



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 534.29.66.084:534-18

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.009



[EDN: SJHFSV](https://elibrary.ru/SJHFSV)

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С РАДИАЛЬНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИМИ ПАКЕТАМИ

Владимир Николаевич Хмелев¹, Андрей Викторович Шалунов²,
Виктор Александрович Нестеров³, Александр Сергеевич Боченков⁴,

^{1, 2, 3, 4} Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийск, Россия

¹ vnh@u-sonic.ru

² Shalunov@u-sonic.ru

³ nva@u-sonic.ru

⁴ sanya.bochankov@mail.ru

Аннотация. В настоящей статье описывается конструкция ультразвукового пьезоэлектрического преобразователя увеличенной акустической мощности. Повышение мощности достигается за счет суммирования акустической мощности нескольких преобразователей Ланжевена, установленных на единой излучающей накладке.

Проведенные исследования позволили установить, что основной недостаток этого пьезопреобразователя заключается в разрушении пьезокерамических колец вследствие высокой неравномерности распределения амплитуд колебаний в местах их установки.

Теоретические и экспериментальные исследования позволили провести оптимизацию и устранить выявленный недостаток пьезоэлектрического преобразователя. При этом в качестве критерия оптимизации был выбран максимум равномерности распределения амплитуд колебаний в области присоединения пьезокерамических колец. В результате проведенных исследований разработана оптимизированная конструкция высокочастотных преобразователей. Определено, что установка 9-11 радиально расположенных пьезокерамических пакетов обеспечивает минимальную неравномерность колебаний в области присоединения пьезоколец, при этом преобразователь, рассчитанный на 30 кГц, обеспечивает акустическую мощность не менее 1450 Вт с КПД 78 %.

Ключевые слова: преобразователь Ланжевена, ультразвуковой излучатель, высокочастотные колебания.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда №19-19-00121.

Для цитирования: Ультразвуковой преобразователь с радиально расположенными пьезокерамическими пакетами / В. Н. Хмелев [и др.] // Ползуновский вестник. 2022. № 4. Т. 2. С. 66–76. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.009. EDN: <https://elibrary.ru/SJHFSV>.

Original article

ULTRASONIC TRANSDUCER WITH RADIALLY POSITIONED PIEZOCERAMIC PACKAGES

Vladimir N. Khmelev¹, Andrey V. Shalunov², Victor A. Nesterov³,
Alexander S. Bochenkov⁴

^{1, 2, 3, 4} Biysk Technological Institute (branch) of the Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russia

¹ vnh@u-sonic.ru

² Shalunov@u-sonic.ru

³ nva@u-sonic.ru

⁴ sanya.bochankov@mail.ru

Abstract. *This article describes the design of an ultrasonic piezoelectric transducer with increased power. The increase in power is achieved by summing the power of several Langevin converters installed on a single radiating patch.*

The conducted studies have shown that the main disadvantage of this piezoelectric transducer is the destruction of piezoceramic rings due to the high uneven distribution of oscillation amplitudes in the region of their attachment.

Theoretical and experimental studies have made it possible to optimize and eliminate the main drawback of the piezoelectric transducer. In this case, the maximum uniformity of the distribution of vibration amplitudes in the area of attachment of piezoceramic rings was chosen as an optimization criterion. As a result of the research, an optimized design of high-frequency converters has been developed. It has been determined that the installation of 9-11 radially arranged piezoceramic packages provides the minimum non-uniformity of oscillations in the area of piezoring attachment, while the transducer designed for 30 kHz provides acoustic power of at least 1450 W with an efficiency of 78 %.

Keywords: *langevin transducer, ultrasonic transducer, high-frequency oscillations.*

Acknowledgements: *The study was carried out by a grant from the Russian Science Foundation №19-19-00121.*

For citation: Khmelev, V. N., Shalunov, A. V., Nesterov, V. A. & Bochenkov, A. S. (2022). Ultrasonic transducer with radially positioned piezoceramic packages. *Polzunovskiy vestnik*, 4(2), 66-76. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.009. EDN: <https://elibrary.ru/SJHFSV>.

ВВЕДЕНИЕ

Создание новых ультразвуковых технологий ограничивается отсутствием высокочастотных ультразвуковых излучателей увеличенной мощности. Такие излучатели востребованы при решении задач интенсификации процессов экстракции в жидких средах [1], очистки воздуха от взвешенных частиц размером менее 2,5 мкм за счет их агломерации [2, 3].

Кроме того, известно, что ультразвуковые (УЗ) колебания с частотой более 25 кГц и интенсивностью выше 10 Вт/см² дают возможность разрушать эмульсии, отделяя нефть от воды [3], очищать буровые растворы от инородных частиц [4], создавать тонкодисперсные туманы для напыления однородных покрытий при производстве электронных (микросхемы и процессоры) и медицинских (коронарные стенты) изделий [5, 6].

На сегодняшний день устройства для создания ультразвуковых колебаний строятся по конструктивной схеме Ланжевена, в которой обеспечивается преобразование электрической энергии в энергию ультразвуковых колебаний с максимальной эффективностью. Эта схема включает в себя последовательно установленные, механически и акустически связанные между собой излучающую накладку, два или четыре пьезоэлектрических кольцевых элемента и отражающую накладку. Длина всей конструкции соответствует половине длины волны ультразвуковых колебаний в материалах преобразователя и определяет резонансную частоту формируемых ультразвуковых колебаний [7]. Схема Ланжевена хорошо зарекомендовала себя при построении современных излучателей на рабочие частоты от 15 до 22 кГц [7–12].

Однако при создании по схеме Ланжеве-

на преобразователей с рабочей частотой более 25 кГц возникает ряд технических трудностей, вызванных тем, что при уменьшении продольного резонансного размера элементов (что необходимо для обеспечения увеличенной резонансной частоты преобразователя) требуется увеличивать диаметр таких элементов (в том числе и пьезоэлементов) для сохранения или увеличения излучаемой мощности. Это обусловлено тем, что мощность создаваемых колебаний определяется объемом используемого пьезоматериала и для современных материалов не превышает 20 Вт на 1 см³ пьезоматериала.

В свою очередь, увеличение диаметра пьезоэлементов приводит к нарушению равномерности колебаний преобразователя, росту паразитных диаметральных колебаний и снижению эффективности формирования продольных колебаний. Теоретически и экспериментально установлено, что внешний диаметр пьезокерамических элементов в такой конструктивной схеме не может быть больше половины резонансной (равной половине длины волны) длины преобразователя [13–15].

Для решения этой проблемы авторами ранее было предложено увеличить интенсивность излучаемых ультразвуковых колебаний суммированием колебаний отдельных преобразователей, размещаемых на общей излучающей накладке [16–18].

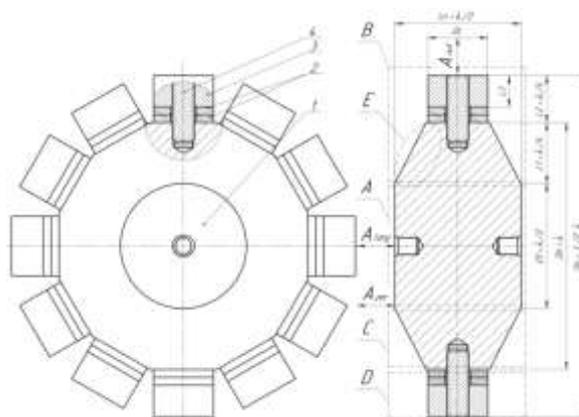
Однако суммирование колебаний преобразователей Ланжевена на продольно колеблющейся общей суммирующей накладке для создания высокочастотных преобразователей неприемлемо из-за возникновения диаметральных колебаний самой суммирующей наклейки, что увеличивает механические напряжения в материале преобразователя до критических значений, приводящих к его поломке. Это происходит в случае, когда диаметр суммирующей наклейки превышает четверть длины волны формируемых колебаний в материале наклейки.

Для устранения указанных недостатков существующих конструкций и увеличения удельной плотности излучаемой энергии предложено использовать диаметральные колебания (считающиеся паразитными в преобразователях Ланжевена) общей суммирующей наклейки. Для этого высокочастотные колебания, создаваемые радиально установленными преобразователями Ланжевена, суммируются на накладке. Накладка выполнена в виде цилиндра, диаметр и высота которого кратны половине длины волны ультразвуковых колебаний в материале наклейки. В такой конструктивной схеме излучаю-

щая накладка выполняет одновременно функции сумматора формируемых колебаний и преобразователя диаметральных колебаний в продольные колебания [17].

КОНСТРУКЦИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ДЛЯ СУММИРОВАНИЯ МОЩНОСТЕЙ, РАДИАЛЬНО РАСПОЛОЖЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЛАНЖЕВЕНА

Конструкция ультразвукового высокочастотного излучателя, обеспечивающего суммирование колебаний, радиально размещенных преобразователей Ланжевена представлена на рисунке 1 [17].



- 1 – суммирующая излучающая накладка;
- 2 – пьезокерамические элементы;
- 3 – отражающие накладки;
- 4 – соединительные шпильки

Рисунок 1 – Конструкция высокочастотного ультразвукового излучателя увеличенной мощности

Figure 1 - The design a high-frequency ultrasonic radiator with increased power

Излучатель состоит из суммирующей излучающей наклейки (поз. 1), радиально и радиально расположенных пьезокерамических элементов (поз. 2), отражающих накладок (поз. 3) и соединительных шпилек (поз. 4).

Область А суммирующей наклейки (поз. 1) диаметром D_1 и длиной L_p представляет собой преобразователь диаметральных колебаний в продольные колебания. Два пьезоэлемента (поз. 2), отражающая накладка (поз. 3) и соединительная шпилька (поз. 4) представляют собой пьезоэлектрический пакет (область D). Пьезоэлектрический пакет (область D) совместно с частью суммирующей наклейки (область C) толщиной L_1 выполняет роль преобразователя Ланжевена (область B).

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С РАДИАЛЬНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИМИ ПАКЕТАМИ

Область А накладки (поз. 1) суммирует колебания радиально-расположенных пьезопреобразователей Ланжевена (область В) за счет формирования диаметральных растяжений и сжатий. Создаваемые диаметральные колебания приводят к формированию продольных колебаний. При этом амплитуда на торцевых поверхностях (ALONG) зависит как от амплитуды колебаний радиально расположенных пьезопреобразователей Ланжевена (область В), так и от коэффициента трансформации суммирующей накладки (область А). Этот коэффициент зависит от соотношения между размерами $D1$ и L_n , а также от количества пьезоэлектрических пакетов (область D). Создаваемое на торцевой поверхности излучающей накладке усилие, будет пропорционально сумме усилий (мощности), создаваемых всеми преобразователями, радиально расположенными по образующей суммирующей накладке. Для увеличения прочности и упрощения конструкции преобразователя форма профиля суммирующей накладки выполнена конической (область Е).

Описывают материалы, приборы, оборудование и другие условия проведения экспериментов / наблюдений.

Не нужно забывать про ссылки на использованные источники [1].

Путем модального анализа методом конечных элементов было установлено оптимальное соотношение диаметр / длина ($M = D_n/L_n$) суммирующей накладки для обеспечения максимальной амплитуды колебаний излучающей поверхности. Полученная зависимость коэффициента трансформации от соотношения диаметр / длина ($M = D_n/L_n$) представлена на рисунке 2 [17].

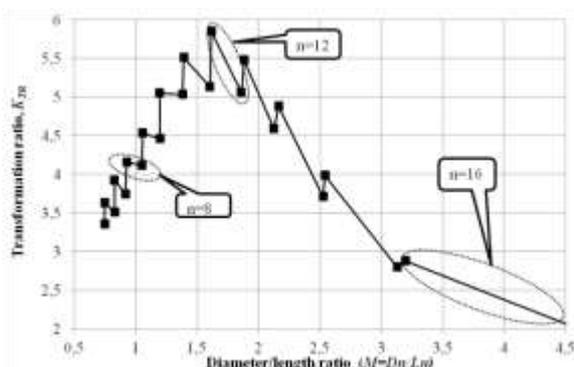


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента трансформации преобразователя ($K_{tr} = A_{long}/A_{nut}$) от соотношения ($M = D_n/L_n$)

Figure 2 – The dependence of the transformation ratio of the piezoelectric transducer ($K_{tr} = A_{long}/A_{nut}$) on the ratio ($M = D_n/L_n$)

Оптимальное соотношение значения M , обеспечивающее максимальную амплитуду, составило 1,6, при этом на преобразователе установлено радиально относительно акустической оси 12 пьезоэлектрических пакетов (область D, рисунок 1). Скачкообразные изменения коэффициента трансформации на графике (рисунок 2) обусловлены появлением промежутков между преобразователями Ланжевена при увеличении диаметра излучающей накладки, но неизменном количестве присоединяемых преобразователей Ланжевена до появления достаточного промежутка для установки следующего преобразователя (т.е. диаметр излучающей накладке изменяется непрерывно, а количество преобразователей Ланжевена дискретно).

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИЗЛУЧАТЕЛЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЕГО КОНСТРУКЦИИ

В процессе определения функциональных возможностей разработанного излучателя с коническим переходом и радиальным расположением преобразователей Ланжевена был рассчитан и изготовлен экспериментальный образец излучателя с резонансной частотой 30 кГц и были проведены его ресурсные испытания.

Фотография изготовленного преобразователя в сборе с цилиндрическим излучателем (для излучения в воду) приведена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Преобразователь в сборе с цилиндрическим излучателем

Figure 3 - Transducer assembly with a cylindrical radiator

В таблице 1 приведены результаты измерений мощностных характеристик преобразователя с радиальным расположением пьезоэлектрических элементов.

В процессе исследований установлено, что через 7...10 часов эксплуатации на полной мощности (1800 Вт) резонансная частота излучателя понизилась на 150 Гц, при этом также увеличился импеданс на резонансе с 10 Ом до 15 Ом. После разбора преобразователя и визуальной оценки состояния отдельных элементов излучателя было установлено, что в большинстве пьезокерамических (21 из 24) колец образовались диаметрально-радиальные трещины.

Наиболее вероятной причиной возникновения трещин является неравномерность распределения амплитуд колебаний суммирующей накладки в области пьезоэлектрических пакетов. Неравномерность колебаний вызвана тем, что жесткая конструкция суммирующей накладки с коническим переходом в процессе колебаний формирует диаметральный изгиб на границе керамика-суммирующая накладка. При этом амплитуда колебаний центральной части соединительных плоскостей (плоскости между областью С и областью D на рисунке 1) суммирующей накладки оказывается существенно больше, чем периферийной. По этой причине возникают изгибные колебания пьезокерамических колец, приводящие к их разрушению.

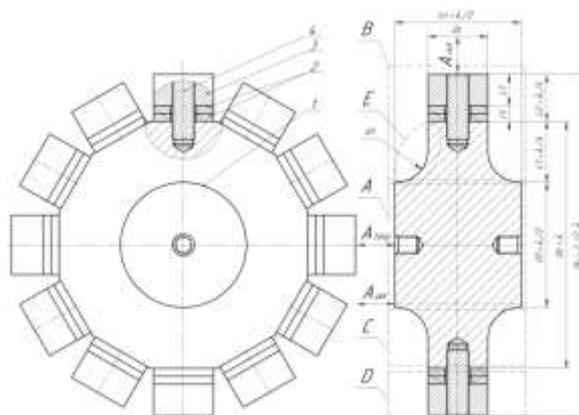
Для устранения выявленной причины разрушения пьезоэлементов авторами была проведена оптимизация конструкции излучателя с целью обеспечения равномерности распределения амплитуд колебаний пьезокерамики смежной с суммирующей накладкой.

В качестве критерия оптимальности было использовано значение нормированного среднеквадратичного отклонения (НСКО) амплитуды колебаний на плоскости пьезокерамики, которое определялось выражением:

$$\sigma = \frac{1}{A_{nut}} \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}, \quad (1)$$

где \bar{x} – среднее арифметическое по выборке, мкм; x_i – значения амплитуд колебаний в пределах плоскости пьезокольца, мкм; A_{nut} – амплитуда колебаний в центре отражающей накладки, мкм; k – количество точек в выборке. Нормирование было проведено по амплитуде колебаний отражающей накладки A_{nut} .

Для снижения неравномерности распределения колебаний в области пьезокерамики было предложено изменять форму перехода суммирующей накладки (область Е, рисунок 1) коническую на радиальную форму. На рисунке 4 приведена модифицированная конструкция УЗ излучателя.



1 – суммирующая излучающая накладка;
2 – пьезокерамические элементы;
3 – отражающие накладки;
4 – соединительные шпильки

Рисунок 4 – Модифицированная конструкция высокочастотного УЗ излучателя увеличенной мощности

Figure4 - Modified design of a high-frequency ultrasonic radiator with increased power

Таблица 1 – Результаты измерений мощностных характеристик преобразователей

Table 1 - Results of measurements of power characteristics of transducers

Тип преобразователя	Частота, кГц	Амплитуда колебаний, мкм	Мощность электрическая, Вт	Мощность акустическая, Вт	КПД, %	Интенсивность, не менее, Вт/см ²
Суммирующий	31,67	22	1800	66	66	35

Далее было проведено моделирование модифицированного излучателя. При проведении расчетов обеспечивалось значение частоты собственных колебаний, равное 30 000±50 Гц. Размер D1 оставался неизменным. При этом диаметр суммирующей излучающей накладки Dn (поз. 1, рисунок 1) изменялся многократно и проводился пересчет. После каждого расчета результаты анализировались и осуществлялась корректировка длины (Ln) для поддержания частоты собственных колебаний в пределах 30 000±50 Гц.

ющей накладки Dn (поз. 1, рисунок 1) изменялся многократно и проводился пересчет. После каждого расчета результаты анализировались и осуществлялась корректировка длины (Ln) для поддержания частоты собственных колебаний в пределах 30 000±50 Гц.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С РАДИАЛЬНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИМИ ПАКЕТАМИ

При проведении расчетов были использованы данные о материалах (плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона), представленные в таблице 2.

Для расчета и анализа работы ультразвукового излучателя, испытывающего объемное напряженное состояние, использовался тетраэдральный тип конечного элемента. Тетраэдральная конечно-элементная сетка хорошо аппроксимирует тела сложной формы

и обеспечивает удовлетворительные результаты моделирования физических задач для объектов произвольной формы, характерные геометрические размеры которых по трём измерениям (длина, ширина, высота) сопоставимы между собой. Линейный размер элемента тетраэдральной сетки составлял 6 мм. Анализ проводился в диапазоне частот от 28 до 32 кГц.

Таблица 2 – Характеристики используемых материалов [19]

Table 2 - Characteristics of the materials used [19]

Элемент	Материал	Модуль Юнга, Е, Па	Плотность, ρ , кг/м ³	Коэффициент Пуассона, μ
Суммирующая накладка	AA7075	$7,1 \cdot 10^{10}$	2800	0,31
Отражающая накладки	Steel 1045	$2 \cdot 10^{11}$	7810	2,8
Пьезо-керамическое кольцо	APC-841	$7,6 \cdot 10^{10}$	7600	0,33

На начальном этапе была получена зависимость (рисунок 5) неравномерности распределения амплитуд колебаний на пьезокерамике (НСКО) от радиуса (от соотношения радиус / диаметр $W = R1/Dn$). При этом в соответствии с зависимостью, представленной на рисунке 2, моделирование проводилось для наиболее оптимального случая, при котором обеспечивается максимальная амплитуда колебаний при количестве радиально размещенных пьезоэлектрических пакетов, равном $n = 12$, при соотношении $M = Dn/Ln = 1,6$.

Анализ полученных данных показал, что минимальная неравномерность колебаний достигается при соотношении $W = R1/Dn = 0,27$.

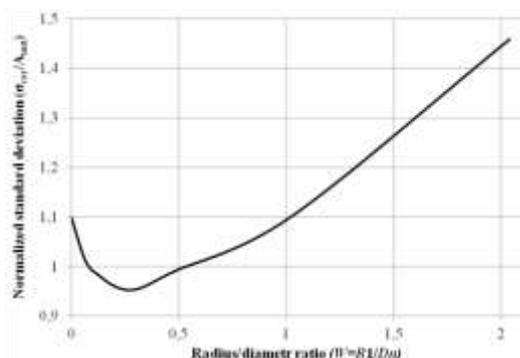


Рисунок 5 – Зависимость неравномерности распределения амплитуд колебаний от соотношения ($W = R1/Dn$)

Figure 5 - The dependence of the uneven distribution of oscillation amplitudes on the ratio ($W = R1/Dn$)

Так как модифицированная конструкция преобразователя (использование радиального перехода) приводит к изменению амплитуд колебаний, то на следующем этапе исследований было предложено повторно исследовать конструкцию излучателя для нахождения максимума коэффициента трансформации K_{TR} и минимума неравномерности колебаний в зависимости от соотношения $M = Dn/Ln$. Таким образом, получены зависимости коэффициента трансформации (рисунок 6) и неравномерности колебаний (НСКО) от диаметра при $W = 0,27$ (рисунок 7).

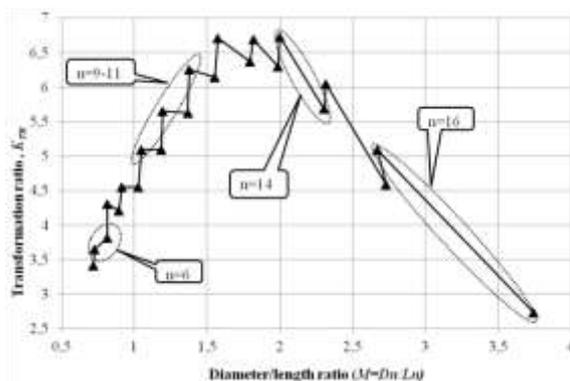


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента трансформации УЗ излучателя со ступенчатым переходом ($K_{tr} = A_{long}/A_{nut}$) от соотношения ($M = Dn/Ln$)

Figure 6 - Dependence of the transformation ratio of an ultrasonic transducer with a stepped transition ($K_{tr} = A_{long}/A_{nut}$) on the ratio ($M = Dn/Ln$)

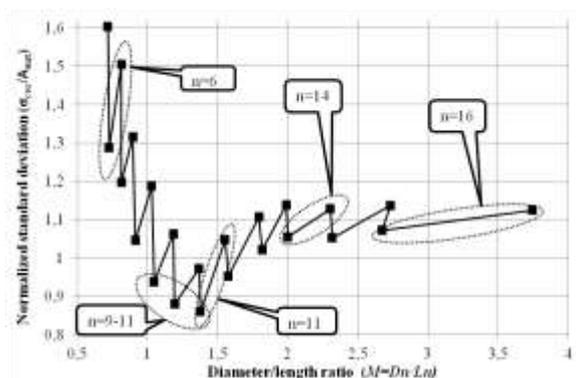


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента трансформации УЗ излучателя со ступенчатым переходом ($K_{tr} = A_{long}/A_{nut}$) от соотношения ($M = Dn/Ln$)

Figure 7 - Dependence of the transformation ratio of an ultrasonic transducer with a stepped transition ($K_{tr} = A_{long}/A_{nut}$) on the ratio ($M = Dn/Ln$)

Примеры равномерного распределения амплитуд, полученных в результате модального анализа конструкций, показаны на рисунке 8.

Анализ полученных данных позволил установить, что максимальная амплитуда колебаний у модифицированной конструкции излучателя достигается при $n = 12...14$ при $M = 1,6...2$. Однако минимальная неравномерность распределения колебаний пьезокерамики достигается при плотной установке пьезоэлектрических пакетов при количестве, равном 9–11 при $W = 0,27$, что является более важным фактором, влияющим на надежность излучателя.

Установлено, что чем меньше количество пьезоэлектрических пакетов, тем больше разница между соседними значениями НСКО. Вызвано это тем, что при маленьком диаметре суммирующей накладке существенно (например, при количестве пьезоэлектрических пакетов $n = 6$, неравномерность изменяется от 1,2 до 1,47) меняется расстояние (промежуток между соседними пьезоэлектрическими пакетами). В сравнении с большим диаметром (при количестве пьезоэлектрических пакетов $n = 16$, неравномерность изменяется от 1,08 до 1,12), при котором изменение количества пьезоэлектрических пакетов на 1 не существенно влияет на промежуток между пакетами. При этом наличие больших промежутков между пьезоэлектрическими пакетами на суммирующей накладке вызывает изгибные колебания соединительных поверхностей, что, в свою

очередь, приводит к дополнительному изгибу пьезокерамических элементов.

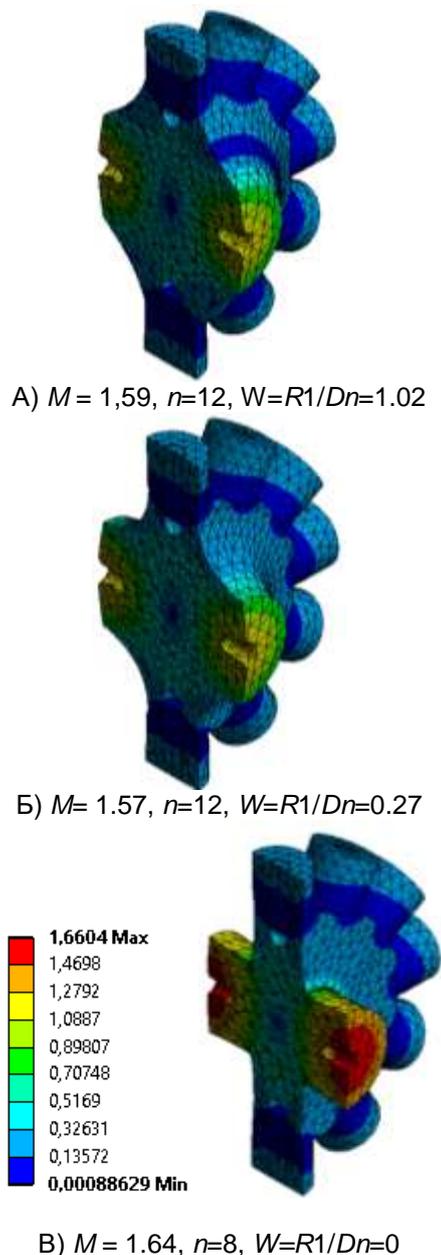


Рисунок 8 – Распределение амплитуд колебаний ультразвукового излучателя при различных соотношениях ($W = R1/Dn$)

Figure 8 - Distribution of oscillation amplitudes of an ultrasonic emitter at various ratios ($W=R1/Dn$)

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для подтверждения результатов моделирования и проверки работоспособности разработанной конструкции с радиальным рас-

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С РАДИАЛЬНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИМИ ПАКЕТАМИ

положением пьезоэлектрических пакетов был изготовлен ультразвуковой излучатель рабочей частотой 30 кГц, количеством пьезоэлектрических пакетов $n = 11$, радиальным переходом $W = 0,27$, при котором $R = 40$ мм. При этом были использованы стандартные пьезокерамические элементы размером 35x16x6 мм.

Дальнейшие исследования были направлены на измерение предельных мощностных характеристик ультразвукового излучателя и ресурсные испытания при его эксплуатации в составе колебательных систем, предназначенных для реализации технологических процессов в жидких средах.

Для этого электрическое питание преобразователей Ланжевена осуществлялось при помощи электронного генератора с независимым возбуждением и фазовой автоподстройкой частоты. Генератор был ранее разработан авторами статьи [20–21]. На выходе генератора установлен транзисторный полумост и согласующий LC контур.

Была измерена электрическая мощность, потребляемая УЗ излучателем. Измерения проводились с помощью измерителя GWINSTEK модель GPM-8212. Потребляемая мощность измерялась в режиме холостого хода, а также с нагрузкой (излучение в воду), при максимальной амплитуде колебаний.

Мощность, потребляемая разработанным излучателем, определялась с помощью следующего выражения:

$$P_E = P_S - P_G, \quad (1)$$

где P_S – суммарная потребляемая мощность, Вт; P_G – потребляемая мощность электронным генератором без подключенного излучателя, Вт.

Для определения максимальной мощности разработанного излучателя в качестве акустической нагрузки использовалась отстоявшаяся водопроводная вода. В качестве рабочего инструмента, погруженного в воду, использовался цилиндр полуволновой длины (собственная частота колебаний 29,95 кГц, диаметр 66 мм), рассчитанный на соответствующие частоты. Измерения потребляемой мощности производились с полностью погруженным цилиндрическим инструментом. Для измерения мощности акустических колебаний, выводимых в воду, использовался колориметрический метод [20]. Для измерения максимальных значений амплитуды колебаний использовался стробоскопический способ [21–22].

В таблице 3 приведены результаты измерений мощностных характеристик оптимизированного излучателя с радиальным расположением пьезоэлектрических элементов.

Результаты измерений показали, что оптимизация конструкции, обеспечивающая равномерность колебаний пьезоэлектрических пакетов, обеспечивает повышение основных мощностных характеристик на 17 %, при этом КПД увеличивается на 15 % до 78 %.

При этом ресурсные испытания и ревизия элементов излучателя показали, что все пьезокерамические элементы не подверглись разрушению даже после 1000 часов наработки.

Таким образом, что при суммировании колебаний от 9 до 11 радиально размещенных преобразователей Ланжевена на резонансной частоте 30,05 кГц при амплитуде колебаний 26 мкм достигнута акустическая мощность (непрерывный режим) 1450 Вт при КПД 78 %.

Таблица 3 – Результаты измерений мощностных характеристик излучателей

Table 3 - Results of measurements of power characteristics of radiators

Тип преобразователя	Частота, кГц	Амплитуда колебаний, мкм	Мощность электрическая, Вт	Мощность акустическая, Вт	КПД, %	Интенсивность, не менее, Вт/см ²
Суммирующий до оптимизации	31,67	22	1800	66	66	35
Суммирующий оптимизированный	30,05	26	1850	1450	78	42

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что создание мощных высокочастотных излучателей может быть обеспечено за счет суммирования колебаний отдельных преобразователей Ланжевена, радиально размещенных на цилиндрической

излучающей накладке, обеспечивающей трансформацию суммируемых диаметральных колебаний в продольные колебания.

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований позволили предложить способ оптимизации высокочастотных излучателей для снижения вероятно-

сти их разрушения и обеспечения требуемой равномерности распределения амплитуд колебаний пьезокерамических элементов.

Установлено, что при суммировании колебаний от 9 до 11 радиально размещенных преобразователей Ланжевена и радиальном переходе к суммирующей накладке на резонансной частоте 30,05 кГц и амплитуде колебаний 26 мкм достигнута акустическая мощность (непрерывный режим) 1450 Вт при КПД 78 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Riera, E., Golás, Y., Blanco, A., Gallego-Juárez, J.A., Blasco, M. & Mulet, A. (2004). Mass transfer enhancement in supercritical fluids extraction by means of power ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, (11), 241-244. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2004.01.019.
- Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Dorovskikh, R.S., Nesterov, V.A., Golykh, R.N. & Kozhevnikov, I.S. Ultrasonic coagulation to improve the efficiency of the gas cleaning systems. *18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. NSTU: Novosibirsk, Russia. DOI: 10.1109/EDM.2017.7981759.
- Khmelev, V.N., Kuzovnikov, Y.M., Tsyganok, S.N., Levin, S.V. & Khmelev, S.S. Evaluation of the area of intensive coagulation of dispersed-phase particles in emulsion and suspension due to high-intensive ultrasonic treatment. *International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices, Erlagol, Altai, 2012*. NSTU: Novosibirsk, Russia. DOI: 10.1109/EDM.2012.6310205.
- Kuzovnikov, Y.M., Khmelev, S.S., Tsyganok, S.N. & Khmelev, V.N. Studying of coagulation and sedimentation of small hard particles in liquid medium during ultrasonic treatment. *11th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. NSTU: Novosibirsk, Russia. DOI: 10.1109/EDM.2010.5568805.
- Avvaru, B., Patil, M.N., Gogate, P.R. & Pandit, A.B. (2006). Ultrasonic atomization: Effect of liquid phase properties. *Ultrasonics*. (44), 146-158. DOI: 10.1016/j.ultras.2005.09.003.
- Khmelev, V.N., Galakhov, A.N., Shalunov A.V., Nesterov, A.V., Golykh, R.N. & Shalunova, A.V. Study of the process of liquid atomization from the ultrasonic disk radiator. *14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. NSTU: Novosibirsk, Russia. DOI: 10.1109/EDM.2013.6641956.
- Transducer, B.L., Takahashi, T. & Adachi, K. (1998). Influence of static prestress on the characteristics of bolt-clamped Langevin-type transducers. *Jpn. J. Appl. Phys.* (37), 2982-2987. DOI: 10.1143/JJAP.37.2982.
- Adachi, K., Konno, Y. & Masaki, S. (1994). Development of bolt-clamped Langevin-type transducer factor for excitation of large torsional vibration with high mechanical quality. *Jpn. J. Appl. Phys.* (33), 1182-1188. DOI: 10.1143/JJAP.33.1182.
- Abdullah, A., Shahini, M. & Pak, A. (2009). An approach to design a high power piezoelectric ultrasonic transducer. *J. Electroceram.* (22), 369-382.
- Shahini, M., Abdullah, A. & Rezaei, M. (2004). Design and Manufacture of an Ultrasonic Transducer with 1 kW Power and 22 kHz Frequency Using Piezoceramics. Extended abstract of master of science thesis. Amir Kabir University of Technology.
- Lin, S. (2006). Study on the Langevin piezoelectric ceramic ultrasonic transducer of longitudinal-flexural composite vibrational mode. *Ultrasonics*. (44), 109-114. DOI: 10.1016/j.ultras.2005.09.002.
- Lin, S. & Zhang, F. (2000). Measurement of ultrasonic power and electro-acoustic efficiency of high power transducers. *Ultrasonics*. (37), 549-554. DOI: 10.1016/S0041-624X(99)00076-1.
- Lin, S., Xu, L. & Wenxu, H. (2011). A new type of high power composite ultrasonic transducer. *J. Sound Vib.* (330), 1419-1431. DOI: 10.1016/j.jsv.2010.10.009.
- Lais, H., Lowe, P.S., Gan, T.H. & Wrobel, L.C. (2018). Numerical modelling of acoustic pressure fields to optimize the ultrasonic cleaning technique for cylinders. *Ultrason. Sonochem.* (45), 7-16. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.02.045.
- Wei, X., Yang, Y., Yao, W. & Zhang, L. (2017). PSpice Modeling of a Sandwich Piezoelectric Ceramic Ultrasonic Transducer in Longitudinal Vibration. *Sensors*. (17), 2253 (1-18). DOI: 10.3390/s17102253.
- Bar-Cohen, Y., Sherrit, S. & Herz, J.L. (2007). ULTRASONIC/ SONIC/JACKHAMMER. Patent 20070193757A1. US, published on 23.08.2007.
- Хмелев, В.Н. Высокочастотный электроакустический излучатель с увеличенной мощностью воздействия // Южно-сибирский научный вестник. – 2019. – № 4(28). – С. 270–278. DOI: 0.25699/SSSB.2019.28.46386.
- Berlincourt, D.A., Curran, D.R. & Jaffe, H. (1964). Piezoelectric and Piezomagnetic Materials and Their Function in Transducers. *Physical Acoustics*. 169-270. DOI: 10.1016/B978-1-4832-2857-0.50009-5.
- Khmelev, V.N., Barsukov, R.V., Tsyganok, S.N., Steer, V.N., Shalunov, A.V. & Lebedev, A.N. (2003). Adjusting and calibration electronic ultrasonic generators. *Siberian Russian Workshop on Electron Devices and Materials*. 202-204. DOI: 10.1109/SREDM.2003.1224227.
- Khmelev, V.N., Barsukov, R.V., Shalunov, A.V., Abramenko, D.S., Genne, D.V. & Abramov, A.D. Design features of electronic generators for radiators intended for influence on gas media. *11th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. NSTU: Novosibirsk, Russia. DOI: 10.1109/EDM.2010.5568802.
- Khmelev, V.N., Tsyganok, S.N., Barsukov, R.V. & Lebedev, A.N. A system of a automatic measurement of acoustic power of the ultrasonic equipment. *International Siberian Workshop on Electron Devices and Materials 2004*. Erlagol, Altai, Russia. DOI: 10.1109/PESC.2004.241344.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С РАДИАЛЬНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИМИ ПАКЕТАМИ

22. Kazancev, I.V., Lebedev, A.N. & Abramenko, D.S. The Method of Oscillations Amplitude Measuring. *Siberian Russian Workshop and Tutorial on Electron Devices and Materials 2007*. Erlagol, Altai, Russia. DOI: 10.1109/SIBEDM.2007.4292987.

Информация об авторах

В. Н. Хмелев – доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, профессор кафедры МСИА Бийского технологического института (филиал) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова».

А. В. Шалунов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры МСИА Бийского технологического института (филиал) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова».

В. А. Нестеров – кандидат технических наук, доцент кафедры МСИА Бийского технологического института (филиал) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова».

А. С. Боченков – аспирант кафедры МСИА Бийского технологического института (филиал) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова».

REFERENCES

1. Riera, E., Golás, Y., Blanco, A., Gallego-Juárez, J.A., Blasco, M. & Mulet, A. (2004). Mass transfer enhancement in supercritical fluids extraction by means of power ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, (11), 241-244. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2004.01.019.

2. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Dorovskikh, R.S., Nesterov, V.A., Golykh, R.N. & Kozhevnikov, I.S. Ultrasonic coagulation to improve the efficiency of the gas cleaning systems. *18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. NSTU: Novosibirsk, Russia. DOI: 10.1109/EDM.2017.7981759.

3. Khmelev, V.N., Kuzovnikov, Y.M., Tsyganok, S.N., Levin, S.V. & Khmelev, S.S. Evaluation of the area of intensive coagulation of dispersed-phase particles in emulsion and suspension due to high-intensive ultrasonic treatment. *International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Erlagol, Altai, 2012*. NSTU: Novosibirsk, Russia. DOI: 10.1109/EDM.2012.6310205.

4. Kuzovnikov, Y.M., Khmelev, S.S., Tsyganok, S.N. & Khmelev, V.N. Studying of coagulation and sedimentation of small hard particles in liquid medium during ultrasonic treatment. *11th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. NSTU: Novosibirsk, Russia. DOI: 10.1109/EDM.2010.5568805.

5. Avvaru, B., Patil, M.N., Gogate, P.R. & Pandit, A.B. (2006). Ultrasonic atomization: Effect of

liquid phase properties. *Ultrasonics*. (44), 146-158. DOI: 10.1016/j.ultras.2005.09.003.

6. Khmelev, V.N., Galakhov, A.N., Shalunov A.V., Nesterov, A.V., Golykh, R.N. & Shalunova, A.V. Study of the process of liquid atomization from the ultrasonic disk radiator. *14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. NSTU: Novosibirsk, Russia. DOI: 10.1109/EDM.2013.6641956.

7. Transducer, B.L., Takahashi, T. & Adachi, K. (1998). Influence of static prestress on the characteristics of bolt-clamped Langevin-type transducers. *Jpn. J. Appl. Phys.* (37), 2982-2987. DOI: 10.1143/JJAP.37.2982.

8. Adachi, K., Konno, Y. & Masaki, S. (1994). Development of bolt-clamped Langevin-type transducer factor for excitation of large torsional vibration with high mechanical quality. *Jpn. J. Appl. Phys.* (33), 1182-1188. DOI: 10.1143/JJAP.33.1182.

9. Abdullah, A., Shahini, M. & Pak, A. (2009). An approach to design a high power piezoelectric ultrasonic transducer. *J. Electroceram.* (22), 369-382.

10. Shahini, M., Abdullah, A. & Rezaei, M. (2004). Design and Manufacture of an Ultrasonic Transducer with 1 kW Power and 22 kHz Frequency Using Piezoceramics. Extended abstract of master of science thesis. Amir Kabir University of Technology.

11. Lin, S. (2006). Study on the Langevin piezoelectric ceramic ultrasonic transducer of longitudinal-flexural composite vibrational mode. *Ultrasonics*. (44), 109-114. DOI: 10.1016/j.ultras.2005.09.002.

12. Lin, S. & Zhang, F. (2000). Measurement of ultrasonic power and electro-acoustic efficiency of high power transducers. *Ultrasonics*. (37), 549-554. DOI: 10.1016/S0041-624X(99)00076-1.

13. Lin, S., Xu, L. & Wenxu, H. (2011). A new type of high power composite ultrasonic transducer. *J. Sound Vib.* (330), 1419-1431. DOI: 10.1016/j.jsv.2010.10.009.

14. Lais, H., Lowe, P.S., Gan, T.H. & Wrobel, L.C. (2018). Numerical modelling of acoustic pressure fields to optimize the ultrasonic cleaning technique for cylinders. *Ultrason. Sonochem.* (45), 7-16. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.02.045.

15. Wei, X., Yang, Y., Yao, W. & Zhang, L. (2017). PSpice Modeling of a Sandwich Piezoelectric Ceramic Ultrasonic Transducer in Longitudinal Vibration. *Sensors*. (17), 2253 (1-18). DOI: 10.3390/s17102253.

16. Bar-Cohen, Y., Sherrit, S. & Herz, J.L. (2007). ULTRASONIC/SONIC/JACKHAMMER. Patent 20070193757A1. US, published on 23.08.2007.

17. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V. & Nesterov, V.A. (2019). High-frequency electro-acoustic emitter with increased exposure power. *South Siberian Scientific Bulletin*. (4), 270-278. DOI: 0.25699/SSSB.2019.28.46386.

18. Berlincourt, D.A., Curran, D.R. & Jaffe, H. (1964). Piezoelectric and Piezomagnetic Materials and Their Function in Transducers. *Physical Acoustics*. 169-270. DOI: 10.1016/B978-1-4832-2857-0.50009-5.

19. Khmelev, V.N., Barsukov, R.V., Tsyganok, S.N., Steer, V.N., Shalunov, A.V. & Lebedev, A.N. (2003). Adjusting and calibration electronic ultrasonic generators. *Siberian Russian Workshop on Electron Devices and Materials*. 202-204. DOI: 10.1109/SREDM.2003.1224227.

20. Khmelev, V.N., Barsukov, R.V., Shalunov, A.V., Abramenko, D.S., Genne, D.V. & Abramov, A.D. (2010). Design features of electronic generators for radiators intended for influence on gas media. *11th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. NSTU: Novosibirsk, Russia. DOI: 10.1109/EDM.2010.5568802.

21. Khmelev, V.N., Tsyganok, S.N., Barsukov, R.V. & Lebedev, A.N. (2004). A system of a automatic measurement of acoustic power of the ultrasonic equipment. *International Siberian Workshop on Electron Devices and Materials 2004*. Erlagol, Altai, Russia. DOI: 10.1109/PESC.2004.241344.

22. Kazancev, I.V., Lebedev, A.N. & Abramenko, D.S. (2007). The Method of Oscillations Amplitude Measuring. *Siberian Russian Workshop and Tutorial on Electron Devices and Materials 2007*. Erlagol, Altai, Russia. DOI: 10.1109/SIBEDM.2007.4292987.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 10.10.2022; одобрена после рецензирования 30.11.2022; принята к публикации 15.12.2022.

The article was received by the editorial board on 10 Oct 2022; approved after editing on 30 Nov 2022; accepted for publication on 15 Dec 2022.

Information about the authors

V. N. Khmelev - Doctor of Technical Sciences professor, deputy director for scientific and research activity of the, Biysk Technological Institute (branch) of the Polzunov Altai State Technical University.

A. V. Shalunov - Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Methods and Measuring Instruments and Automation of the Biysk Technological Institute (branch) of the Polzunov Altai State Technical University.

A. V. Nesterov - Candidate of Technical Sciences Associate Professor of the Department of Methods and Measuring Instruments and Automation of the Biysk Technological Institute (branch) of the Polzunov Altai State Technical University.

A. S. Bochenkov - postgraduate student of the Department of Methods and Measuring Instruments and Automation of the Biysk Technological Institute (branch) of the Polzunov Altai State Technical University.