-го цикла амплитуда положительного сигнала усилия повторялась от цикла к циклу. Поэтому при оценке тяговых характеристик ЭО несколько первых циклов не учитывались.

Основные тяговые характеристики движителя – средняя тяга и удельный импульс тяги. Они определялись следующим образом. Сначала на

зависимости тяги от времени выбирали серию из N циклов, которой соответствует интервал времени (t_1, t_2) , и определяли интеграл усилия $F(t)$

$$P = \int_{t_1}^{t_2} F(t) dt$$

и среднюю тягу

$$T = \frac{P}{\Delta\tau} = \frac{P}{t_2 - t_1}.$$

Затем рассчитывали удельный импульс тяги

$$I_{уд} = \frac{P}{\Delta m g} = \frac{T}{Q_m g}, \quad (1)$$

где $\Delta m = Q_m \Delta\tau$ – масса топливной смеси, подаваемой в ЭО за N циклов, g – ускорение силы тяжести, $Q_m = (\dot{m}_T + \dot{m}_{OK}) \Delta\tau_T f$ – расход топливной смеси при работе ЭО в частотном режиме, определённый по производительности форсунки \dot{m}_T и массовому расходу окислителя \dot{m}_{OK} при заданных значениях длительности подачи топливной смеси $\Delta\tau_T$ и рабочей частоты f .

Таблица 1. Зависимость средней тяги, секундного расхода топливной смеси и удельного импульса тяги от рабочей частоты ЭО ИДГРД и скорости набегающего потока воды

f , Гц	$u = 5$ м/с			$u = 10$ м/с		
	T , Н	Q_M , г/с	$I_{уд}$, с	T , Н	Q_M , г/с	$I_{уд}$, с
1	5,8	0,63	936	7,8	0,65	1224
2	7,9	1,18	683	5,0	1,18	433
3	12,4	1,64	771	8,1	1,64	506
5	10,2	3,10	337	10,9	3,10	359
7	21,0	4,10	521	13,7	4,10	340
10	15,6	6,20	257	24,6	6,20	404
14	17,4	7,00	250	21,0	7,00	306
17	18,7	8,10	235	25,8	8,10	325
20	20,20	9,20	224	34,2	9,50	367

В расчётах, как правило, принимали $N = 10$. Для проверки установившейся работы ЭО также рассчитывали значение тяги и удельного импульса при $N = N_{max}$, где N_{max} – общее количество циклов в одном испытании. Так, для условий на рис. 3 получены следующие значения средней тяги и удельного импульса тяги: 26 Н и 280 с соответственно.

В табл. 1 представлены результаты измерений средней тяги и удельного импульса ЭО ИДГРД при работе в импульсно-детонационном режиме с разной частотой при скоростях набегающего потока воды 5 и 10 м/с. Здесь также приведены соответствующие значения расхода топливной смеси

Q_M с учётом частотной работы ЭО. Учтено, что время подачи топливной смеси в отдельном рабочем цикле составляло $\Delta\tau_T = 36$ мс. Время продувки КС азотом $\Delta\tau_{II}$ изменялось от 10 до 20 мс. Частота работы ЭО задавалась одним параметром – интервалом времени $\Delta\tau_{II}$ между рабочими циклами. Так, $\Delta\tau_{II} = 950$ мс при частоте $f = 1$ Гц и $\Delta\tau_{II} = 0$ при $f = 20$ Гц. Скорость набегающего потока воды изменялась с помощью регулирования мощности мотопомпы.

На рис. 4 показаны измеренные зависимости удельного импульса тяги ЭО от рабочей частоты. Из табл. 1 и рис. 4 следует, что с увеличением рабочей частоты удельный импульс тяги в среднем снижается от 1000 с при $f = 1$ Гц до 220–370 с при $f = 20$ Гц. Некоторые отклонения от монотонной зависимости могут быть связаны с неустойчивой работой ЭО в детонационном режиме – преждевременными вспышками топливной смеси при контакте с продуктами горения, оставшимися в КС от предыдущего цикла, – а также с резонансными явлениями в системе КС – водовод на некоторых режимах. Можно также отметить, что на рабочих частотах f выше 10 Гц удельный импульс тяги возрастает с увеличением скорости набегающего потока воды. По-видимому, это связано с улучшением наполнения водовода водой перед следующим рабочим циклом.

Отметим, что значения средней тяги и удельного импульса тяги в первом рабочем цикле были значительно выше, чем в последующих циклах. В проведённых испытаниях среднее значение тяги в первом цикле изменялось от 300 до 480 Н, а значение удельного импульса тяги – от 960 до 2690 с. Это свидетельствует об имеющемся потенциале повышения тяговых характеристик ЭО.

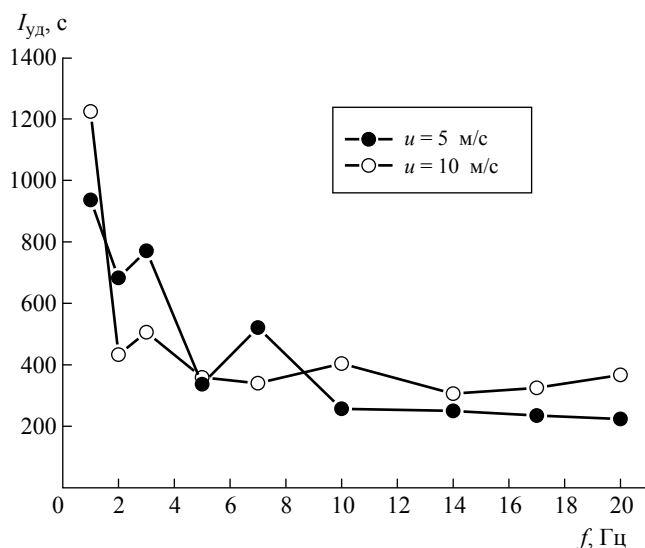


Рис. 4. Измеренные зависимости удельного импульса тяги ЭО ИДГРД от рабочей частоты при двух значениях скорости набегающего потока.

Таким образом, в работе впервые спроектирован, изготовлен и испытан экспериментальный образец двигателя нового типа для скоростного водного транспорта – прямоточного ИДГРД. Огневые испытания ЭО ИДГРД с камерой сгорания объёмом 2 л проведены на специально разработанном стенде, позволяющем создавать набегающий поток воды в виде затопленной струи со скоростью до 10 м/с. Экспериментально получен удельный импульс тяги на уровне 1200 с при низкой рабочей частоте (1 Гц) и 370 с при высокой рабочей частоте (20 Гц), т.е. измеренный удельный импульс прямоточного ИДГРД оказался выше удельного импульса лучших современных жидкостных ракетных двигателей. При этом начальное давление топливных компонентов в КС ИДГРД перед зажиганием было близким к атмосферному, тогда как в ракетных двигателях оно достигает нескольких сот атмосфер. Показано, что

с увеличением рабочей частоты удельный импульс тяги в среднем снижается;

при заданной рабочей частоте удельный импульс тяги возрастает с увеличением скорости набегающего потока воды;

средняя тяга, развиваемая ЭО ИДГРД, возрастает с увеличением рабочей частоты от 8 Н при частоте 1 Гц до 34 Н при частоте 20 Гц;

измеренные значения средней тяги и удельного импульса тяги в первом рабочем цикле всегда значительно выше, чем в последующих циклах: в проведённых испытаниях среднее значение тяги в первом цикле изменялось от 300 до 480 Н, а значение удельного импульса тяги – от 960 до 2690 с, что свидетельствует об имеющемся потенциале повышения тяговых характеристик ЭО.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки РФ по государственному контракту № 14.609.21.0001 (идентификатор контракта RFMEFI60914X0001) и РФФИ (грант 16–29–01065 оф-м).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов С. М., Аксенов В. С., Фролов Ф. С., Авдеев К. А. Водометный импульсный детонационный двигатель (варианты) и способ создания гидрореактивной тяги. Номер международной заявки PCT/RU2013/001148 от 23.12.2013.
2. Авдеев К. А., Аксенов В. С., Борисов А. А., Тухватуллина Р. Р., Фролов С. М., Фролов Ф. С. Численное моделирование передачи импульса от ударной волны к пузырьковой среде // Горение и взрыв. 2015. Т. 8. № 2. С. 57–67.
3. Авдеев К. А., Аксёнов В. С., Борисов А. А., Фролов С. М., Фролов Ф. С., Шамшин И. О. Исследование передачи количества движения от ударной волны к пузырьковой жидкости // Хим. физика. 2015. Т. 34. № 11. С. 27–32.
4. Frolov S. M., Avdeev K. A., Aksenov V. S., Frolov F. S., Sadykov I. A., Shamshin I. O., Tukhvatullina R. R. Direct Conversion of Fuel Chemical Energy Into the Energy of Water Motion. In: Nonequilibrium Processes in Physics and Chemistry. V. 2. Combustion and Detonation. Moscow: Torus Press, 2016. P. 251–262.
5. Фролов С. М., Аксенов В. С., Дубровский А. В., Зангиев А. Э., Иванов В. С., Медведев С. Н., Шамшин И. О. Хемионизационная и акустическая диагностика рабочего процесса в непрерывно-детонационных и импульсно-детонационных камерах сгорания // ДАН. 2015. Т. 465. № 1. С. 62–67.
6. Фролов С. М. Быстрый переход горения в детонацию // Хим. физика. 2008. Т. 27. № 6. С. 31–44.