

УДК 621.647.23

А.Ф. Луговской, д-р.техн.наук, проф., И.А. Гришко, асп., А.В. Мовчанюк, канд.техн.наук, доц.
НТУ Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТРУБЧАТОГО КАВИТАТОРА В РЕЖИМЕ РАДИАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Розглянуті особливості збудження ультразвукової кавітації в трубчатому вібраторі, що здійснює радіальні коливання. Представлені результати експериментального дослідження інтенсивності кавітації та особливостей її розповсюдження в трубчатому вібраторі з чотирма ультразвуковими п'єзоелектричними приводами на зовнішній твірній поверхні. Дослідження кавітації проводилися із застосуванням алюмінієвої фольги.

The characteristics of ultrasonic cavitation stimulation in pipe vibrator, which provides radial vibrations, have been examined. The results of the pilot study of cavitation intensity and peculiarities of its dissemination in the pipe vibrator with four ultrasonic piezoelectric actuators on the outer surface of the generators have been presented. Cavitation researches were conducted with aluminum foil usage.

Введение

Многочисленными экспериментальными и теоретическими исследованиями подтверждена возможность обеззараживания жидкостей путем облучения ультразвуком высокой интенсивности [1-3]. Показано, что разнообразие и скорость уничтожения опасных для здоровья человека микроорганизмов увеличиваются с повышением уровня интенсивности, введенной в жидкость, ультразвуковой волны [1]. От степени концентрации ультразвуковой энергии в жидкости зависит эффективность и многих других технологических процессов, использующих физические явления, сопровождающие ультразвуковую кавитацию. Однако увеличение интенсивности, введенной в жидкость, ультразвуковой волны связано с рядом трудностей, вызванных, прежде всего, образованием на излучающей поверхности двухфазной кавитационной прослойки, поглощающей и рассеивающей ультразвуковую энергию [4].

Логичным выходом из ситуации является введение в жидкость ультразвуковой волны малой и средней интенсивности и дальнейшая концентрация звуковой энергии до необходимого высокого уровня за счет применения различного рода акустических концентраторов.

Целью предложенной статьи является экспериментальное исследование возможностей концентрации ультразвуковой энергии с помощью трубчатого вибратора, совершающего радиальные колебания.

Исследование

Исследуемая кавитационная камера представляла собой проточный трубчатый резонансный вибратор, возбуждаемый на частоте радиальных колебаний. Источником колебаний являлись четыре пьезоэлектрические привода, собранные по полуволновой акустической схеме со ступенчатым трансформатором скорости, ступень малой площади которого была выполнена ножевидной и фиксировалась вдоль образующей на наружной поверхности трубчатого вибратора (рис. 1). Такое конструктивное решение позволяло ввести в трубчатый вибратор ультразвуковую энергию с минимальным негативным влиянием на форму возбуждаемых в вибраторе колебаний.

В работе [5] получены выражения для потенциала скорости и звукового давления, возникающих в жидкости, заполнившей



Рис. 1. Ультразвуковая кавитационная проточная камера с трубчатым вибратором

трубчатый вибратор, при прохождении звуковой волны деформации для условия неразрывности потока жидкости:

$$\Phi_m(r, \varphi, z, t) = A_m J_m(\mu_p r) \cos m_T \varphi \cdot e^{j\gamma p z} \sin \omega t ;$$

$$p(r, \varphi, z, t) = A_m \rho \omega J_m(\mu_p r) \cos m_T \varphi \cdot e^{j\gamma p z} \cos \omega t ,$$

де r – радиус-вектор; φ – полярный угол; z – координата вдоль оси вибратора; $A_m = A \cdot C \cdot U$ – константы, определяемые с помощью граничных условий; $J_m(\mu_p r)$ – цилиндрическая функция Бесселя порядка m ; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; $\gamma_p = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \mu_p^2}$; μ_p^2 – некоторая постоянная величина; C – скорость звука в жидкости; $m_T = 0, 1, 2, 3, \dots$

Аналитическое исследование ультразвукового поля с помощью полученных выражений позволяет получить картину распределения звукового давления по сечению трубчатого вибратора, в частности, для нулевой моды колебаний (рис. 2). Полученное графическое решение иллюстрирует фокусировку, т.е. концентрацию ультразвуковой энергии вдоль оси вибратора и ее минимальный уровень на внутренней поверхности вибратора. Соответственно, при экспериментальном исследовании следует ожидать максимальный уровень кавитации в центральной части трубы вибратора и минимальный – на его внутренней цилиндрической поверхности.

Исследуемый трубчатый вибратор представлял собой отрезок трубы из стали 12Х18Н10Т с наружным диаметром 75 мм и внутренним диаметром 62 мм. Резонансная частота колебаний составляла 22,2 кГц. Вибратор возбуждался на нулевой моде колебаний, т.е. совершал радиальные колебания. Длина трубы вибратора составляла 80 мм, что существенно меньше половины длины волны изгибных колебаний по длине трубы. Поэтому во время экспериментов вся поверхность вибратора совершала чисто радиальные колебания. Этому способствовала и ножевидная форма ступеней малой площади трансформаторов скорости, которые контактировали с поверхностью вибратора вдоль образующей на длине 50 мм.

Исследование эффективности кавитации проводилось с помощью алюминиевой фольги, которая помещалась в трубу вибратора согласно схеме (рис. 3.). По скорости эрозионного разрушения фольги можно было судить об уровне кавитации и форме кавитационной области.

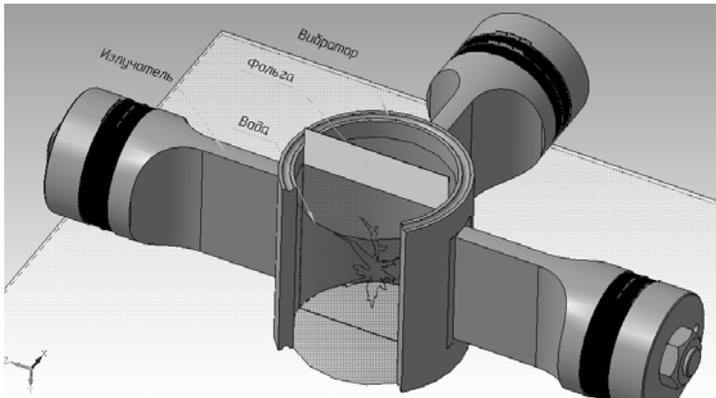


Рис. 3. Схема размещения контрольных образцов фольги в кавитационной камере

При дальнейшем увеличении амплитуды колебаний стенки цилиндрической кавитационной камеры бугор в центре камеры исчезает и наблюдается интенсивная турбулизация жидкости в объеме кавитационной камеры.

Исследование контрольных образцов алюминиевой фольги показывает, что при малой интенсивности ультразвука кавитационная область сконцентрировалась в центральной части цилиндрической камеры (рис. 5.а.). При увеличении амплитуды колебаний наблюдается эффективная фокусировка ультразвуковой энергии вдоль оси камеры с образованием кавитационной области высокой интенсивности (рис. 5.б.). На внутренней поверхности цилиндрической камеры кавитационной эрозии не наблюдается, что свидетельствует о высокой эффективности введения в жидкость ультразвуковой энергии. По мере увеличения интенсивности подводимого ультразвука амплитуда звукового давления растет, кавитационная область постепенно расширяется, приближаясь к внутренней поверхности камеры. Как только кавитационная область коснется внутренней поверхности камеры условия введения в жидкость ультразвуковой энергии

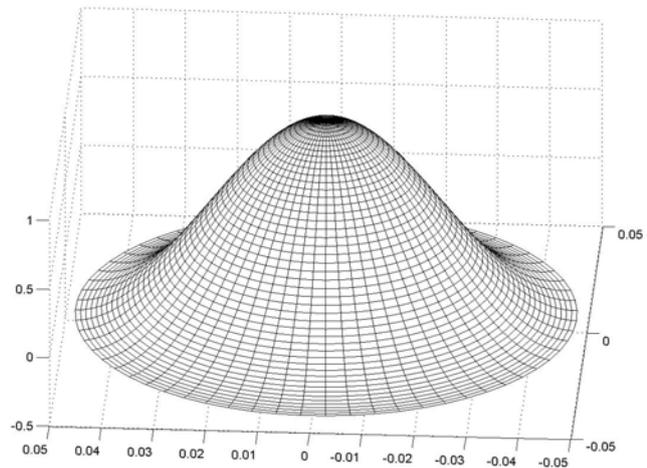


Рис. 2. Распределение звукового давления по сечению трубчатого вибратора при радиальных колебаниях стенки

При подведении к пьезоэлементам приводов-излучателей ультразвукового сигнала малой мощности в трубчатой кавитационной камере визуально наблюдается образование небольшого кавитационного облачка в центральной части (рис. 4.а.). Увеличение подводимой мощности, т.е. амплитуды радиальных колебаний стенок трубы приводит к образованию бугра в центральной части трубы (рис. 4.б.), который при дальнейшем увеличении амплитуды колебаний перерастает в неустойчивый столбик (рис. 4.в.).

резко ухудшаются за счет поглощения и рассеивания энергии двухфазной средой. При этом уровень кавитации падает и усредняется по всему объему цилиндрической камеры (рис. 5.в.).

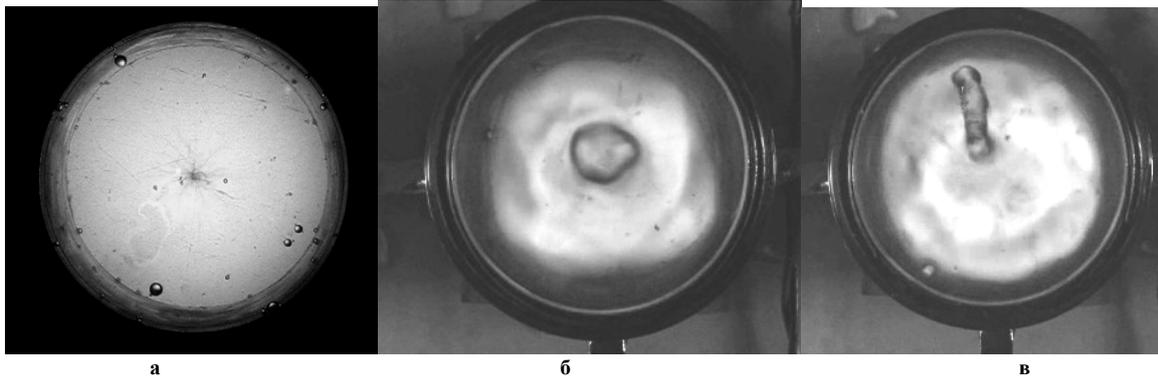


Рис. 4. Визуально наблюдаемый эффект концентрации ультразвуковой энергии в цилиндрической кавитационной камере, совершающей радиальные колебания различной интенсивности

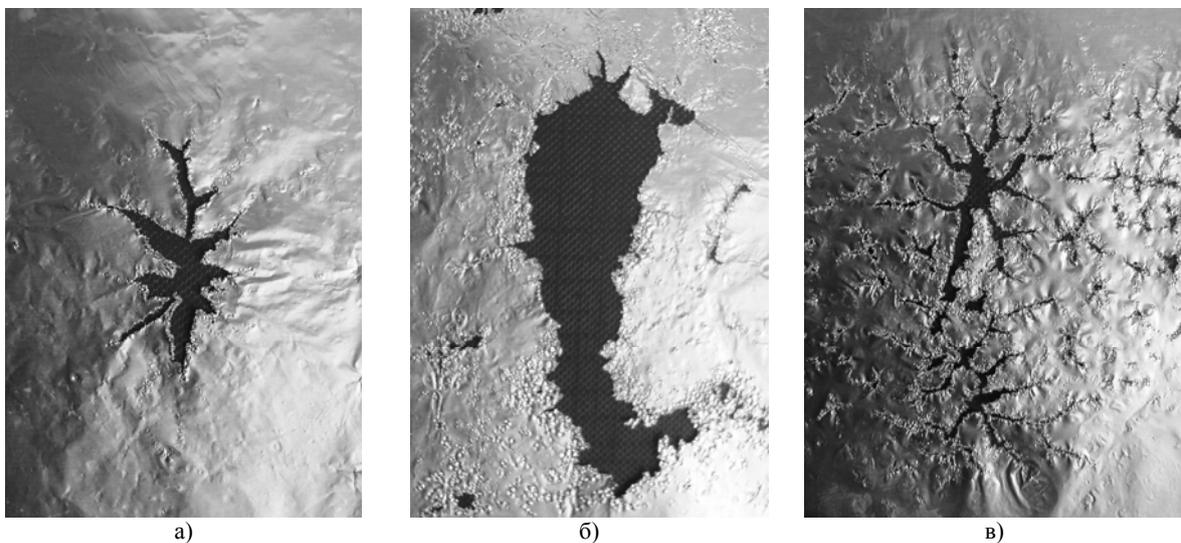


Рис. 5. Эрозионное разрушение контрольных образцов алюминиевой фольги в цилиндрической камере, совершающей радиальные колебания, при различных интенсивностях ультразвука

Картина распространения кавитационной области на весь объем камеры наблюдалась при подведенной мощности 250...300 Вт. Дальнейшее повышение мощности приводит к нагреванию вибратора и мало сказывается на повышении уровня кавитации.

Выводы Экспериментальные исследования подтвердили эффект концентрирования ультразвуковой энергии вдоль оси в цилиндрическом вибраторе при совершении радиальных колебаний. Подтверждена возможность достижения в области продольной оси исследуемого цилиндрического кавитатора интенсивности ультразвука порядка 50...60 Вт/см². Показано, что повышение подводимой к вибратору мощности целесообразно до момента образования кавитационной прослойки на внутренней поверхности вибратора. Повышение производительности технологического оборудования по обеззараживанию воды, построенного с использованием подобного цилиндрического кавитатора, может быть достигнуто за счет последовательной установки нескольких акустически развязанных проточных трубчатых вибраторов.

Список литературы

1. Эльпинер И.Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие. - М.: Физматиз, 1963. – 430 с.
2. Луговской А.Ф. Оценка методов обеззараживания воды / А. Ф. Луговской, А. В. Мовчанюк, И. А. Гришко // – Вест. Нац. техн. ун-та Украины «Киев. политехн. ин-т»: серия «Машиностроение». – 2008. - № 52. – С.103-111.
3. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И. П. Голямина. - М.: Советская энциклопедия, 1979 – 400с
4. Луговской А.Ф. Исследование рабочей зоны высокоамплитудного кавитационного ультразвукового привода / А.Ф. Луговской, А. В. Мовчанюк, И. А. Гришко // – Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М.Остроградського. Вип. 2/2008 (49). Частина 2, -Кременчук, 2008. - С.81-85
5. Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А. Ф. Луговской, Н. В. Чухраев. - К.: ВПЦ «Київ. ун-т», 2007. - 244 с.