

# ПУЛЬСАЦИИ ПОЛОСТИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ СЖИГАНИИ ГАЗА В ЗАТОПЛЕННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

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

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
г. Новосибирск, ruslan@hydro.nsc.ru*

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований гидродинамических процессов, происходящих при сжигании газа в затопленной в воду вертикальной цилиндрической трубе. В результате приближенного расчета получено выражение для периода пульсации газовой полости, который пропорционален длине трубы и слабо зависит от объема сжигаемого газа.

The results of experimental and theoretical investigations of hydrodynamic processes occurring during gas combustion in a vertical cylindrical tube immersed into water are presented. In result of average calculation the expression of period of cavity pulsations was obtained which is proportional to the tube length and weakly depends on the volume of combustible gas.

## Введение

В настоящей работе предлагается принципиально новый метод импульсно-циклического сжигания природного газа непосредственно в воде на тяговой стенке с заданным профилем. Он позволяет существенно сократить потери механической энергии, объединить в одном устройстве двигатель и движитель, а также существенно упростить конструкцию силовой установки для водного транспорта.

В работе [1] показано, что сжигание пузыря вблизи жесткой стенки обеспечивает создание тяги, направленной по нормали к поверхности стенки. В описываемой работе пузырь имел форму тора и располагался на поверхности горизонтальной стенки. Один из способов увеличения удельного импульса заключается в создании цилиндрического сопла, препятствующего движению полости и окружающей жидкости в боковом направлении. В данной работе проводилось сжигание горючей газовой смеси в вертикальной цилиндрической трубе (рис. 1).

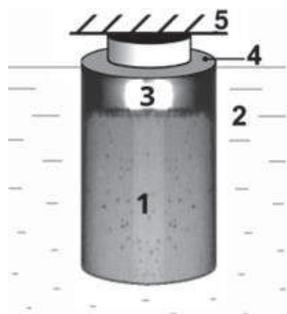


Рис. 1. Схема постановки экспериментов

Важным параметром, определяющим область конечного применения разрабатываемой

технологии, является максимальная частота циклов сжигания, которая определяется периодом пульсации полости, содержащей продукты сгорания. В экспериментах после первой пульсации полость распадается на облако мелких пузырьков, которые продолжают синхронно пульсировать, создавая импульсы силы на тяговую стенку [1, 2]. Оценка периода пульсации позволит определить максимально возможную частоту работы импульсного гидрореактивного движителя и максимальную тягу, достижимую им.

### Постановка экспериментов

На рис. 1 представлена принципиальная схема постановки экспериментов. Прозрачная цилиндрическая труба 1, расположенная вертикально в воде 2, заполнялась горючей газовой смесью 3 в торцевой части трубы. Газовые заряды поджигались высоковольтной искрой. Сжигание заданных порций газовой смеси приводило к выталкиванию столба воды из трубы и генерации импульсов силы на тяговую стенку 4. Труба 1 крепилась на горизонтальной жесткой балке 5, в некоторых экспериментах балка 5 отсутствовала, позволяя трубе свободно перемещаться. Киносъемка гидродинамических процессов осуществлялась при помощи цифровой камеры MotionXtra HG-LE.

Эксперименты проводились для газовых зарядов из стехиометрической пропан-кислородной смеси ( $C_3H_8 + 5 \cdot O_2$ ) объемом  $V = 0,5 \dots 3$  мл для трубы с внутренними радиусами  $R = 10, 14,5$  и  $20$  мм и варьируемой длиной  $h = 27 \dots 108$  мм.

### Результаты

На рис. 2 представлен пример теневой киносъемки гидродинамических процессов, проходящих при сжигании газа ( $V = 1$  мл) в цилиндрической трубе длиной  $h = 47$  мм с внутренним радиусом  $R = 14,5$  мм.

### Численный расчет

Так как период пульсаций полости составляет несколько миллисекунд, предполагалось, что за это время не происходит существенного теплообмена с окружающей средой, поэтому расчет проводился в адиабатическом приближении.

Толщина трубы предполагалась пренебрежимо малой по сравнению с радиусом, жидкость – идеальной и несжимаемой, течение – потенциальным, трение жидкости о стенку трубы – несущественным.

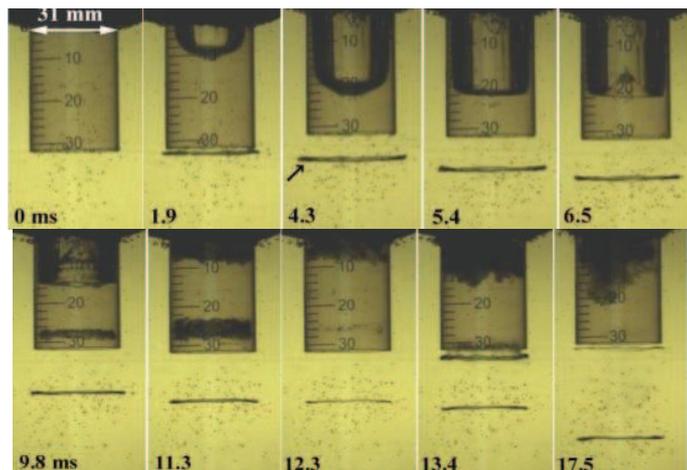


Рис. 2. Теневая кинограмма динамики процессов в трубе и вне трубы для газового заряда,  $V = 1,0$  мл,  $R = 14,5$  мм,  $h = 47$  мм

Результаты численного расчета поля скоростей в жидкости показали, что в постановке длинной трубы ( $h \gg l$ ,  $l$  – длина цилиндрической полости) основная доля кинетической энергии принадлежит столбу жидкости внутри трубы. Например, при отношении  $l/h = 0.4$  в трубе сосредоточено 90 % кинетической энергии, а при  $l/h = 0.8$  – 74 %. Таким образом, для приближенных расчетов движение жидкости снаружи трубы можно не учитывать. Тогда кинетическую энергию жидкости легко определить, зная размер полости и скорость ее границы.

С учетом полученного результата можно рассчитать период пульсации цилиндрической полости. Он будет равен

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

где  $l_0$  – начальный размер полости;  $l_{\max}$  – максимальный размер полости (должно выполняться условие  $l_{\max} < h$ );  $P_0$  – начальное давление в полости;  $P_a$  – давление в окружающей жидкости ( $P_0 > P_a$ );  $\rho$  – плотность жидкости;  $\gamma$  – показатель адиабаты продуктов сгорания ( $\approx 1.2$  для случая пропан-кислородной смеси).

Зная  $l_{\max}$ , можно определить начальное давление в полости, соответствующее моменту, когда смесь полностью сгорела ( $\approx 1$  мс):

$$\frac{P_0}{P_a} = (\gamma - 1) \frac{\tilde{l}_{\max} - 1}{1 - \tilde{l}_{\max}^{1-\gamma}}. \quad (2)$$

Анализ кинограмм пульсаций полости в трубе дает относительный максимальный размер  $\tilde{l}_{\max} = l_{\max} / l_0 \sim 15 \dots 20$ . По формуле (2) относительное начальное давление получается равным  $P_0/P_a \sim 7 \dots 9$ .

Рассчитанные значения первого периода пульсаций представлены на рис. 3. Для расчета использовались значения  $\tilde{l}_{\max}$ , полученные из эксперимента. Видно, что расчетные значения хорошо согласуются с экспериментальными измерениями периодов пульсаций продуктов сгорания в трубе.

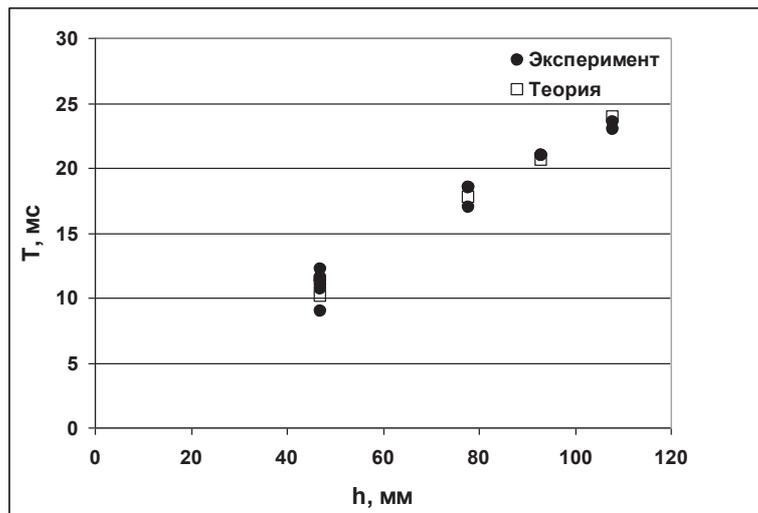


Рис. 3. Зависимость экспериментальных и расчетных значений первого периода пульсаций полости  $T$  от длины трубы  $h$  для различных начальных газовых зарядов,  $V = 1 \dots 3$  мл

### Выводы

Получено приближенное выражение для периода пульсации газовой полости в цилиндрической трубе. Показано, что динамика пульсаций определяется столбом жидкости внутри трубы. Хорошее соответ-

стве расчетных и экспериментальных значений говорит об адекватной постановке теоретической задачи.

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

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Медведев Р.Н. Сжигание горючих газов в воде в кольцевых пузырях // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – № 1(12). – Киев, 2013. – С. 302–305.

## ТВЕРДОТОПЛИВНЫЕ ПГУ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ГАЗИФИКАЦИЕЙ УГЛЯ

**Н.В. Миронова**

*Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, mironovaNina@inbox.ru*

Рассмотрена перспективная для энергетики технология газификации кавитационного жидкоугольного топлива (КЖТ), определены параметры газификации КЖТ, получены конструктивные характеристики газификатора «Тексако» и котла-утилизатора.

Advanced power engineering technology of Cavitation Fuel Oil (CFO) was considered, gasification parameters of the cavitation fuel oil were defined, design arrangement's characteristics of the Texaco gasifier and boiler-utilizer were obtained.

Внедрение и использование парогазовых технологий является одним из перспективных направлений в развитии энергетики страны. Однако, в условиях сложной энергетической ситуации в мире, связанной с ростом цен на природный газ, возникает необходимость разработки установок, работающих на твердом топливе.

Создание и внедрение парогазовых установок, работающих на угле на основе технологии газификации, позволяют повысить КПД парогазовой установки в конденсационном режиме до 45...55 %, обеспечивают эффективное использование угольного топлива, высокие технико-экономические и экологические показатели ТЭЦ [4].