

## Неравновесные процессы и образования кавитационных пузырьков при прохождении водяной струи через сопло Лавалья

Ысламидинов А.Ы<sup>1</sup>., Ташполотов Ы<sup>1,2,3</sup>., Абдалиев У<sup>1</sup>.

1-Институт природных ресурсов Южного отделения Национальной академии наук Кыргызской Республики; 2-Ошский государственный университет; 3-Ошский государственный социальный университет

### Аннотация

*Представлены результаты экспериментальных исследований кавитационных пузырьков(КП) при прохождении водной струи через сопло Лавалья с соответствующими диаметрами 15мм(вход) и 1мм(выход сопла) и длиной 35 мм. Установлено, что интенсивность образования КП происходит при скоростях струи более 2 м/с.*

Теоретическое рассмотрение кавитации пузырьков в жидкости восходит еще ко временам Рэлея[1]. К теме пузырькового синтеза научное сообщество вернулось после публикации статьи [2]. Физические процессы, происходящие при взаимодействии пузырьков являются интересными и достойными для научных исследований сложных процессов при схлопывании отдельного пузырька[3]. 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 в следствие 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/см<sup>2</sup>). 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.

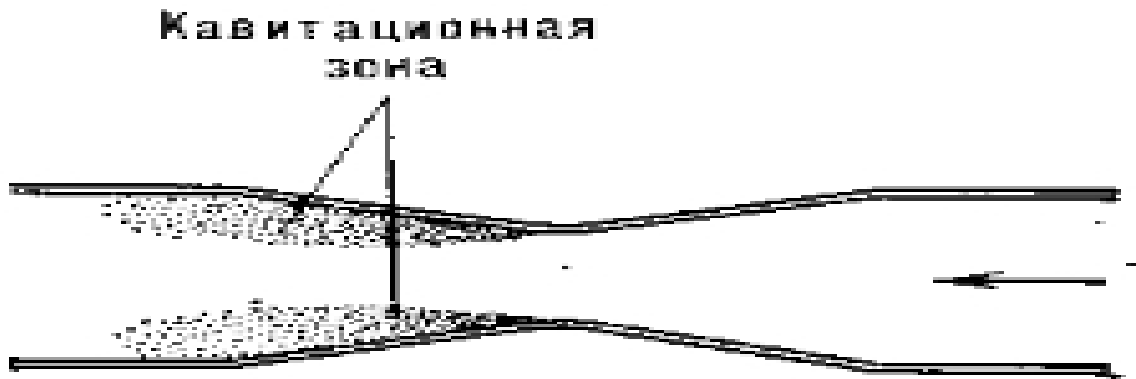


Рис.1. Образование кавитационной зоны в сопле Лавалья

При данной форме обтекаемого тела кавитация возникает при некотором, вполне определенном для данной точки потока, то значение безразмерного параметра[1]

$$\chi = 2 \frac{p - p_n}{\rho v^2},$$

где  $p$  – гидростатическое давление набегающего потока,  $p_n$  – давление насыщенного пара,  $\rho$  – плотность жидкости,  $v$  – скорость жидкости при достаточном удалении от тела. Этот параметр называется «числом кавитации», служит одним из критериев подобия при моделировании гидродинамических течений. Увеличение скорости потока после начала кавитации вызывает быстрое возрастание количества кавитационных пузырьков, затем происходит их объединение в общую кавитационную каверну, после чего течение переходит в струйное.

В наших исследованиях скорость потока воды из сопло Лавалья, при которой начинают наблюдаться кавитационные процессы на выходе сопла Лавалья были в интервале  $v=2-3\text{ м/с}$ . Экспериментальные исследования процессы образования кавитационных пузырьков при прохождении водяной струи через сопло Лавалья проведены с соплом Лавалья с соответствующими диаметрами 15мм(вход) и 1мм(выход сопла) и длиной 35 мм. Для рассматриваемого сопла Лавалья порог наблюдения кавитации соответствовал числам Рейнольдса  $Re = v d_0 / \nu \geq 2 \cdot 10^4$ , где  $\nu$ - 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.

В наших исследованиях порог возникновения кавитации оценивали по параметру кавитационного числа и закона Бернуллина основани  $\alpha$  [1,2]

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

Здесь  $p$  – гидростатическое давление,  $\rho$  – плотность жидкости,  $v$  – скорость потока жидкости. В нашем случае  $\alpha = 25-26$ .

По параметрам скорости струи из сопла, выявлены пороговые параметры кавитационных процессов и образования устойчиво пульсирующих КП. Нитевидные 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  $v=2$  м/с и числом Рейнольдса  $Re \geq 20000$  с кавитационным числом  $\alpha = 25-26$ .

В данной работе коэффициент кавитации (число кавитации) при пропускании через сопло Лавалья определим с помощью понятий «вход» и «выход». Тогда процесс возникновения кавитации пузырьков может быть успешно исследован на основе общей теории синергетики [4]. 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:

$$\alpha = \frac{\hat{a} \hat{u} \hat{\delta} \hat{i} \hat{a}}{\hat{a} \hat{\delta} \hat{i} \hat{a}} \quad (2)$$

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 [4]:

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

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 Лавалья примет вид:

$$\alpha = \frac{\hat{a}\hat{u}\hat{\delta}\hat{i}\hat{a}}{\hat{a}\hat{\delta}\hat{i}\hat{a}} = -\frac{I_i X_i}{I_e X_e}, \quad (4)$$

где  $I_e$  – гидродинамический поток воды на входе,  $I_i$  – гидродинамический поток кавитационных пузырьков на выходе сопло Лавалья, 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 неравномерным(нестационарным) прохождением воды через сопло Лавалья 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:

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

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  $\varepsilon x$  и  $\beta$  лежат в пределах:

$-1 \leq \varepsilon x \leq 1$ ,  $-1 \leq \beta \leq 1$ , тогда  $0 \leq \alpha \leq 1$ . График зависимости  $\alpha = f(\varepsilon x)$  имеет вид(рис1).

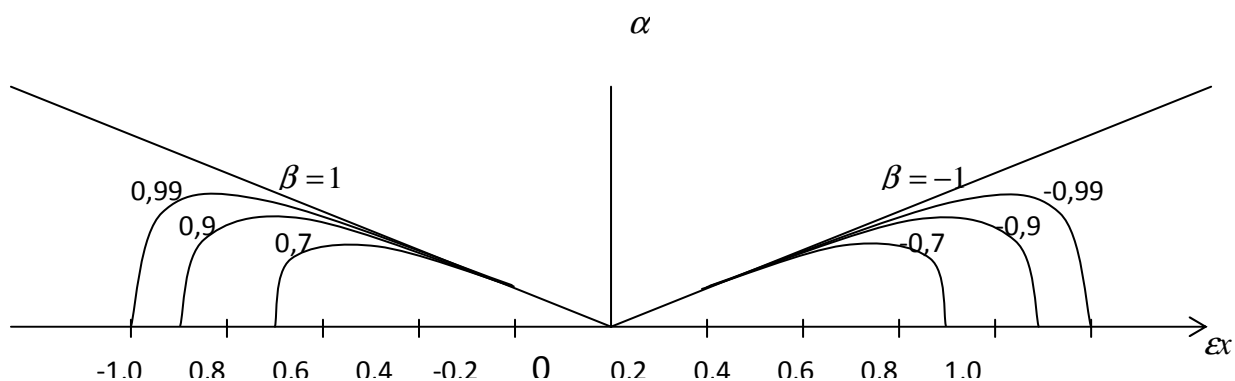


Рис.1.График зависимости эффективности коэффициента кавитации водяной струи при прохождении воды через сопло Лавала под действием гидродинамического потока воды от  $\epsilon x$ .

Из рис.1 видно, что коэффициент эффективности коэффициента кавитации водяной струи, кроме  $\beta = \pm 1$ , принимает максимальное значение только для фиксированного значения  $\alpha x$ .

Из условия экстремума функции  $\frac{d\alpha}{d(\epsilon x)} = 0$  следует, что максимальное

значение  $\alpha_{\max}$  при заданном значении  $\epsilon x$  равно:

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

#### Литература

- 1.Кнэпп Р., Дэйли ДЖ., Хэммит Ф. Кавитация: Пер. с англ.-М.: Мир, 1974.- 687с.
- 2.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.
- 3.Говердовский А.А., Имшенник З.С., Смирнов В.П. О перспективах термоядерной энергетики на основе кавитации пузырей // УФН, 2013, т.183 с.445-448.
- 4.Пригожин И. От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках/ Перевод с англ./ Изд.3-е/Синергетика: от прошлого к будущему. – М.: Комкнига, 2006.-296с.

