

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛОВОЙ НЕИДЕНТИЧНОСТИ ПРИ РАБОТЕ ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННОГО ГИДРОРЕАКТИВНОГО ДВИЖИТЕЛЯ*

К. А. Авдеев¹, В. С. Аксёнов², И. А. Садыков³, С. М. Фролов⁴, Ф. С. Фролов⁵, И. О. Шамшин⁶

Аннотация: Исследование посвящено выяснению и устранению причин цикловой неидентичности при работе инновационного импульсно-детонационного гидрореактивного двигателя (ИД ГРД), которая снижает его тяговые характеристики. Спроектирован и изготовлен экспериментальный образец ИД ГРД в виде импульсно-детонационной трубки (ДТ), соединенной с оптически прозрачным водоводом. Проведены экспериментальные исследования с вертикальным погружением образца в воду. Обнаружено, что межцикловая неидентичность связана с перерасширением газообразных продуктов детонации в детонационной трубке вследствие инерции водяного столба в водоводе. Перерасширение газа вызывает обратное течение механической газовой смеси, которая не только заполняет водовод, но и проникает в ДТ, оказывая сильное влияние на циклический рабочий процесс. Для устранения межцикловой неидентичности разработан, изготовлен и испытан новый лабораторный образец ИД ГРД, оснащенный вращающимся механическим клапаном и работающий на пропанокислородной смеси. Его огневые испытания показали, что при прочих равных условиях применение клапана позволяет в значительной мере устранить межцикловую нестабильность и увеличить средний удельный импульс более чем вдвое: до 550 с вместо 250 с при рабочей частоте 14 Гц.

Ключевые слова: импульсно-детонационный гидрореактивный двигатель; детонационная волна; ударная волна; пузырьковая водная среда; удельный импульс; тяга

DOI: 10.30826/CE21140105

1 Введение

В [1–6] спроектирован, изготовлен и испытан водный транспортный двигатель нового типа — импульсно-детонационный гидрореактивный двигатель. Двигатель представляет собой ДТ, вставленную в проточный водовод (рис. 1). Импульсно-детонационная трубка предназначена для периодической генерации детонационной волны (ДВ), выходящей в водовод в виде сильной ударной волны (УВ). Детонационная волна образуется благодаря заполнению трубки взрывчатой смесью, поджигу смеси свечой зажигания и последующему переходу горения в детонацию (ПГД). Тяга в ИД ГРД создается импульсными струями сжимаемой пузырьковой водной среды — механической смеси воды и газообразных продуктов детонации

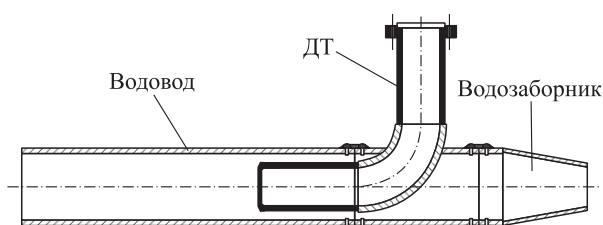


Рис. 1 Схема ИД ГРД

предыдущего цикла, истекающими из сопла под действием УВ. Численное моделирование и эксперименты показали, что оптимальное газосодержание водной среды в водоводе 20%–25% [5–8]. При таком газосодержании достигается максимальное приращение выходного импульса истекающих

* Научно-исследовательская работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФИЦ ХФ РАН на выполнение государственного задания по теме № 0082-2019-0006 (номер государственной регистрации АААА-А21-121011990037-8).

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, kaavdeev@mail.ru

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, vaksenov@mail.ru

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, ilsadykov@mail.ru

⁴Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, smfrol@chph.ras.ru

⁵Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; f.frolov@chph.ru

⁶Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, igor_shamshin@mail.ru

струй, а абсолютная скорость истечения водной среды увеличивается на 25–30 м/с по сравнению со скоростью набегающего потока заборной воды.

Нами проведены исследования моделей ИД ГРД различных бесклапанных и клапанных схем. Показано, что такие движители могут создавать тягу с удельным импульсом на уровне от 600 до 2400 с (отношение тяги к весовому расходу топливной смеси). Так, в [3, 4, 8] проведены огневые испытания ИД ГРД с ДТ объемом 2 л на лабораторном стенде [3], обеспечивающем набегающий поток воды в виде затопленной струи со скоростью до 10 м/с. Показано, что средний удельный импульс движителей бесклапанных и клапанных схем составил 350–400 с без учета первого рабочего цикла. Измеренные значения средней тяги и удельного импульса в первом рабочем цикле были всегда значительно выше, чем в последующих циклах: при испытаниях среднее значение тяги в первом цикле достигало 300–480 Н, а значение удельного импульса — 960–2690 с. Этот факт указывает на возможность увеличения тяговых характеристик ИД ГРД. В [8] обнаружено, что амплитуда и длительность импульса давления в выходном сечении ДТ (т. е. в активной фазе работы движителя) в первом и последующих циклах существенно отличаются (по амплитуде до двух раз). Кроме того, в каждом цикле (кроме первого) в водоводе после активной фазы наблюдается паразитная фаза разрежения продолжительностью до 10–15 мс, которая влияет на тягу движителя.

Цель данной работы — повысить средние тяговые характеристики ИД ГРД путем выяснения и устранения причин цикловой неидентичности, обнаруженной в [8].

2 Цикловая неидентичность

Для выяснения причин цикловой неидентичности при работе ИД ГРД нами изготовлен лабораторный образец с вертикально расположенными ДТ и соосным водоводом (рис. 2). Детонационная трубка [8] объемом 1 л состоит из смесительной головки с газовыми штуцерами и форсункой, секции ускорения пламени со спиралью Щёлкина, гладкой секции и переходной конусной секции. В экспериментах использовалась стехиометрическая топливно-кислородная смесь (ТКС) бензина марки Нефрас С2-80/120 (октановое число около 80) с техническим кислородом. Избыточное давление в системе подачи бензина составляло 0,2 МПа, кислорода — 0,7 МПа. Эксперименты проводились на двух рабочих частотах — 3 и 5 Гц. Водовод выполнен из плексигласовой трубы внутренним диаметром 80 мм и длиной 500 мм. В огневых испытаниях

водовод вертикально погружался в воду на глубину 400 мм.

Рабочий цикл лабораторного образца ИД ГРД включает следующие процессы:

- продувку ДТ азотом под избыточным давлением 0,45 МПа;
- заполнение ДТ взрывчатой ТКС;
- искровое зажигание ТКС и ее сгорание в бегущей ДВ;
- истечение водной среды из водовода под действием УВ и продуктов детонации.

Время продувки и заполнения ДТ взрывчатой ТКС в ходе экспериментов не изменялось. Частота рабочего процесса регулировалась паузой по

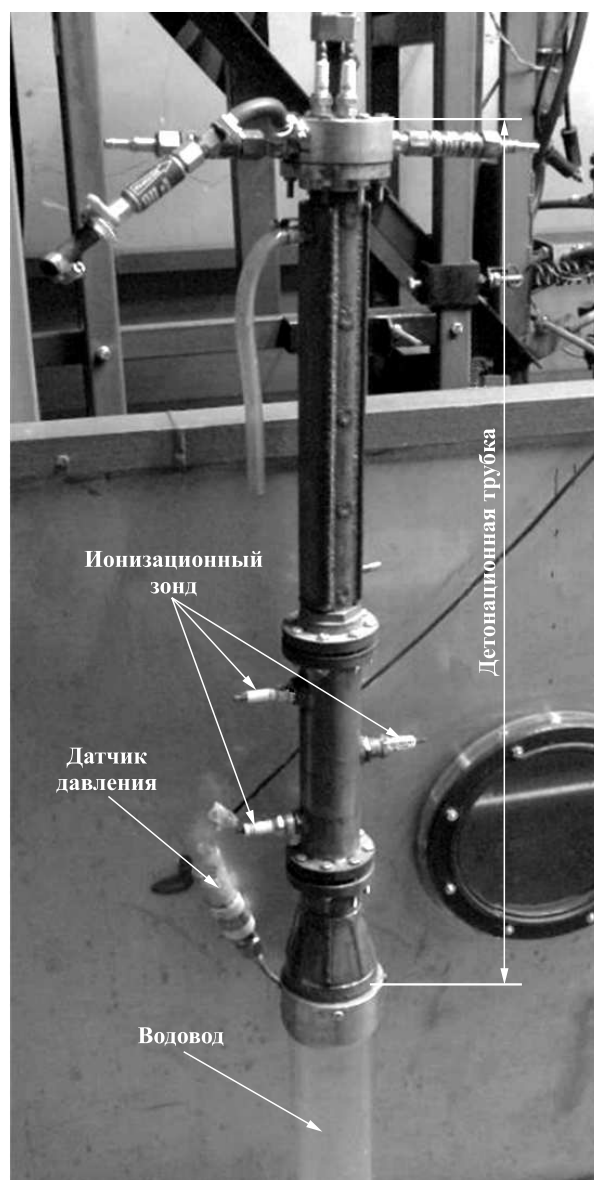


Рис. 2 Лабораторный образец ИД ГРД

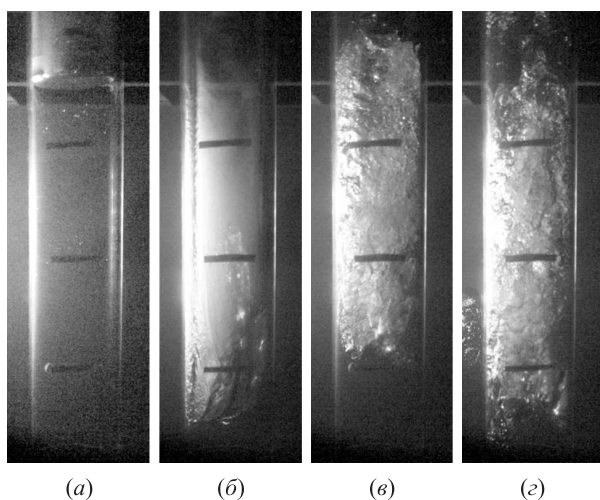
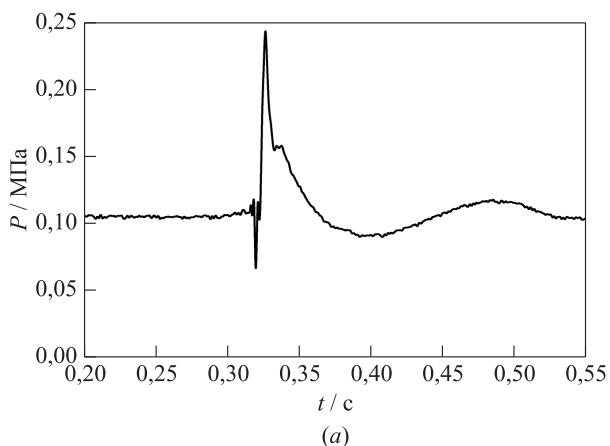


Рис. 3 Кадры видеосъемки процесса истечения водной среды из водовода в двух последовательных циклах. Расстояние между горизонтальными рисками 100 мм: (а) кадр № 1, 0 мс; (б) кадр № 2, 67,5 мс; (в) кадр № 3, 162,5 мс; (г) кадр № 4, 345 мс

времени между процессами зажигания и продувки ДТ азотом. Время подачи бензина и кислорода подбиралось так, чтобы ДТ заполнялась топливной смесью на $\sim 1/3$ всего объема (для предотвращения разрушения прозрачного водовода и формирования УВ амплитудой не более 0,5 МПа).

В огневых испытаниях регистрировались давление в ДТ с помощью датчика абсолютного давления Курант-ДА 1,6 атм (см. рис. 2) и скорость распространения фронта реакции с помощью ионизационных зондов. Кроме того, с помощью видеокамеры CASIO EX-1 (скорость съемки 300 кадр/с) проводилась скоростная видеосъемка процессов в прозрачном водоводе.



Огневые испытания проводились следующим образом. Сначала закрепленный на раме лабораторный образец ИД ГРД опускали в бассейн [8] с возможностью визуальных наблюдений за границей раздела фаз внутри водовода. Затем запускали систему регистрации и скоростную видеосъемку. Далее запускали циклограмму работы лабораторного образца и производили 5–7 рабочих циклов.

На рис. 3 представлены кадры видеосъемки процесса истечения водной среды из водовода в двух последовательных циклах. Кадр № 1 (рис. 3, а) соответствует моменту времени, когда УВ первого цикла достигает границы раздела фаз в водоводе, причем поверхность воды не возмущена. Кадр № 2 (рис. 3, б) соответствует моменту максимального перемещения границы раздела фаз вниз, причем граница раздела фаз сильно возмущена. Кадр № 3 (рис. 3, в) соответствует моменту, когда в водоводе формируется обратный поток механической смеси воды и газа, который не только заполняет водовод, но и проникает в ДТ. Наконец, кадр № 4 (рис. 3, г) показывает состояние среды в водоводе после прохождения УВ второго цикла.

На рис. 4 показаны соответствующие осциллограммы давления в первом (рис. 4, а) и втором (рис. 4, б) рабочих циклах. Сравнение двух осциллограмм на рис. 4 показывает, что эффекты формирования обратного течения в водоводе и проникновения воды в ДТ, наблюдаемые на рис. 3, в и 3, г, оказывают сильное влияние на измеряемое давление в ДТ и, следовательно, на тягу ИД ГРД. Эти эффекты, очевидно, вызваны ярко выраженной фазой разрежения на осциллограмме давления первого цикла (см. рис. 4, а). Что касается второго и последующего циклов, фаза разрежения на соответствующих осциллограммах давления выражена слабее (см. рис. 4, б). Появление фазы разреже-

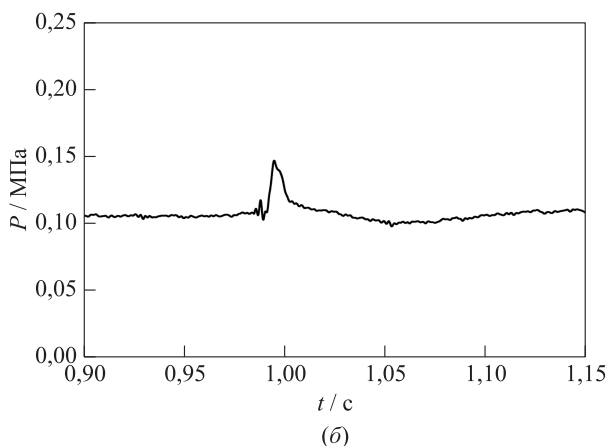


Рис. 4 Осциллограммы давления в первом (а) и втором (б) рабочих циклах

Амплитуда давления (P_a) и удельный импульс ($I_{уд}$) в трех последовательных циклах четырех огневых испытаний ИД ГРД

Опыт	P_a (№ 1/№ 2/№ 3), МПа	$I_{уд}$ (№ 1/№ 2/№ 3), с
1	0,48/0,29/0,27	1660,9/473,7/232
2	0,35/0,20/0,21	1162,9/196,7/246,6
3	0,33/0,19/0,17	980,1/507,5/386,1
4	0,33/0,18/0,16	1038,3/386,7/303,7

ния, по-видимому, связано с перерасширением газа вследствие инерции водяного столба и с охлаждением газа на развитой межфазной границе. Для иллюстрации в таблице приведены количественные данные по снижению амплитуды давления (P_a) и удельного импульса ($I_{уд}$) в трех последовательных циклах работы ИД ГРД в четырех огневых испытаниях. Удельный импульс определяли по формуле:

$$I_{уд} = \frac{S}{t_2 - t_1} \frac{\int_{t_1}^{t_2} P(t) dt}{\dot{m}g},$$

где t — время; P — абсолютное давление в выходном сечении ДТ; $\dot{m}g$ — весовой расход ТКС; S — площадь сечения водовода; индексы 1 и 2 соответствуют началу и концу рабочего цикла.

3 Новый движитель

Для устранения цикловой неидентичности было решено предпринять меры по ослаблению фазы разрежения как в первом, так и в последующих циклах. Для этого был создан новый лабораторный образец ИД ГРД с вращающимся клапаном (ВК) (рис. 5, а). Клапан в основном предназначен для организации естественной подачи атмосферного воздуха в ДТ, когда давление в ней снижается ниже атмосферного, а также для продувки ДТ атмосферным воздухом в конце процесса вытеснения водной среды из водовода.

Клапан представляет собой две соосные трубы. Внутренняя труба неподвижна, а внешняя труба вращается с помощью ременной передачи (передаточное число 1 : 2) от электродвигателя с управляемой частотой вращения (рис. 5, б). Зазор между соосными трубами составляет 0,2 мм. Длина внутренней трубы — 200 мм, а внутренний и внешний диаметры — 51 и 55 мм соответственно. В стенке внутренней трубы выполнены два окна, симметричных относительно диаметральной плоскости, высотой 50 мм и шириной 8,4 мм (центральный угол окна — 18°). Суммарная площадь двух продувочных окон равна 8,4 см². Во внешней трубе выполнены ответные окна высотой 54 мм и центральным углом

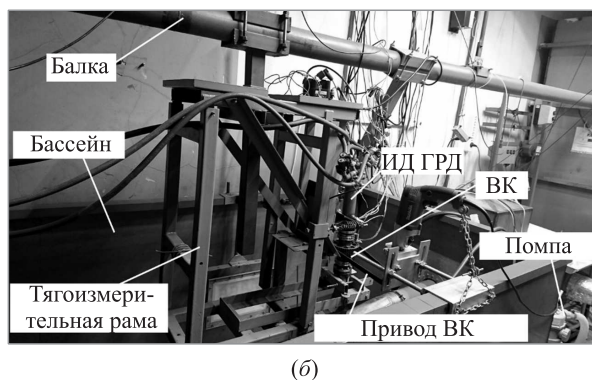
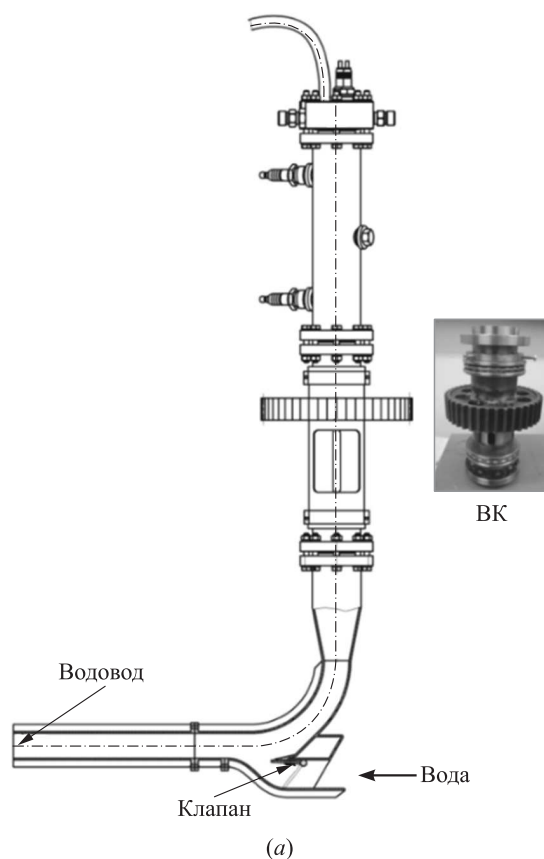


Рис. 5 Схема ИД ГРД с ВК (а) и ИД ГРД, установленный на лабораторном стенде (б)

раскрытия 120°. Для обеспечения синхронизации работы ДТ и ВК последний снабжен датчиком положения (ДП), по сигналу с которого инициируется процесс детонационного горения в ДТ.

Циклограмма работы ИД ГРД (рис. 6, а) включает следующие стадии:

- (1) сгорание взрывчатой смеси в ДТ, передача импульса водной среде в водоводе и истечение реактивной струи водной среды из водовода — интервал времени T_1 ;

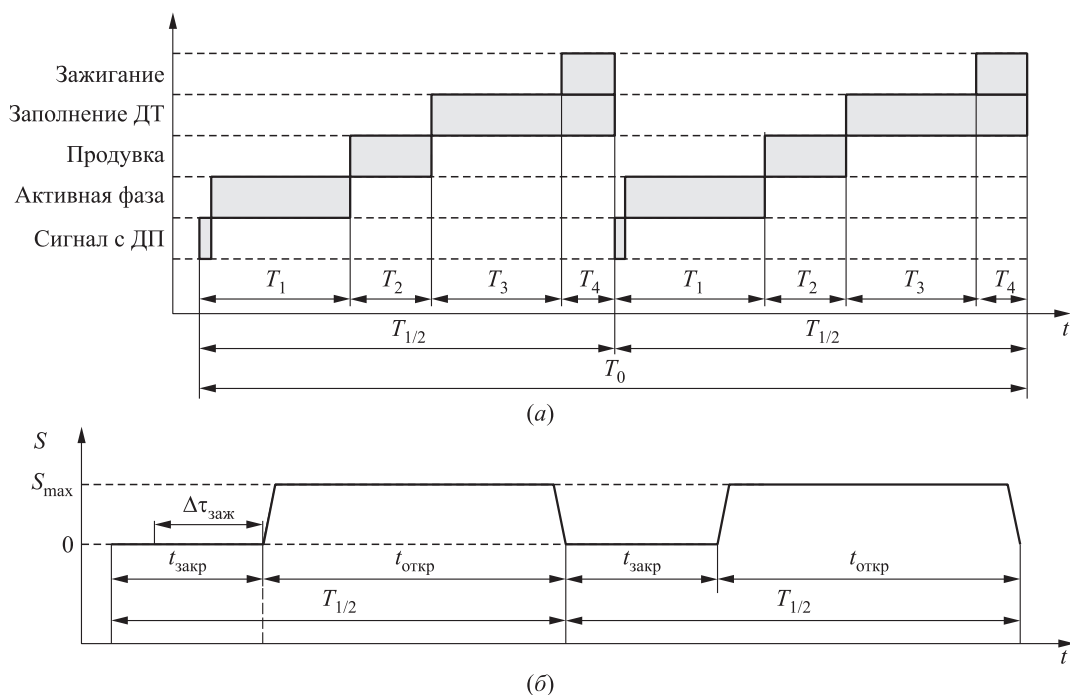


Рис. 6 Циклограммы работы ИД ГРД (а) и ВК (б): $t_{закр}$ — интервал времени, когда клапан закрыт, $t_{откр}$ — интервал времени, когда клапан открыт, $\Delta\tau_{заж}$ — интервал времени между моментом зажигания и открытия клапана (задержка зажигания)

- (2) продувка ДТ азотом — T_2 ;
- (3) заполнение ДТ взрывчатой смесью — T_3 ;
- (4) зажигание взрывчатой смеси — T_4 .

За полупериод ($T_{1/2}$) вращения ВК (рис. 6, б) совершается один рабочий цикл ИД ГРД. Управление работой ИД ГРД с ВК осуществляется при помощи управляющей программы с обратной связью, созданной в среде Arduino. Периоды T_2 , T_3 и T_4 задаются в блоке управления, а период T_1 за ($i + 1$)-й оборот вычисляется по значению $T_{1/2}$ за предыдущий i -й оборот как

$$T_1^{i+1} = T_{1/2}^i - (T_2 + T_3 + T_4).$$

Открытие клапана ослабляет фазу разрежения в ДТ и предотвращает формирование обратного течения водной среды в водоводе, сопровождаемого забросом струй и капель воды в ДТ.

4 Огневые испытания

Огневые испытания нового ИД ГРД проведены на лабораторном стенде на двух частотах работы (7 и 14 Гц) при скорости набегающего потока воды около 5 м/с. Давление в ресиверах подачи топлива (пропана), кислорода и продувочного газа (азота) составляло 0,27, 0,5 и 0,7 МПа соответственно. Аэрация воды в водоводе осуществлялась продуктами

детонации предыдущего цикла. Время подачи компонентов взрывчатой смеси — 40 мс, время продувки азотом — 40 и 26 мс для частоты работы 7 и 14 Гц соответственно.

На рис. 7 приведено сравнение записей тяги и давления в выходном сечении ДТ для двух режимов работы с частотой 14 Гц: с деактивированным ВК (в закрытом положении) и с активированным ВК. Из сравнения рис. 7, а и 7, б отчетливо видно, что использование ВК, во-первых, приводит к более регулярной работе ИД ГРД (изменения значений тяги и давления в ДТ от цикла к циклу значительно меньше, а первый цикл лучше воспроизводится в каждом последующем) и, во-вторых, обеспечивает снижение длительности фазы разрежения. Кроме того, следует отметить повышение тяги с 8 Н при деактивированном ВК до 35 Н при активированном ВК.

Сравнение кадров видеосъемки процессов истечения водной среды из водовода для режима работы с деактивированным ВК и активированным ВК в момент времени, предшествующий выходу УВ из ДТ в водовод, показывает, что ВК обеспечивает воспроизводимость гидродинамических условий в начале второго и последующих циклов.

Дополнительно проведено исследование влияния задержки зажигания ($\Delta\tau_{заж}$) на тяговые характеристики ИД ГРД. Под задержкой зажигания

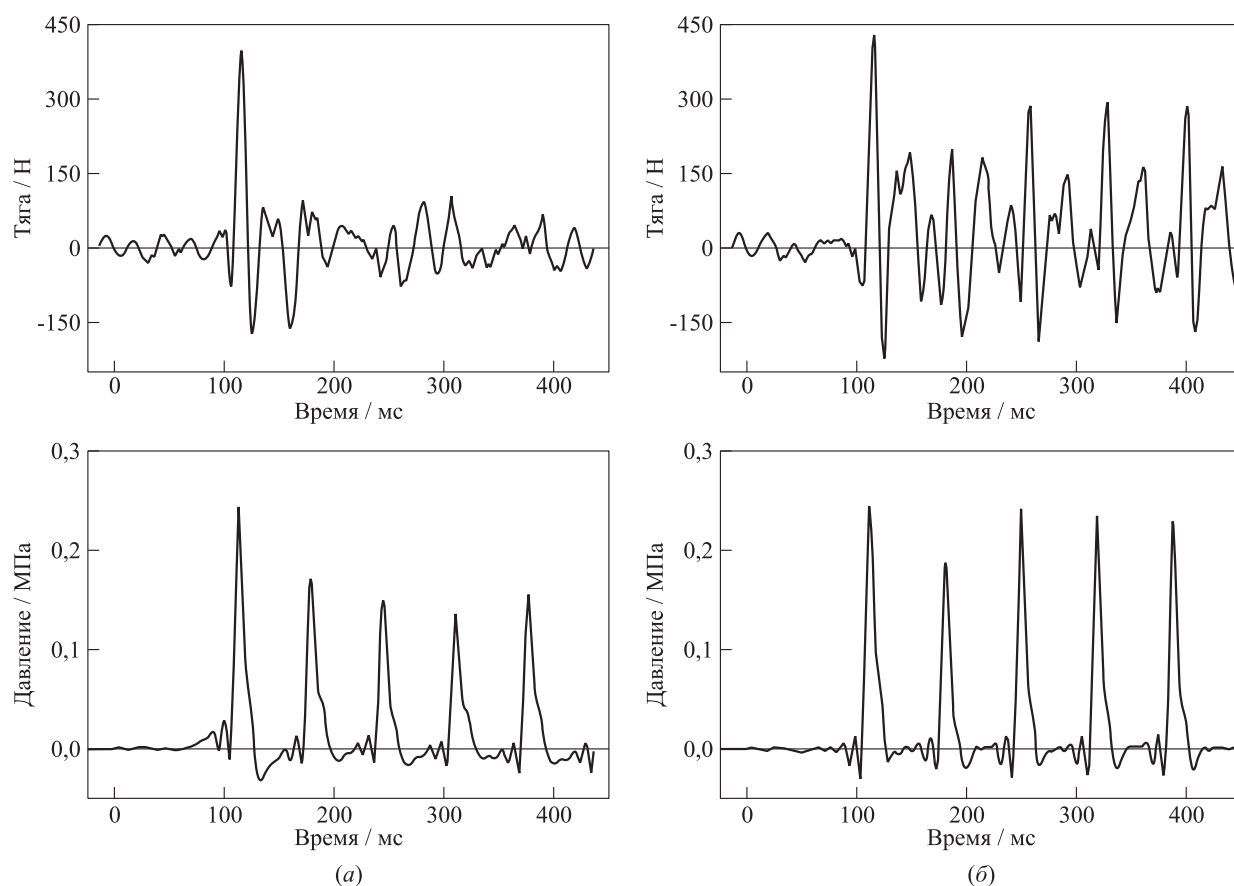


Рис. 7 Тяга и давление в выходном сечении ДТ при выключенном ВК в закрытом положении (а) и включенном ВК (б) при работе на частоте 14 Гц

понимали интервал времени между подачей напряжения на свечу зажигания в ДТ и характерным положением ВК. В экспериментах $\Delta\tau_{\text{заж}}$ варьировали от 0 до 30 мс при частоте 7 Гц и от 0 до 17 мс при частоте 14 Гц.

При $\Delta\tau_{\text{заж}} = 0$ мс взрывчатая смесь в ДТ зажигается в момент начала открытия ВК. В этом случае детонационное сгорание взрывчатой смеси в ДТ происходит на фоне увеличения площади продувочных окон ВК, а активная фаза (процесс истечения водной среды из водовода) протекает главным образом при полностью открытых продувочных окнах. При максимальных значениях $\Delta\tau_{\text{заж}}$ взрывчатая смесь зажигается в момент, когда ВК уже полностью закрыт, и активная фаза процесса может протекать при полностью или частично закрытом ВК в зависимости от частоты вращения клапана. Таким образом, задержка зажигания фактически определяет продолжительность активной фазы работы ИД ГРД, в течение которой и создается тяговое усилие.

На рис. 8 представлены экспериментальные зависимости тяги (рис. 8, а) и удельного импульса

(рис. 8, б) от задержки зажигания. Видно, что для обоих значений рабочей частоты имеется оптимальная задержка зажигания (14–16 мс), при которой достигаются максимальные значения тяги (до 39 Н) и удельного импульса (до 550 с). Уменьшение задержки зажигания по отношению к оптимальному значению приводит к потерям полезного давления, так как активная фаза рабочего процесса протекает при частично или полностью открытом ВК. Увеличение задержки зажигания по отношению к оптимальному значению снижает тяговые характеристики ИД ГРД вследствие перерасширения продуктов детонации в ДТ с формированием обратного течения воды в водоводе, сопровождаемого забросом струй и капель воды в ДТ.

Отметим, что при деактивированном (полностью закрытом) ВК средняя тяга и средний удельный импульс ИД ГРД составили 8 Н и 150 с соответственно, т. е. были значительно меньше.

5 Заключение

Таким образом, нами выяснены причины межциклового неидентичности при работе импульс-

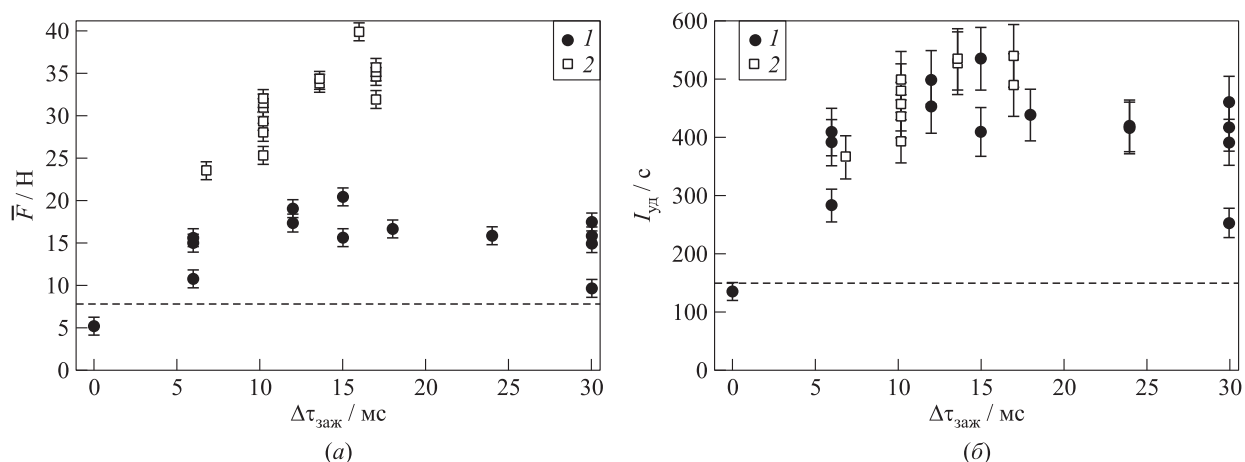


Рис. 8 Экспериментальные зависимости тяги (а) и удельного импульса (б) от задержки зажигания $\Delta\tau_{зж}$: 1 — частота 7 Гц, 2 — частота 14 Гц; горизонтальные штриховые линии соответствуют значениям тяги и удельного импульса для ИД ГРД с деактивированным ВК (частота 14 Гц)

но-детонационного гидрореактивного движителя. Оказалось, что межцикловая неидентичность связана с перерасширением газа в детонационной трубке вследствие инерции водяного столба. Перерасширение газа вызывает формирование обратного потока механической водно-газовой смеси, который не только заполняет водовод, но и проникает в саму детонационную трубку, оказывая сильное влияние на циклический рабочий процесс.

Для устранения межцикловой неидентичности нами разработан и изготовлен новый лабораторный образец движителя, оснащенный вращающимся механическим клапаном. Огневые испытания нового образца движителя показали, что при прочих равных условиях (рабочая частота 14 Гц, стехиометрическая пропанокислородная смесь) применение клапана позволяет в значительной мере устранить межцикловую нестабильность давления в трубке и увеличить среднюю абсолютную тягу и средний удельный импульс более чем вдвое: до 39 Н вместо 18 Н и до 550 с вместо 250 с.

Литература

1. Фролов С. М., Аксенов В. С., Фролов Ф. С., Авдеев К. А. Водометный импульсный детонационный двигатель (варианты) и способ создания гидрореактивной тяги. Патент WO/2015/099552, 23.12.2013. https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2015099552&_cid=P10-KLWBNQ-86226-1.
2. 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 / Eds. A. M. Starik, S. M. Frolov. — Moscow: TORUS PRESS, 2016. Vol. 2. P. 251–262.

3. Фролов С. М., Аксёнов В. С., Садыков И. А., Авдеев К. А., Шамшин И. О. Испытания экспериментальных образцов водометного движителя с импульсно-детонационным горением жидкого топлива // Горение и взрыв, 2017. Т. 10. № 2. С. 73–82.
4. Фролов С. М., Аксенов В. С., Садыков И. А., Авдеев К. А., Шамшин И. О. Водометный движитель с импульсно-детонационным горением жидкого топлива // Докл. Акад. наук, 2017. Т. 475. № 3. С. 281–285. doi: 10.7868/S0869565217210101.
5. Frolov S. M., Avdeev K. A., Aksenov V. S., Frolov F. S., Sadykov I. A., Shamshin I. O., Tukhvatullina R. R. Pulsed detonation hydroramjet // Advances in pulsed and continuous detonations / Ed. S. M. Frolov. — Moscow: TORUS PRESS, 2019. P. 372–396. doi: 10.30826/ICPCD201829.
6. Frolov S. M., Aksenov V. S., Avdeev K. A., Sadykov I. A., Shamshin I. O., Tukhvatullina R. R. Pulsed-detonation hydroramjet // Recent progress in detonation for propulsion / Eds. S. M. Frolov, J. Kasahara. — Moscow: TORUS PRESS, 2019. P. 68–70. doi: 10.30826/IWDP201925.
7. Frolov S. M., Avdeev K. A., Aksenov V. S., Borisov A. A., Frolov F. S., Shamshin I. O., Tukhvatullina R. R., Basara B., Edelbauer W., Pachler K. Experimental and computational studies of shock wave-to-bubbly water momentum transfer // Int. J. Multiphas. Flow, 2017. Vol. 92. P. 20–38. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.01.016.
8. Frolov S. M., Avdeev K. A., Aksenov V. S., Frolov F. S., Sadykov I. A., Shamshin I. O., Tukhvatullina R. R. Pulsed detonation hydroramjet: Simulations and experiments // Shock Waves, 2020. Vol. 30. No. 3. P. 221–234. doi: 10.1007/s00193-019-00906-2.

Поступила в редакцию 14.02.2021

INVESTIGATION OF CYCLE-TO-CYCLE VARIABILITY AT OPERATION OF PULSED DETONATION HYDRORAMJET

K. A. Avdeev¹, V. S. Aksenov^{1,2}, I. A. Sadykov¹, S. M. Frolov^{1,2}, F. S. Frolov¹,
and I. O. Shamshin¹

¹N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the 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: The study is aimed at clarifying and eliminating the reasons of cycle-to-cycle variability during the operation of an innovative pulsed detonation hydoramjet (PDH) which reduces its thrust performance. An experimental sample of the PDH in the form of a pulsed detonation tube connected to an optically transparent water guide has been designed and manufactured. Experimental studies were performed with the vertical immersion of the sample in water. It was found that the cycle-to-cycle variability is associated with the overexpansion of gaseous detonation products in the detonation tube due to the inertia of the water column in the water guide. Gas overexpansion causes a reverse flow of the gas–water mixture which fills the water guide and penetrates the detonation tube, thus exerting a strong effect on the cyclic operation of the PDH. To eliminate the cycle-to-cycle variability, a new PDH model was developed, manufactured, and tested. The model is equipped with a rotary mechanical valve and operates on a propane–oxygen mixture. Its test fires showed that the use of the valve makes it possible to eliminate the cycle-to-cycle variability and to increase more than twice the average specific impulse: up to 550 s instead of 250 s at an operating frequency of 14 Hz.

Keywords: pulsed detonation hydoramjet; detonation wave; shock wave; bubbly water medium; specific impulse; thrust

DOI: 10.30826/CE21140105

Figure Captions

Figure 1 Schematic of PDH

Figure 2 Experimental sample of PDH with the detonation tube, transparent water guide, pressure sensor, and ionization probe

Figure 3 Frames of video record of water flow in the PDH water guide in two successive operation cycles. Distance between horizontal risks is 100 mm: (a) 0 ms; (b) 67.5; (c) 162.5; and (d) 345 ms

Figure 4 Time histories of pressure at the exit of the detonation tube in the first (a) and second (b) operation cycles

Figure 5 Schematic of the PDH model with a rotary valve (a) and the PDH model installed on the laboratory bench (b)

Figure 6 Cyclograms of PDH (a) and rotary valve (b) operation: t_{close} is the time interval when valve is closed; t_{open} is the time interval when valve is open; and $\Delta\tau_{\text{ign}}$ is the time interval between the moments of ignition and valve opening

Figure 7 The PDH thrust and pressure at the outlet of the detonation tube with deactivated (a) and activated (b) rotary valve (operation frequency 14 Hz)

Figure 8 Experimental dependences of PDH thrust (a) and specific impulse (b) on the ignition delay $\Delta\tau_{\text{ign}}$: 1 – 7 Hz; and 2 – 14 Hz. Horizontal dashed lines correspond to the thrust and specific impulse of PDH with deactivated valve (frequency 14 Hz)

Table Caption

Maximum pressure (P_a) and specific impulse (I_{sp}) in three successive cycles in four test fires of the PDH

Acknowledgments

This research work was performed at the expense of a subsidy allocated by the N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences to implement the State Task on the topic No. 0082-2019-0006 (Registration No. AAAA-A21-121011990037-8).

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 [Pump-jet pulse detonation engine (variants) and method for creating hydro-jet]. Patent WO/2015/099552. Available at: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2015099552&_cid=P10-KLWBNQ-86226-1 (accessed February 14, 2021).
2. Frolov, S. M., K. A. Avdeev, V. S. Aksenov, F. S. Frolov, I. A. Sadykov, I. O. Shamshin, and R. R. Tikhvatullina. 2016. Direct conversion of fuel chemical energy into the energy of water motion. *Nonequilibrium processes in physics and chemistry*. Eds. A. M. Starik and S. M. Frolov. Moscow: TORUS PRESS. 2:251–262.
3. Frolov, S. M., V. S. Aksenov, I. A. Sadykov, K. A. Avdeev, and I. O. Shamshin. 2017. Ispytaniya eksperimental'nykh obraztsov vodometnogo dvizhitelya s impul'sno-detonatsionnym goreniiem zhidkogo topliva [Testing of experimental models of a hydrojet with pulsed-detonation combustion of liquid fuel]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 10(2):73–82.
4. Frolov, S. M., V. S. Aksenov, I. A. Sadykov, K. A. Avdeev, and I. O. Shamshin. 2017. Hydrojet engine with pulse detonation combustion of liquid fuel. *Dokl. Phys. Chem.* 475(1):129–133. doi: 10.1134/S0012501617070053.
5. Frolov, S. M., K. A. Avdeev, V. S. Aksenov, F. S. Frolov, I. A. Sadykov, I. O. Shamshin, and R. R. Tikhvatullina. 2019. Pulsed detonation hydroramjet. *Advances in pulsed and continuous detonations*. Ed. S. M. Frolov. Moscow: TORUS PRESS. 372–396. doi: 10.30826/ICPCD201829.
6. Frolov, S. M., V. S. Aksenov, K. A. Avdeev, I. A. Sadykov, I. O. Shamshin, and R. R. Tikhvatullina. 2019. Pulsed-detonation hydroramjet. *Recent progress in detonation for propulsion*. Eds. S. M. Frolov and J. Kasahara. Moscow: TORUS PRESS. 68–70. doi: 10.30826/IWDP201925.
7. Frolov, S. M., K. A. Avdeev, V. S. Aksenov, A. A. Borisov, F. S. Frolov, I. O. Shamshin, R. R. Tikhvatullina, B. Basara, W. Edelbauer, and K. Pachler. 2017. Experimental and computational studies of shock wave-to-bubbly water momentum transfer. *Int. J. Multiphas. Flow* 92:20–38. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.01.016.
8. Frolov, S. M., K. A. Avdeev, V. S. Aksenov, F. S. Frolov, I. A. Sadykov, I. O. Shamshin, and R. R. Tikhvatullina. 2020. Pulsed detonation hydroramjet: Simulations and experiments. *Shock Waves* 30(3):221–234. doi: 10.1007/s00193-019-00906-2.

Received February 14, 2021

Contributors

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

Aksenov Victor S. (b. 1952) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; assistant 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) — research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; ilsadykov@mail.ru

Frolov Sergey M. (b. 1959) — Doctor of Science in physics and mathematics, head of department, head of laboratory, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the 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

Frolov Fedor S. (b. 1981) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; f.frolov@chph.ru

Shamshin Igor O. (b. 1975) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; igor_shamshin@mail.ru