

УДК 536.71

ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСОВ СИЛЫ И ВИХРЕВЫХ ПОТОКОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ СЖИГАНИИ ГАЗА В ВОДЕ

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

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований гидродинамических процессов, происходящих при сжигании газа в затопленном в воду цилиндрическом стволе, с измерениями импульсов силы на тяговую стенку. Показано, что за один цикл сжигания стехиометрической пропан-кислородной смеси генерируется два-три импульса силы с удельным импульсом $10^4 - 10^5$ сек.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в водном транспорте преимущественно применяются двигатели внутреннего сгорания (ДВС), бензиновые и дизельные, с винтовыми движителями. В последнее время в качестве топлива для ДВС стали использовать природный газ. Помимо уменьшения ресурса ДВС при использовании газового топлива, 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, эксплуатационные расходы на их обслуживание.

Применительно для водного транспорта предлагается к разработке принципиально новый метод импульсно-циклического сжигания природного газа непосредственно в воде на тяговой стенке с заданным профилем.

В данной работе представлены результаты исследований гидродинамических процессов, происходящих при сжигании газов в воде на границе с твердой стенкой в виде цилиндрического ствола. Постановка работы является развитием ранее предложенных подходов [1,2] применительно к разработке принципиально новых технологий для создания энерго-эффективных тепловых генераторов, подводных движителей, средств для очистки подводных частей судов и т.д.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На Рис. 1 представлена принципиальная схема постановки экспериментов. Прозрачный цилиндрический ствол (1), расположенный вертикально в воде (2), заполнялся горючей газовой смесью в торце ствола (3). Газовые заряды поджигались высоковольтной искрой. Сжиганием заданных порций газовой смеси обеспечивалось выталкивание столба воды из ствола, что обеспечивало генерацию импульсов силы на ствол, с передачей силы на динамометр (4). Динамометр крепился на горизонтальной жесткой балке (5). Регистрация импульсов силы на стенку осуществлялась на цифровом осциллографе TDS-210 с помощью динамометра (4) на базе пьезокерамики из цирконат-титаната свинца с диаметром 40 мм и

высотой 15 мм и эмиттерного повторителя с постоянной составляющей времени $\theta \approx 10$ сек. Киносъемка гидродинамических процессов осуществлялась при помощи цифровой камеры MotionXtra HG-LE. Дополнительно ставились эксперименты без упора, со свободным перемещением ствола. Регистрация поля скоростей в жидкости осуществлялась по трекам частиц из полистирола диаметром 100 мкм, с плотностью $1,05 \text{ г/см}^3$.

Эксперименты проводились для газовых зарядов из стехиометрической пропан-кислородной смеси ($\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2$) с объемами $V_0 = 0,5 - 3$ мл для стволов с внутренними диаметрами $d = 20, 29$ и 40 мм, с варьируемой длиной стволов $h = 27 - 108$ мм.

Для различных начальных объемов газовых зарядов измерялось поле скоростей жидкости вдоль оси и по сечению на срезе ствола.

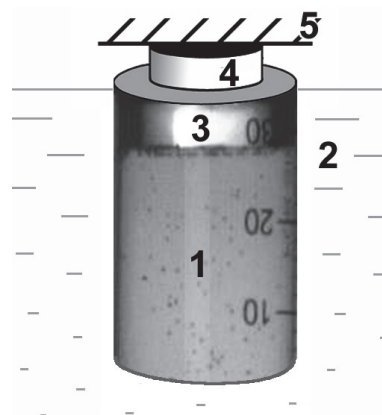


Рис. 1. Схема постановки экспериментов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На Рис. 2 представлен пример одной из осциллограмм импульсов силы, полученных при сжигании 3 мл стехиометрической пропан-кислородной смеси в стволе с внутренним диаметром 29 мм, длиной 108 мм.

На Рис. 3 представлен пример теневой киносъемки гидродинамических процессов происходящих при сжигании газа ($V_0 = 1$ мл) в цилиндрическом стволе длиной $h = 47$ мм, с внутренним диаметром $d = 29$ мм и внешним диаметром $D = 31,3$ мм. Данная кинограмма представлена для варианта со свободным перемещением ствола, что и отслеживается на представленных кинокадрах.

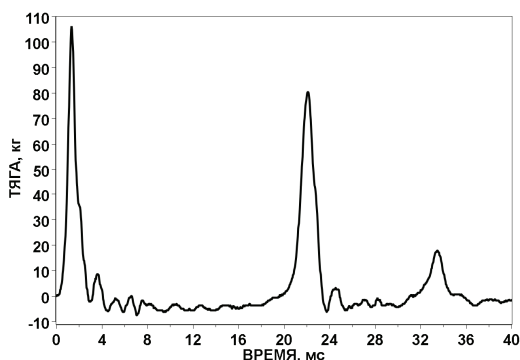


Рис. 2. Импульсы силы на тяговую стенку при сжигании 3 мл пропан-кислородной смеси в трубе; диаметр трубы равен 29 мм, длина – 108 мм.

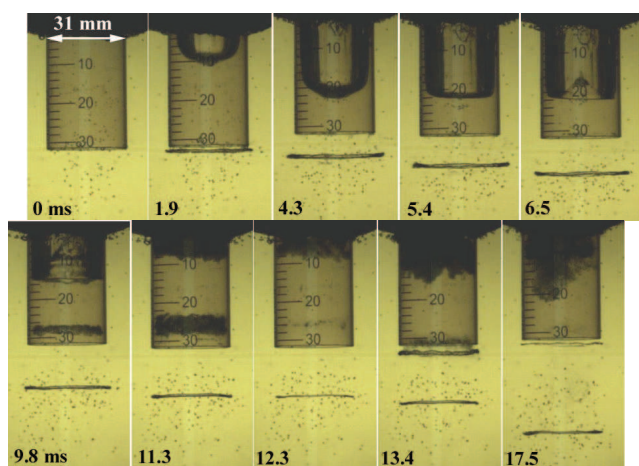


Рис. 3. Теневая кинограмма динамики процессов в стволе и вне ствола для газового заряда $V = 1,0$ мл, $d = 29$ мм, $h = 47$ мм.

Из результатов киносъемки и измерения импульсов силы на тяговую стенку следует, что для различных объемов сжигаемого пузыря с горючим газом на тяговой стенке генерируется несколько импульсов силы (Рис.2) за один цикл сжигания газовой смеси. Первый импульс соответствует расширению пузыря после сгорания газа в пузыре, а последующие импульсы соответствуют гидродинамическим процессам при пульсациях образованного пузыря в стволе.

Отметим основные особенности гидродинамических процессов для данной постановки экспериментов. Так для малых зарядов фронт пузыря в стволе овальный, как на Рис 3. При захлопывании такого пузыря наблюдается образование кумулятивной струи (Рис. 3, 6,5 мс). Можно предполагать, что овальность фронта пузыря связана с трением на стенке. С увеличением газового заряда фронт расширяющегося пузыря более плоский. При захлопывании пузыря в стволе вблизи среза возникает кавитация. Например, для Рис. 3 это соответствует временам 9,8-12,3 мс.

Из представленной кинограммы наглядно следует, что в процессе истечения столба жидкости из ствола наблюдается генерация кавитационных вихревых колец (КВК). Скорость потока воды на срезе ствола, при которой начинали обнаруживаться кавитационные процессы в виде колец была в интервале 2-3 м/сек. Этот порог соответствовал числам Рейнольдса $Re_1 = v_0 \cdot d / \nu > 2 \cdot 10^4$

(здесь v_0 – скорость водяного поршня на срезе цилиндра, ν – вязкость воды при температуре 25° С). С увеличением скорости метания водяного поршня, т.е. с увеличением газового заряда, регистрировались КВК в виде пульсирующего тора. Подобные процессы наблюдались и для последующих пульсаций пузыря в стволе (на Рис.3 это 13,4 и 17, 5 мс), т.е. при каждом коллапсе пузыря на торце ствола.

Особенности наличия второго и третьего импульсов силы обеспечивают повышение суммарной удельной тяги за один цикл сжигания газа в стволе.

Важным параметром для оценки различных движителей является параметр удельной тяги:

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

где F – величина силы, m – масса топлива.

Обработки импульсов 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 длины ствола.

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ

Постановка задачи показана на рис. 4. Толстыми линиями изображена труба с закрытым торцом, который являлся тяговой стенкой. R и h – радиус и высота трубы соответственно ($R=d/2$), l – длина цилиндрического пузыря. Толщина трубы предполагалась пренебрежимо малой по сравнению с радиусом. Жидкость предполагалась идеальной и несжимаемой, течение предполагалось потенциальным.

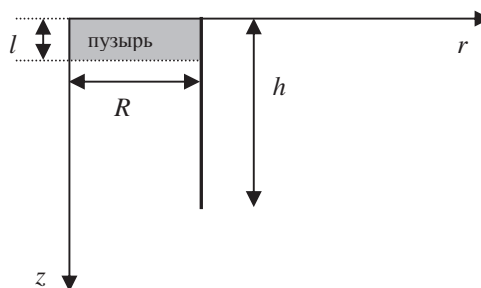


Рис. 4. Математическая постановка задачи о пульсации пузыря в трубе.

Численным моделированием было найдено поле скоростей в жидкости. Для этого численно решалось уравнение Лапласа для потенциала скорости в цилиндрической геометрии с осевой симметрией относительно оси z (r – расстояние от оси z). Далее находили кинетическую энергию жидкости внутри трубы и во всем объеме.

Результаты показали, что в постановке длинной трубы (длина трубы много больше длины пузыря) основная доля кинетической энергии принадлежит столбу жидкости внутри трубы. Таким образом, для приближенных расчетов объем жидкости снаружи трубы можно не учитывать. С учетом этого можно записать закон сохранения энергии:

$$E = K + A + W = const \quad (1)$$

где K – кинетическая энергия жидкости (в нашем приближении $K \approx \frac{\pi \rho R^2 \dot{l}^2 (h-l)}{2}$), $A = P_a \cdot \pi R^2 (l-l_0)$ – работа по расширению пузырька, W – внутренняя энергия пузырька (в случае идеального газа $W = \frac{P \pi R^2 l}{\gamma - 1}$).

Здесь l_0 – начальный размер пузыря, P_0 – начальное давление внутри пузыря, P_a – давление в окружающей жидкости ($P_0 > P_a$), ρ – плотность жидкости, γ – показатель адиабаты газа в пузырьке. Будем предполагать, что теплообмен на границе пузыря отсутствует. Тогда давление в пузырьке будет определяться выражением $P = P_0 (l_0 / l)^\gamma$ (2)

В начальный момент времени K и A равны нулю, таким образом $E = \frac{P_0 \pi R^2 l_0}{\gamma - 1}$ (вся энергия сосредоточена во внутренней энергии пузырька). Подставляя это выражение в (1), выражая давление по формуле (2) и сокращая площадь сечения трубы πR^2 , получаем следующее соотношение:

$$\frac{P_0 l_0}{\gamma - 1} = \frac{\rho (h-l) \dot{l}^2}{2} + (l-l_0) P_a + \frac{P_0 l}{\gamma - 1} \left(\frac{l_0}{l} \right)^\gamma \quad (3)$$

(считаем, что γ не изменяется заметным образом при расширении пузыря). Выражая из соотношения (3) скорость роста пузырька, получаем:

$$\frac{dl}{dt} = \sqrt{\frac{2}{\rho (h-l)} \left(\frac{P_0 l_0}{\gamma - 1} - \frac{P_0}{\gamma - 1} \frac{l_0^\gamma}{l^{\gamma-1}} - (l-l_0) P_a \right)}. \quad (4)$$

Из этого выражения можно найти период пульсации пузыря, перенося dt в правую часть и интегрируя:

$$T = \sqrt{2\rho} \int_{l_0}^{l_{\max}} \frac{\sqrt{h-l}}{\sqrt{\frac{P_0 l_0}{\gamma - 1} - \frac{P_0}{\gamma - 1} \frac{l_0^\gamma}{l^{\gamma-1}} - (l-l_0) P_a}} dl, \quad (5) \text{ где}$$

$l_{\max}$ – максимальный размер пузыря (должно выполняться $l_{\max} < h$).

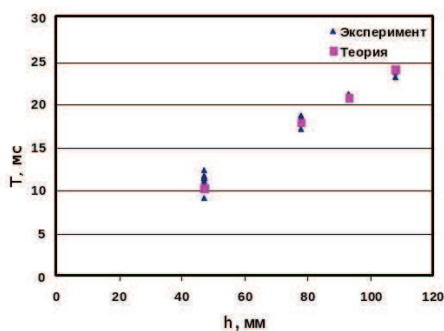


Рис. 5. Зависимость экспериментальных и расчетных значений периода пульсаций пузыря T от длины ствола h для различных начальных газовых зарядов, $V=1-3$ мл.

Интеграл в (5) не находится аналитически. Численное интегрирование показывает, что период примерно пропорционален длине трубы h .

Рассчитанные значения первого периода пульсаций хорошо согласуются с экспериментальными измерениями периодов пульсаций пузыря в стволе (Рис. 5).

Оценим импульс p , приобретаемый трубой при росте пузыря. Он будет равен $p = \pi R^2 \int (P - P_a) dt$. Видно, что интеграл имеет максимум в момент времени, когда $P = P_a$. В этот момент $l = l_a = l_0 \left(\frac{P_0}{P_a} \right)^{1/\gamma}$. Выражая время

по формуле (4) и давление из (2), подставляя в качестве верхнего предела интегрирования l_a , получим выражение для максимального импульса:

$$p_{\max} = \pi R^2 l_0 \sqrt{\frac{P_a \rho}{2}} \int_1^{\tilde{l}} (\tilde{P}_0 \tilde{l}^{-\gamma} - 1) \sqrt{\frac{\tilde{h} - \tilde{l}}{\frac{\tilde{P}_0}{\gamma - 1} (1 - \tilde{l}^{1-\gamma}) - \tilde{l} + 1}} d\tilde{l}, \quad (8)$$

где $\tilde{P}_0 = \frac{P_0}{P_a}$, $\tilde{l} = \frac{l}{l_0}$, $\tilde{h} = \frac{h}{l_0}$. Интеграл в (8) не имеет аналитическую первообразную, его можно приближенно аппроксимировать зависимостью $\sqrt{\tilde{h}} (3,2\sqrt{\tilde{P}_0} - 3,6)$. Таким образом:

$$p_{\max} \approx R \sqrt{\frac{\pi P_a \rho h V_0}{2}} (3,2\sqrt{\tilde{P}_0} - 3,6), \quad (9)$$

где $V_0 = \pi R^2 l_0$ – объем выдуваемого газа.

Сравнение полученного выражения для импульса (9) с экспериментальными результатами (Рис. 2-3) показывает хорошее соответствие при $\tilde{P}_0 = 20 - 25$, что соответствует режиму дефлаграционного горения при постоянном объеме, исходя из данных, приведенных в [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты указывают на перспективы разработки недорогих и высоко эффективных подводных двигателей на основе сжигания углеводородов непосредственно в воде на тяговой стенке.

Устройства подобного типа, с генерацией кавитационных вихревых колец (КВК), могут быть использованы для очистки подводных частей судов.

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

Список литературы:

1. Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Медведев Р.Н. Сжигание горючих газов в воде в кольцевых пузырях // СОВРЕМЕННАЯ НАУКА: исследования, идеи, результаты, технологии, Киев, 2013г. № 1(12), с. 302-305.
2. 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
3. Васильев А.А. Энергетические аспекты инициирования бытовых газов // Физика горения и взрыва, 2008. Т. 45. № 1. С. 96-101.