

УДК 536.71; 537.5; 662.6

Сжигание газов в воде для генерации тяги*

В.С. Тесленко, А.П. Дрожжин, Р.Н. Медведев

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

E-mail: teslenko@hydro.nsc.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований гидродинамических процессов, происходящих при сжигании стехиометрической смеси пропана с кислородом в камерах сгорания различных конфигураций, затопленных вертикально в воду. Проведены измерения импульсов силы, действующих на тяговую стенку, для цилиндрических, конических, полусферических и кольцевых камер сгорания, включая сжигание газа на плоской тяговой стенке. Показано, что после сжигания одной порции стехиометрической пропан-кислородной смеси на тяговой стенке развиваются процессы циклической генерации импульсов силы: первый импульс формируется вследствие повышения давления при сжигании газа, а последующие импульсы — за счет гидродинамических пульсаций газовой полости. Экспериментально показано, что для получения эффективной генерации тяги необходимо использовать все пульсации пузыря при сжигании одной порции газового заряда. В представленных экспериментах удельные импульсы силы на тяговой стенке находились в интервале 10^4 – 10^5 с (10^5 – 10^6 м/с) с учетом положительных и отрицательных составляющих.

Ключевые слова: импульсное сжигание газов в воде, импульсы силы, тяга, удельная тяга, гидрореактивные движители.

Введение

В современных энергетических установках водного транспорта используются двигатели внутреннего сгорания (ДВС) или турбины, в которых с помощью разнообразных трансмиссий приводятся во вращение гребные винты. Главным недостатком энергетических установок водного транспорта является наличие значительного количества трущихся механических деталей в цепи передачи механической энергии от камеры сгорания к гребному винту. Для этих устройств характерны технологическая сложность, высокая стоимость изготовления и значительные эксплуатационные расходы энергоблоков. 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, неприемлемы 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.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-08-00838).

Важным условием при разработке методов сжигания газов в жидкости является раздельная подача непосредственно в жидкость горючего газа и окислителя. Методы раздельной подачи в жидкость горючего и окислителя в импульсно-циклических режимах обеспечивают безопасность эксплуатации разрабатываемых систем и устройств. Такой метод был 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 водных двигателей и тепловых генераторов. Представлены результаты исследования гидродинамических процессов при сжигании пропан-кислородной смеси для геометрически различных камер сгорания, погруженных в воду.

Постановка экспериментов

На рис. 1 изображена принципиальная схема постановки экспериментов. В кювету из оргстекла 1 высотой 0,5 м, заполненную водой, вертикально помещались различные камеры сгорания, которые заполнялись газом до необходимого уровня. На рисунке представлен вариант для цилиндрической камеры 2, которая заполнялась стехиометрической пропан-кислородной смесью 3 с варьируемыми объемами. Горючая смесь поджигалась искрой от высоковольтного источника 5 с энергией до 2 Дж. Сжигание газовой смеси 3 с начальным объемом V_0 обеспечивало генерацию импульсов силы, действующих на тяговую стенку 4, с передачей силы на динамометр 6. Динамометр крепился на горизонтальной жесткой балке 7. Регистрация действующих на стенку импульсов силы осуществлялась динамометром 6, изготовленным 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 $\theta \approx 10$ с и записывался цифровым осциллографом TDS-210 8. Одновременно с измерениями импульсов силы осуществлялись измерения давления в камере сгорания 3 с помощью турмалиновых датчиков 9 с характерным временем разрешения 0,3 мкс и постоянной времени регистрации не менее 1 с. Датчик давления устанавливался в торце ствола на тяговой стенке. Ошибки измеряемых параметров находились в пределах 5–15 %. Эксперименты проводились с газовыми зарядами из стехиометрической пропан-кислородной смеси ($C_3H_8 + 5 \cdot O_2$) с объемами $V_0 = 0,5-20$ см³. Киносъемка гидродинамических процессов осуществлялась при помощи цифровой камеры MotionXtra HG-LE 10. Управление системой осуществлялось с пульта 11 с регистрацией результатов на компьютере 12. Дополнительно ставились эксперименты со свободным перемещением цилиндрических стволов из воды, с регистрацией динамики их перемещения в вертикальном направлении.

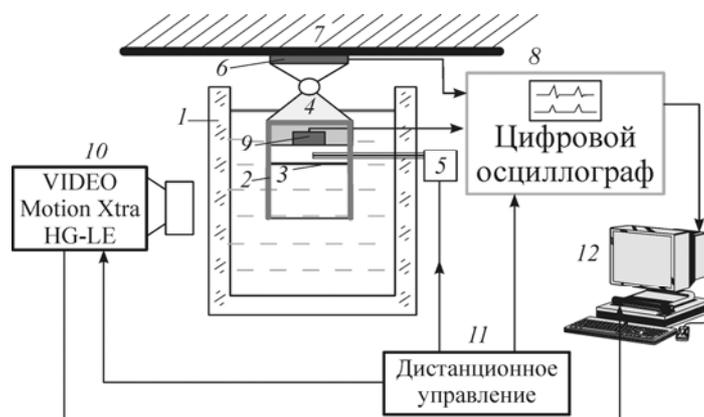


Рис. 1. Схема постановки экспериментов.

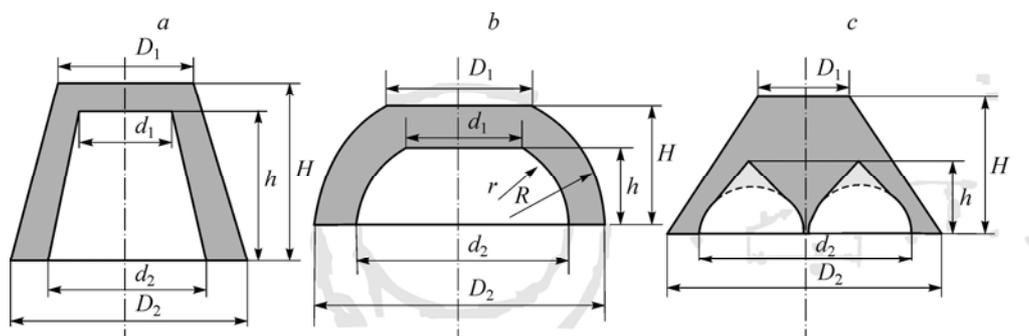


Рис. 2. Схемы испытанных макетов открытых камер сгорания.

a — конический или цилиндрический ствол, *b* — сфероидальная камера, *c* — кольцевая камера.

В качестве рабочих камер для сжигания газа испытывались открытые камеры с начальными объемами газовой смеси различной формы: цилиндрические, конические, полусферические, кольцевые, плоские. На рис. 2 представлены продольные разрезы различных макетов камер сгорания с унификацией размерных параметров. Так, например, для размерных параметров усеченного конуса (рис. 2*a*) при условиях $D_1 = D_2 = D$, $d_1 = d_2 = d$ имеет место случай цилиндрической камеры и цилиндрического ствола. Варианты, представленные на рис. 2*b* и 2*c*, также имеют множество параметрических модификаций. Рассмотрим некоторые из них: конический или цилиндрический ствол, сфероидальная камера, кольцевая камера.

Результаты экспериментов

Наиболее полными и наглядными, представляющими возможность параметрических расчетов, являются данные экспериментов с цилиндрическими камерами [4, 5]. На рис. 3 показан пример теневой киносъемки гидродинамических процессов, происходящих при сжигании газа в цилиндрической камере. На запечатленных кадрах отражены основные моменты гидродинамических процессов, происходящих при сжигании газового заряда в цилиндрическом стволе с $d = 29$ мм, $D = 31$ мм, $h = 47$ мм.

На рис. 4 представлены осциллограммы импульсов силы для рассматриваемого макета при различных объемах газовых зарядов V_0 (см³). Из результатов киносъемок и измерения импульсов силы и давления в камере сгорания следует, что при сжигании одной порции газовой смеси на тяговой стенке генерируется несколько импульсов силы. Первый импульс генерируется за счет сгорания газа, а последующие — за счет пульсаций парогазовой полости в стволе. При этом наблюдается несколько пульсаций полости с периодами T_1, T_2, T_3, \dots . Отметим важный результат: в случаях, когда максимальный объем парогазового пузыря V_b превышает объем камеры сгорания V_c ($V_b > V_c$), последующие импульсы силы становятся незначительными (рис. 4*c*). Если объем камеры сгорания V_c больше максимального объема образуемого пузыря V_b ($V_b < V_c$), то генерируются последующие импульсы силы.

Для выявления механизма формирования последующих импульсов силы, действующих на тяговую стенку, синхронно осуществлялись измерения импульсов силы и давления в цилиндрической камере сгорания. На рис. 5 приведены примеры осциллограмм

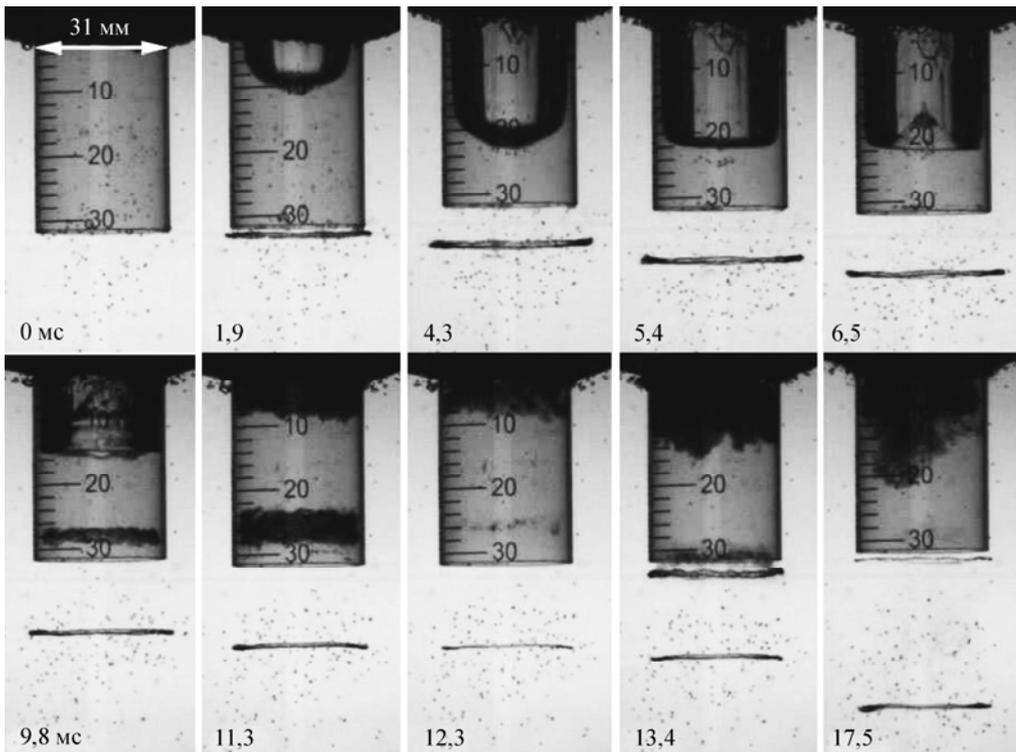


Рис. 3. Теневая кинограмма динамики процессов в камере и вне ее для газового заряда.

$$V_0 = 2 \text{ см}^3, d = 29 \text{ мм}, D = 31 \text{ мм}, h = 47 \text{ мм}.$$

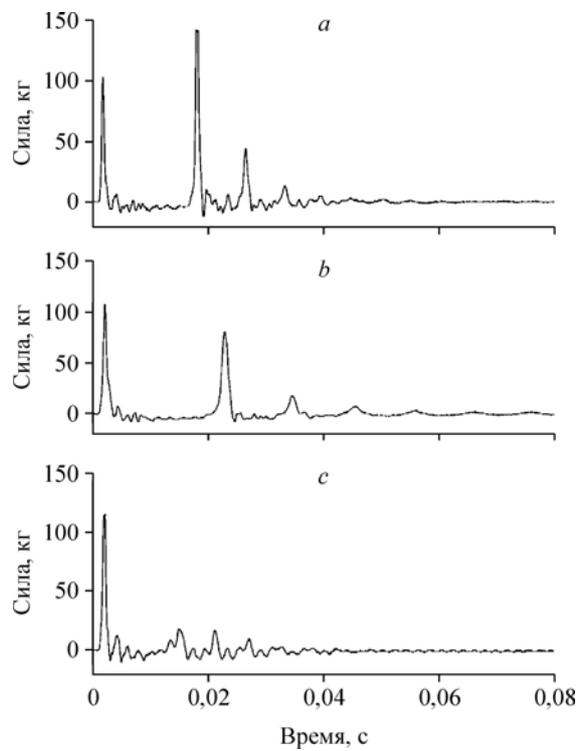


Рис. 4. Импульсы силы для различных начальных газовых зарядов V_0 .
 $d = 29 \text{ мм}, h = 47 \text{ мм}, V_0 = 1 \text{ (a)}, 3 \text{ (b)} \text{ мл}, V_0 > 3 \text{ мл (c)}.$

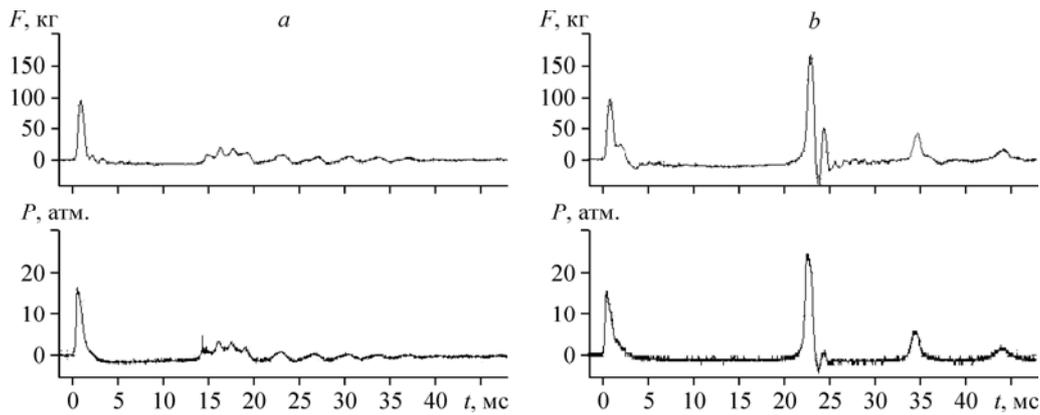


Рис. 5. Импульсы силы $F(t)$ и давления $P(t)$ в камере сгорания.

a — для случая $V_b > V_c$, b — для случая $V_b < V_c$.

импульсов силы $F(t)$ и давления $P(t)$ в камере сгорания, полученных одновременно при сжигании стехиометрической пропан-кислородной смеси в цилиндрических камерах сгорания. Осциллограммы, представленные на рис. 5а, соответствуют регистрации импульсов силы и давления газов в стволе при условии $V_b > V_c$. Осциллограммам на рис. 5б соответствуют условия эксперимента $V_b < V_c$. В этом случае максимальный размер пузыря достигал среза ствола, но газ не покидал его.

Для определения периода пульсации полости, образованной продуктами сгорания, проводились расчеты в адиабатическом приближении, которые сравнивались с измерениями периодов пульсаций пузыря в цилиндрических стволах различной длины. В работе [5] была получена теоретическая формула для расчета первого периода пульсации пузыря T_1 в цилиндрическом стволе в зависимости от внутренней длины ствола h . Экспериментальная ошибка измерения периодов не превышала 1 % для зарядов $V_0 = 1\text{--}3 \text{ см}^3$. Экспериментальные и расчетные зависимости для T_1 хорошо совпадают друг с другом.

Расчеты удельных импульсов

Важной характеристикой эффективности водных (и не только) двигателей является удельный импульс, равный отношению развиваемого импульса к массе сгоревшего топлива. Для вычисления удельного импульса проводилось интегрирование импульсов силы ($I_n = \int F(t)dt$) по данным измерений силы в интервале от момента инициирования до затухания пульсаций полости, но не более 50 мс. Полученные значения импульсов суммировались и делились на массу сгоревшей смеси m : $I_m = \Sigma I_n/m$. Для различных геометрий камер сгорания период пульсаций полости неодинаков, и затухание пульсаций происходит с разной скоростью, поэтому для корректного сравнения импульсов силы и удельных импульсов для разных камер сгорания расчеты проводились по схеме, представленной на рис. 6. Осциллограммы разбивались на четыре интервала: 1 — интервал $(t_0 - t_1)$ соответствовал генерации первого положительного импульса I_1 за счет создания давления сразу после сжигания газовой смеси; 2 — интервал $(t_1 - t_2)$ соответствовал отрицательной фазе импульса $I_{(-1)}$ в процессе пульсации полости; 3 — интервал $(t_2 - t_3)$ соответствовал положительной фазе импульса I_2 в момент коллапса полости вблизи тяговой стенки; 4 — интервал $(t_3 - t_4)$ соответствовал второй отрицательной фазе импульса $I_{(-2)}$ при второй пульсации полости. Не для всех видов камер третий положительный импульс I_3

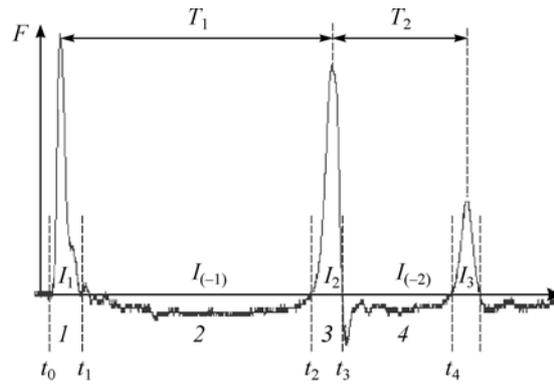


Рис. 6. Схема дифференциальной обработки импульса.
1, 2, 3, 4 — интервалы времени, описанные в тексте.

всегда присутствовал, поэтому для сравнительного анализа работы всех макетов он не включался в расчет.

На рис. 7 представлены примеры обработки осциллограмм по вышеприведенной схеме для зарядов газа $V_0 = 3 \text{ см}^3$ для варианта $V_b > V_c$, (рис. 7a) и для варианта $V_b < V_c$ (рис. 7b). По оси абсцисс номера 1–4 соответствуют отрезкам осциллограмм в соответствии со схемой рис. 6. Номер 5 соответствует сумме положительных и отрицательных импульсов силы (1–4) до момента t_4 . Номер 6 соответствуют интегралу всех импульсов до конца регистрируемой осциллограммы (~ 50 мс). Из рис. 7a и 7b наглядно следует, что условия $V_b > V_c$ существенно уменьшают суммарный импульс силы, действующей на тяговую стенку.

На рис. 8 представлены полученные на основе экспериментальных данных результаты расчетов удельных импульсов ($I_m = \Sigma \cdot I_n / m$) для различных макетов камер сгорания: левые (темные) столбцы — удельные импульсы для интервалов времени ($t_0 - t_4$), правые (светлые)

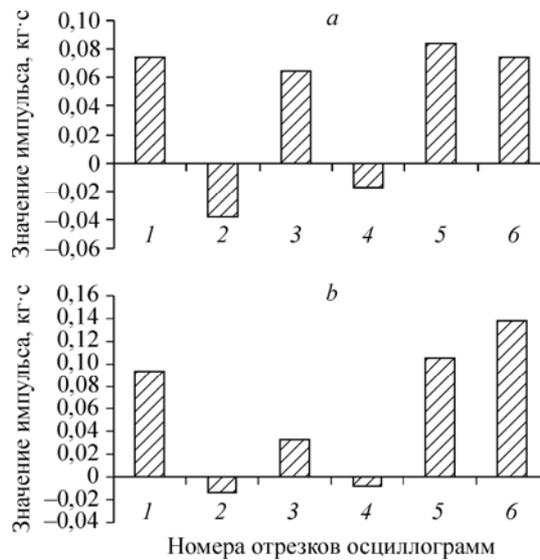


Рис. 7. Гистограммы импульсов силы.
 $V_0 = 3 \text{ см}^3$, $h = 27$ (a), 47 (b) мм.

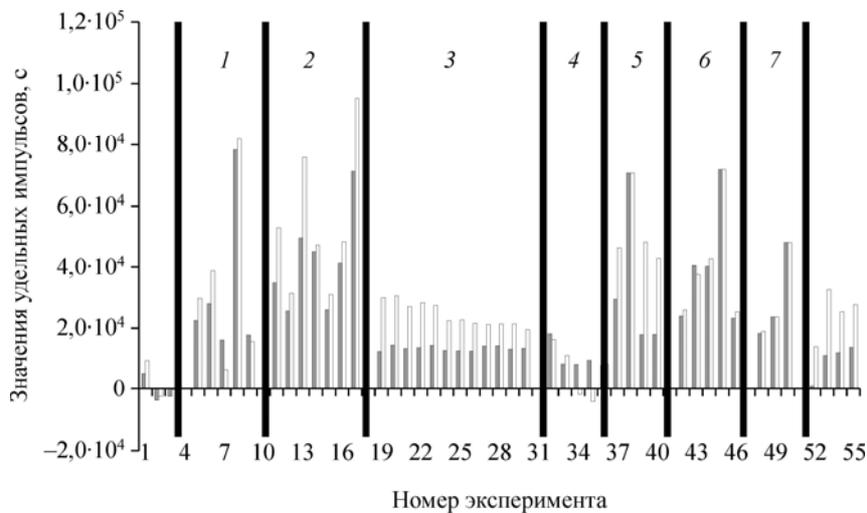


Рис. 8. Значения удельных импульсов для семи макетов камер сгорания.

столбцы — случаи полного интегрирования всех импульсов в интервале до 50 мс (для отрезка осциллограммы 6, рис. 7). По горизонтальной оси приведены номера экспериментов с присвоенными номерами макетов камер сгорания: 1 — цилиндр ($d_1 = d_2 = 29$ мм, $h = 47$ мм, рис. 2а); 2 — цилиндр ($d_1 = d_2 = 29$ мм, $h = 93$ мм, рис. 2а); 3 — кольцевой конус в цилиндре ($d_2 = 84$ мм, $D_1 = D_2 = 87$ мм, $H = 51$ мм, $h = 24$ мм, рис. 2с); 4 — усеченный конус с коническим корпусом ($d_2 = 56$ мм, $d_1 = 27$ мм, $D_2 = 58$ мм, $D_1 = 16$ мм, $H = 60$ мм, $h = 30$ мм, рис. 2с); 5 — усеченный конус в цилиндрическом корпусе ($d_2 = 56$ мм, $D_1 = D_2 = 62$ мм, $H = 120$ мм, $h = 30$ мм, рис. 2с); 6 — сегмент полусферы ($d_2 = D_2 = 52$ мм, $h = 9$ мм, $r = 40$ мм, рис. 2б); 7 — плоский диск диаметром $D = 99$ м. В данных расчетах за массу m принималась полная масса заряда пропан-кислородной смеси ($C_3H_8 + 5O_2$).

Из представленных результатов наглядно видно, что разброс измеряемых параметров в экспериментах значительный. Данное обстоятельство связано с неудовлетворительной повторяемостью процессов горения газовых зарядов ввиду их малых объемов. Несмотря на это, величина суммарных удельных импульсов находилась преимущественно в пределах 10^4 – 10^5 с (10^5 – 10^6 м/с). В отдельных экспериментах значения превышали 10^5 с. Предполагается, что в них обеспечивались условия перехода горения в режим детонации газа.

Динамические испытания

Из сравнения диаграмм рис. 7 следует, что для генерации эффективной тяги необходимо использовать все периоды пульсаций образованного пузыря, т.к. они обеспечивают увеличение удельного импульса для одного цикла сжигания газа. Для детального и наглядного выявления роли последующих импульсов силы на тяговые характеристики движителя были проведены динамические испытания работы такого движителя в варианте свободного движения вертикально из воды цилиндрического макета длиной 220 мм, диаметром 45 мм, весом 168 гр при сжигании 1,5–3 см³ стехиометрической пропан-кислородной смеси. В макете использовалась цилиндрическая камера сгорания диаметром $d = 29$ мм и высотой $H = 47$ мм. На рис. 9 представлены результаты экспериментов с регистрацией динамики подъема этого макета. Для камеры сгорания данного макета период первой пульсации пузыря T_1 составлял около 12 мс. Из рис. 9 следует, что первый импульс силы обеспечивает начальное перемещение макета в течение первых 7–8 мс,

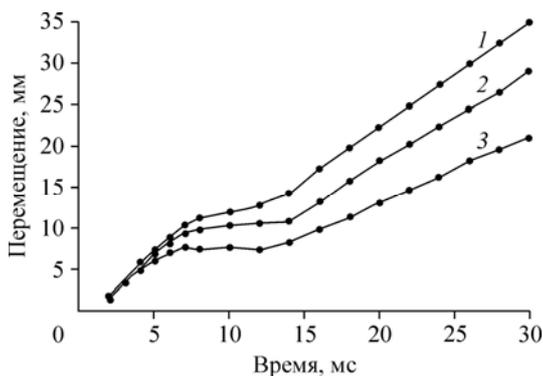


Рис. 9. Графики вертикального движения макета.

$d = 29$ мм, $h = 47$ мм, $V = 3$ (1), 2,5 (2), 1,5 (3) см³.

затем за счет импульса $I_{(-1)}$ происходит торможение, и, начиная с 13–14 мс, движение макета осуществляется за счет энергии последующих импульсов силы. Из приведенных графиков видно, что с увеличением газозаряда V_0 увеличивается скорость движения макета.

Анализ результатов

Учитывая, что при использовании цилиндрической камеры площадь тяговой стенки $S = \text{const}$, тягу $F(t)$ можно вычислять путем умножения площади поперечного сечения камеры на величину давления газа, измеряемого датчиком давления в камере сгорания. Эксперименты показали, что значения силы тяги, вычисленные по результатам измерения давления $F_p(t) = \Delta P(t) \cdot S$, превышают значения силы, измеренные непосредственно динамометром F_d . В среднем значения $(F_p - F_d)/F_p$ находились в пределах 0,15–0,3. Этот факт указывает на наличие потерь в системе, которые могут происходить за счет не учитываемых гидродинамических процессов. Следовательно, в случаях дробления образованного пузыря гидродинамические потери будут увеличиваться, при этом жидкость будет эффективно нагреваться.

Важными особенностями генерируемых импульсов силы является наличие последующих импульсов. Для цилиндрических камер сгорания регистрируемые импульсы силы позволяют судить о значениях давления внутри пузыря как для первого, так и для последующих импульсов. Последующие импульсы наблюдаются в случае, если максимальный объем образованного пузыря (V_b) не превышает объема используемого ствола (V_c). При $V_b > V_c$ пузырь «вылетает» из ствола и регистрируется только первый импульс, последующие импульсы являются незначительными по амплитуде и имеют стохастическую структуру (рис. 5a). Если выполняются условия $V_b < V_c$, то генерируются последующие импульсы силы (рис. 5b). Эти импульсы связаны с пульсациями образованного в камере пузыря, с периодами T_1, T_2, T_3, \dots . Причем второй положительный импульс соизмерим с первым, и наблюдались случаи превышения значений второго в сравнении с первым (рис. 5b). Как для цилиндрических, так и для конических камер имело место увеличение второго импульса. Этот эффект может возникать по двум причинам: первая — за счет конденсации паров при захлопывании пузыря, который был рассмотрен в работе [6], вторая — за счет увеличения скорости жидкости при обратном потоке в торец камеры сгорания. При этом наблюдается корреляция импульсов силы $F(t)$ и измеряемых значений давления $P(t)$ в камере (рис. 5). Эксперименты и расчеты показали, что начальные давления в пузыре находились в интервале 15–20 атм, что близко к режимам дефлаграционного горения при постоянном объеме.

Из общего анализа результатов измерений удельных импульсов (рис. 8) следует отметить варианты макетов 4 и 5: 4 — усеченный конус с коническим корпусом в виде воронки, 5 — усеченный конус в цилиндрическом корпусе. Из диаграмм рис. 8 следует, что от внешних геометрических параметров зависят параметры тяги. В первую очередь это связано с процессами на торце камеры. Если радиус кривизны в сечении истекающей из ствола жидкости мал, то на границе генерируются кавитационные кольца [7], это видно на рис. 3 (момент времени 1,9 мс.). Захлопывание пузыря сопровождается возвратным

течением жидкости, при этом кавитация возникает в стволе (см. фрагменты рис. 3, соответствующие 9,8–11,3 мс), и с последующим расширением пузыря генерируется второе кавитационное кольцо (фрагмент для 13,4 мс.). Подобные пограничные процессы способствуют существенным потерям тяги. Эти потери наиболее наглядно проявились для макета 4. Для их ликвидации необходимо увеличить радиус кривизны на срезе ствола и соотношение D_2/d_2 , что было сделано для варианта 5.

Из представленных результатов следует, что для задания циклов инъекций газов в систему целесообразно подавать последующую порцию газа после всех имеющих место импульсов силы. Использование последующих периодов пульсаций обеспечивает увеличение удельной тяги за один цикл сжигания топлива по сравнению с одним–двумя периодами. Эти особенности предопределяют параметры задания цикличности (T_c) подачи последующих порций горючего газа в камеру. При этом период первой пульсации T_1 задается параметрами камеры сгорания — продольными размерами, как, например, для цилиндрического ствола (рис. 7). Процесс циклической подачи порции газа с периодом T_c в камеру можно реализовать и на последующих периодах пульсаций пузыря, что обеспечит большую эффективность движителя. Имеет смысл рассматривать и более поздние моменты подачи топлива в систему с учетом генерации последующих импульсов силы, которые зависят от геометрических характеристик камеры сгорания.

Выводы

На основании проведенных экспериментальных исследований процессов генерации тяги при импульсном сжигании газа в воде в затопленных камерах сгорания получены следующие основные результаты.

1. Проведенные комплексные исследования процессов генерации тяги при импульсном сжигании газов в макетных камерах с одновременными измерениями силы тяги, давления и гидродинамических процессов показали, что получение удельных импульсов до 10^4 – 10^5 с (10^5 – 10^6 м/с) обеспечивается за счет использования последующих импульсов от пульсаций пузыря в камерах сгорания.

2. Для цилиндрических камер сгорания показано, что если продукты сжигания газа в процессе расширения пузыря вылетают из ствола, то последующие импульсы силы отсутствуют. В конических и сферических камерах наличие последующих импульсов силы зависит от соотношения D_2/d_2 и внешней геометрии камеры и тяговой стенки.

3. Показано, что для рассмотренных макетов движителей при условиях, когда максимальный объем образовавшегося пузыря (V_b) не превышает объем камеры сгорания (V_c), т.е. при $V_b < V_c$, генерируются два–три импульса силы с суммарным удельным импульсом $P_{уд} = 10^4$ – 10^5 с, а при $V_b > V_c$ последующие импульсы исчезают, что приводит к уменьшению величины удельного импульса за один цикл сжигания газа.

4. Результаты настоящей работы могут быть положены в основу как предварительные для разработки относительно простых пульсирующих «hydro-jet» движителей и устройств, использующих энергию скоростных гидродинамических потоков.

Авторы благодарны С.А. Ждану за полезные обсуждения работы.

Список литературы

1. Платонов А.В. Подводные лодки. СПб.: Полигон, 2002. 256 с.
2. Башкатов В.А., Орлов П.П., Федосов М.И. Гидрореактивные пропульсивные установки. Ленинград: Судостроение, 1977. 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.

4. Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Медведев Р.Н. Генерация импульсов силы и вихревых потоков при импульсном сжигании газа в воде // Тр. всеросс. конф. «XXXI-й Сибирский теплофизический семинар» (ISBN 978-5-89017-039-2). Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2014. С. 234–236.
5. Medvedev R.N., Drozhzhin A.P., Teslenko V.S. Thrust generation by pulse combustion of gas in a submerged chamber // Int. J. of Multiphase Flow. 2016. Vol. 83. P. 232–238.
6. Попов Е., Когарко С.М. Об одной особенности подводного взрыва газовых смесей // Физика горения и взрыва. 1976. № 4. С. 610–614.
7. Медведев Р.Н., Дрожжин А.П., Тесленко В.С. Порог образования кавитационных вихревых колец при истечении жидкости из затопленной трубы // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2015. № 1 (16). С. 86–89.

*Статья поступила в редакцию 3 марта 2017 г.,
после доработки — 28 марта 2017 г.*