

УДК 532.529

КАВИТАЦИОННАЯ ЭРОЗИЯ В УСЛОВИЯХ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Ғазизов Бауыржан Сағидоллаұлы

b.kosai95.95@mail.ru

Магистрант 2-го курса, Евразийского национального университета имени Л.Н.

Гумилева, механико-математического факультета, кафедра механика

Научный руководитель – Н.Ж.Джайчибеков

Кавитация может вызвать разрушение практически любой твердой поверхности. С одной стороны, кавитационные явления в потоках жидкости существенно снижают сроки эксплуатации гидравлического оборудования, гидросооружений, гребных винтов, форсунок дизельных двигателей и других конструкций. С другой стороны, эрозионное разрушение поверхностных пленок под воздействием кавитации в мощных акустических полях широко применяется для интенсификации различных технологических процессов – диспергирования твердых присадок технических масел, очистки поверхностей от нагара, окалины, ржавчины, абразивных частиц притирочных паст и т. д.

На протяжении последнего десятилетия все большее применение в автомобилестроении получают алюминиевые и магниевые сплавы. Однако при очистке изготовленных из них деталей и узлов моющие растворы разрушают поверхность очищенного металла (за счет коррозии, химического растрескивания и др.), а введение в рабочую жидкость акустических полей высокой интенсивности только усиливает воздействие этих механизмов. Поэтому в ультразвуковых методах очистки последнее время прослеживается тенденция к снижению концентраций поверхностно-активных веществ, переход на дистиллированную воду или химически нейтральные жидкости (минеральные масла, толуол и другие органические соединения) [1]. В последнем случае жидкости также являются диэлектриками и основную роль в кавитационном разрушении пленок загрязнителей играет механическое воздействие кавитации на поверхность твердого тела. Однако при этом необходимо повысить ударное воздействие схлопывающихся паровых каверн, например, создавая избыточное статическое давление в рабочей емкости и одновременно увеличивая интенсивность акустического поля [2].

В качестве простых в эксплуатации и надежных источников упругих волн в жидких средах хорошо зарекомендовали себя осесимметричные гидродинамические излучатели (ГДИ) прямооточного и противоточного типа. У них отсутствуют основные недостатки, присущие электроакустическим преобразователям магнитострикционного или пьезоэлектрического типов [3]. Как показали ранее экспериментальные исследования, данные устройства могут генерировать акустические поля высокой интенсивности в жидкостях различной вязкости в широком диапазоне гидростатических давлений [4,5]. В связи с этим, представляет интерес исследование эрозионных свойств ближнего поля осесимметричного гидродинамического излучателя в условиях избыточного статического давления в герметичной емкости.

ПОГЛОЩЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО ИМПУЛЬСА

Частоту основной гармоники акустического сигнала, генерируемого ГДИ, задает упругая затопленная струйная оболочка. Накопителем энергии является первичный вихрь в форме тороида, а областью звукообразования – вторичный тороидальный вихрь с развитой кавитацией [4 – 8]. Пульсации вихря возбуждают струйную оболочку, которая совершает изгибные колебания. При оптимальной скорости струи, когда частота пульсаций первичного вихря совпадает с собственной частотой оболочки, наблюдается максимальный уровень тонального звука [6]. При этом круговая частота основной гармоники генерируемых акустических волн совпадает с низшей собственной частотой струйной оболочки:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_0^4 h^2 r^2 + 12}{12 \rho r^2}} E,$$

$$\frac{\pi}{2} \leq k_0 l \leq \frac{3\pi}{2}, \quad (1)$$

$$E = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \chi_i (P_* + \Delta P_{st})^i.$$

Здесь ρ , r , l , h – плотность материала, средний радиус, длина и толщина струйной оболочки соответственно; E – модуль объемной упругости жидкости; k_0 – параметр цилиндрической оболочки, полученный как минимальный из корней соответствующего трансцендентного уравнения [5]; ΔP_{st} – избыточное, по сравнению с атмосферным, статическое давление; P_* – внутреннее давление в жидкости (фактически, ее порог кавитации); χ_1 – линейный, а χ_2 и χ_3 – первые два нелинейных параметра адиабатической сжимаемости жидкости [9].

Управлять частотой возможно тремя путями: изменяя геометрию оболочки (с помощью замены сопла и отражателя) [6, 7], создавая избыточное статическое давление в герметичной емкости [5, 6] или изменяя скорость истечения струи жидкости из сопла [4, 8]. Заметим, что первый способ неудобен, а второй не всегда реализуем. Третий способ более практичен, однако при этом уменьшается амплитуда изгибных колебаний струйной оболочки и, как следствие, снижается уровень акустического сигнала, вплоть до полного исчезновения. Наиболее перспективным для акустических технологий является создание в рабочей емкости необходимого избыточного статического давления с одновременным увеличением до оптимального значения скорости струи на выходе из сопла. Тогда, кроме повышения частоты основной гармоники, можно повысить уровень звука, акустогидродинамический КПД [4, 8] и интенсивность ближнего поля ГДИ [10].

Ранее в работе [10] теоретически и экспериментально исследовалось нелинейное затухание коротких экспоненциальных импульсов в ближнем поле излучателя рассматриваемого типа. Интенсивность импульса можно записать как:

$$I(r) = \frac{p_0^2(\beta_1 - \beta_2) [\beta_1 \Pi_0(\xi_1) - \beta_2 \Pi_0(\xi_2)]}{\rho c r^2 (\beta_1 + \beta_2) \beta_1^2}, \quad (2)$$

где

$$\Pi_0(\xi) = [1 - \Phi(\xi)] \exp(\xi^2);$$

$$\Phi(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi \exp(-t^2) dt;$$

$$\xi_1 = \beta_1 \sqrt{\alpha_0 r}; \xi_2 = \beta_2 \sqrt{\alpha_0 r}.$$

В последнем выражении $\alpha_0 = 2\alpha/\omega^2$ – коэффициент поглощения для интенсивности плоской волны за счет физического затухания в среде [11]; ω – круговая частота гармоники; β_1 и β_2 – безразмерные коэффициенты, соответствующие длительности фронтов импульса [12]; p_0 – действующее значение акустического давления вблизи активной зоны звукообразования; ρ – плотность жидкости; c – скорость звука. Функция $\Phi(\xi)$ представляет собой интеграл вероятности.

Дифференцированием функции интенсивности по координате можно получить выражение для акустической мощности, поглощенной в единице объема жидкости:

$$i(r) = \frac{\partial I}{\partial r} = \frac{p_0^2(\beta_1 - \beta_2)}{\rho c (\beta_1 + \beta_2)} \left[-\frac{2F}{r^3} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial F}{\partial r} \right], \quad (3)$$

где

$$F = \beta_1 \Pi_0(\xi_1) - \beta_2 \Pi_0(\xi_2);$$

$$\frac{\partial F}{\partial r} = \beta_1^3 \Pi_1(\xi_1) - \beta_2^3 \Pi_1(\xi_2);$$

$$\Pi_1(\xi) = [1 - \Phi(\xi)] \exp(\xi^2) - \frac{1}{\sqrt{\pi\xi}}$$

Пренебрегая в выражении для $i(r)$ первым слагаемым ($\sim r^{-3}$), по сравнению со вторым ($\sim r^{-2}$), окончательно получим

$$i(r) = \frac{\partial I}{\partial r} = \frac{I_0 (\beta_1 - \beta_2)}{r^2 (\beta_1 + \beta_2)} \times [\beta_1^3 \Pi_1(\xi_1) - \beta_2^3 \Pi_1(\xi_2)]; \quad (4)$$

В формуле (4) I_0 – действующее значение интенсивности поля вблизи активной зоны звукообразования:

$$I_0 = \frac{p_0^2}{\rho c} \quad (5)$$

Можно предположить, что дополнительное нелинейное затухание энергии упругого импульса должно быть пропорционально степени кавитационного разрушения твердых преград.

Список использованных источников

1. Максимов В. Г., Сухарьков О. В., Сухарьков А. О. Очистка деталей автомобилей с использованием гидродинамических излучателей // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2002. – 1(17). – С. 65–68.
2. Dezhkunov N. V., Francescutto A., Ciuti P. Enhancement of the conversion and concentration of energy in a multibubble cavitation zone // Proc. 16-th Int. Sympos. Nonlin. Acoust. – Moscow, 2002. – P. 919–926.
3. Costes S., Tierce P. Characterization of efficiency of ultrasonic equipment: Experimental results of different kinds of transducers // Proc. 3-rd Meet. Appl. Power Ultrasound in Phys. Chem. Proces. – Paris, 2001. – P. 137–142.
4. Дудзинский Ю. М., Назаренко А. Ф. Эффективность работы осесимметричных гидродинамических излучателей в условиях избыточного статического давления // Акуст. ж. – 1996. – 42, N 4. – С. 569–572.
5. Дудзинский Ю. М., Дашенко А. Ф. Собственные колебания струйной оболочки в условиях гидростатического давления // Прикл. мех. – 2004. – 40, N 12. – С. 92–98.
6. Дудзинский Ю. М., Маничева Н. В., Назаренко О. А. Оптимизация параметров широкополосного акустического излучателя в условиях избыточных статических давлений // Акуст. вісн. – 2001. – 4, N 2. – С. 38–46.
7. Дудзинский Ю. М., Попов В. Г. Вынужденные колебания осесимметричной затопленной струйной оболочки // Прикл. мех. – 2004. – 40, N 12. – С. 92–98.
8. Дудзинский Ю. М., Сухарьков О. В., Маничева Н. В. Энергетика прямого гидродинамического излучателя в условиях гидростатического давления // Акуст. вісн. – 2004. – 7, N 1. – С. 40–45.
9. Зарембо Л. К., Красильников В. А. Введение в нелинейную акустику. – М.: Наука, 1966. – 520 с.
10. Дудзинский Ю. М. Ближнее поле осесимметричного гидродинамического излучателя // Акуст. вісн. – 2004. – 7, N 4. – С. 48–51.
11. Полякова А. Л. Поглощение звука // Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И. П. Голяминой. – М.: Сов. Энцикл., 1979. – С. 257–264.

12. Дудзинский Ю. М. О нелинейном затухании экспоненциальных упругих импульсов // Акуст. вісн.– 2005.– 8, N 1-2.– С. 51–53.