

УДК 666.961

О.А. Петров, аспирант; П.Е. Вайтехович, доцент

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА И ДЛИНЫ ПРОБЕГА КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ

In the given article the technique for definition of the size and landing run of cavitation bubbles is offered. The developed technique allows to calculate geometrical ratio, which are determining at designing of designs of cavitation vehicles.

В последнее время ведется поиск новых нетрадиционных методов разрушения твердых материалов. Причем большинство из этих методов основаны на использовании физических эффектов. Одним из таких методов является кавитационное воздействие, которое может успешно использоваться для разрушения материалов в водной среде [1].

Среди всех видов кавитации наиболее приемлемым с точки зрения интенсификации технологических процессов является суперкавитация, которая заключается в создании каверн значительных размеров, замыкающихся за пределами рабочих органов, что предотвращает кавитационное разрушение последних. В качестве обтекателей для получения суперкаверн используются различные тела (пластины, диски, конусы и т. д.), за которыми образуется суперкаверна определенной длины. На границе суперкаверны и сплошного потока жидкости образуются кавитационные пузырьки, которые, попадая в основной поток, замыкаются. При схлопывании пузырьков образуются высокоскоростные струйки жидкости, оказывающие разрушающее воздействие на твердый материал, находящийся рядом с ними [2].

Однако разрушающее действие кавитации может восприниматься не только обрабатываемым материалом, но и стенками трубопровода кавитационных установок. Эрозионные разрушения могут развиваться настолько быстро, что сделают практически неработоспособной ту или иную конструкцию гидродинамического оборудования через несколько недель эксплуатации. Поэтому задачей исследования и проектирования кавитационных аппаратов является предотвращение возможности контакта пузырька со стенкой. Для достижения этой задачи необходимо рассчитать размеры каверны, а также длину пробега кавитационных пузырьков, образующихся на ее границе.

Длина и диаметр каверны при различных скоростях жидкости в трубопроводе определены нами ранее для осевого и закрученного потоков на основе анализа гидродинамики потока в кавитаторе [3]. Задачей данной работы является определение длины пробега кавитационных пузырьков.

Длину пробега от начала роста до окончательного схлопывания пузырька можно определить, зная время его роста и замыкания, а также полагая, что скорость и направление движения пузырьков и основного потока совпадают.

Для определения времени роста и замыкания кавитационного пузырька воспользуемся уравнением движения границы сферической каверны, полученным в работе [4]. Исходными предпосылками для этого уравнения являлись:

уравнение движения вязкой сжимаемой жидкости в векторной форме

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \cdot \text{grad}(p) - v \cdot \text{rot}(\text{rot}(v)) + \left( \frac{\zeta}{\rho} + \frac{4}{3} \cdot v \right) \cdot \text{grad}(\text{div}(v)), \quad (1)$$

где  $v$  – скорость;  $\rho$  – плотность жидкости;  $v$  – кинематический коэффициент вязкости;  $\zeta$  – второй коэффициент вязкости;

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0. \quad (2)$$

Для замыкания системы этих двух уравнений использовано уравнение состояния в виде эмпирического соотношения Тэта, связывающее давление и плотность:

$$\frac{p+B}{p_\infty+B} = \left( \frac{\rho}{\rho_\infty} \right)^n, \quad (3)$$

где для воды постоянные имеют значения  $B \approx 3 \cdot 10^8$  Па,  $n \approx 7$ .

В результате этого и с учетом малого влияния сжимаемости жидкости получено уравнение движения сферической каверны (пузырька) для несжимаемой жидкости в общем виде:

$$R \cdot \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \cdot \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{P-p}{\rho}, \quad (4)$$

где  $R$ ,  $\frac{dR}{dt} = v_r$ ,  $\frac{d^2 R}{dt^2} = a_r$ ,  $P$  и  $p$  – радиус, радиальная скорость, ускорение, давление на границе каверны и давление в потоке жидкости соответственно.

Полное давление на границе  $P$  можно получить из условия непрерывного изменения давления при переходе из жидкости (внешней области пространства по отношению к границе каверны) к парогазовой смеси (внутренней области).

$$P = p_n + p_\mu + p_\sigma = p_n - 4 \cdot \mu \cdot \frac{v_r}{R} - \frac{2 \cdot \sigma}{R}, \quad (5)$$

где  $p_n$  – давление пара в каверне;  $p_\mu = -4 \cdot \mu \cdot \frac{v_r}{R}$  – давление, соответствующее действию вязких касательных напряжений (здесь  $\mu = \nu \cdot \rho$  – динамический коэффициент вязкости);  $p_\sigma = -\frac{2 \cdot \sigma}{R}$  – давление, соответствующее действию сил поверхностного натяжения (здесь  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения).

Подставив зависимость (5) в (4), получим дифференциальное уравнение движения границы сферической каверны:

$$R \cdot \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \cdot \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{1}{\rho} \cdot \left( p_n - 4 \cdot \mu \cdot \frac{v_r}{R} - \frac{2 \cdot \sigma}{R} - p \right). \quad (6)$$

Перейдя к безразмерной величине  $\zeta = R/R_0$ , где  $R$  и  $R_0$  – текущий и начальный радиусы пузырька соответственно, авторы попытались получить аналитическое решение уравнения (4). Однако, по признанию самих авторов, упрощения и допущения, сделанные при этом, не позволяют реально учесть все факторы, влияющие на образование и распространение кавитационных пузырьков.

При помощи современной компьютерной техники и программного обеспечения есть возможность решить уравнения (4, 6) в общем виде численным методом. Решение уравнения (6) позволяет определить время от начала роста до момента схлопывания кавитационных пузырьков. Зная скорость и направление их движения в пространстве, можем определить и диапазон кавитационного воздействия в рабочем объеме аппарата.

Расчеты проводились с помощью математического пакета программ «Mathcad» для кавитационной установки со струйным кавитатором [5]. Диаметр трубопровода составлял  $D = 3.5 \times 10^{-2}$  м; максимальный диаметр конуса-обтекателя  $d_k = 1.6 \times 10^{-2}$  м. Начальный размер зародышей (кавитационных ядер) принимался равным  $1 \times 10^{-4}$  м на основании экспериментальных измерений, выполненных различными методами и приведенных в виде графических зависимостей [4].

На рис. 1 представлен график зависимости изменения радиуса пузырька от времени. График показывает, что радиус пузырька сначала возрастает под действием растягивающих напряжений. Затем, когда эти напряжения сменяются действием избыточного давления, рост пузырька приостанавливается, и впоследствии это давление вынуждает его замыкаться. Из расчетов видно, что рост и схлопывание пузырька происходят очень быстро: за время  $t_p = 1.5 \times 10^{-3}$  с. Под действием растягивающих напряжений  $N = P - p \approx 10^4$  Па в воде из микроскопического зародыша ( $R_0 = 1/10$  мм) он вырастает до  $R_{\max} \approx 3$  мм. Время замыкания составляет  $t_s = 1 \times 10^{-4}$  с.

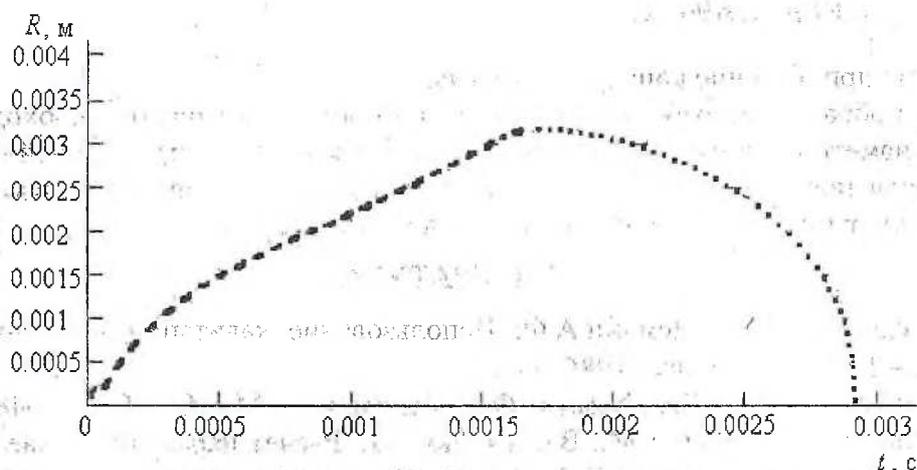


Рис. 1. График роста и замыкания кавитационного пузырька

На рис. 2 приведен график зависимости длины пробега пузырька от скорости жидкости в трубопроводе. Расчеты показали, что при изменении среднерасходной скорости жидкости по сечению трубопровода от 1 до 2.3 м/с (скорость в зоне каверны изменялась от 1.3 до 3 м/с) длина пробега пузырька плавно растет от 5.4 до 7.8 мм.

На основе расчетов можно сделать вывод, что при имеющемся отношении диаметров обтекателя и трубопровода  $a = d_k / D = 0.457$  и максимальной длине суперкаверны  $L_k = 0.403$  м контакт кавитационных пузырьков со стенками трубопровода при задаваемых скоростях потока жидкости не происходит.

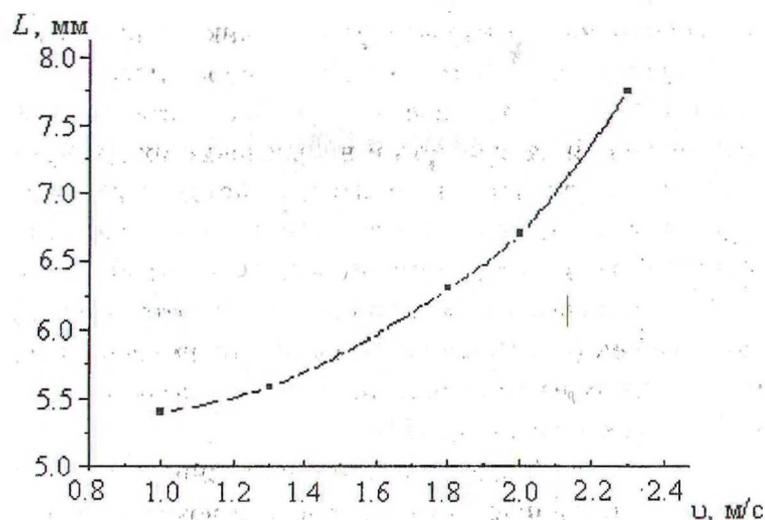


Рис. 2. График зависимости длины пробега пузырька от скорости жидкости  
Необходимая длина прямолинейного участка трубопровода составляет

$$L_{mp} = L_k + L_{II}, \quad (7)$$

где  $L_{II}$  – максимальная длина пробега пузырька.

Необходимый диаметр трубопровода

$$D_{mp} = d_k + L_{II} \cdot \cos(90 - \alpha/2), \quad (8)$$

где  $\alpha$  – угол при вершине конуса-обтекателя.

Таким образом, разработанная методика позволяет рассчитать необходимое соотношение диаметра обтекателя и трубопровода, а также длину прямолинейного участка трубопровода после обтекателя. Эти геометрические соотношения являются определяющими при разработке конструкций кавитаторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Федоткин И.М., Немчин А.Ф. Использование кавитации в технологических процессах. – Киев: Высш. шк., 1986. – 47 с.
2. Кнэпп Р., Дэйли Дж., Хэммит Ф.Г. Кавитация. – М.: ИЛ, 1974. – 648 с.
3. Петров О.А., Волк А.М., Вайтехович П.Е. Расчет параметров каверны в кавитационном аппарате // Труды БГТУ. Серия III. Химия и технология неорганических веществ. – Вып. IX. – 2001. – С. 106–109.
4. Левковский Ю.Л. Структура кавитационных течений. – Л.: Судостроение, 1978. – 224 с.
5. Вайтехович П.Е., Петров О.А. Исследование и оптимизация гидродинамических кавитационных диспергаторов // Труды БГТУ. Серия III. Химия и технология неорганических веществ. – Вып. VIII. – 2000. – С. 237–244.