

УДК 621.787.6

А.В. Мовчанюк, канд. техн. наук,

Е.А. Луговская,

В.П. Фесич

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КАВИТАТОРОВ С РАЗВИТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Розглянуто чинники, що впливають на роботу ультразвукових кавітаційних резонансних приводів. Показано, що для кожної резонансної частоти є області раціональних розмірів випромінюючої поверхні ультразвукового привода. Показано, що при попередньому виборі площі поверхні випромінювання необхідно керуватися вимогами технологічного процесу.

The reasons that affect the ultrasonic cavitation drives. It is shown that for each resonant frequency is the domain of rational dimensions of the radiating surface of the drive. It is shown that in the preliminary selection of the surface area of the radiation must take into account the requirements of the technological process.

Введение

Ультразвуковые кавитационные технологии получили широкое распространение в различных областях современного промышленного производства. Известны технологические процессы ультразвуковой кавитационной очистки твердых и эластичных поверхностей [1, 2], обеззараживания питьевой и сточных вод [3, 4], ультразвукового диспергирования твердых тел и распыления жидкостей [5, 6], активирования жидкостей и ускорения химических реакций [7–9] и т.д. При этом одной из самых важных задач при проектировании ультразвуковой технологической аппаратуры является выбор конструкции и расчет ультразвукового резонансного привода, обеспечивающего введение в жидкость ультразвуковой волны высокой интенсивности. При этом приводы условно разделяются на малоамплитудные и высокоамплитудные. Повышение амплитуды колебаний излучающей поверхности достигается за счет применения трансформаторов колебательной скорости различных акустических систем. Изменение площади излучающей поверхности резонансного привода и амплитуды ее колебаний позволяет в зависимости от технологического назначения либо усилить эрозионный эффект захлопывающихся кавитационных пузырьков, либо обеспечить получение мощных микротечений от интенсивных пульсаций кавитационных пузырьков, выросших и не имеющих возможности захлопнуться в высокоамплитудной волне звукового давления, либо обеспечить заданную интенсивность вводимой в жидкость звуковой волны. Иногда технологическая необходимость требует сочетать в одном приводе сразу несколько указанных особенностей.

Целью излагаемого материала является аналитическое исследование взаимосвязи площади поверхности излучения резонансного привода с условиями нагружения и резонансной частотой привода.

Основная часть

Удельное акустическое сопротивление упругой среды для случая поршневых колебаний излучающей поверхности вибрационного привода определяется отношением комплексных амплитуд звукового давления p к колебательной объемной скорости v частиц среды:

$$Z_a = \frac{p}{v}$$

Акустическое сопротивление среды [10] может быть рассчитано, как

$$Z_a = \rho c \left[1 - \frac{2J_1(2kr)}{2kr} + j \left(\frac{2S_1(2kr)}{2kr} \right) \right],$$

где ρ — плотность жидкости; c — скорость звука в технологической жидкости; $J_1(2kr)$ — функция Бесселя первого порядка; $k = \frac{\omega}{c}$ — волновое число; ω — круговая частота; c — скорость звука в жидкости; r — радиус поршня, $S_1(2kr)$ — функция Струве первого порядка.

В связи с тем, что ρ и c зависят только от свойств жидкости и не зависят от частоты колебаний, введем понятие отнормированного акустического сопротивления:

$$\bar{Z}_a = \frac{Z_a}{\rho c} = \left(1 - \frac{2J_1(2kr)}{2kr} + j \left(\frac{2S_1(2kr)}{2kr} \right) \right). \quad (1)$$

Акустическое сопротивление среды имеет две составляющие — действительную и мнимую, которые, исходя из выражения (1), в отнормированном виде могут быть представлены как

$$\text{Re}(\bar{Z}_a) = 1 - \frac{2J_1(2kr)}{2kr}; \quad (2)$$

$$\text{Im}(\bar{Z}_a) = \frac{2S_1(2kr)}{2kr} \quad (3)$$

При этом действительная часть (активное акустическое сопротивление) характеризует диссипацию ультразвуковой энергии в самой акустической системе, т.е. связана с потерями энергии на возникновение и развитие кавитации, а также излучение ультразвуковой волны в технологическую жидкость. Мнимая часть (реактивное акустическое сопротивление) характеризует диссипацию ультразвуковой энергии, вызванную реакцией сил инерции присоединенной соколеблющейся массы жидкости и созданием акустических микротечений, т.е. турбулизацией технологической жидкости.

Графическое представление выражений (2) и (3) показывает, что как активное акустическое сопротивление (рис. 1), так и реактивное (рис. 2) минимальны, когда радиус излучающей поверхности много меньше длины волны в технологической жидкости.

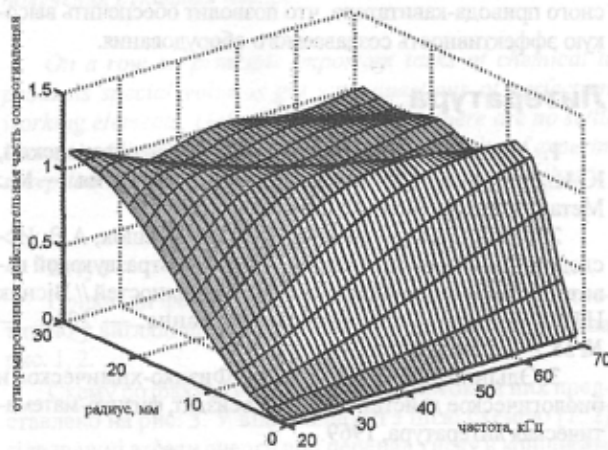


Рис. 1. Графическое представление отнормированной действительной части акустического сопротивления.

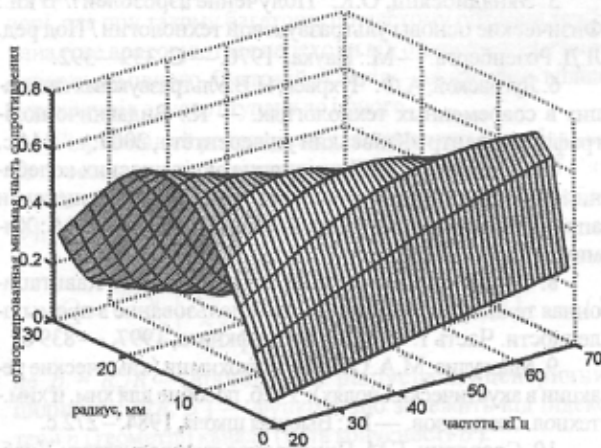


Рис. 2. Графическое представление отнормированной мнимой части акустического сопротивления.

Для оценки эффективности использования активной или реактивной составляющей ультразвукового излучения запишем выражение для модуля отнормированного акустического сопротивления

$$|\bar{Z}_a| = \sqrt{(\text{Re}(\bar{Z}_a))^2 + (\text{Im}(\bar{Z}_a))^2} \quad (4)$$

Тогда эффективность использования активной составляющей ультразвуковой энергии с учетом выражения (4) можно записать как

$$\frac{\text{Re}(\bar{Z}_a)}{|\bar{Z}_a|} = \frac{1 - \frac{2J_1(2kr)}{2kr}}{\sqrt{\left(1 - \frac{2J_1(2kr)}{2kr}\right)^2 + \left(\frac{2S_1(2kr)}{2kr}\right)^2}} \quad (5)$$

Аналогично, для оценки эффективности использования реактивной составляющей ультразвуковой энергии, вводимой в технологическую жидкость, можно записать

$$\frac{\text{Im}(\bar{Z}_a)}{|\bar{Z}_a|} = \frac{\frac{2S_1(2kr)}{2kr}}{\sqrt{\left(1 - \frac{2J_1(2kr)}{2kr}\right)^2 + \left(\frac{2S_1(2kr)}{2kr}\right)^2}} \quad (6)$$

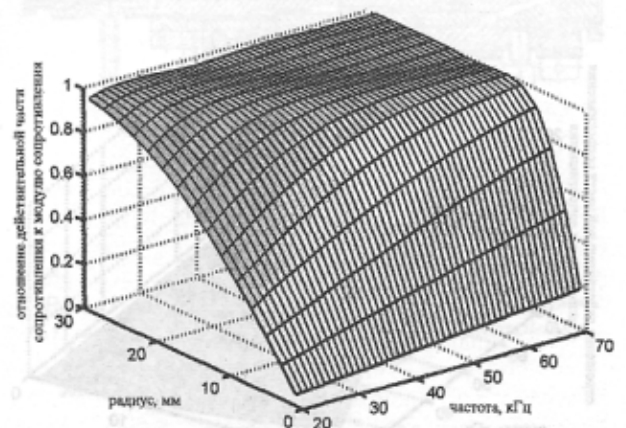


Рис. 3. Отношение действительной части акустического сопротивления к модулю акустического сопротивления.

Графическое изображение выражений (5) и (6), представленное, соответственно, на рис. 3 и рис. 4, позволяет произвести выбор площади поверхности излучения и резонансной частоты вибрационного привода для обеспечения максимальной эффективности того или иного технологического процесса, использующего явление ультразвуковой кавитации.

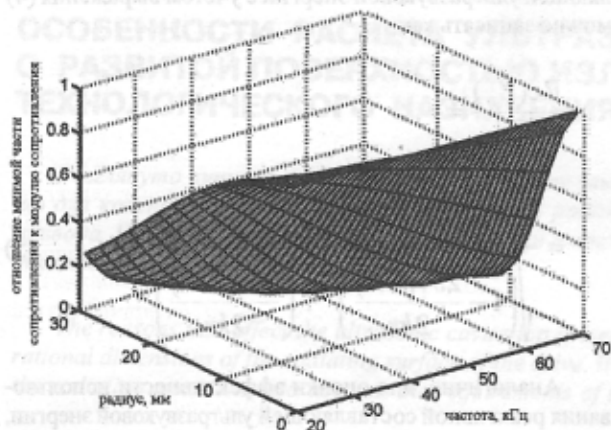


Рис. 4. Отношение мнимой части акустического сопротивления к модулю акустического сопротивления.

При проектировании ультразвукового резонансного привода-излучателя для конкретного технологического процесса удобно воспользоваться выражением для отношения действительной и мнимой частей акустического сопротивления, полученным с учетом выражений (2) и (3):

$$\frac{\text{Re}(\bar{Z}_a)}{\text{Im}(\bar{Z}_a)} = \frac{kr - J_1(2kr)}{S_1(2kr)}, \quad (7)$$

графический вариант которого представлен на рис. 5.

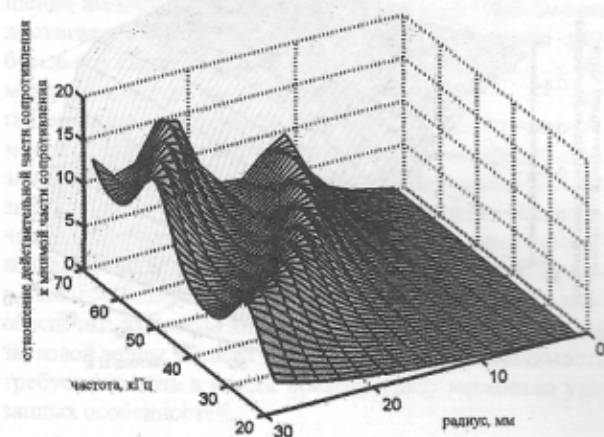


Рис. 5. Отношение действительной части акустического сопротивления к мнимой части акустического сопротивления.

Представленная графическая зависимость (рис. 5) показывает, что каждой рабочей частоте резонансного привода соответствует рациональная площадь излучающей поверхности, при которой излучение ультразвуковой энергии, соответствующей активной или реактивной составляющей акустического сопротивления, является максимальным.

Выводы

Графическое представление действительной и мнимой частей акустического импеданса показывают существенную нелинейность зависимостей звуковой энергии, идущей на достижение эрозионной активности кавитирующей среды или на турбулизацию технологического объема жидкости, от частоты ультразвуковых колебаний и площади излучающей поверхности. Полученные выражения и проведенный анализ позволяют при проектировании ультразвукового технологического оборудования для реализации конкретного технологического процесса, использующего эффекты, сопровождающие явление ультразвуковой кавитации, обоснованно выбирать параметры резонансного привода-кавитатора, что позволит обеспечить высокую эффективность создаваемого оборудования.

Литература

1. Агранат, Б.А., Башкиров, В.И., Китайгородский, Ю.И., Хавский, Н.Н. Ультразвуковая технология. — М.: Металлургия, 1974. — 503 с.
2. Яхно, О.М., Луговская, Е.А., Мовчанюк, А.В. Исследование возможностей технологии ультразвуковой кавитационной очистки эластичных поверхностей // Вісник НТУУ «КПІ», Серія машинобудування. — 2010. — № 58. — С. 234—240.
3. Эльпинер, И.Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие. — М., Госиздат, физико-математическая литература, 1969.
4. Луговской, А.Ф., Мовчанюк, А.В., Гришко, И.А. Оценка методов обеззараживания воды // Вестник НТУУ «КПІ», Серія машиностроение, Вып. 52. — Київ. — 2008. — С. 103—111.
5. Экнадиосянц, О.К. Получение аэрозолей // В кн.: Физические основы ультразвуковой технологии / Под ред. Л.Д. Розенберга. — М.: Наука, 1970. — С. 339—392.
6. Луговской, А.Ф., Чухраев, Н.В. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях. — К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2007. — 244 с.
7. Новицкий, Б.Г. Применение акустических колебаний в Химико-технологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтяной технологии). — М.: Химия, 1983. — 192 с.
8. Федоткин, И.М., Гулый, И.С. Кавитация. Кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. Часть 1. — К.: Полиграфкнига, 1997. — 839 с.
9. Маргулис, М.А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях): Учеб. пособие для хим. и хим.-технол. спец. вузов. — М.: Высшая школа, 1984. — 272 с.
10. Свердлин, Г.М. Прикладная гидроакустика: Учеб. пособие. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Судостроение, 1990. — 320 с.

Надійшла 06.09.2010 р.