

Совершенствование Конструкции Резонансного Концентрирующего Звена С Увеличенной Поверхностью Излучения

Владимир Н.Хмелев, Сергей С.Хмелев, Роман Н.Голых, Ксения А. Карзакова, Сергей В. Левин
Центр ультразвуковых технологий, Бийск, Россия
Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического
университета и. И.И. Ползунова, Бийск, Россия

Аннотация - В статье представлены результаты исследования функциональных возможностей, оптимизации геометрических размеров и совершенствования конструкции специализированного резонансного концентрирующего звена с увеличенной поверхностью излучения. Разработанная теоретическая модель позволила определять значения продольных и поперечных размеров каждого из участков концентрирующего звена, обеспечивающих достижение требуемых технических характеристик ультразвуковых колебательных систем (коэффициента усиления звена и его резонансной частоты). Для проверки эффективности разработанной модели проведено определение геометрических размеров резонансного концентрирующего звена с помощью конечно-элементного комплекса показавшее, что расхождение не превышает 10%. Эффективность предложенной модели при определении размеров и резонансных характеристик концентрирующего звена подтверждена результатами экспериментальных исследований.

Теоретические и экспериментальные исследования позволили оптимизировать размеры концентрирующего звена, а созданная на его основе колебательная система при реализации технологий кавитационной обработки жидких сред обеспечила увеличение излучающей поверхности более чем в 6 раз без снижения интенсивности излучения.

Ключевые слова - Ультразвук, ультразвуковая колебательная система, концентрирующее резонансное звено, концентратор, коэффициент усиления.

I. ВВЕДЕНИЕ

Используемое в настоящее время ультразвуковое (УЗ) технологическое оборудование базируется на общих принципах построения и поэтому сходно по своей структуре. В состав любого УЗ технологического аппарата входит электронный генератор и ультразвуковая колебательная система (УЗКС). Колебательная система представляет собой устройство, обеспечивающее преобразование энергии электрических колебаний, поступающих от генератора, в упругие механические колебания, их усиление и введение в обрабатываемые среды. Усиление амплитуды механических колебаний до величин, необходимых для реализации различных технологических процессов осуществляют при помощи концентраторов.

Концентраторы ультразвуковых колебаний представляют собой стержни переменного сечения, присоединяемые к

преобразователю входным участком большего сечения. Только повышение амплитуды колебаний, формируемых пьезоэлектрическими преобразователями, за счет применения концентраторов позволяет реализовывать кавитационную обработку жидких сред, ультразвуковую сварку, размерную обработку хрупких материалов и другие ультразвуковые технологические процессы.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Принцип действия концентраторов основан на увеличении амплитуды колебательного смещения частиц стержня вследствие уменьшения его поперечного сечения в соответствии с законом сохранения движения. В результате многочисленных исследований [1, 2] было показано, что наиболее перспективными среди используемых концентраторов являются ступенчатые концентраторы с переходным радиальным участком. Схематично ступенчато-радиальный концентратор представлен на Рис. 1.

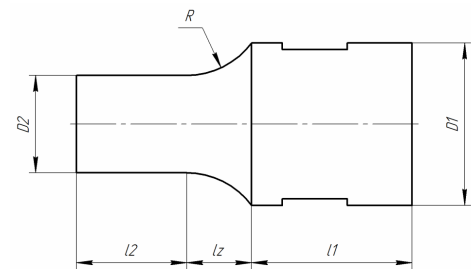


Рис. 1. Общий вид составного ступенчато-радиального концентратора

Расчет участков l_1 , l_2 , l_z осуществляется по известным методикам расчета, подробно изложенным в [1, 2].

Используемые в составе современных УЗ аппаратов концентраторы обладают высоким коэффициентом усиления, хорошими прочностными и согласующими пьезопреобразователь с жидкой средой характеристиками. Однако, использование концентраторов с высоким коэффициентом усиления (около 10) не всегда реализуемо на практике, поскольку уменьшение диаметра выходной части значительно снижает прочностные характеристики

переходного участка и уменьшает площадь излучающей поверхности. Попытки увеличения входного сечения концентратора не позволяют решить проблему, поскольку требуют увеличивать размеры пьезоэлектрических преобразователей, что не всегда возможно из-за ограниченности диаметров выпускаемых пьезоэлементов.

Вместе с тем известно одно из решений рассматриваемой проблемы, основанное на использовании концентрирующего звена, объединяющего классический концентратор с резонирующей на его собственной частоте дополнительной массой.

Впервые такая конструкция была предложена в [3, 4] и являлась основой для построения ультразвуковых колебательных систем (УЗКС), использующихся в ряде высокопроизводительных химических кавитационных реакторов. Использование такой конструкции позволяло получить требуемый коэффициент усиления при равных входных и выходных диаметрах звена.

Сущность конструкции такого звена поясняется Рис. 2. Участок диаметром D_1 является входным и выбирается равным выходному диаметру пьезоэлектрического преобразователя. При практическом применении линейные размеры l_1, l_2, l_3 выбираются соответствующими размерам ступенчато-радиального концентратора. Диаметр D_2 является промежуточным и определяет необходимый коэффициент усиления. Размер l_4 обычно соответствует размеру l_2 , и влияние угла α на параметры усиления не рассматривалось. Размер l_5 выбирается из условия, что $l_4 + l_5 = \lambda/2$, где λ – длина волны в материале концентрирующего звена. Выбор выходного диаметра D_3 обычно соответствует диаметру D_1 , однако его значение должно определяться требованиями технологических процессов и требует изучения.

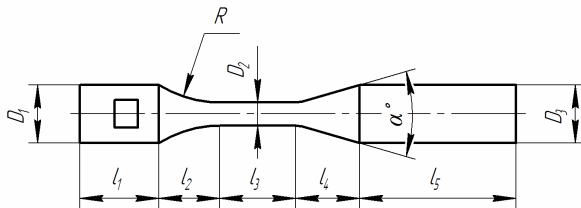


Рис. 2. Конструктивная схема концентрирующего резонирующего звена

К сожалению, концентрирующее звено, объединяющее классический концентратор с резонирующей массой не получило широкого практического распространения. Обусловлено это отсутствием теоретических и экспериментальных исследований, направленных на выработку методических рекомендаций по оптимизации конструкции для получения максимального коэффициента усиления в различных условиях, при различных диаметрах и размерах излучающей поверхности.

Таким образом, наличие в концентрирующем резонансном звене большого количества переходных участков и продольных участков различных диаметров, требует подробных исследований конструкции для выявления оптимальных соотношений длин участков и диаметров при

заданных отношениях площадей входного и выходного торцов концентратора.

Проведению исследований концентрирующего резонансного звена посвящена представленная работа.

III. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Для построения теоретической модели, способной обеспечить теоретические расчеты концентрирующего резонансного звена приняты следующие упрощающие допущения:

- а) в стержне распространяется плоская волна, т.е. напряжения и скорости частиц по всей площади произвольного сечения постоянны;
- б) поперечное сжатие конструкции отсутствует;
- в) колебания конструкции гармонические.

В этом случае, распределение амплитуд колебательных смещений участков малых диаметров рассматриваемого звена, в зависимости от продольной координаты, описывается следующим уравнением продольных колебаний тонкого стержня (1):

$$S(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(S(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где $S(x)$ – площадь поперечного сечения концентрирующего резонансного звена в продольной координате x , u – величина колебательного смещения звена в точке с продольной координатой x , c – скорость распространения продольных колебаний в материале.

Поскольку рассматриваемое резонансное звено представляет собой линейную систему, справедливо утверждение, что все участки звена колеблются с одинаковой частотой ω :

$$-\omega^2 S(x)U = c^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(S(x) \frac{\partial U}{\partial x} \right), \quad (2)$$

где U – амплитуда колебательных смещений.

Для дальнейшего рассмотрения звено разбивается на несколько участков следующих типов:

- 1) участок постоянного сечения;

$$S(x) = const,$$

Величина колебательных смещений представима в следующем виде:

$$U(x) = A \cos(kx) + B \sin(kx),$$

где k – волновое число концентрирующего звена.

2) участок с линейным профилем. Площадь поперечного сечения представлена следующей зависимостью от координаты:

$$S(x) = \left(\sqrt{S_0} + \frac{\sqrt{S_1} - \sqrt{S_0}}{L} x \right)^2,$$

где S_0 – площадь входного торца, S_1 – площадь выходного торца, L – длина участка.

Величина колебательных смещений представима в следующем виде:

$$U(x) = AG_{1,S_0,S_1,k,L}(x) + BG_{2,S_0,S_1,k,L}(x),$$

3) участок звена с радиальным профилем. Площадь поперечного сечения представлена следующей зависимостью от координаты:

$$S(x) = S_1 \left(\frac{d_1 + R - \sqrt{R^2 - (L-x)^2}}{d_1} \right)^2,$$

где S_1 – площадь выходного торца, d_1 – диаметр выходного торца, L – длина участка, R – радиус кривизны продольного профиля.

Величина колебательных смещений представима в следующем виде:

$$U(x) = AE_{1,S_0,S_1,k,L}(x) + BE_{2,S_0,S_1,k,L}(x),$$

Функции G и E определяются исходя из решения уравнения (2).

Используя указанные представления, составляется система уравнений из следующей системы граничных условий равенства смещений и напряжений на границах участков (постоянного сечения – радиальный – постоянного сечения – с линейным профилем – радиальный):

$$A_0 = U_0$$

$$A_0 \cos(kL_1) + B_0 \sin(kL_1) = A_1 E_{1,S_0,S_1,k,L}(0) + B_1 E_{2,S_0,S_1,k,L}(0)$$

$$-kA_0 \sin(kL_1) + kB_0 \cos(kL_1) = A_1 E_{1,S_0,S_1,k,L}'(0) + B_1 E_{2,S_0,S_1,k,L}'(0)$$

$$A_1 E_{1,S_0,S_1,k,L}(L_2) + B_1 E_{2,S_0,S_1,k,L}(L_2) = A_2$$

$$A_1 E_{1,S_0,S_1,k,L}'(L_2) + B_1 E_{2,S_0,S_1,k,L}'(L_2) = kB_2$$

$$-kA_2 \sin(kL_3) + kB_2 \cos(kL_3) = A_3 G_{1,S_0,S_1,k,L}'(0) + B_3 G_{1,S_0,S_1,k,L}'(0)$$

$$A_2 \cos(kL_3) + B_2 \sin(kL_3) = A_3 G_{1,S_0,S_1,k,L}(0) + B_3 G_{1,S_0,S_1,k,L}(0)$$

$$A_3 G_{1,S_0,S_1,k,L}(L_4) + B_3 G_{1,S_0,S_1,k,L}(L_4) = A_4$$

$$A_3 G_{1,S_0,S_1,k,L}'(L_4) + B_3 G_{1,S_0,S_1,k,L}'(L_4) = kB_4$$

$$A_4 G_{1,S_0,S_1,k,L}'(L_5) + B_4 G_{1,S_0,S_1,k,L}'(L_5) = 0$$

Решение полученной системы уравнений методом Гаусса относительно постоянных коэффициентов $A_1, \dots, A_4, B_1, \dots, B_4$ позволяет найти распределение амплитуд колебаний вдоль концентрирующего резонансного звена.

Полученное распределение амплитуд продольных колебательных смещений вдоль акустической оси концентрирующего звена представлено на Рис. 3 при различных длинах участка l_4 и диаметрах входного и выходного сечений (10, 15, 27 мм)

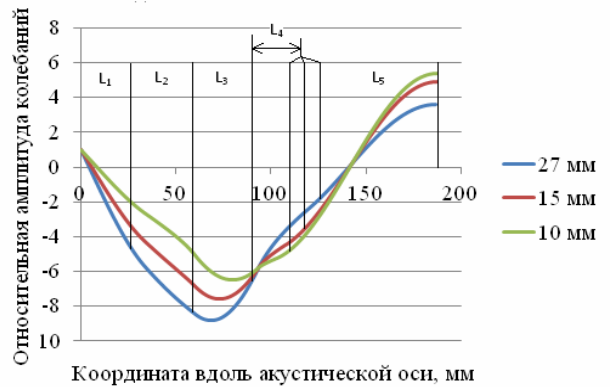


Рис. 3. Распределение амплитуд продольных колебаний концентрирующего звена при различных длинах участка l_4

Полученное распределение амплитуд колебаний вдоль концентрирующего резонансного звена позволяет установить, что выбором длины участка l_4 при постоянной суммарной длине усиливающего звена можно обеспечить дополнительное увеличение коэффициента усиления в 1,5 раза без изменения диаметров D_2 и D_3 .

На Рис. 4 приведена зависимость коэффициента усиления от соотношения площадей входного ($S_{вх}$) и выходного ($S_{вых}$) торца для ступенчато-радиального двухполуволнового концентратора, полученная при помощи разработанной модели.

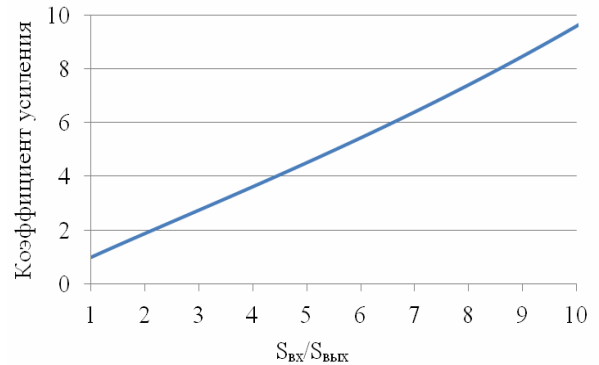


Рис. 4. Распределение амплитуд продольных колебаний концентрирующего звена при различных длинах участка l_4

При установлении соотношений площадей входного и выходного сечений концентрирующего участка, равными отношению площадей участков максимального и минимального сечения (l_5 и l_3) разрабатываемого усиливающего звена, можно путём оптимизации длины участка l_4 достичь соответствующего коэффициента усиления, в данном случае, равного 5,7.

Однако за счёт увеличения в 6,25 раз площади выходного торца в рассматриваемом звене, можно достичь более чем 6-кратного увеличения вводимой акустической энергии, что свидетельствует о высокой эффективности данного концентрирующего звена. На Рис. 5 и 6 приведены зависимости коэффициента усиления от диаметра и длины участка l_4 .

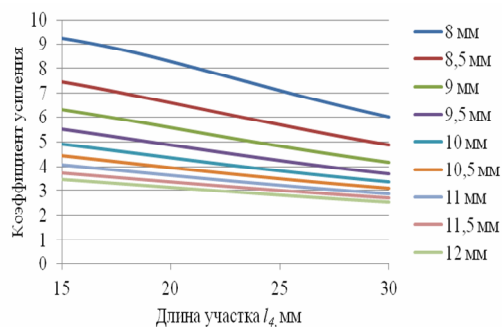


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления от длины участка l_4 при различных диаметрах D_2

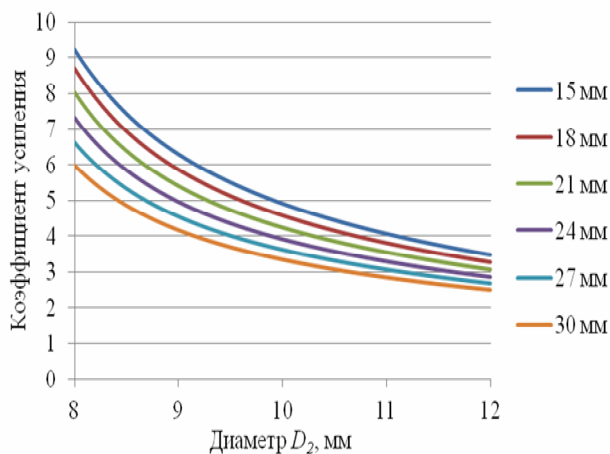


Рис. 6. Зависимость коэффициента усиления от диаметра участка l_3 при различных диаметрах участка l_4

Представленные зависимости позволяют сделать вывод о том, что наиболее существенно на коэффициент усиления влияет диаметр тонкого участка l_3 .

Однако, попытка уменьшения диаметра с 10 до 8 мм с целью 2-кратного повышения коэффициента усиления является недопустимой, поскольку приводит к такому росту механических напряжений, которые могут привести к поломке звена. Поэтому оптимальный диаметр с точки зрения обеспечения допустимых механических напряжений составляет около 10 мм. Вместе с тем, анализ модели показывает возможность повышения коэффициента усиления до 6...7 раз путем уменьшения длины участка l_4 (увеличением угла α , см. Рис. 2).

Таким образом, разработанная модель позволяет совершенствовать конструкцию усиливающего звена путем определения оптимальных конструктивных параметров.

IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРИРУЮЩЕГО ЗВЕНА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В результате последовательного выполнения всех этапов расчета по предложенной модели определяются основные конструктивные размеры концентрирующего звена. Для подтверждения адекватности предложенной модели были проведены сравнения с расчетами, полученными прямым численным методом конечных элементов [5]. При этом

разработка трехмерных твердотельных моделей узлов УЗКС осуществлялась посредством системы автоматизированного твердотельного проектирования.

В качестве начальных размеров были взяты: входной диаметр $D_1=25$ мм (равный выходному диаметру пьезоэлектрического преобразователя), $D_2=10$ мм, выходной диаметр $D_3=25$ мм. Участки l_1, l_2, l_3 рассчитываются по методике расчета представленной в [1, 2] при этом $l_1+l_2+l_3=\lambda/2$, участок l_4 выбирается равным участку l_2 . Участок l_5 рассчитывается исходя из условия, что $l_4+l_5=\lambda/2$. В итоге общая длина конструкции получается резонансной, равной $2\lambda/2$.

В качестве начальных размеров концентрирующего звена были взяты размеры участков, полученные на этапе теоретического расчета. Затем были промоделированы концентрирующие звенья с шагом по 0,5 мм вокруг этих базовых размеров. Полученные результаты приведены на рис. 7. На Рис. 7а изображена зависимость коэффициента усиления от диаметра D_2 , на Рис. 7б, зависимость коэффициента усиления от длины участка l_4 .

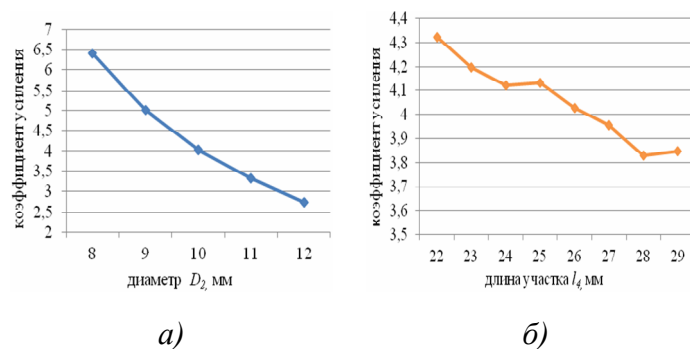


Рис. 7. Результаты моделирования методом конечных элементов

Из зависимости, представленной на Рис. 7а следует, что устанавливая диаметр D_2 равным 8 мм может быть получен максимальный коэффициент усиления, при неизменном диаметре выходной части. Однако, как было сказано выше такой диаметр средней части звена, так же как и его дальнейшее уменьшение приводит к значительному возрастанию механических напряжений в данной области, что может приводить к поломке. Поэтому в качестве оптимального диаметра, удовлетворяющего условию достижения максимального коэффициента усиления при механических напряжениях, не превышающих пороговые для материала звена, выбрано значение, равное 10 мм.

Из зависимости, представленной на Рис. 7б следует, что при уже зафиксированном размере D_2 наибольший коэффициент усиления достигается при минимальной длине участка l_4 концентрирующего звена.

При моделировании определялась длина концентрирующего звена с целью установления точного значения собственной резонансной частоты конструкции. По расчетам с использованием предложенной модели резонансная частота конструкции составила 29,9 кГц. Таким образом, на этапе моделирования были определены и выбраны оптимальные длины всех участков концентрирующего звена на заданную резонансную частоту, что позволило приступить к изготовлению

концентрирующего звена для ультразвуковых технологических аппаратов.

В результате расчётов установлено, что различие между результатами моделирования методом конечных элементов и с помощью предложенной модели составляет не более 10%. Наличие такой погрешности обусловлено тем, что предложенная модель не учитывает поперечные радиальные колебания концентрирующего звена, поскольку продольные колебания представляют наибольший практический интерес для реализации ультразвуковых технологий. Тем не менее, модель является вполне удовлетворительной для расчёта основных геометрических и резонансных параметров концентрирующего звена.

V. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования по выявлению технических характеристик разработанного звена заключались в измерении собственной резонансной частоты конструкции и коэффициента усиления ультразвуковой колебательной системы, а так же амплитуды механических колебаний на выходном торце звена и измерении электроакустического КПД ультразвукового аппарата.

Внешний вид концентрирующего звена и ультразвукового аппарата «Алена», использующего колебательную систему с таким звеном показаны на Рис. 8.



Рис. 8. Внешний вид разработанного концентрирующего звена и ультразвукового аппарата

В качестве источника ультразвуковых колебаний был использован пьезоэлектрический преобразователь, состоящий из 2-х пьезокерамических колец типоразмера 24x12,5x6,35 мм, с частотопонижающей излучающей накладкой из алюминиевого сплава В95 и частотопонижающей отражающей накладкой из стали 45. Соединение преобразователя с концентрирующим звеном производилось посредством шпилечного соединения.

Измерение собственной резонансной частоты колебательной системы и коэффициента усиления производили при помощи пьезоэлектрического щупа с сухим точечным контактом при питании УЗКС от низковольтного генератора. Резонансная частота определялась по максимальному значению амплитуды колебаний, коэффициент усиления определялся как отношение максимальной амплитуды колебаний на излучающем торце УЗКС к амплитуде колебаний на задней отражающей накладке пьезоэлектрического

преобразователя. Результаты измерений приведены в Табл. 1.

ТАБЛИЦА 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ
 ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЩУПА.

Звено	Амплитуда на торце, В	Амплитуда, на задней отражающей накладке, В	Резонансная частота, кГц	Коэффициент усиления
Пьезоэлектрический преобразователь	2,4	1,6	29,71	1,5
+ концентрирующее звено	5,8	0,8	29,76	7,25

Таким образом, результаты измерений показывают, что измеренное значение коэффициента усиления концентрирующего звена составляет 4,8, что в свою очередь отличается от значения коэффициента усиления, полученного при теоретических расчетах не более чем на 5%. Расхождения в определении резонансной частоты составили 0,6%.

Амплитуду механических колебаний на торце концентрирующего звена измеряли при помощи стробоскопического способа [7]. Для этого использовали стробоскоп для измерения амплитуды механических колебаний и микроскоп. Измерения амплитуды колебаний при работе аппарата показали, что амплитуда механических колебаний на выходном торце концентрирующего звена составляет 40–45 мкм. Полученные данные также подтверждают полученные значения коэффициента усиления УЗКС с концентрирующим звеном, при этом, полученное значение амплитуды достаточно для реализации большинства ультразвуковых технологий.

Поскольку теоретически наличие диаметральных колебаний концентрирующего звена не рассматривалось, представляет особый интерес исследование распределения колебаний цилиндрического участка l_5 . Полученное вышеописанным методом распределение амплитуды колебаний представлено на Рис. 9.

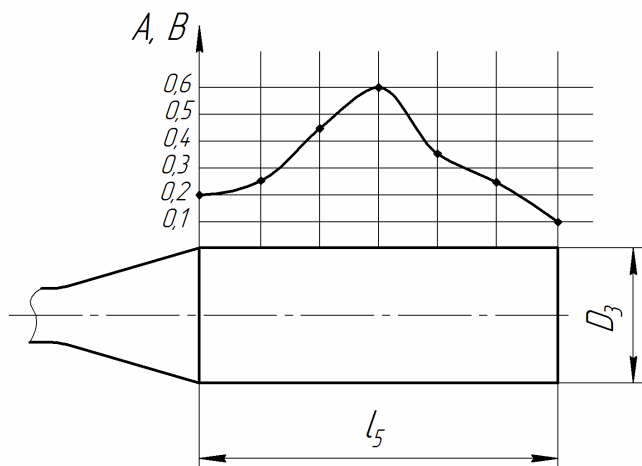


Рис. 9. Распределение амплитуды колебаний вдоль цилиндрического участка l_5

Как видно из графика, концентрирующее звено обладает достаточно высоким уровнем поперечных колебаний (максимальное значение амплитуды при работе аппарата не превышает 5 мкм), что может обуславливать дополнительный выход энергии с боковой поверхности. Эту долю легко определить экспериментально, погружая цилиндрический участок в воду частично.

Полный (при полном погружении цилиндрического участка) КПД ультразвукового аппарата определяли при помощи calorиметрического метода. Этот способ является одним из наиболее доступных и пригодных для определения полезной акустической мощности ультразвуковых установок, предназначенных для работы в жидких и жидкодисперсных средах [6]. Методика проведения измерений основана на практической реализации calorиметрического метода, стандартизованного Международной электротехнической комиссией. Измерение электроакустической мощности проводили при помощи анализатора качества электрической энергии. Измерения проводились на двух типах жидкостей – водопроводной воде и моторном масле по SAE10-W40. Количество серий измерений для каждого типа жидкостей было выбрано равным 10, затем значения усреднялись.

Результаты измерений приведены в Табл. 2.

ТАБЛИЦА 2.

ИЗМЕРЕНИЯ КПД АППАРАТА, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ ПОМОЩИ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА

Наименование жидкости	Потребляемая мощность аппарата от электрической сети, Вт	Акустическая мощность, Вт	КПД, %
Вода	390	244	61,5
Масло моторное	410	235	57,3

Из полученных результатов следует, что излучаемая аппаратом акустическая мощность, при использовании пьезоэлектрического преобразователя диаметром 25 мм с рассматриваемым концентрирующим звеном значительно

(примерно в 4 раза) превосходит излучаемую мощность, при использовании колебательных систем с традиционными концентратором. Это свидетельствует о том, что исследуемый вид концентрирующего звена позволяет выводить большее количество энергии в обрабатываемую среду. Значение КПД ультразвукового аппарата с концентрирующим звеном достаточно велико, и соответствует значениям КПД ультразвуковых аппаратов с традиционными концентраторами и грибовидными рабочими инструментами.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы исследован новый тип концентрирующего резонансного звена для ультразвуковых колебательных систем. В результате теоретических расчетов выявлены основные зависимости длин участков, составляющих концентрирующее звено, при заданных начальных условиях, определены условия обеспечения максимального коэффициента усиления звена при заданных условиях. На основании результатов теоретических исследований было разработано усовершенствованное концентрирующее резонансное звено для ультразвуковой колебательной системы и изготовлен технологический аппарат для такой системы. Результаты экспериментальных исследований созданного УЗ технологического аппарата позволили подтвердить возможность создания ультразвуковых колебаний с заданной амплитудой (до 45 мкм) и обеспечить при КПД более 60% увеличение в 4 раза вводимой в обрабатываемые среды акустической энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Меркулов, Л.Г. Теория и расчет составных концентраторов [текст] / Л.Г. Меркулов, А.В. Харитонов // «Акустический журнал», 1959, т.5, №2.
- [2] Меркулов, Л.Г. Теория ультразвуковых концентраторов [текст] / Л.Г. Меркулов // «Акустический журнал», 1957, т.3, №3.
- [3] S. Peshkovsky, A. Peshkovsky. High capacity ultrasonic reactor system. international application no.: pct/us2008/068697, international filing date: 30.06.2008.
- [4] S. Peshkovskiy, M. Friedman, W. Hawkins. Ultrasonic rod waveguide-radiator. United States patent #7,156,201, January 2, 2007.
- [5] Хмелев, В.Н. Автоматизированное проектирование ультразвуковых колебательных систем [текст] / В.Н. Хмелев, А.Н. Лебедев, С.Н. Цыганок // Известия тульского государственного университета: избранные труды участников второй международной электронной научно-технической конференции. – Тула, 2003. – с. 14–18.
- [6] Хмелев, В.Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве [текст] / В.Н. Хмелев, Г.В. Леонов, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов // Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. – 400 с.
- [7] Патент 2292530 Российская Федерация, мпк g01h 9/00. Способ измерения амплитуды колебаний [текст] / Г.В. Леонов, В.Н. Хмелев, И.И. Савин, Д.С. Абраменко; заявитель и патентообладатель Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – № 2005111032/28, заявл. 14.04.05; опубл. 27.01.07. бюл. № 3. – 10 с.