

ИСПЫТАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ВОДОМЕТНОГО ДВИЖИТЕЛЯ С ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННЫМ ГОРЕНИЕМ ЖИДКОГО ТОПЛИВА*

С. М. Фролов¹, В. С. Аксёнов², И. А. Садыков³, К. А. Авдеев⁴, И. О. Шамшин⁵

Аннотация: Спроектированы, изготовлены и испытаны экспериментальные образцы (ЭО) двигателей нового типа для водного транспорта — прямооточных импульсно-детонационных гидрореактивных двигателей (ИДГРД). Огневые испытания ЭО ИДГРД различной конструкции с камерой сгорания (КС) объемом около 2 л проведены на специально разработанном стенде, позволяющем создавать набегающий поток воды в виде затопленной струи со скоростью до 10 м/с. На основе сравнения достигаемых значений удельного импульса тяги выбрана наиболее перспективная конструкция ЭО ИДГРД, при которой удельный импульс тяги не опускается ниже 350–400 с. Показано, что измеренные значения средней тяги и удельного импульса тяги в первом рабочем цикле всегда значительно выше, чем в последующих циклах: в проведенных испытаниях среднее значение тяги в первом цикле изменялось в пределах от 300 до 480 Н, а значение удельного импульса тяги — от 960 до 2690 с, что свидетельствует об имеющемся потенциале повышения тяговых характеристик ЭО.

Ключевые слова: водометный двигатель; импульсно-детонационное горение; экспериментальный образец; удельный импульс; тяга

Введение

В работах [1–4] предложен новый тип двигателя для водного транспорта — прямооточного ИДГРД. В ИДГРД гидрореактивная тяга создается импульсно-периодическими ударными волнами, выходящими в прямооточный водовод из 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 нем отсутствуют какие-либо промежуточные подвижные элементы типа гребного винта, импеллера и т. д. В соответствии с расчетами и экспериментами [5] наибольшая эффективность передачи количества движения от ударных волн к забортной

воде (наибольший удельный импульс) достигается при газосодержании воды в водоводе на уровне 20%–25%. Такое газосодержание может быть обеспечено либо принудительной аэрацией забортной воды, либо газообразными продуктами детонации предыдущего цикла.

В [4] представлены результаты огневых испытаний первого ЭО прямооточного ИДГРД, спроектированного авторами на основе параметрических численных расчетов и компьютерного моделирования. Испытания проведены в открытом бассейне размером 2×1,2×5 м, оборудованном стационарной тягоизмерительной рамой и мотопомпой, обеспечивающей непрерывную затопленную струю воды с заданной скоростью до 5 м/с. Частота детонационных импульсов в ЭО, работающем на бензитоноксигородной смеси, изменялась в пределах от 1 до 6 Гц. Удельный импульс тяги ЭО ИДГРД, полу-

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному контракту № 14.609.21.0001 (идентификатор контракта RFMEFI60914X0001) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-29-01065 офи-м).

¹ Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», smfrol@chph.ras.ru

² Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», v.aksenov@mail.ru

³ Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», ilsadykov@mail.ru

⁴ Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, kaavdeev@mail.ru

⁵ Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», igor_shamshin@mail.ru

ченный в испытаниях, достигал 370 с, что в целом соответствовало расчетным значениям (350–400 с), т. е. измеренный удельный импульс прямоточного ИДГРД оказался сравнимым по величине с удельным импульсом лучших современных жидкостных ракетных двигателей.

Цель данной работы — доводка первого ЭО прямоточного ИДГРД [4] с тем, чтобы повысить его рабочую частоту и удельный импульс тяги.

Экспериментальные образцы двигателя

На рис. 1 показана принципиальная схема ЭО ИДГРД. Экспериментальный образец состоит из КС — стальной трубы внутренним диаметром 49 мм, объемом 1930 см³ (приблизительно 2 л) — с системами подачи топливных компонентов, зажигания, диагностики детонации и управления и из прямоточного водовода — стальной трубы диаметром 80 мм — с коническим водозаборным устройством (ВЗУ) и сменным соплом.

Компоненты топлива — горючее (бензин Нефрас С2-80/120) и окислитель (газообразный кислород) — подаются в КС отдельно. Горючее

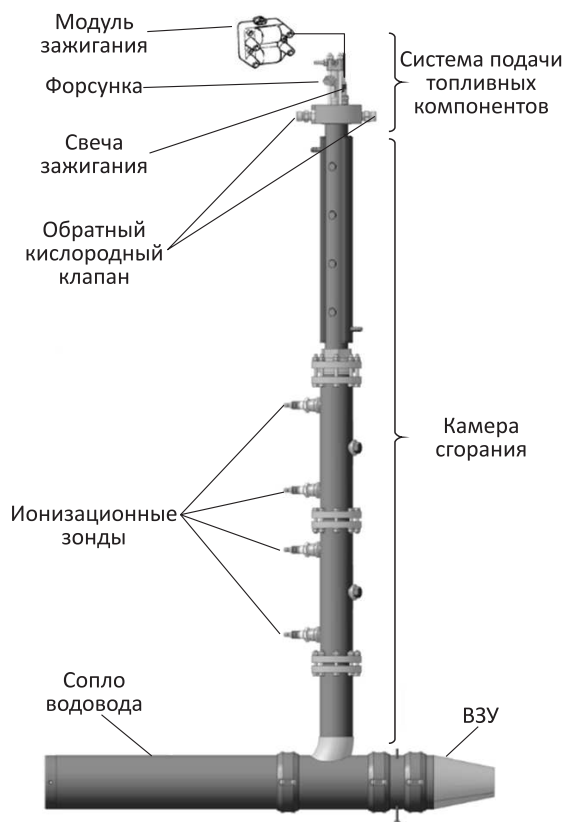


Рис. 1 Схема ЭО ИДГРД

впрыскивается в КС автомобильной форсункой, а окислитель подается через два канала (Ди 3 мм), оснащенных обратными клапанами КОК. Горючее подается 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 подается продувочный газ — азот. Азот подается 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 газообразных компонентов (кислорода, азота, воздуха для опциональной аэрации воды в водоводе), форсунки и модуля зажигания. Программное обеспечение блока управления позволяет задавать временные интервалы подачи топливных компонентов (бензина и кислорода), продувочного газа (азота), воздуха для опциональной аэрации воды в водоводе и импульса зажигания, а также обеспечивает генерацию управляющих сигналов в частотном режиме.

Система диагностики быстропротекающего рабочего процесса в КС включает четыре ионизационных зонда и аналогово-цифровой преобразователь, соединенный с персональным компьютером. Регистрация быстропротекающих процессов горения и детонации ионизационными зондами апробирована авторами ранее и показала высокую эффективность [6]. В качестве ионизационных зондов использовались автомобильные свечи.

Для организации быстрого перехода горения в детонацию (ПГД) и образования детонационной волны (далее — донорной ДВ) в КС установлены турбулизаторы специальной формы [7]. Камера сгорания изгибается, чтобы ее выходное сечение было соосным с соплом водовода, так что донорная ДВ выходит в сопло водовода соосно потоку воды и, трансформируясь в ударную волну (далее — акцепторную УВ), передает воде запасенное 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);

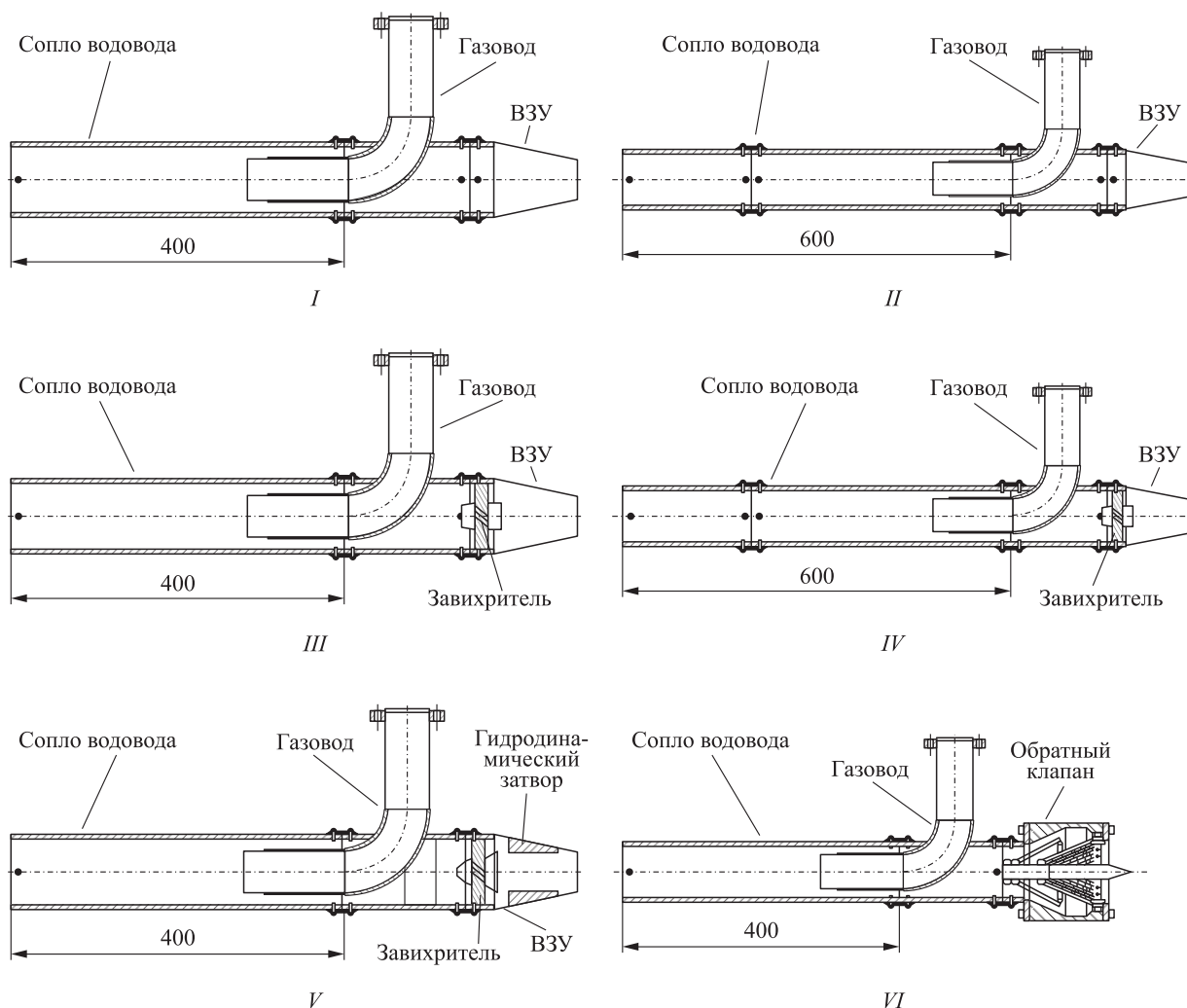


Рис. 2 Конфигурации ЭО ИДГРД. Размеры указаны в миллиметрах

- (2) стадию формирования донорной ДВ в КС (зажигание горючей смеси, ПГД и распространение донорной ДВ в КС);
- (3) стадию формирования импульсной гидрореактивной струи (выход донорной ДВ из КС, образование и распространение акцепторной УВ в сопле водовода, вызывающее ускорение водной среды и ее 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 времен стадий (1) $\Delta\tau_{\text{T}}$ и (4) $\Delta\tau_{\text{П}}$, а также из времени скважности циклов — времени задержки между рабочими циклами — $\Delta\tau_{\text{И}}$, т. е. $\Delta\tau_{\text{ц}} = \Delta\tau_{\text{T}} + \Delta\tau_{\text{П}} + \Delta\tau_{\text{И}}$. В этом случае рабочая частота ЭО равна $f \approx 1/\Delta\tau_{\text{ц}}$.

По схеме, показанной на рис. 1, изготовлено и испытано шесть (I–VI) конфигураций ЭО ИДГРД (рис. 2), отличающихся длиной сменного сопла водовода и конструкцией ВЗУ.

Сопло водовода имеет длину 400 мм для ЭО конфигураций I, III, V и VI и 600 мм для ЭО конфигураций II и IV.

Диаметр входного сечения ВЗУ в конфигурациях I–V равен 49 мм, так что площадь входного сечения ВЗУ равна эффективной площади проходного сечения водовода в месте его сочленения с КС.

Водозаборные устройства ЭО конфигураций III, IV и V содержат завихрители входящего потока воды, а ВЗУ ЭО конфигурации V — еще и гидродинамический затвор.

В ЭО конфигурации VI вместо конического ВЗУ установлен обратный клапан лепесткового типа с тем же эффективным проходным сечением (при полном открытии лепестков), что и сечение водовода.

Испытательный стенд и методика испытаний

Для проведения огневых испытаний ИДГРД в ИХФ РАН спроектирован и изготовлен новый испытательный стенд. Фотография испытательного стенда и его схема с системой создания свободной затопленной струи воды в бассейне представлены на рис. 3.

Бассейн, выполненный из листовой нержавеющей стали толщиной 2,5 мм, имеет размеры $1,26 \times 1,05 \times 2,54$ м. Для измерения тягового усилия, создаваемого ЭО ИДГРД, используется тягоизмерительная рама (см. рис. 3, а), состоящая из

двух частей: неподвижного основания и подвески. К закрепленному на силовой балке неподвижному основанию крепится тензорезисторный датчик сжатия мембранного типа из нержавеющей стали. Максимальное измеряемое усилие датчика — 5000 Н.

Экспериментальный образец ИДГРД крепится к подвеске, которая передает усилие на датчик. Подвеска притянута к неподвижному основанию блоком пружин. Такое предварительное нагружение датчика позволяет регистрировать продольную осевую нагрузку в обоих направлениях.

При обтекании ЭО струей воды без подачи топливных компонентов в КС показания датчика уси-

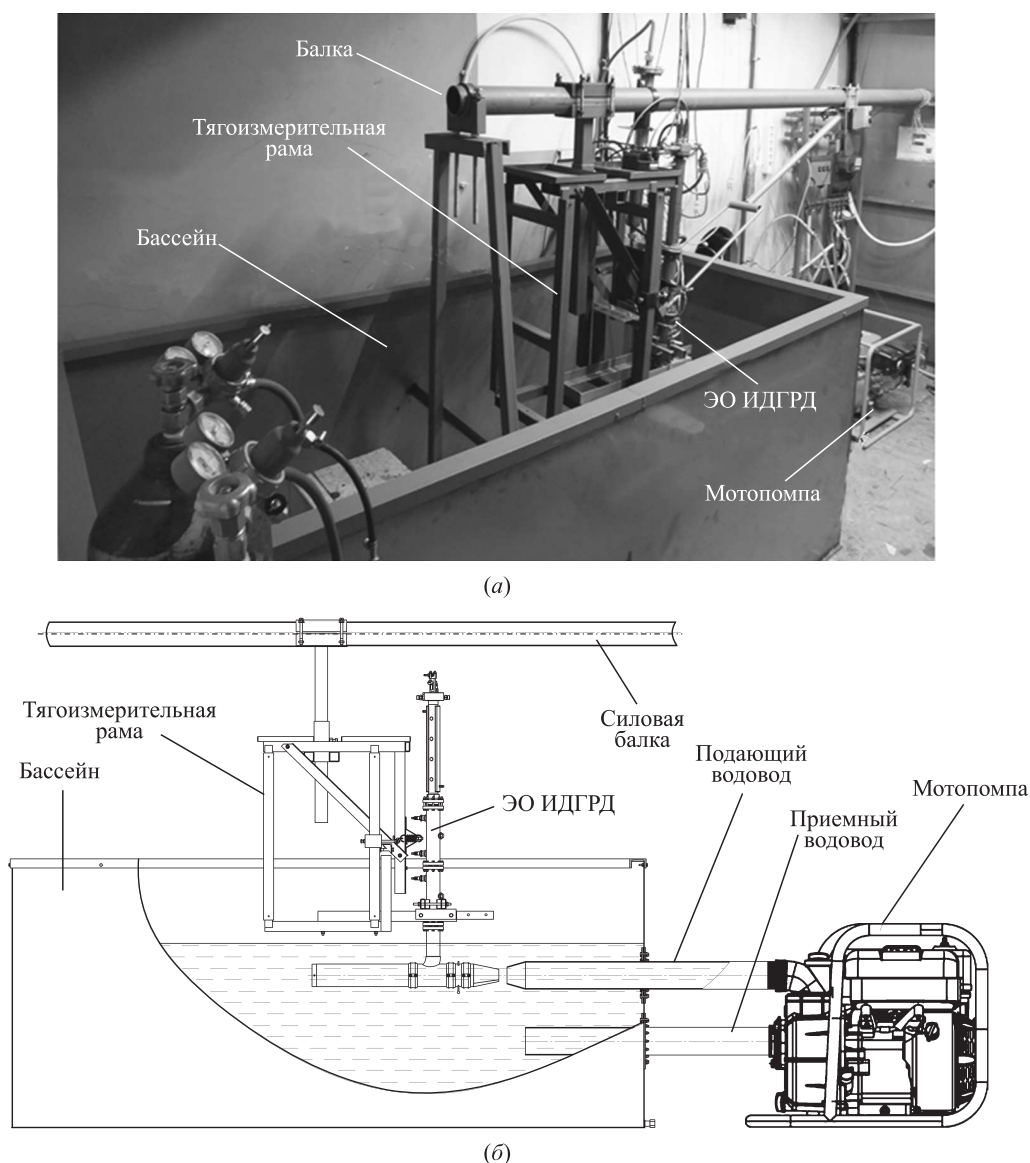


Рис. 3 Фотография испытательного стенда (а) и его схема (б)

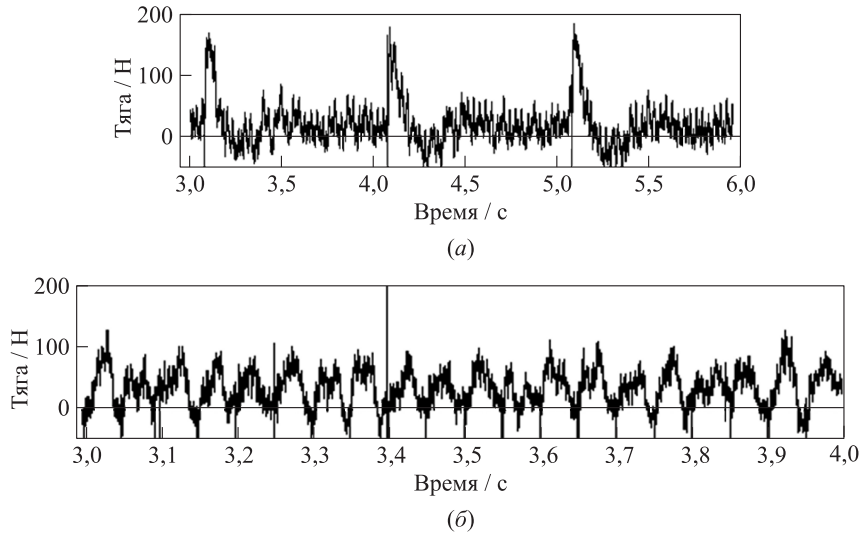


Рис. 4 Пример осциллограммы тягового усилия, создаваемого при работе ЭО ИДГРД конфигурации IV при скорости набегающего потока 10 м/с и частоте детонационных импульсов 1 (а) и 20 Гц (б)

лия 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 приемный и подающий водоводы диаметрами 110 мм, введенные в бассейн через сальники, обеспечивающие герметичность и осевую подвижность. Подающий водовод оборудован сужающимся коническим соплом. Вода засасывается в мотопомпу через приемный водовод и вводится обратно в бассейн в виде затопленной струи через подающий водовод. Водозаборное устройство 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 ВЗУ ЭО, так что через ВЗУ 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. 4 показаны примеры записей датчика усилия при работе ЭО конфигурации I при скорости набегающего потока воды 10 м/с и частоте импульсов 1 и 20 Гц. Первый рабочий цикл ЭО (на рис. 4 не показан) значительно отличается от последующих рабочих циклов, что связано с разными начальными условиями в КС и в водоводе перед запуском ИДГРД. Начиная со 2-го цикла амплитуда положительного сигнала усилия повторяется от цикла к циклу, поэтому при оценке тяговых характеристик ЭО первый цикл не учитывался.

Тягу и удельный импульс тяги определяли следующим образом. На зависимости тяги от времени (см. рис. 4) выбирали серию из N циклов, которой соответствует интервал времени (t_1, t_2) , и определяли импульс тягового усилия как интеграл усилия по времени:

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

где $F(t)$ — зависимость тягового усилия от времени на участке (t_1, t_2) . Среднюю тягу определяли по формуле:

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

Удельный импульс тяги для каждого из выбранных N циклов рассчитывали по формуле:

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

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

В расчетах, 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. 4 получены следующие значения тяги / удельного импульса тяги: 7,8 Н / 1220 с при работе ЭО с частотой 1 Гц и 32 Н / 340 с при работе с частотой 20 Гц.

На рис. 4, а показана серия из трех повторяющихся циклов при работе ЭО с частотой 1 Гц. В каждом цикле перед воспламенением топливной смеси значение тяги выходит на нулевой уровень. После зажигания датчик усилия дает сигнал колоколообразной формы длительностью около 100 мс с амплитудой до 150 Н. С увеличением частоты (см. рис. 4, б) амплитуда сигнала несколько уменьшается (до 100 Н), однако среднее значение тяги увеличивается с 7,8 Н при $f = 1$ Гц до 32 Н при $f = 20$ Гц.

Результаты испытаний

В табл. 1 и 2 представлены результаты измерений тяги и удельного импульса ЭО ИДГРД раз-

ных бесклапанных конфигураций (I–V) при работе в импульсно-детонационном режиме с разной частотой при скоростях набегающего потока воды 5 и 10 м/с и при естественной аэрации воды в водоводе продуктами детонации. Здесь также приведены соответствующие значения расхода топливной смеси Q_M с учетом 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, при частоте $f = 1$ Гц $\Delta\tau_{II} = 950$ мс, а при $f = 20$ Гц $\Delta\tau_{II} = 0$ мс. Скорость набегающего потока воды изменялась с помощью регулирования мощности мотопомпы.

На рис. 5 показаны измеренные зависимости удельного импульса тяги ЭО от рабочей частоты.

Из табл. 1 и 2 и рис. 5 следует, что с увеличением рабочей частоты удельный импульс тяги в среднем снижается от 1000 с при $f = 1$ Гц до 200–

Таблица 1 Зависимость тяги, секундного расхода топливной смеси и удельного импульса тяги от рабочей частоты f для ЭО ИДГРД бесклапанных конфигураций I–III при скорости набегающего потока воды $u = 5$ м/с

f , Гц	Конфигурация								
	I			II			III		
	Тяга, Н	Q_M , г/с	$I_{уд}$, с	Тяга, Н	Q_M , г/с	$I_{уд}$, с	Тяга, Н	Q_M , г/с	$I_{уд}$, с
1	5,8	0,63	936	12	0,65	1890	3,2	0,65	494
2	7,9	1,18	683	—	—	—	5,5	1,18	476
3	12,4	1,64	771	7,5	1,64	468	9,4	1,64	584
5	10,2	3,10	337	11,1	3,10	365	10,3	3,10	337
7	21,0	4,10	521	15,1	4,10	375	13,3	4,10	331
10	15,6	6,20	257	15,6	6,20	257	16,8	6,20	276
14	17,4	7,00	250	23,7	7,00	345	20,3	7,00	295
17	18,7	8,10	235	23,8	8,10	300	24,5	8,10	308
20	20,2	9,20	224	20,7	9,20	229	28,1	9,20	311

Таблица 2 Зависимость тяги, секундного расхода топливной смеси и удельного импульса тяги от рабочей частоты f для ЭО ИДГРД бесклапанных конфигураций I, III–V при скорости набегающего потока воды $u = 10$ м/с

f , Гц	Конфигурация											
	I			III			IV			V		
	Тяга, Н	Q_M , г/с	$I_{уд}$, с	Тяга, Н	Q_M , г/с	$I_{уд}$, с	Тяга, Н	Q_M , г/с	$I_{уд}$, с	Тяга, Н	Q_M , г/с	$I_{уд}$, с
1	7,8	0,65	1224	—	—	—	6,2	0,63	995	6,0	0,63	963
2	5,0	1,18	433	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	8,1	1,64	506	—	—	—	5,3	1,64	331	14,3	1,64	889
5	10,9	3,10	359	13,6	3,10	446	11,1	3,10	366	14,0	3,10	460
7	13,7	4,10	340	15,4	4,10	382	10,8	4,10	268	20,2	4,10	502
10	24,6	6,20	404	16,6	6,20	273	16,5	6,20	271	22,2	6,20	365
14	21,0	7,00	306	21,2	7,00	308	17,7	7,00	258	33,0	7,00	480
17	25,8	8,10	325	19,6	8,10	246	15,6	8,10	196	35,1	8,10	442
20	34,2	9,50	367	23,9	9,20	265	16,1	9,20	178	33,4	9,20	370

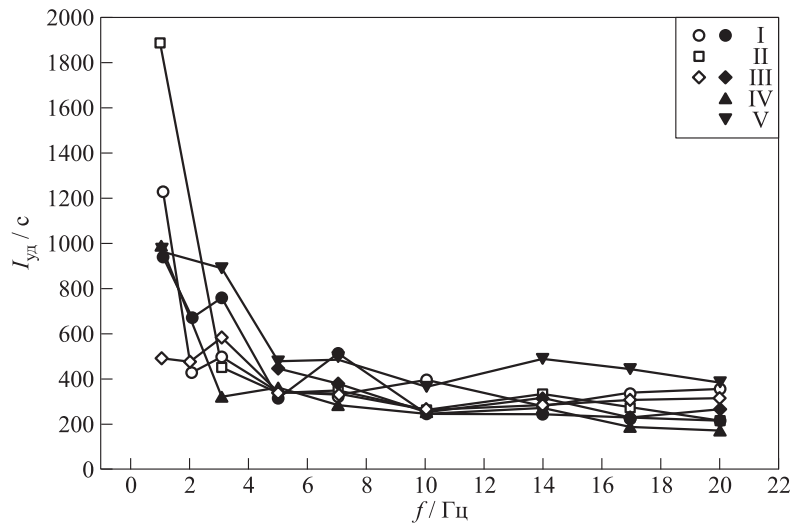


Рис. 5 Измеренные зависимости удельного импульса тяги $I_{уд}$ от рабочей частоты f при скорости набегающего потока $u = 5$ (пустые значки) и 10 м/с (залитые значки) для ЭО ИДГРД пяти бесклапанных конфигураций I–V

400 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 для ЭО конфигурации I на рабочих частотах f выше 10 Гц удельный импульс тяги возрастает с увеличением скорости набегающего потока воды и достигает значений ~ 400 с. По-видимому, это связано с улучшением наполнения водовода водой перед следующим рабочим циклом. Можно предположить, что с дальнейшим увеличением скорости набегающего потока воды эффективность ИДГРД будет возрастать. В целом, ЭО ИДГРД конфигурации V оказался наиболее энергоэффективным: в исследованных диапазонах частот и скоростей набегающего потока воды достигнутый на нем удельный импульс тяги не опускался ниже 350–400 с.

Несмотря на то что первый рабочий цикл не учитывался при расчете значений средней тяги и удельного импульса тяги, интересно отметить, что эти показатели в первом рабочем цикле всегда значительно выше, чем в последующих циклах. В проведенных испытаниях среднее значение тяги в первом цикле изменялось в пределах от 300 до 480 Н, а значение удельного импульса тяги — от 960 до 2690 с. Это свидетельствует об имеющемся потенциале повышения тяговых характеристик ЭО.

Все испытания, обсуждавшиеся выше, относились к бесклапанным конфигурациям ЭО I–V. В табл. 3 и на рис. 6 приведены результаты огне-

Таблица 3 Зависимость тяги, секундного расхода топливной смеси и удельного импульса тяги от рабочей частоты f и скорости набегающего потока воды u для ЭО ИДГРД клапанной конфигурации VI

f , Гц	$u = 5$ м/с			$u = 10$ м/с		
	Тяга, Н	Q_m , г/с	$I_{уд}$, с	Тяга, Н	Q_m , г/с	$I_{уд}$, с
1	4,1	0,63	660	7,0	0,63	1124
3	9,1	1,77	568	11,3	1,77	703
5	12,3	3,10	403	13,9	3,10	456
7	15,0	4,10	372	15,5	4,10	386
10	22,0	6,20	362	21,2	6,20	349
14	22,2	7,00	320	23,7	7,30	330
17	28,0	8,10	353	21,8	8,40	265
20	25,5	9,20	280	—	—	—

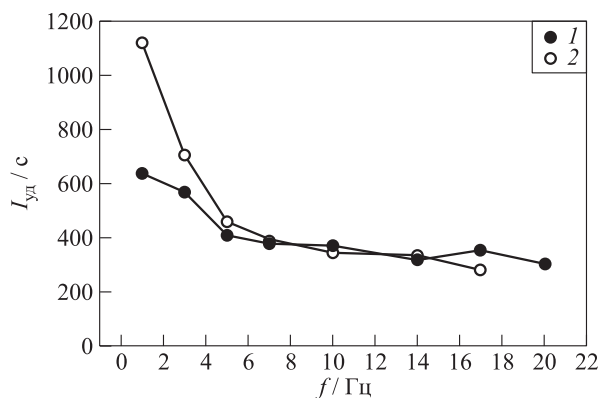


Рис. 6 Измеренные зависимости удельного импульса тяги $I_{уд}$ от рабочей частоты f при скоростях набегающего потока воды $u = 5$ (1) и 10 м/с (2) для ЭО ИДГРД клапанной конфигурации VI

вых испытаний ЭО клапанной конфигурации VI. Из сравнения данных табл. 1, 2 и 3, а также рис. 5 и 6 следует, что клапанная схема не дает каких-либо принципиальных преимуществ по сравнению с бесклапанными схемами. При этом клапанная схема обладает рядом недостатков, а именно: повышенным гидравлическим сопротивлением водовода, наличием движущихся частей и ограничением по кавитационному разрушению элементов конструкции.

Заключение

В работе спроектированы, изготовлены и испытаны ЭО двигателей нового типа для водного транспорта — прямоточных ИДГРД. Огневые испытания ЭО ИДГРД различной конструкции с КС объемом около 2 л проведены на специально разработанном стенде, позволяющем создавать набегающий поток воды в виде затопленной струи со скоростью до 10 м/с. На основе сравнения достигаемых значений удельного импульса тяги выбрана наиболее перспективная конструкция ЭО ИДГРД, при которой удельный импульс тяги не опускается ниже 350–400 с. Показано, что

- с увеличением рабочей частоты удельный импульс тяги в среднем снижается от 1000 с при частоте 1 Гц до 200–400 с при частоте 20 Гц;
- при заданной рабочей частоте удельный импульс тяги ЭО заданной конструкции возрастает с увеличением скорости набегающего потока воды, достигая значения 400 с при скорости 10 м/с;
- максимальные значения средней тяги, развиваемой ЭО разной конструкции, возрастает с увеличением рабочей частоты от 12 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 проведенных испытаниях среднее значение

тяги в первом цикле изменялось в пределах от 400 до 760 Н, а значение удельного импульса тяги — от 900 до 2600 с, что свидетельствует об имеющемся потенциале повышения тяговых характеристик ЭО.

Литература

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 // Nonequilibrium processes in physics and chemistry. Vol. 2: Combustion and detonation / Eds. A. M. Starik, S. M. Frolov. — Moscow: TORUS PRESS, 2016. P. 251–262.
5. Avdeev K. A., Aksenov V. S., Borisov A. A., Frolov F. S., Frolov S. M., Shamshin I. O., Tukhvatullina R. R., Basara B., Edelbauer W., Pachler K. Experimental and computational investigation of shock wave-to-bubbly water momentum transfer // Progress in detonation physics / Eds. S. M. Frolov, G. D. Roy. — Moscow: TORUS PRESS, 2016. P. 199–219.
6. Фролов С. М., Аксенов В. С., Дубровский А. В., Зангев А. Э., Иванов В. С., Медведев С. Н., Шамшин И. О. Хемиионизационная и акустическая диагностика рабочего процесса в непрерывно-детонационных и импульсно-детонационных камерах сгорания // Докл. РАН, 2015. Т. 465. № 1. С. 62–67.
7. Фролов С. М. Быстрый переход горения в детонацию // Хим. физика, 2008. Т. 27. № 6. С. 31–44.

Поступила в редакцию 14.02.17

TESTING OF EXPERIMENTAL MODELS OF A HYDROJET WITH PULSED-DETONATION COMBUSTION OF LIQUID FUEL

S. M. Frolov^{1,2}, V. S. Aksenov², I. A. Sadykov^{1,2}, K. A. Avdeev¹, and I. O. Shamsin^{1,2}

¹N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation

Abstract: Experimental models (EMs) of a pulse-detonation hydrojet (PDH), a new type of thruster for water propulsion, were designed, manufactured, and tested. Fire tests of PDH EMs with combustors of different design 2 l in volume were performed on a specially designed experimental rig which made it possible to create an approach stream of water with a speed of up to 10 m/s. By comparing the attained values of the fuel-mixture based specific impulse in the multicycle PDH operation, the most promising design of the PDH has been proposed exhibiting the specific impulse exceeding 350–400 s. It is shown that the measured values of the time-averaged thrust and specific impulse in the first working cycle are always significantly higher than in the subsequent cycles: 400–760 N and 900–2600 s, respectively, which indicates the potential for increasing the thrust performances of the PDH.

Keywords: hydrojet engine; pulsed-detonation combustion; experimental model; specific impulse; thrust

Acknowledgments

The work was partly supported by the Russian Ministry of Education and Science under the State Contract No. 14.609.21.0001 (Contract ID RFMEFI60914X0001) and by the Russian Foundation for Basic Research (grant 16-29-01065 ofi-m).

References

1. Frolov, S. M., V. S. Aksenov, F. S. Frolov, and K. A. Avdeev. 2013. Vodometnyy impul'snyy detonatsionnyy dvigatel' (varianty) i sposob sozdaniya gidroreaktivnoy tyagi [Pulse detonation engine (variants) and the way to create hydrojet thrust]. PCT/RU 2013/001148. Available at: <http://www.idgcenter.ru/patentPCT-RU2013-001148.htm> (accessed June 2, 2017).
2. Avdeev, K. A., V. S. Aksenov, A. A. Borisov, R. R. Tukhvatullina, S. M. Frolov, and F. S. Frolov. 2015. Chislennoe modelirovaniye peredachi impul'sa ot udarnoy volny k puzyr'kovoy srede [Numerical simulation of the momentum transfer from the shock waves to the bubble media]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 8(2):57–67.
3. Avdeev, K. A., V. S. Aksenov, A. A. Borisov, S. M. Frolov, F. S. Frolov, and I. O. Shamshin. 2015. Momentum transfer from a shock wave to a bubbly liquid. *Russ. J. Phys. Chem. B* 9(6):895–900.
4. Frolov S. M., K. A. Avdeev, V. S. Aksenov, F. S. Frolov, I. A. Sadykov, I. O. Shamshin, and R. R. Tukhvatullina. 2016. Direct conversion of fuel chemical energy into the energy of water motion. *Nonequilibrium processes in physics and chemistry. Vol. 2: Combustion and detonation*. Eds. A. M. Starik and S. M. Frolov. Moscow: TORUS PRESS. 251–262.
5. Avdeev, K. A., V. S. Aksenov, A. A. Borisov, F. S. Frolov, S. M. Frolov, I. O. Shamshin, R. R. Tukhvatullina, B. Basara, W. Edelbauer, and K. Pachler. 2016. Experimental and computational investigation of shock wave-to-bubbly water momentum transfer. *Progress in detonation physics*. Eds. S. M. Frolov and G. D. Roy. Moscow: TORUS PRESS. 199–219.
6. Frolov S. M., V. S. Aksenov, A. V. Dubrovskii, A. E. Zangiev, V. S. Ivanov, S. N. Medvedev, and I. O. Shamshin. 2015. Chemiionization and acoustic diagnostics of the process in continuous- and pulse-detonation combustors. *Dokl. Phys. Chem.* 465(1):273–278.
7. Frolov, S. M. 2008. Fast deflagration-to-detonation transition. *Russ. J. Phys. Chem. B* 2(3):442–455.

Received February 14, 2017

Contributors

Frolov Sergey M. (b. 1959) — Doctor of Science in physics and mathematics, head of department, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; smfrol@chph.ras.ru

Aksenov Victor S. (b. 1952) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; associate professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; vaksenov@mail.ru

Sadykov Ilyas A. (b. 1993) — technician, Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; student, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; ilsadykov@mail.ru

Avdeev Konstantin A. (b. 1971) — Candidate of Science in technology, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; kaavdeev@mail.ru

Shamshin Igor O. (b. 1975) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; associate professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; igor_shamshin@mail.ru