

УДК 544.01

ОБРАЗОВАНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ВОДЯНОЙ СТРУИ ЧЕРЕЗ СОПЛО ЛАВАЛЯ

¹Ысламидинов А.Ы., ¹Абдалиев У.К., ^{1,2,3}Ташполотов Ы.

¹Институт природных ресурсов Южного отделения Национальной академии наук Кыргызской Республики, e-mail: itashpolotov@mail.ru;

²Ошский государственный университет, Ош;

³Ошский государственный социальный университет, Ош

Представлены результаты экспериментальных исследований кавитационных пузырьков (КП) при прохождении водной струи через сопло Лавалья с соответствующими диаметрами 15 мм (вход) и 1 мм (выход сопла) и длиной 35 мм. Установлено, что интенсивность образования КП происходит при скоростях струи более 20 м/с.

Ключевые слова: кавитация, кавитационная зона, сопло Лавалья, пузырьки, гидродинамическая паток

EDUCATION OF CAVITATION BUBBLES WHEN PASSING THROUGH A LAVAL NOZZLE WATER JET

²Islamidinov A.I., ¹Abdaliev U.K., ^{1,2,3}Tashpolotov I.

¹Institute of natural resources in the southern branch of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, e-mail: itashpolotov@mail.ru;

²Osh State University, Osh;

³Osh State social University, Osh

The results of experimental research of cavitation bubbles (CB) when passing through a Laval nozzle water jet with the respective diameters of 15 mm (inlet) and 1 mm (outlet nozzle) and a length of 35 mm is presented. Found that the rate of generation of CB occurs when Jet speeds of more than 20 m/s.

Keywords: cavitation, cavity area, Laval nozzle, bubbles, hydrodynamic patok

Теоретическое рассмотрение кавитации пузырьков в жидкости восходит еще ко времени Рэлея [2]. К теме пузырькового синтеза научное сообщество вернулось после публикации статьи [4]. Физические процессы, происходящие при взаимодействии пузырьков являются интересными и достойными для научных исследований сложных процессов при схлопывании отдельного пузырька [1]. Как известно, кавитационные пузырьки (КП) образуются в тех местах, где давление жидкости становится некоторого критического значения $p_{кр}$ (в реальной жидкости $p_{кр}$ приблизительно равно давлению насыщенного пара этой жидкости при данной температуре). Если понижение давления происходит вследствие больших местных скоростей в потоке движущейся капельной жидкости, то кавитация называется гидродинамической.

Для идеальной однородной жидкости вероятность образования пузырьков за счет разрыва жидкости становится заметной при больших растягивающих напряжениях так, например, теоретическая прочность на разрыв воды равна $1,5 \cdot 10^8$ Па (1500 кгс/см²) [4]. Максимальное растяжение тщательно очищенной воды, достигнутое при растяжении воды при 10°C , составляет $2,8 \cdot 10^7$ Па, так как реальные жидкости менее прочны. Обычно

же разрыв возникает при давлениях, лишь немного меньших давления насыщенного пара. Низкая прочность реальных жидкостей связана с наличием в них, так называемых кавитационных зародышей: микроскопических газовых пузырьков, твердых частиц с трещинами, заполненными газом и другие. Мельчайшие пузырьки газа или пара, двигаясь с потоком и попадая в область давления $p < p_{кр}$, сильно расширяются в результате того, что давление содержащегося в них пара и газа оказывается больше, чем суммарное действие поверхностного натяжения и давления в жидкости. В результате на участке потока с пониженным давлением создается довольно четко ограниченная «кавитационная зона», заполненная движущимися пузырьками, рис. 1.

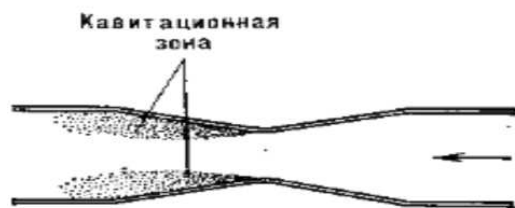


Рис. 1. Образование кавитационной зоны в сопле Лавалья

Для характеристики течения с кавитацией применяется безразмерный критерий α , называемый числом кавитации и равный [2]:

$$\alpha = \frac{2(p - p_n)}{\rho v^2},$$

где p – гидростатическое давление набегающего потока, p_n – давление насыщенного пара, v – скорость жидкости при достаточном удалении от тела, ρ – плотность жидкости.

Обычно число кавитации α определяют на входе в тот или иной агрегат, внутри которого возможно возникновение кавитации. Значение α , при котором в системе начинается кавитация, называется критическим числом кавитации.

Скорость потока воды из сопла Лавалья, при которой начинают наблюдаться кавитационные процессы на выходе сопла Лавалья были в интервале $v = 20\text{--}30$ м/с. Экспериментальные исследования процессы образования кавитационных пузырьков (КП) при прохождении водяной струи через сопло Лавалья проведены с соплом Лавалья с соответствующими диаметрами 15 мм (вход) и 1 мм (выход сопла) и длиной 35 мм. Для рассматриваемого сопла Лавалья порог наблюдения кавитации соответствовал числам Рейнольдса

$$Re = v_0 d_0 / \nu \geq 2 \cdot 10^4,$$

где ν – вязкость воды при температуре 25 °С. При дальнейшем увеличении скорости водяной струи обеспечивается формирования устойчивых КП в виде кавитационной нити типа «ожерелья» из пузырьков, с разрывами между пузырьками.

Порог возникновения кавитации можно оценивать по параметру кавитационного числа на основании закона Бернулли α [2, 4]

$$\alpha = p_0 / \rho v^2 \quad (1)$$

Здесь p_0 – гидростатическое давление, v – скорость потока жидкости. В нашем случае $\alpha = 25\text{--}26$.

По параметрам скорости струи из сопла, выявлены пороговые параметры кавитационных процессов и образования устойчиво пульсирующих КП. В эксперименте кавитационные пузырьки образовывались как с добавками углеводородного топлива, так и в чистой воде. Существенного различия в динамике образования КП в чистой воде и с частицами топлива не обнаружено. Таким образом, разработан относительно простой метод генерации КП в воде с помощью сопла Лавалья при пропускании воды через сопла со скоростью более $v = 20$ м/с и числом Рейнольдса $Re \geq 20000$ с кавитационным числом $\alpha = 25\text{--}26$.

Изучение коэффициента кавитации (число кавитации) при пропускании через сопло Лавалья можно описать с помощью понятий «вход» и «выход». Тогда процесс коэффициент кавитации пузырьков может быть успешно исследован на основе общей теории синергетики [3]. Процесс образования кавитационных пузырьков после прохождении воды через сопло Лавалья состоит из следующих двух процессов:

- подача воды – **вход** (подвод воды к сопло Лавалья);
- прохождение водяной струи через сопло Лавалья под действием гидродинамического давления – **выход** (выход воды через сопло и образование пузырьков).

Тогда эффективность коэффициента кавитации водяной струи при прохождении водяного потока через сопло Лавалья можно выразить в виде:

$$\alpha = \frac{\text{ВЫХОД}}{\text{ВХОД}}. \quad (2)$$

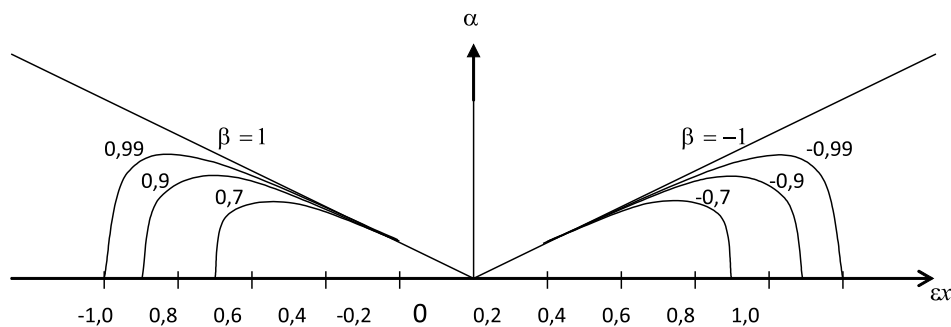


Рис. 2. График зависимости эффективности коэффициента кавитации водяной струи при прохождении воды через сопло Лавалья под действием гидродинамического потока воды от ϵx

Пусть вход потоковой системы характеризуется потоком I_e и обобщенной силой X_e , а выход потоком I_i и обобщенной силой X_i . Общую связь между термодинамическими потоками и силами для необратимых процессов можно записать в виде уравнения Онзагера:

$$I_k = L_{ki} X_i \quad (3)$$

где L_{ki} – феноменологические коэффициенты или коэффициенты Онзагера.

Здесь коэффициенты L_{ki} характеризуют взаимосвязь процесса k с процессом i . В термодинамике неравновесных процессов для феноменологических коэффициентов выводится соотношение взаимности Онзагера, которое утверждает, что матрица коэффициентов $\{L_{ki}\}$ в выражении (3) является симметричной, т.е. перекрестные коэффициенты равны между собой: $L_{ki} = L_{ik}$.

Это означает, что имеется некоторая симметрия во взаимодействии различных процессов: возрастание потока I_k обусловленное увеличением на единицу силы X_i , равно возрастанию потока I_i , обусловленному увеличением на единицу X_k .

На практике обычно используются не просто коэффициенты L_{ik} , а некоторые пропорциональные им величины, так, например, коэффициент вязкости, теплопроводности и др.

Тогда эффективность коэффициента кавитации водяной струи при прохождении воды через сопло Лавала примет вид:

$$\alpha = \frac{\text{ВЫХОД}}{\text{ВХОД}} = -\frac{I_i X_i}{I_e X_e}, \quad (4)$$

где I_e – гидродинамический поток воды на входе, I_i – гидродинамический поток кавитационных пузырьков на выходе сопла Лавала, знак «-» в этом соотношении показывает существенное знаковое отличие входящих и выходящих потоков воды через сопло: $I_i X_i > 0$, и $-I_e X_e > 0$.

Применительно к процессам с неравновесным (нестационарным) прохождением воды через сопло Лавала водяные потоки связаны между собой следующим образом:

$$I_i = L_{ii} X_i + L_{ie} X_e \quad (5)$$

$$I_e = L_{ei} X_i + L_{ee} X_e \quad (6)$$

Подставляя (5) и (6) в (4) получим для двухпотоковой системы:

$$\alpha = -\frac{L_{ii} X_i^2 + L_{ie} X_e X_i}{L_{ei} X_i X_e + L_{ee} X_e^2}. \quad (7)$$

Умножим числитель и знаменатель в (7) на

$$\frac{1}{\sqrt{L_{ii} L_{ee} X_i X_e}}.$$

Тогда выражение (7) примет вид:

$$\alpha = -\frac{\varepsilon x + \beta}{\frac{1}{\varepsilon x} + \beta}, \quad (8)$$

где $\beta = \pm \frac{L_{ie}}{\sqrt{L_{ii} L_{ee}}}$ и $\varepsilon = \pm \sqrt{\frac{L_{ii}}{L_{ee}}}$ – управляющие параметры; $x = \frac{X_i}{X_e}$ – параметр порядка.

Значения εx и β лежат в пределах:

$$-1 \leq \varepsilon x \leq 1, \quad -1 \leq \beta \leq 1, \quad \text{тогда } 0 \leq \alpha \leq 1.$$

График зависимости $\alpha = f(\varepsilon x)$ имеет вид (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что эффективное значение коэффициента кавитации водяной струи, кроме $\beta = \pm 1$, принимает максимальное значение только для фиксированного значения εx .

Из условия экстремума функции $\frac{d\alpha}{d(\varepsilon x)} = 0$ следует, что максимальное значение α_{\max} при заданном значении εx равно:

$$\frac{\varepsilon x}{\alpha_{\max}} = \frac{\sqrt{1 - \beta^2} - 1}{\beta}. \quad (9)$$

Список литературы

1. Говердовский А.А. О перспективах термоядерной энергетики на основе кавитации пузырей / А.А. Говердовский, З.С. Имшенник, В.П. Смирнов. – УФН, 2013, т. 183. – С. 445–448.
2. Кнэпп Р. Кавитация: Пер. с англ. / Р. Кнэпп, ДЖ. Дэйли, Ф. Хэммит. – М.: Мир, 1974. – 687 с.
3. Пригожин И. От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках / Перевод с англ. / Изд.3-е/Синергетика: от прошлого к будущему. – М.: Ком-книга, 2006. – 296 с.
4. Taleyarkhan R., West C., Cho J., Lahey R., Nigmatulin R., Block R. (2002). Evidence for Nuclear Emissions During Acoustic Cavitation. Science, 295(5561), 1868–1873.