

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ КАВИТАЦИИ НА ЖИДКИЕ СРЕДЫ

Л.Г. Григорян, С.Б. Коньгин

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: mahp@inbox.ru

Предложена методика экспериментальной оценки энергетического уровня воздействия кавитации на обрабатываемые жидкие среды. Методика базируется на теории изотропной турбулентности и связывает размер капель тестовой эмульсии, полученной акустическим способом, с энергетикой кавитации.

Ключевые слова: кавитация, турбулентность, дробление жидкости на капли.

В настоящее время для обработки жидкостей в различных технологических процессах начинают активно использоваться акустические активаторы, работающие в кавитационных режимах воздействия [1]. При этом важным моментом является определение зависимостей между параметрами кавитации и показателями качества процесса.

В настоящее время в качестве основного параметра, характеризующего кавитационные процессы, как правило, выступает число кавитации [1, 2]

$$K = \frac{P_0 - P_{\text{ин}}}{P_a}, \quad (1)$$

где p_0 – давление в системе;
 $p_{\text{ин}}$ – давление насыщенного пара;
 p_a – амплитуда колебаний акустического давления.

В то же время следует отметить, что существенным недостатком числа кавитации является то обстоятельство, что оно показывает только момент начала кавитации, но не отражает уровень ее энергетического воздействия на обрабатываемые жидкости. В этой связи возникает необходимость в выборе другого критерия для оценки уровня воздействия акустической кавитации на жидкости.

Для выбора указанного критерия рассмотрим процесс схлопывания кавитационного пузырька. При рассмотрении примем следующие допущения:

- кавитационный пузырек заполнен парами жидкости;
- в процессе сжатия пары конденсируются таким образом, что внутри пузырька давление остается постоянным и равным давлению насыщенного пара.

С учетом принятых допущений уравнение Нолтинга – Непайреса, описывающее динамику кавитационного пузырька, будет иметь вид [2]

$$\rho R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3\rho}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = P_{\text{ин}} - P_0 - \frac{2\sigma}{R}, \quad (2)$$

где R – текущий радиус пузырька;

Леон Гайкович Григорян (д.т.н., проф.), профессор каф. машин и аппаратов химических производств.

Сергей Борисович Коньгин (к.т.н.), зав. кафедрой машин и аппаратов химических производств.

ρ – плотность жидкости;

σ – поверхностное натяжение.

Начальный размер пузырька зависит от многих факторов (тип жидкости, амплитуда и частота акустических колебаний и т. д.). Однако проведенные решения уравнений показывают, что для пузырьков различных размеров конечный этап схлопывания характеризуется весьма большими значениями скоростей, в пределе стремящимися к бесконечности.

В качестве примера на рис. 1 и 2 представлены результаты решения уравнения (2) для схлопывающегося кавитационного пузырька, находящегося в воде. При расчетах приняты следующие расчетные параметры модели: начальный радиус пузырька 10 мкм, начальная скорость схлопывания равна нулю, давление насыщенного пара 3 кПа.

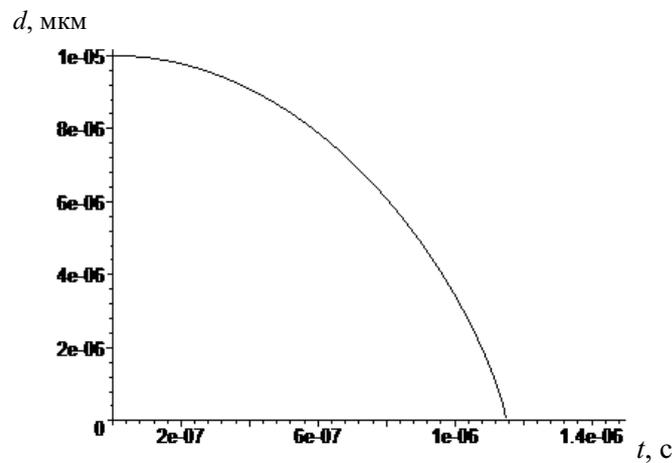


Рис. 1. Зависимость размера кавитационного пузырька от времени

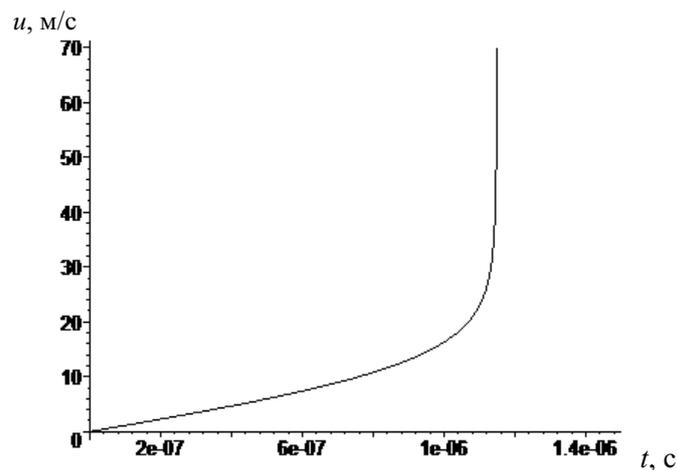


Рис. 2. Зависимость скорости границы кавитационного пузырька от времени

Рассмотренный сферически-симметричный случай схлопывания кавитационного пузырька, строго говоря, на практике никогда не должен реализоваться по следую-

щим причинам. Во-первых, значения ряда параметров должны стремиться к бесконечности, чего в действительности не наблюдается. Во-вторых, всегда имеются отклонения формы пузырька от идеальной. В-третьих, согласно принципам гидродинамики вследствие больших скоростей на конечном этапе течение жидкости теряет устойчивость и приобретает турбулентный характер.

В этой связи в реальности имеет место ассиметричное захлопывание кавитационного пузырька, в ходе которого образуются микромасштабные вихри, приводящие к локальному перемешиванию обрабатываемой жидкости. Интенсивность перемешивания жидкости указанными вихрями определяется уровнем энергетического воздействия схлопывающегося кавитационного пузырька.

Согласно теории турбулентности интенсивность вихревого движения жидкости в целом может быть охарактеризована с помощью величины объемной скорости диссипации энергии [3]

$$\varepsilon = -\frac{dW}{dt}. \quad (3)$$

Считая, что схлопывание кавитационных пузырьков приводит к образованию микромасштабных вихрей, в рамках настоящей работы указанную величину $\varepsilon_{кав}$ предлагается использовать в качестве интегрального параметра, характеризующего интенсивность энергетического воздействия кавитации на жидкие среды.

Согласно теории изотропной турбулентности объемная скорость диссипации энергии может быть оценена с помощью выражения [3]

$$\varepsilon \sim \frac{\mu^3}{\rho^2 \delta^4}, \quad (4)$$

где μ – динамическая вязкость обрабатываемой жидкости;
 δ – внутренний масштаб турбулентности.

Согласно выражению (4), диссипации энергии соответствует внутренний масштаб турбулентности, равный

$$\delta_{кав} \sim \frac{\mu^{3/4}}{\rho^{1/4} \varepsilon_{кав}^{1/4}}. \quad (5)$$

Таким образом, определяя минимальное значение внутреннего масштаба турбулентности $\delta_{кав}$, можно оценить уровень диссипации энергии в среде и уровень мощности кавитационного воздействия на обрабатываемую жидкость.

В классических работах по теории турбулентности для определения внутреннего масштаба использовался распад капель одной жидкости в турбулентном потоке другой жидкости [3]. Дробление капель при этом обусловлено разностью динамических напоров, действующих на каплю с разных сторон.

В этой связи в рамках настоящей работы указанный подход предлагается распространить и для определения внутреннего масштаба кавитационной турбулентности. В работе [3] показано, что размер капель, образующихся при дроблении в турбулентном потоке, по порядку величины совпадает с внутренним масштабом турбулентности:

$$a_{кав} \sim \delta_{кав}. \quad (6)$$

Для определения размера $a_{кав}$ теоретические подходы в настоящее время не точны. В этой связи данная величина может быть определена только экспериментально.

Для этого был проведен эксперимент по кавитационному эмульгированию воды и керосина в соотношении объемов 10:1 с помощью магнитострикционного излучателя с частотой 20 кГц. Для полученной эмульсии проведена статистическая обработка распределения капель по размерам. Их диаметры находились в диапазоне от 0,37 до 1,31 мкм. По данной методике эти размеры соответствуют уровням локальной диссипации энергии $\varepsilon \sim 1 \div 50 \cdot 10^9$ Вт/м³ (если бы кавитационные пузырьки занимали весь объем среды). Для сравнения, аналогичные внутренние масштабы турбулентности могут быть достигнуты при градиентном течении воды при числах Рейнольдса потока $Re \sim 200000 \div 250000$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии. – М.: Химия, 1990. – 208 с.
2. Красильников В.А. Введение в физическую акустику. – М.: Наука, 1984. – 400 с.
3. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Физматгиз, 1959. – 700 с.

Статья поступила в редакцию 12 марта 2012 г.

ASSESSMENT OF THE ENERGY IMPACT OF CAVITATION ON THE LIQUIDS

L.G. Grigoryan, S.B. Konygin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

Procedure of experimental assessment of the energy impact of cavitation on the liquids is suggested. Procedure is based on theory of isotropic turbulence and unites size of test emulsion drops made by ultrasound with cavitation energy.

Keywords: *cavitation, turbulence, liquid droplets breaking.*