

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ СЖИГАНИЯ
ГАЗОВ В ЖИДКОСТИ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ*Тесленко В.С., Дрожжин А.П.**Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 630090,
Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15 teslenko@hydro.nsc.ru*

Аннотация В работе представлены результаты разработки методов сжигания горючих газов непосредственно в жидкости с целями улучшения энергоэффективности использования углеводородных топлив для создания принципиально новых энергетических устройств и систем. На примере импульсных методов сжигания газовых смесей в открытых камерах сгорания затопленных в воду показаны возможности разработки новых технологий для создания принципиально новых водных движителей и тепловых генераторов.

Экспериментально показано, что за один цикл сжигания стехиометрической пропан-кислородной смеси в цилиндрической и конической камерах сгорания генерируются два-три импульса силы на тяговую стенку, что и обеспечивает удельный импульс до 10^5 сек.

Введение В современных энергетических установках водного транспорта используются двигатели внутреннего сгорания (ДВС) или турбины, в которых с помощью разнообразных трансмиссий приводят во вращение гребные винты. Главными недостатками энергетических установок водного транспорта является наличие значительного количества трущихся механических деталей в цепи передачи механической энергии от камеры сгорания к гребному винту. В этих устройствах заложены технологическая сложность и высокая стоимость изготовления и значительные эксплуатационные расходы. Потери энергии на всех системах передачи механического импульса значительны [1]. Перспективными для водных средств являются системы с непосредственной передачей механической энергии от продуктов сгорания в импульсы тяги, например, гидрореактивные движители [2]. Однако существующие гидрореактивные движители на основе сжигания специальных топлив, для которых окислителем является вода, не приемлемы для широкого использования по условиям норм экологической безопасности. Поэтому особый интерес для водного транспорта могут представлять системы с широко доступными топливами, к таким топливам относится природный газ.

Важным вектором в разработке методов сжигания газов в жидкости является метод раздельной подачи непосредственно в жидкость горючего газа и окислителя. Методы раздельной подачи в жидкость горючего и окислителя в импульсно-циклических режимах предусматривают безопасность эксплуатации разрабатываемых систем и устройств. Этот метод опробован экспериментально и представлен в работе [3].

В настоящей работе рассматриваются возможности применения методов импульсного сжигания горючих газов непосредственно в воде с целью создания научных основ для разработки пульсирующих гидрореактивных движителей и тепловых генераторов. Представлены результаты исследования сжигания пропан-кислородной смеси на открытой твердой стенке, в цилиндрических и конических камерах погруженных в воду.

Постановки экспериментов На Рис. 1 представлены принципиальные схемы постановки экспериментов: **а)** для вариантов расположения газовых зарядов на торце глухого цилиндра (1) погруженного в воду (2), что соответствует сжиганию газа на открытой жесткой стенке; **б)** для вариантов с цилиндрической (и конической) камерой сгорания (1) погруженной в воду (2). Газовые заряды (3) поджигались высоковольтной искрой. При сжигании заданных порций газовой смеси происходило выталкивание столба воды из ствола, что обеспечивало генерацию импульсов силы на тяговую стенку (4), с передачей силы на динамометр (5). Динамометр крепился на горизонтальной жесткой балке (6). Регистрация импульсов силы на стенку осуществлялась с помощью динамометра, выполненного на базе пьезокерамики из цирконат-титаната свинца с диаметром 40 мм и высотой 15 мм, с акустической развязкой вдоль оси. Электрический сигнал от динамометра поступал на эмиттерный повторитель, с постоянной составляющей времени $\theta \approx 10$ сек, и записывался на цифровой осциллограф TDS-210. Киносъемка гидродинамических процессов осуществлялась при помощи цифровой камеры MotionXtra HG-LE. Дополнительно ставились эксперименты без упора (6), со свободным перемещением цилиндрического ствола. Эксперименты проводились с газовыми зарядами из стехиометрической пропан-кислородной смеси ($C_3H_8 + 5 \cdot O_2$) с объемами $V_g = 0,5 - 20$ мл.

Результаты Из результатов обработки киносъемок и измерения импульсов силы на тяговую стенку следует, что для различных объемов сжигаемого газа на тяговой стенке генерируется один (Рис. 2а) или несколько импульсов силы (Рис. 2б) за один цикл сжигания газовой смеси. На Рис. 2 представлены примеры осциллограмм импульсов силы, полученных при сжигании 3 мл стехиометрической пропан-

кислородной смеси в стволе: а) с внутренним диаметром $d = 29$ мм, длиной $h = 47$ мм и б) с внутренним диаметром $d = 29$ мм, $h = 108$ мм.

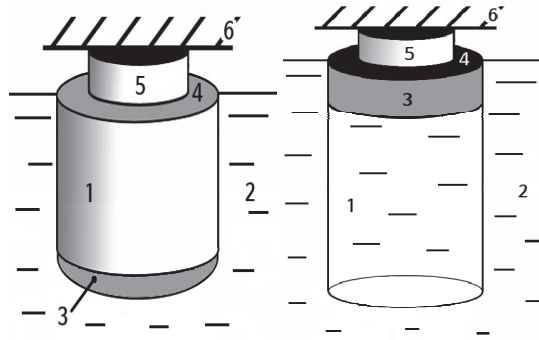


Рис. 1а Рис. 1б

Первый импульс соответствует расширению пузыря после сгорания газа в пузыре, а последующие импульсы соответствуют гидродинамическим процессам при последующих пульсациях пузыря в стволе ($T_2, T_3, \dots$) и вне ствола. Сигнал на Рис. 2а соответствует случаю, когда пузырь вылетает из ствола. А сигнал на Рис. 2б соответствует случаю пульсаций пузыря внутри ствола.

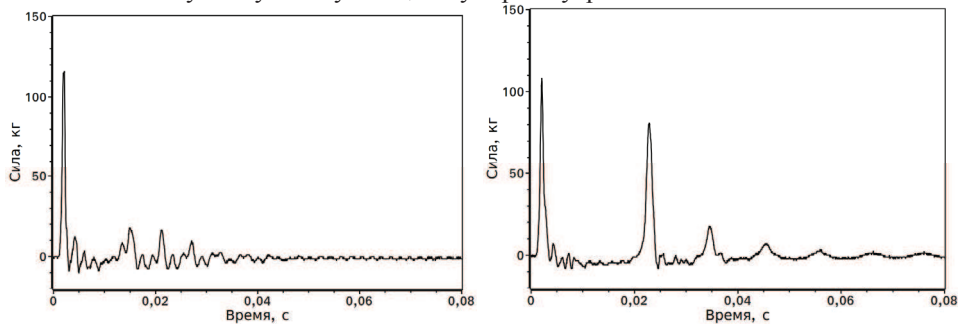


Рис. 2а Рис. 2б

В работе [4] было показано, что время между первым и вторым импульсами силы соответствует первому периоду пульсации пузыря в стволе - T_1 и удовлетворяет зависимости:

$$T_1 = \sqrt{2\rho} \int_{l_0}^{l_{\max}} \frac{\sqrt{h-l}}{\sqrt{\frac{P_0 l_0}{\gamma-1} - \frac{P_0}{\gamma-1} \frac{l_0^\gamma}{l^{\gamma-1}} - (l-l_0)P_a}} dl$$

здесь: P_0 – начальное давление внутри пузыря, P_a – давление в окружающей жидкости ($P_0 > P_a$), ρ – плотность жидкости, γ – показатель адиабаты, $l, l_{\max}$ – текущий и максимальный размер пузыря ($l_{\max} < h$), l_0 – начальный размер пузыря.

Важными особенностями генерируемых импульсов силы являются факты наличия последующих импульсов. Последующие импульсы наблюдаются только при условии, если максимальный объем образованного пузыря (V_b) не превышает объема используемого ствола (V_c). Если $V_b > V_c$, то пузырь «вылетает» из ствола и регистрируется только первый импульс, последующие импульсы незначительны по амплитуде со стохастической структурой (Рис. 2а). Такие же одиночные импульсы регистрируются при сжигании газовых зарядов на открытой жесткой поверхности (постановка Рис. 1а). Однако если сформировать на поверхности кольцевой газовый заряд, то генерируется второй импульс силы [3]. Для рассмотренных камер сгорания регистрируемые импульсы силы позволяют судить о значениях давления внутри пузыря. Оценки и расчеты показали, что начальное давление внутри в пузыре находится в интервале 15–25 атм, что близко к режимам дефлаграционного горения при постоянном объеме [5].

Если принимать, что значения начального давления в пузыре зафиксированы, то для увеличения силы тяги необходимо увеличивать сечения камеры сгорания, что соответствует увеличению сечения начального пузыря с газовой смесью.

На Рис. 3 представлены экспериментальные результаты измерений максимальных амплитуд первого импульса силы (F_1) в зависимости от объема стехиометрической пропан-кислородной смеси газового заряда для конической камеры сгорания. Такая камера сгорания позволяет осуществлять увеличение импульса силы при увеличении объема газового заряда.

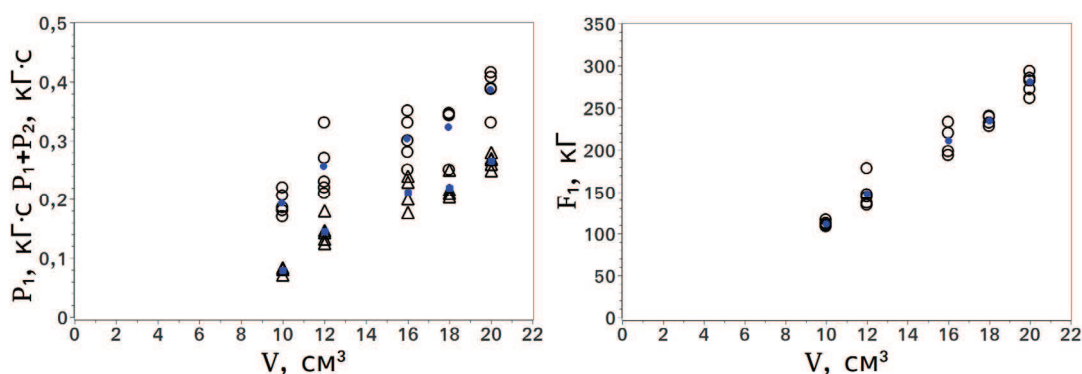


Рис. 3. Рис. 4.

На Рис. 4 представлены результаты расчетов для первых импульсов $p_1 = \int F_1 dt$ (в интервале $\frac{1}{2} T_1$) – треугольники, и для суммы импульсов $p_{12} = \int F dt$ с интегрированием в интервале времени $(T_1 + \frac{1}{2} T_2)$ – кружки при генерации двух импульсов (p_1, p_2) в зависимости от объема газового заряда пропан-кислородной смеси для конической камеры сгорания. Заштрихованные значки – осреднение по серии.

Важным параметром для оценки различных движителей является параметр удельной тяги:

$$P_{y0} = \int F dt / m,$$

где F – функция величина силы, m – масса топлива.

Обработки импульсов силы и расчеты удельных импульсов для данной серии экспериментов показали, что, с учетом используемых и измеряемых параметров, суммарный удельный импульс находится в интервале $P_{y0} = 10^4 - 10^5$ сек. Диапазон значений удельных импульсов зависит от выбора соотношений высоты газового заряда и параметров камеры сгорания.

ВЫВОДЫ

1. Впервые проведены экспериментальные исследования гидродинамических процессов по сжиганию стехиометрической пропан-кислородной смеси в воде на границе модельной тяговой стенки с измерениями импульсов силы для открытой стенки и для различных камер сгорания: цилиндрической, конической, кольцевой.
2. Показано, что сжигание газа на открытой жесткой стенке приводит к вихревому разрушения «горячего» пузыря на мелкие в направлении нормали к стенке, что обеспечивает эффективную теплопередачу жидкости, с минимальными импульсами силы на стенку.
3. Показано, что для рассматриваемого типа движителей при условиях, когда максимальный объем образовавшегося пузыря (V_b) не превышает объем камеры сгорания (V_c), т. е. при $V_b / V_c < 1$ генерируется два-три импульса силы с суммарным удельным импульсом $P_{уд} = 10^5$ сек, а при $V_b / V_c > 1$ последующие импульсы исчезают, что приводит к уменьшению величины удельного импульса за один цикл сжигания газа.
4. Полученные критерии являются основными для проектирования энергетически эффективных водных движителей рассматриваемого типа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, граты
№ № 13-08-00838, 14-08-00226.

Литература:

1. Платонов А.В. Подводные лодки. СПб.: Полигон, 2002. 256 с., http://www.e-reading.biz/bookreader.php/132935/Podvodnye_lodki.pdf
2. Башкатов В.А., Орлов П.П., Федосов М.И. Гидрореактивные пропульсивные установки. «Судостроение», Ленинград 1977 г, 296 с.
3. Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Медведев Р.Н., Батраев И.С. Сжигание газов в воде в линейных и кольцевых пузырях // Теплофизика и аэромеханика, 2014. Т. 21. № 4. С. 497-507, <http://swsl.hydro.nsc.ru/publ/TiA2014.pdf>
4. Тесленко В. С., Дрожжин А. П., Медведев Р.Н. Генерация импульсов силы и вихревых потоков при импульсном сжигании газа в воде // Труды всероссийской конференции «XXXI Сибирский теплофизический семинар» (ISBN 978-5-89017-039-2), Новосибирск, Институт теплофизики СО РАН, 2014г, с. 234-236, <http://swsl.hydro.nsc.ru/publ/Teslenko-STS31.pdf>
5. Васильев А.А. Энергетические аспекты инициирования бытовых газов // Физика горения и взрыва, 2008. Т. 45. № 1. С. 96-101.