

УДК 621.647.23

Мовчанюк А.В., к.т.н., доц.  
НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОНИЧЕСКИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КАВИТАЦИОННЫХ КАМЕР

Movchanuk A.  
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine ([movchanuk@rtf.kpi.ua](mailto:movchanuk@rtf.kpi.ua))

### CALCULATION OF CONICAL ULTRASONIC CAVITATION CELL

*В работе рассмотрены и проанализированы основные методы повышения интенсивности ультразвуковых колебаний в технологическом оборудовании. Предложен метод повышения звукового давления при помощи конического трансформатора давления. Получены выражения для распределения звукового давления вдоль оси конического трансформатора давления. Проанализированы основные факторы, влияющие на эффективность работы конических трансформаторов давления. Предложена методика расчета геометрических размеров конического трансформатора давления. Предложенная методика учитывает параметры жидкости, рабочую частоту и конструктивные особенности кавитационной камеры.*

*Ключевые слова:* ультразвуковая кавитационная обработка, ультразвуковые излучатели, трансформатор колебательного давления, ультразвуковая кавитация.

**Введение.** Ультразвуковые кавитационные технологии находят широкое применение в различных областях. При этом эффективность протекания технологических процессов во многом зависит от интенсивности ультразвуковых колебаний, вводимых в обрабатываемую жидкость [1-3]. Ультразвуковое технологическое оборудование является сложной мехатронной системой, состоящей из ультразвукового резонансного привода, электронной системы управления приводом и кавитационной камеры, заполненной технологической жидкостью.

Существует несколько путей повышения интенсивности ультразвуковых колебаний: повышение амплитуды колебаний излучающей поверхности ультразвуковых резонансных приводов путем использования новых конструкций ультразвуковых колебательных систем; совершенствование электронных систем управления путем введения новых алгоритмов управления ультразвуковыми резонансными приводами; использование новых конструкций ультразвуковых резонансных кавитационных камер.

Повышение амплитуды рабочей поверхности ультразвукового привода не всегда приводит к повышению интенсивности ультразвука в технологическом объеме жидкости. Это связано с тем, что на излучающей поверхности привода возникает кавитационная прослойка, препятствующая дальнейшему распространению ультразвуковых колебаний. Использование новых систем управления и совершенствование существующих, приводит к повышению общего к.п.д. процесса, мало влияя на интенсивность ультразвуковых колебаний в целом. Одним из новых направлений повышения интенсивности ультразвуковых колебаний является переход на резонансные кавитационные камеры, в которых собственные частоты колебаний жидкости в объеме камеры совпадают с резонансной частотой ультразвукового привода [4, 5]. Такие камеры способны концентрировать ультразвуковые колебания до необходимого уровня интенсивности.

В резонансных кавитационных камерах увеличение величины звукового давления, а следовательно и интенсивности кавитационных явлений, получают за счет образования стоячих акустических волн. При этом звуковое давление в пучностях стоячей звуковой волны может значительно превышать величину звукового давления на поверхности ультразвукового привода, что позволяет минимизировать потери от кавитационной прослойке на излучающей поверхности привода. Примерами таких кавитационных камер могут служить ступенчатые и конические трансформаторы звукового давления. На сегодняшний день аспекты проектирования резонансных камер изучены мало.

**Целью** статьи является создание методики расчета ультразвуковых кавитационных камер на базе конического трансформатора звукового давления.

**Исследование.** Кавитационная камера в виде конического трансформатора давления представляет собой усеченный конус из кавитационно стойкого материала с хорошей отражающей способностью к акустическим волнам ультразвукового диапазона (рис.1). В основании конуса размещается излучающая поверхность

ультразвукового резонансного привода. Максимальний поперечний розмір конічного трансформатора тиску вибирається меншим, ніж половина довжини хвилі  $\lambda$  на робочій частоті в технологічній рідині. Такий вибір поперечного розміру дозволяє вважати фронт акустичної хвилі в рідині плоским, а задачу про поширення акустичних коливань в конічному трансформаторі тиску звести до одновимірної. Проектування кавітаційної камери в вигляді конічного трансформатора тиску зводиться до знаходження власних частот коливань рідини в об'ємі кавітаційної камери і виборі таких розмірів камери, при яких ці частоти збігаються з робочою частотою ультразвукового резонансного привода.

Розглянемо поширення акустичних коливань в об'ємі технологічної камери в вигляді конічного трансформатора тиску довжиною  $l$ , радіусами  $R_1$  і  $R_2$  і площами  $S_1$  і  $S_2$  широкою і вузькою частини конуса відповідно. Початок координат збігається з широкою частиною контуру, а поширення акустичних коливань уздовж осі  $z$ .

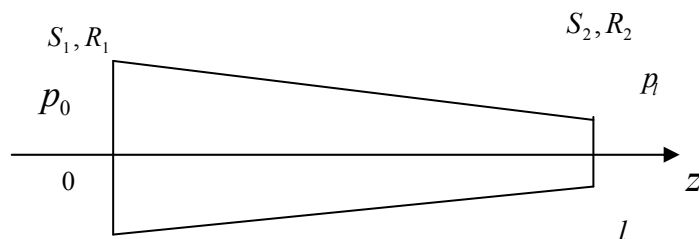


Рис. 1. Розрахункова схема конічного трансформатора тиску

Уравнення для звукового тиску матиме вигляд

$$\frac{\partial^2 p(z)}{\partial z^2} + \frac{1}{S(z^2)} \frac{\partial S(z)}{\partial z} \frac{\partial p(z)}{\partial z} + k^2 p(z) = 0, \quad (1)$$

де  $k$  – хвильове число.

В разі, якщо трансформатор закритий абсолютно жорсткими стінками, граничні умови на його торцях будуть мати вигляд

$$p(0) = p_0; \quad p(l) = p_l; \quad \frac{\partial p(0)}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial p(l)}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

Закон зміни площі поперечного перерізу конічного трансформатора тиску може бути записаний у вигляді

$$S(z) = S_1 \cdot (1 - \alpha \cdot z)^2; \quad \alpha = \frac{R_1 - R_2}{R_1 \cdot l}. \quad (3)$$

Після підстановки (3) в (1) отримуємо

$$\frac{\partial^2 p(z)}{\partial z^2} + \frac{2}{z - \frac{1}{\alpha}} \frac{\partial p(z)}{\partial z} + k^2 p(z) = 0$$

Розв'язок рівняння будемо шукати у вигляді

$$p(z) = \left[ \frac{1}{\left( z - \frac{1}{\alpha} \right)} \right] \cdot (A \cdot \cos(k \cdot z) + B \cdot \sin(k \cdot z)), \quad (4)$$

де  $A$ ,  $B$  – константи, які знаходяться з граничних умов.

Підстановка граничних умов (2) в (4) призводить до співвідношенням

$$B = A \cdot \left[ \frac{k \cdot (1 - \alpha \cdot k) \cdot \sin(k \cdot z) - \alpha \cdot \cos(k \cdot l)}{k \cdot (1 - \alpha \cdot k) \cdot \cos(k \cdot z) + \alpha \cdot \sin(k \cdot l)} \right],$$

$$B = -A \cdot \frac{\alpha}{k}.$$

В результаті отримуємо

$$-\frac{\alpha}{k} = A \cdot \frac{k \cdot (1 - \alpha \cdot k) \cdot \sin(k \cdot z) - \alpha \cdot \cos(k \cdot l)}{k \cdot (1 - \alpha \cdot k) \cdot \cos(k \cdot z) + \alpha \cdot \sin(k \cdot l)}.$$

Введем обозначение  $N = \frac{R_1}{R_2}$ , после преобразований получим

$$\operatorname{tg}(k \cdot l) = \frac{k \cdot l}{\frac{(k \cdot l)^2 \cdot N}{(1-N)^2} + 1} \quad (5)$$

Полученное трансцендентное выражение позволяет рассчитать длину трансформатора давления при заданной рабочей частоте, скорости звука в жидкости и радиусах торцов трансформатора давления.

Распределение звукового давления по длине трансформатора давления будет описываться выражением

$$p(z) = \frac{P_0}{1 - \alpha \cdot z} \cdot \left( \cos(k \cdot z) - \frac{\alpha}{k} \cdot \sin(k \cdot z) \right).$$

Коэффициент отношения величин звукового давления на торцах (коэффициент увеличения давления) может быть найден как

$$M = \left| \frac{P_1}{P_0} \right| = \left| N \cdot \left( \cos(k \cdot l) - \frac{N-1}{N \cdot k \cdot l} \cdot \sin(k \cdot l) \right) \right| \quad (6)$$

Решение трансцендентного уравнения (5) (рис.2.) показывает, что при выбранном соотношении радиусов (диаметров) конца и начала конического трансформатора давления, расчет общей длины является не однозначным.

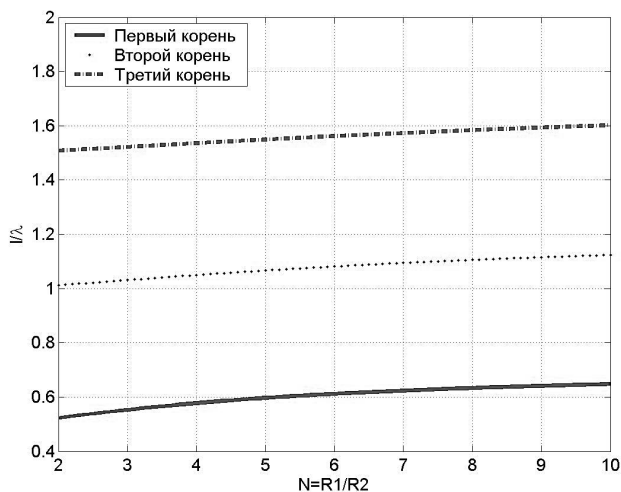


Рис. 2. Номограмма выбора длины конического трансформатора давления

Следует обратить внимание, что при изменении номера корня трансцендентного уравнения, общая длина конуса возрастает не в целое число раз, как это имело бы место для ступенчатого трансформатора давления.

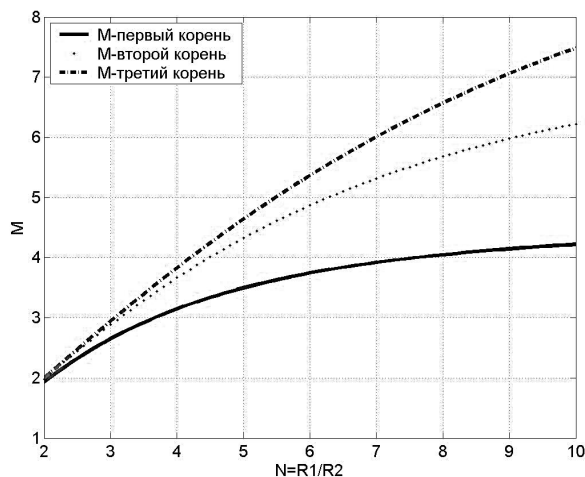


Рис. 3. Зависимость коэффициент трансформации давления от отношений радиусов для корней разной кратности

Проведем более подробный анализ решений трансцендентного уравнения.

Построенные по (6) зависимости коэффициента увеличения давления (рис.3) показывают, что увеличение давления для разных корней при одном и том же отношении радиусов разные. И если для малых отношений увеличение давления пропорционально отношениям радиусов, то при больших отношениях радиусов явное преимущество имеют корни высокой кратности (соответствуют большей общей длине трансформатора давления). При больших отношениях радиусов коэффициент увеличения давления не превышает 4, 3 для первого корня трансцендентного уравнения. В связи с этим для получения больших коэффициентов трансформации давления рационально использовать трансформаторы, длина которых выбрана для второго и выше корней решения трансцендентного уравнения (5). Анализ распределения давления вдоль оси конусного трансформатора показывает, что кратность корня трансцендентного уравнения соответствует числу узлов.

В результате проведенного моделирования можно составить методику расчета геометрических размеров кавитационных камер в виде конического трансформатора давления.

### Исходные данные для расчета

$f$  - рабочая частота ультразвукового резонансного привода;  $M$  - коэффициент увеличения давления;  $c$  - скорость звука в обрабатываемой жидкости.

### Порядок расчета

1. Рассчитываем максимально возможный диаметр кавитационной камеры

$$d_{\max} = 0,586 \cdot \frac{c}{f};$$

2. Выбираем диаметр трансформатора давления из условия

$$d_1 \leq d_{\max}.$$

3. По номограмме (рис.3) выбираем отношение диаметров входной и выходной площадей при заданном коэффициенте увеличения давления
4. Рассчитываем длину волны в жидкости

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

5. По номограмме (рис.2) определяем по выбранному значению отношения диаметров  $N$  необходимую длину трансформатора давления

### Результат расчета

Диаметр входной площади  $d_1$ ; диаметр выходной площади  $d_2$ ; длина кавитационной камеры  $l$ . По полученным значениям выбираем решение с наименьшим значением  $l$ , если нет других конструктивных соображений.

### Выводы

Предложенная методика расчета позволяет определить основные акустические размеры конической ультразвуковой кавитационной камеры, позволяющей обработать жидкость высокоинтенсивным ультразвуком. Высокая интенсивность ультразвука обеспечена применением жидкостного конического трансформатора колебательного давления. Методика учитывает свойства обрабатываемой жидкости и конструктивные особенности кавитационной камеры.

*Анотація.* В роботі розглянуто та проаналізовано основні методи підвищення інтенсивності ультразвукових коливань в технологічному обладнанні. Запропоновано метод підвищення звукового тиску за допомогою кінчного трансформатора тиску. Отримано вирази для розподілу звукового тиску вздовж осі кінчного трансформатора тиску. Проаналізовано основні чинники, що впливають на ефективність роботи кінчних трансформаторів тиску. Наведено результати роботи кінчних трансформаторів тиску на різних модах коливань. Показано, що на найнижчій моді робота кінчного трансформатора тиску є малоєфективною, а коефіцієнт підвищення тиску мало залежить від співвідношення діаметрів та має обмежене значення. Наведено номограми для розрахунку геометричних розмірів кінчного трансформатора тиску в залежності від необхідного коефіцієнту підвищення тиску. Наведено вирази щодо обмеження максимальних діаметрів кінчних трансформаторів тиску. Запропоновано методику розрахунку геометричних розмірів кінчного трансформатора тиску. Запропонована методика враховує параметри рідини, робочу частоту і конструктивні особливості кавітаційної камери.

*Ключові слова:* ультразвукова кавітаційна обробка, трансформатор коливального тиску, ультразвукова кавітація.

**Abstract.** *The main methods of increasing the intensity of ultrasonic vibrations in the process equipment are discussed and analyzed. A method of increasing the sound pressure using a conical transformer pressure is proposed. The expressions for the distribution of sound pressure along the axis of the conical pressure transformer are received. The main factors affecting the efficiency of the conical pressure transformers are analyzed. The results of transformers conical pressure on different modes of oscillation. It is shown that the lowest work conical fashion transformer pressure is ineffective and a maximum pressure increase was dependent on the ratio of the diameter and is of limited value. Shows nomogram for calculating the geometric dimensions of the transformer conical pressure depending on the desired ratio increased pressure. Shows expressions to limit the maximum diameter tapered transformers pressure. The method of calculating the geometric dimensions of the conical pressure transformer is offered. The proposed technique takes into account the parameters of the liquid, the operating frequency and the design features of the cavitation chamber.*

**Keywords:** *ultrasonic cavitation treatment, transformer oscillating pressure, ultrasonic cavitation.*

#### Библиографический список использованной литературы

1. *Луговской А.Ф.* Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А.Ф. Луговской, Н.В. Чухраев. – К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2007. – 244 с.
2. *Эльпинер И.Е.* Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие / И.Е. Эльпинер. – М.: Физматиз, 1963. – 430 с.
3. *Хмелев В.Н.* Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве / В.Н. Хмелев, Г.В. Леонов, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов. – Бийск.: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та БТИ, 2007. – 400 с.
4. *Луговской А.Ф.* Проблемы создания технологического оборудования для ультразвукового кавитационного обеззараживания воды / А.Ф. Луговской, И.А. Гришко // Промислова гідравліка і пневматика. – Вінниця, 2009. – № 4 (26). – С. 3 – 6.
5. *Луговской А.Ф.* Исследование работы ультразвукового трубчатого кавитатора в режиме радиальных колебаний / А.Ф. Луговской, А.В. Мовчанюк, И.А. Гришко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. – Київ, 2010. – Вип. 59. – С. 285 – 287.

#### References

1. *Lugovskoj A.F., Chuhraev N.V.* Ul'trazvukovaja kavitacija v sovremennyh tehnologijah (Ultrasonic cavitation in modern technologies). Kiev: Vidavnicno-poligrafichnij centr «Kiïvs'kij universitet», 2007, 244 p.
2. *Jel'piner I.E.* Ul'trazvuk. Fiziko-himicheskoe i biologicheskoe dejstvie (Ultrasound. Physical and chemical and biological action) Moscow: Fizmatizdat, 1963, 430 p.
3. *Hmelev V.N., Leonov G.V., Barsukov R.V., Cyganok S.N., Shalunov A.V.* Ul'trazvukovye mnogofunkcional'nye i specializirovannye apparaty dlja intensivifikacii tehnologicheskijh processov v promyshlennosti, sel'skom i domashnem hozjajstve (Ultrasonic Multifunctional and specialized devices for intensification of technological processes in industry, agriculture and household) Bijsk.: Izd-vo Alt. gos. tehn. un-ta BТИ, 2007, 400 p.
4. *Lugovskoj A.F., Grishko I.A.* Problemy sozdanija tehnologicheskogo oborudovanija dlja ul'trazvukovogo kavitacionnogo obezzarazhivanija vody. Promislova gidravlika i pnevmatika. Vinnitsa, 2009, no 4 (26), pp. 3 – 6.
5. *Lugovskoj A.F., Movchanjuk A.V., Grishko I.A.,* Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Politechnic Institute", 2010, no 59, pp. 285-287.

Подана до редакції 10.11.2014