



Научная статья

2.16.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 534.29.66.084:534-18

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.03.31

 EDN: ZJSJJW

ИЗЛУЧАТЕЛИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Роман Сергеевич Доровских¹, Анна Евгеньевна Пужайкина²,
Александр Сергеевич Боченков³, Андрей Викторович Шалунов⁴,
Виктор Александрович Нестеров⁵

1, 2, 3, 4, 5 Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», Бийск, Россия

¹ dorovskih_roman@mail.ru

² zyatkova.ae@bti.secna.ru

³ sanya.bochankov@mail.ru

⁴ shalunov@u-sonic.ru

⁵ nva@u-sonic.ru

Аннотация. В статье представлены результаты разработки дисковых ультразвуковых излучателей 4 разных типов и даны рекомендации по области их возможного применения. Представлены диаграммы направленности разработанных излучателей и зависимости ослабления звукового давления от расстояния до излучателя и приведены их основные характеристики. Показано, что плоская фронтальная поверхность дискового излучателя на расстоянии 1 метр обеспечивает излучение с уровнем звукового давления порядка 152 дБ. Ступенчато-переменная фронтальная поверхность диска позволяет формировать уровень звукового давления в пределах 155 дБ. При осуществлении фокусировки в точке фокуса обеспечивается уровень звукового давления 173-177 дБ, при этом на расстоянии 1 метр уровень падает до 145-151 дБ за счет расхождения колебаний.

Ключевые слова: ультразвук, дисковый излучатель, газодисперсная среда, упругая деформация, колебания, сушка, распыление, коагуляция, дисперсные частицы, пеногашение.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 21-72-00158), <https://rscf.ru/en/project/21-72-00158/>.

Для цитирования: Излучатели для формирования высокоинтенсивных ультразвуковых колебаний в газовых средах различного назначения / Р. С. Доровских [и др.] // Ползуновский вестник. 2023. № 3. С. 226–237. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.03.031. EDN: <https://elibrary.ru/ZJSJJW>.

Original article

EMITTERS FOR THE FORMATION OF HIGH-INTENSITY ULTRASONIC VIBRATIONS IN GASEOUS MEDIA FOR VARIOUS PURPOSES

Roman S. Dorovskikh¹, Anna E. Puzhaykina², Alexander S.Bochenkov³,
Andrey V. Shalunov⁴, Viktor A. Nesterov⁵

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

¹ dorovskih_roman@mail.ru

² zyatkova.ae@bti.secna.ru

³ sanya.bochankov@mail.ru

⁴ shalunov@u-sonic.ru

⁵ nva@u-sonic.ru

© Доровских Р. С., Пужайкина А. Е., Боченков А. С., Шалунов А. В., Нестеров В. А., 2023

ИЗЛУЧАТЕЛИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Abstract. The article presents the results of the development of disk ultrasonic emitters of 4 different types and gives recommendations on the area of their possible application. The radiation patterns of the developed emitters and the dependence of the sound pressure attenuation on the distance to the emitter are presented, and their main characteristics are given. It is shown that the flat front surface of the disk radiator at a distance of 1 meter provides radiation with a sound pressure level of about 152 dB. The step-variable front surface of the disc allows you to form a sound pressure level within 155 dB. When focusing at the focal point, a sound pressure level of 173-177 dB is provided, while at a distance of 1 meter the level drops to 145-151 dB due to the divergence of oscillations.

Keywords: ultrasonic, disk emitter, gas-dispersed medium, elastic deformation, vibrations, drying, spraying, coagulation, dispersed particles, defoaming.

Acknowledgements: The study was carried out by a grant from the Russian Science Foundation (project 21-72-00158), <https://rscf.ru/en/project/21-72-00158/>.

For citation: Dorovskikh, R. S., Puzhaykina, A. E., Bochenkov, A. S., Shalunov, A. V. & Nesterov, V. A. (2023). Emitters for the formation of high-intensity ultrasonic vibrations in gaseous media for various purposes. *Polzunovskiy vestnik*, (3), 226–237. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.03.031. <https://elibrary.ru/ZJSJJW>.

ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковые технологии прочно завоевали себе место в современном производстве. Воздействие ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности служит основой для улучшения свойств известных веществ и материалов, интенсификации различных технологических процессов. Наибольшее практическое распространение получило ультразвуковое оборудование, предназначенное для кавитационной обработки жидких сред, обеспечивающее интенсификацию таких технологических процессов как диспергирование, эмульгирование, экстракция, очистка и т.д. При этом введение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности (более 3...10 Вт/см²) осуществляется непосредственно в жидкие и жидко – дисперсные среды [1,3].

В последние годы акустическое воздействие начинают применять для интенсификации процессов в газовых средах. Такое воздействие позволяет повысить эффективность улавливания высокодисперсных материалов и очистки газов за счет коагуляции твердых и жидких частиц, удаление пен при производстве и упаковке пенящихся продуктов. Кроме того, УЗ воздействие на материалы и объекты в газах, ускоряется процесс сушки легкоокисляемых веществ, обеспечивает распыления при производстве высокодисперсных материалов и нанесении разнообразных покрытий и даже лечит человека [4-6].

К сожалению, до настоящего времени, широкой практической реализации ультразвуковой технологии в газовых средах не получили. Причина этого заключается в том, что в качестве источника звуковых колебаний использовались газоструйные излучатели с

низким КПД (до 25%) и малой эрозионной стойкостью поверхностей сопла и резонатора. Кроме того, такие излучатели могут эффективно работать только в звуковом диапазоне частот. Звуковые частоты высокой интенсивности оказывают крайне негативное влияние на человека и живые организмы (прогнозируются смертельные воздействия при уровне более 140 дБ). Это делает практически не реализуемой интенсификацию процессов в газовых средах колебаниями в звуковом диапазоне частот.

Невозможность применения звуковых колебаний обуславливает необходимость совершенствования источников акустического воздействия для работы в ультразвуковом диапазоне частот (частоты выше 22 кГц практически не воспринимаются живыми организмами и не оказывают на них негативного воздействия).

Однако, при генерации ультразвуковых колебаний с высоким уровнем звукового давления (более 130 дБ) на частоте выше 20 кГц газоструйные излучатели должны конструктивно выполняться очень маленьких размеров (размеры сопла и резонатора около 1 мм). Создаваемые ими колебания способны бесконтактно осуществлять энергетические воздействия в очень маленьких объемах, существенно ослабляясь за счет дифракционного расхождения на расстояниях в несколько сантиметров [7].

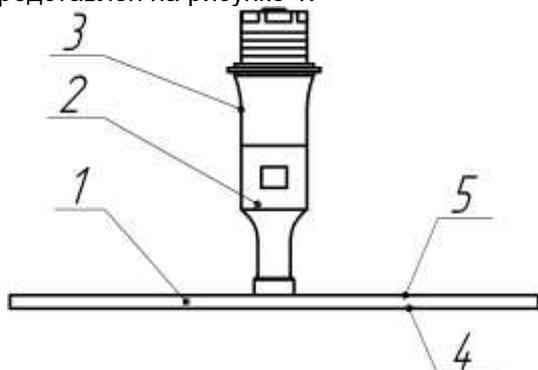
Решениям указанной проблемы может служить создание нового типа излучателей представляющие собой изгибно-колеблющиеся диски [8]. Колебания таких излучателей на заданной моде на частотах более 22 кГц с уровнями давления до 170 дБ формируются последовательно установленными и пьезоэлектрическими преобразовате-

лями [4, 10]. Дисковые излучатели могут иметь размеры излучающих поверхностей более 1 м² и способны осуществлять вывод в воздух до 60% от энергии, затрачиваемой на формирование ультразвуковых колебаний.

Особенностью таких излучателей является то, что размеры и форма излучающей поверхности определяют направленность излучаемых колебаний и их интенсивность. Поэтому далее проанализированы характеристики ультразвукового поля (диаграмма направленности и погонное затухание), формируемого различными типами дисковых излучателей, созданных авторами в настоящей статье, и даны рекомендации по области их возможного применения.

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДИСКОВОГО ТИПА

Основой всех конструкций дисковых излучателей может служить плоский, соединенный с электроакустическим преобразователем (колебательной системой). Эскиз колебательной системы с плоским излучателем представлен на рисунке 1.



1 – дисковый излучатель; 2 – трансформатор колебательной скорости;
3 – электроакустический преобразователь;
4 – фронтальная сторона; 5 – тыльная сторона

Рисунок 1 – Ультразвуковая колебательная система с плоским дисковым излучателем

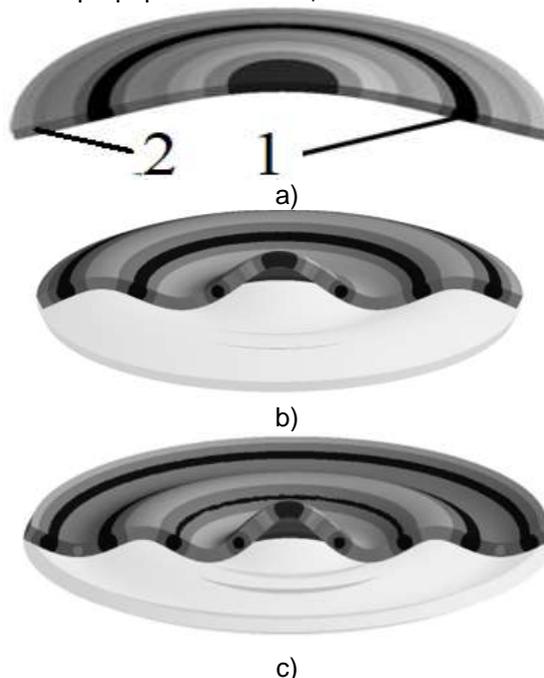
Figure 1 – Ultrasonic oscillatory system with a flat disk radiator

Колебания дискового излучателя на определенной моде колебаний характеризуется пространственной конфигурацией колеблющегося диска, определяемой положением узловых окружностей (кольцевых поверхностей в которых амплитуда колебаний равна нулю), а также собственной частотой (определяемой диаметром диска и его толщиной). При этом номер моды колебаний определяется количеством

таких узловых окружностей [8].

При работе излучателя на изгибной моде, области диска, разделенные узловыми окружностями, излучают колебания в противоположенных фазах. Таким образом, некоторые кольцевые области колеблются синфазно колебательной системе, а другие – противофазно. На рисунке 2а представлено распределение колебаний на первой моде колебаний излучателя в форме диска. При работе излучателей на более высоких частотах колебаний используют высшие моды колебаний (рисунок 2b, c).

Такая конструкция излучателя позволяет понять принцип формирования колебаний, однако практического применения не имеет, поскольку обладает неравномерным распределением амплитуд колебаний. У диска происходит уменьшение амплитуды колебаний кольцевых областей по мере удаления от центра. Это снижает эффективность излучения периферийных кольцевых областей.



а – 2-я мода; b – 3-я мода; c – 4-я мода;
1 – узловая окружность («нуль колебаний»);
2 – кольцевая область

Рисунок 2 – Распределения колебаний плоского дискового излучателя

Figure 2 – Vibration distributions of a flat disk radiator

Это снижает эффективность излучения периферийных кольцевых областей. Распределения относительных амплитуд колебаний плоского дискового излучателя, колеблющегося на различных кольцевых модах, представлены на рисунке 3.

ИЗЛУЧАТЕЛИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

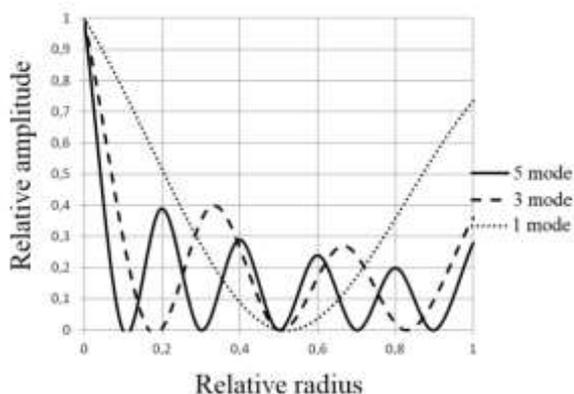


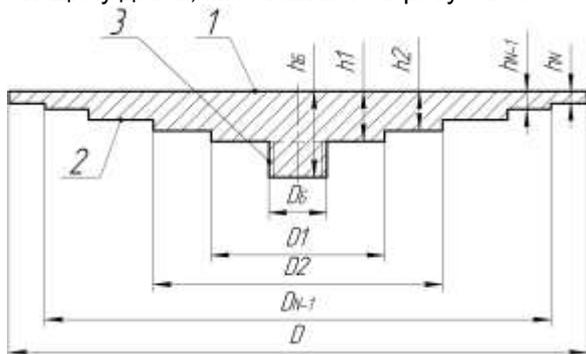
Рисунок 3 – Распределения относительных амплитуд колебаний плоского излучателя по радиусу

Figure 3 – Distributions of relative oscillation amplitudes of a flat radiator along the radius

Снижение амплитуд колебаний по мере удаления от центра связано с ростом жесткости кольцевых областей вследствие увеличения их площади. Исключение составляет только крайняя (периферийная) кольцевая область, жесткость которой ниже (за счет отсутствия закрепления внешнего края), что приводит к увеличению амплитуды колебаний до 30 %.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ КОЛЕБАНИЙ ДИСКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Для устранения неравномерности колебаний дискового излучателя необходимо с тыльной стороны диска ступенчато уменьшать толщину диска, как показано на рисунке 4.



1 – фронтальная сторона; 2 – тыльная сторона; 3 – присоединительный хвостовик (диаметр резьбы D_b)

Рисунок 4 – Изгибно-колеблющийся дисковый излучатель с плоской фронтальной поверхностью и ступенчатым профилем тыльной стороны, корректирующим амплитуду колебаний

Figure 4 – Flexural-oscillating disk radiator with a flat front surface and a stepped back side profile that corrects the oscillation amplitude

В такой конструкции увеличение жесткости (по мере удаления от центра) кольцевых областей диска компенсируется, соответствующим снижением толщины диска по мере удаления от центра. С тыльной стороны изменение толщины диска выполняется в местах узловых окружностей, соответствующих нулям колебаний с диаметрами равными D_1-D_{n-1} (рисунок 4). Места изменения толщины диска дальше будут обозначаться ступенчатыми переходами.

Взаимная компенсация изменения жесткости диска по радиусу и толщине (увеличение жесткости диска с увеличением его радиуса, компенсируется снижением толщины диска) обеспечивает равномерность амплитуды колебаний по всей поверхности диска.

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБУЕМОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Выполнение тыльной стороны дискового излучателя ступенчато-переменной по толщине позволило обеспечить равномерность амплитуды ультразвуковых колебаний, формируемых по всей поверхности излучателя.

Но поскольку, как было указано выше, соседние кольцевые области диска формируют равноамплитудные колебания в противофазе, то в воздухе на некотором расстоянии от излучателя происходит взаимная компенсация излучения. Это существенно снижает формируемый уровень звукового давления и дальность распространения колебаний.

Что избежать взаимной компенсации колебаний, а также иметь возможность задавать необходимую диаграмму направленности излучателя фронтальную поверхность излучателя также можно выполнить ступенчато-переменной по толщине. Местоположение и размеры фронтальных выступов или углублений и будут определять основные характеристики акустического поля, формируемого излучателем.

Далее рассмотрены 4 наиболее представительных варианта дисковых излучателей и проанализированы их характеристики:

- излучатель с плоской фронтальной поверхностью (используется как контрольный образец, с ним будут сравниваться остальные типы излучателей);
- направленный излучатель со ступенчато-переменной поверхностью и преимущественным излучением одной фазы колебаний;
- фокусирующий излучатель со ступенчато-вогнутым профилем излучающей поверхности;
- фокусирующий излучатель со ступенчато-радиальным профилем излучающей поверхности;

На рисунках 5-8 представлены схемы, поясняющие принцип работы вышеперечисленных типов изгибно-колеблющихся дисковых излучателей.

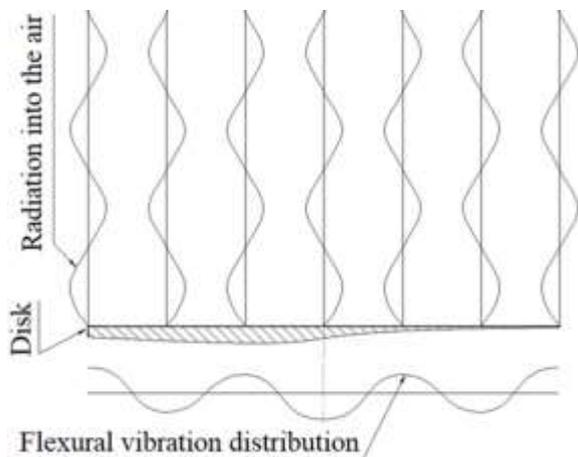
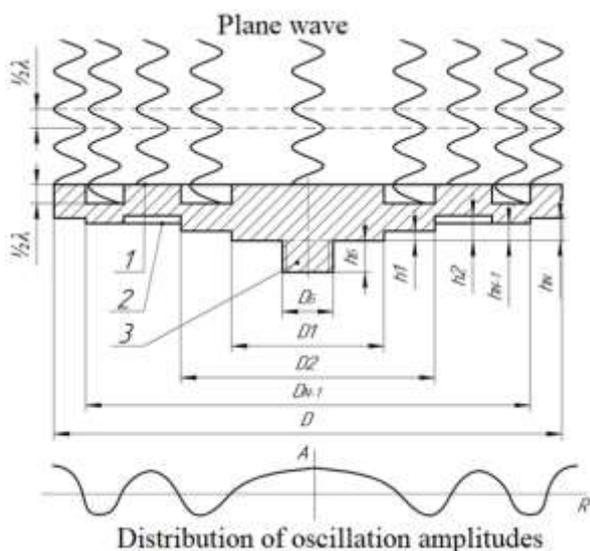


Рисунок 5 – Схема излучателя с плоской фронтальной поверхностью

Figure 5 – Scheme of a radiator with a flat front surface



1 – фронтальная сторона; 2 – тыльная сторона;
3 – присоединительный хвостовик

Рисунок 6 – Схема направленного излучателя со ступенчато-переменной поверхностью

Figure 6 – Scheme of a directional emitter with a step-variable surface

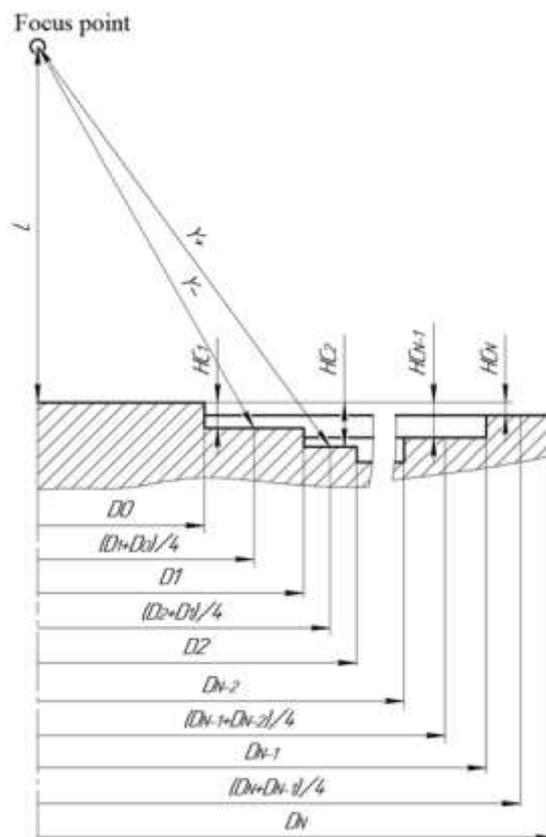


Рисунок 7 – Схема фокусирующего излучателя со ступенчато-вогнутым профилем излучающей поверхности

Figure 7 – Scheme of a focusing radiator with a stepped-concave profile of the radiating surface

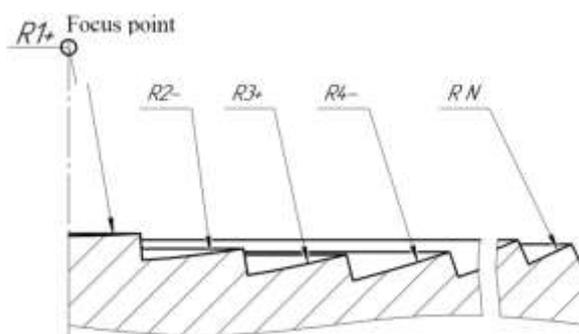


Рисунок 8 – Схема Фокусирующего излучателя со ступенчато-радиальным профилем излучающей поверхности

Figure 8 – Scheme of the Focusing Radiator with a step-radial profile of the radiating surface

На рисунке 9 представлена типовая форма колебаний рассматриваемых дисковых излучателей.

ИЗЛУЧАТЕЛИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

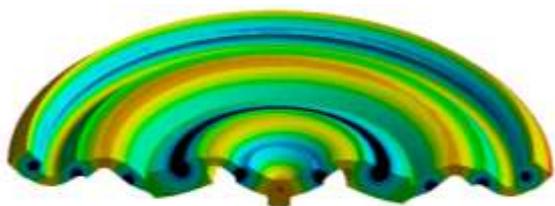


Рисунок 9 – Типовая форма колебаний изгибно-колеблющегося дискового излучателя

Figure 9 – Typical form of vibrations of a flexural-oscillating disk radiator

Во всех конструкциях дисковых излучателей, выравнивание амплитуд колебаний кольцевых областей обеспечивается за счет геометрии тыльной стороны (ступенчатые переходы с высотами h_1-h_n , рис. 4). Далее принципы работы каждого из перечисленных типов излучателей рассмотрены более подробно.

Как видно из рисунка 5 и ранее уже упоминалось, соседние кольцевые области диска формируют равноамплитудные колебания в противофазе, то в воздухе на некотором расстоянии от излучателя происходит взаимная компенсация излучения.

Для исключения этого явления был разработан направленный излучатель со ступенчато-переменной поверхностью и преимущественным излучением одной фазы колебаний. Для обеспечения синфазности излучаемых колебаний профиль фронтальной поверхности этого типа излучателей (рисунок 6) выполнен ступенчато-переменным. При этом ступенчатые переходы выполняются в зонах узловых окружностей на диаметрах D_1-D_{N-1} с высотой равной половине длины волны УЗ колебаний в газовой среде. Таким образом, фаза излучения всех точек поверхности выравнивается и формируется синфазная плоская волна.

Для увеличения уровня звукового давления, формируемого в газовой среде возможно использования принципа фокусировки колебаний на некотором расстоянии от излучателя. Для обеспечения сложения волн в требуемой области (точка фокуса) и излучения высокоинтенсивных УЗ колебаний, профиль фронтальной стороны излучателя выполняется таким обра-

зом (высоты $h_{C_1} - h_{C_N}$), чтобы каждая точка колеблющейся поверхности излучала в воздушную среду акустическую волну, при этом «положительные» максимумы колебательных смещений должны быть расположены на расстояниях от центра излучателя согласно формуле:

$$Y_+ = \sqrt{n\lambda L + \frac{n^2 \lambda^2}{4}} \quad (1)$$

где $n=0,2,4,\dots$, λ - длина звуковой волны в воздухе, L - расстояние от центра излучателя до фокуса.

И «отрицательные» максимумы на расстояниях, рассчитанных по формуле:

$$Y_- = \sqrt{n\lambda L + \frac{n^2 \lambda^2}{4}} \quad (2)$$

где $n=1,3,5,\dots$

Таким образом, колебания, излучаемые каждой кольцевой областью, будут приходить в фокус в одной фазе.

Для дальнейшего увеличения уровня звукового давления в фокусе профиль сечения кольцевых областей диска может быть выполненным радиальным, с центром радиуса в точке фокуса. При этом радиус сферы каждой кольцевой поверхности кратен половине длины волны и должен отличаться от соседней на половину длины волны.

Далее представлены фотографии разработанных излучателей и их основные технические характеристики.

ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ ДИСКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ, МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Фотографии изготовленных излучателей 4-х типов представлены на рисунке 10. Материал изготовленных излучателей титановый сплав ВТ1-0. Каждый излучатель снабжен электронным генератором для питания. Генераторы обеспечивают поддержание постоянной амплитуды колебаний (размах) на уровне 50 мкм. Технические характеристики разработанных УЗ излучателей представлены в таблице 1.

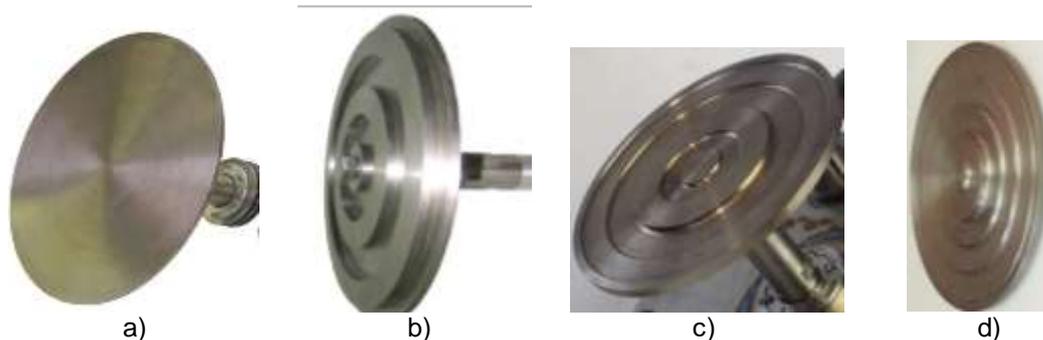
Таблица 1 – Технические характеристики ультразвуковых излучателей

Table 1 – Technical characteristics of ultrasonic emitters

Наименование параметра				
Тип дискового излучателя	Излучатель с плоской фронтальной поверхностью	Направленный излучатель со ступенчато-переменной поверхностью	фокусирующий излучатель со ступенчато-вогнутым профилем излучающей поверхности	фокусирующий излучатель со ступенчато-радиальным профилем излучающей поверхности
1	2	3	4	5
Диаметр излучателя, мм	Ø320	Ø320	Ø 320	Ø 320

Продолжение таблицы 1 / Continuation of table 1

1	2	3	4	5
Потребляемая мощность, Вт	250	240	245	255
Частота колебаний, кГц	22,1	22,5	22,3	21,8
Амплитуда колебаний поверхности мах/мин	51/45	52/48	50/48	50/49
Средняя амплитуда колебаний	35	36	35	35



a – излучатель с плоской фронтальной поверхностью; b – направленный излучатель со ступенчато-переменной поверхностью; c – фокусирующий излучатель со ступенчато-вогнутым профилем излучающей поверхности; d – фокусирующий излучатель со ступенчато-радиальным профилем излучающей поверхности

Рисунок 10 – Фото ультразвуковых дисковых излучателей

Figure 10 – Photo of ultrasonic disk emitters

Для определения диаграммы направленности, формируемой разработанными излучателями, был создан экспериментальный стенд, предназначенный для измерения звукового давления, создаваемого излучателем в произвольной точке пространства на расстоянии 1,5 м и 0,3 м от центра фронтальной поверхности излучателя (рисунок 11). Для измерения диаграммы направленности на расстоянии 0,3 м (область фокусировки в ближней зоне) стенд перенастраивался (устанавливалась другая дуга удерживающая микрофон).



Рисунок 11 – Стенд для измерения звукового давления

Figure 11 – Stand for measuring sound pressure
232

Измерение звукового давления осуществлялось измерителем уровня звукового давления Экофизика-110А.

Метод измерения линейного ослабления уровня звукового давления в зависимости от расстояния до источника ультразвуковых колебаний заключался в измерении уровня звукового давления, формируемого ультразвуковым излучателем вдоль акустической оси на различных расстояниях до излучателя. Измерения проводились на открытом участке для исключения переотражения колебаний в воздухе и искажения показаний. Измерение звукового давления осуществлялось измерителем уровня звукового давления Экофизика-110А. При определении ослабления в ближней зоне (до 1 м от источника) измерении уровня звукового давления вдоль акустической оси осуществлялось через каждые 50 мм. В диапазоне расстояний от 1 до 2 метров измерение проводилось через каждые 200 мм. В диапазоне от 2 до 10 метров – через каждый метр.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В результате исследований изготовленных излучателей и измерений уровня звукового давления были получены диаграммы направ-

ИЗЛУЧАТЕЛИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

ленности (при расстоянии до излучателя 0,3 м и при расстоянии 1 м) и графики ослабления звукового давления в зависимости от расстояния до излучателя. На рисунке 12 представлены диаграммы направленности.

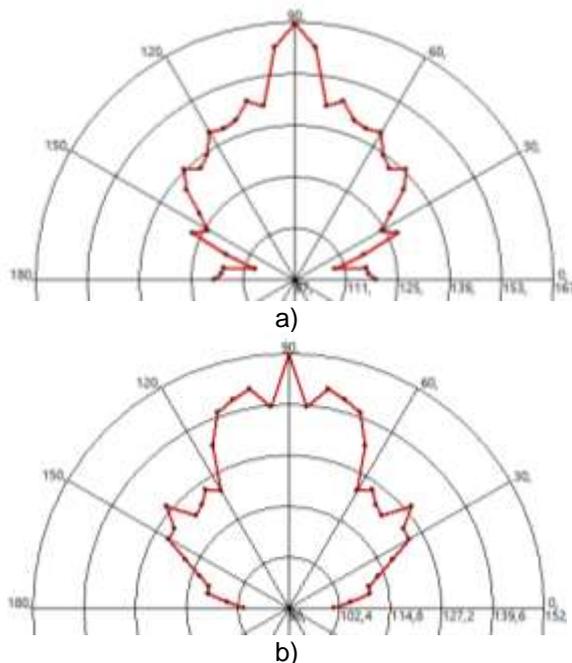


Рисунок 12 – Диаграммы направленности в зависимости от расстояния до излучателя с плоской поверхностью: а) – расстояние 0.3 м; б) – расстояние 1 м

Figure 12 – Radiation patterns depending on the distance to the radiator with a flat surface: a) - distance 0.3 m; b) - distance 1 m

График ослабления звукового давления в зависимости от расстояния до излучателя первого типа с плоской излучающей поверхностью представлен на рисунке 13.

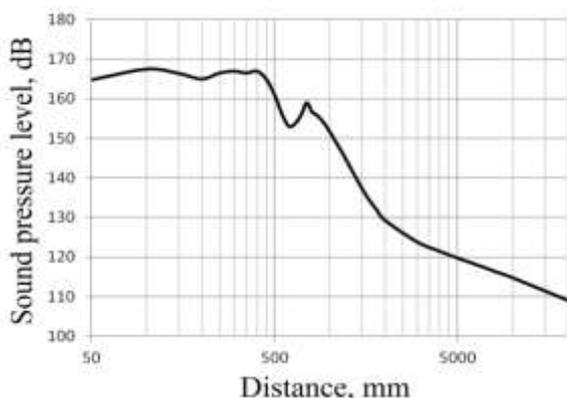


Рисунок 13 – График ослабления звукового давления в зависимости от расстояния до излучателя с плоской фронтальной поверхностью

Figure 13 – Graph of sound pressure attenuation depending on the distance to the radiator with a flat frontal surface

Анализ полученных данных показал, что в ближней зоне излучатель на акустической оси формирует УЗ поле с уровнем звукового давления не более 167 дБ, а на расстоянии 1 м – 152 дБ. Т.е. за счет того, что диаметр излучателя во много раз больше длины формируемой в газе волны, в центре формируется область автофокусировки с высоким уровнем звукового давления. Основная же часть центрального лепестка диаграммы направленности (1 м) имеет ширину около 50 градусов, с уровнем звукового давления около 141 дБ. При этом дальнейшее увеличение расстояние приводит к существенному уменьшению уровня звукового давления вследствие рассеяния и взаимной компенсации колебаний в газе. Например, уже при расстоянии 1.5 метра до излучателя уровень звукового давления падает до 136 дБ. Полученные данные показывают, что рассматриваемая конструкция УЗ излучателя может быть использована при реализации и интенсификации технологических процессов в ближней зоне (до 1 метра), такие как коагуляция и сушка.

При установке отражающей поверхности на небольшом расстоянии (до 30 длин волн) от излучателя возможно резонансное усиление колебаний, т.е. формирование стоячей волны, вследствие чего в существенно возрастает уровень звукового давления. Таким образом, в пространстве между излучателем и отражателем может быть реализован процесс коагуляции высокодисперсных частиц [10].

Также предложенная конструкция может быть использована при реализации процесса распыления пленки жидкости с поверхности излучателя.

На рисунке 13 представлены диаграммы направленности в зависимости от расстояния до направленного излучателя со ступенчато-переменной поверхностью.

График ослабления звукового давления в зависимости от расстояния до направленного излучателя со ступенчато-переменной поверхностью формирующего плоскую волну представлен на рисунке 14.

Диаграмма направленности (0.3 м) имеет ширину 60 градусов, при этом во всем диапазоне формируется постоянный уровень звукового давления 155-157 дБ.

Диаграмма направленности (1 м) имеет малую ширину (30 градусов) со средним уровнем звукового давления более 152 дБ, что свидетельствует о малом рассеянии и малой взаимной компенсации колебаний в рассматриваемой области, которая не превышает диаметр излучателя. В тоже время можно отметить, что не происходит усиления

колебаний в области перед излучателем, таким образом, во всей области уровень звукового давления не превышает 160 дБ.

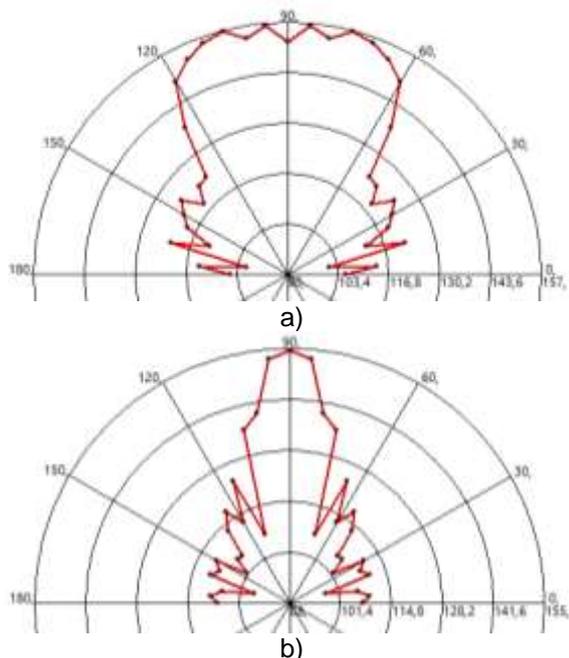


Рисунок 13 – Диаграммы направленности в зависимости от расстояния до направленного излучателя со ступенчато-переменной поверхностью: а) – расстояние 0.3 м; б) – расстояние 1 м

Figure 13 – Radiation patterns depending on the distance to a directional emitter with a step-variable surface: a) - distance 0.3 m; b) - distance 1 m

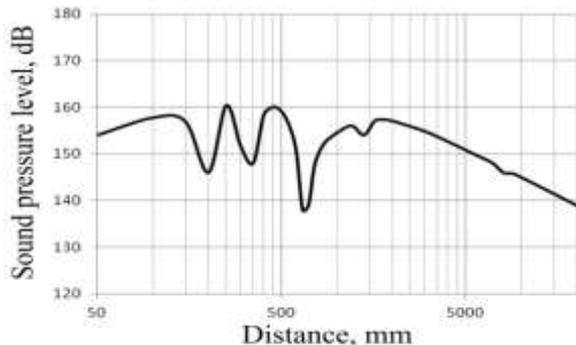


Рисунок 14 – График ослабления звукового давления в зависимости от расстояния до направленного излучателя со ступенчато-переменной поверхностью

Figure 14 – Graph of sound pressure attenuation depending on the distance to a directional emitter with a step-variable surface

Анализ полученных данных позволил сделать вывод, что рассматриваемая конструкция УЗ излучателя формирует узконаправленное излучение и может быть использована для интенсификации процессов коагуляции и сушки [11-13]. Излучатель обеспечивает формирование плоской волны с интенсивностью более

234

155 дБ на расстоянии до 2 метров и не менее 150 дБ на расстоянии до 5 метров.

На рисунке 15 представлены диаграммы направленности в зависимости от расстояния до фокусирующего излучателя с плоскими кольцевыми поверхностями.

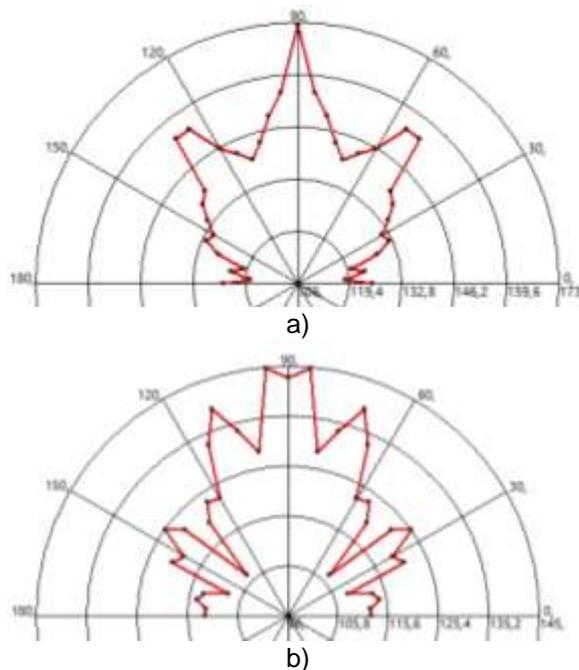


Рисунок 15 – Диаграммы направленности в зависимости от расстояния до фокусирующего излучателя с плоскими кольцевыми поверхностями: а) – расстояние 0.3 м; б) – расстояние 1 м

Figure 15 – Radiation patterns depending on the distance to the focusing radiator with flat annular surfaces: a) - distance 0.3 m; b) - distance 1 m

График ослабления звукового давления в зависимости от расстояния до фокусирующего излучателя с плоскими кольцевыми поверхностями представлен на рисунке 16.

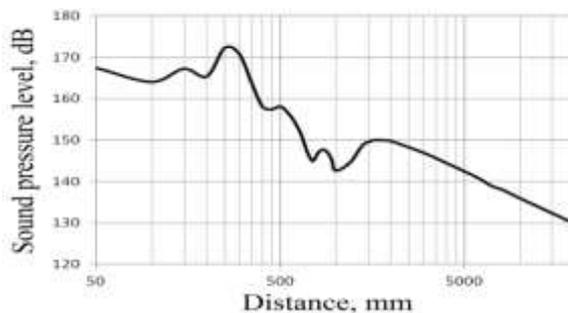


Рисунок 16 – График ослабления звукового давления в зависимости от расстояния до фокусирующего излучателя с плоскими кольцевыми поверхностями

Figure 16 – Graph of sound pressure attenuation depending on the distance to the focusing radiator with flat annular surfaces

ИЗЛУЧАТЕЛИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

На рисунке 17 представлены диаграммы направленности в зависимости от расстояния до фокусирующего излучателя со сферическими кольцевыми поверхностями.

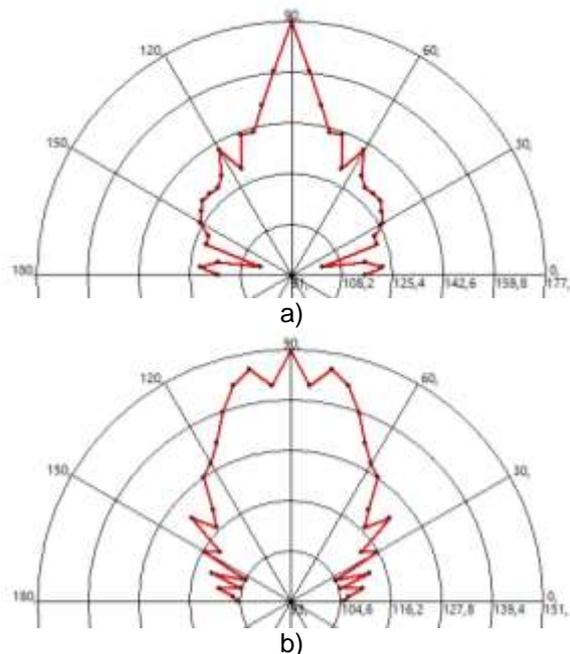


Рисунок 17 – Диаграммы направленности в зависимости от расстояния до фокусирующего излучателя со сферическими кольцевыми поверхностями: а) – расстояние 0.3 м; б) – расстояние 1 м

Figure 17 – Radiation patterns depending on the distance to the focusing radiator with spherical annular surfaces: a) - distance 0.3 m; b) - distance 1 m

График ослабления звукового давления в зависимости от расстояния до фокусирующего излучателя со сферическими кольцевыми поверхностями представлен на рисунке 18.

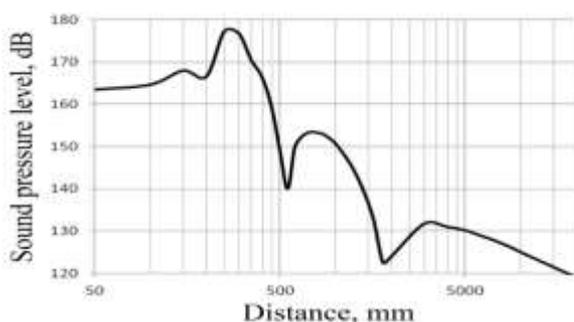


Рисунок 18 – График ослабления звукового давления в зависимости от расстояния до фокусирующего излучателя со сферическими кольцевыми поверхностями

Figure 18 – Graph of sound pressure attenuation depending on the distance to the focusing radiator with spherical annular surfaces

Анализ графиков показал, что выполнение сферических поверхностей (ступенчато-радиальный профиль) позволяет увеличить уровень звукового давления в фокусе (0.3 м) на 4 дБ, за счет снижения рассеяния (перенаправления колебаний), что позволит повысить эффективность воздействия на газодисперсные системы.

Однако, несмотря на высокий уровень звукового давления в фокусе, на расстоянии более 1 метра уровень звукового давления резко начинает падать у обоих излучателей фокусирующего типа. Таким образом, после прохождения точки фокусировки, ультразвуковые колебания становятся расходящимися. Поэтому с увеличением расстояния от излучателя уровень звукового давления у них падает сильнее, чем у ранее рассмотренных излучателей.

Разработанные фокусирующие излучатели могут быть найдены свое применение в промышленных сферах, таких как коагуляция в локальной области, находящейся в точке фокуса. Также излучатель может быть использован для бесконтактной сушки, разрушения пены и бесконтактного распыления жидкости, подаваемой в фокусе излучателя. Эффективность воздействия на расстоянии более 400 мм существенно снижается вследствие ослабления уровня звукового давления. Поэтому разработанные фокусирующие излучатели формируют УЗ поле, обеспечивающее низкую эффективность процесса коагуляции частиц на расстоянии более 1 метра.

Для увеличения уровня звукового давления на большем расстоянии необходимо модернизировать излучатель (выполнить пересчет профиля фронтальной стороны излучателя с большим фокусным расстоянием).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье были представлены различные типы конструкций и принципы построения дисковых излучателей для воздействия на газовые среды. Было показано, что за счет ступенчатого изменения толщины диска можно обеспечить равенство амплитуд колебаний по всей поверхности излучателя. При этом изменение толщины диска производится с тыльной стороны излучателя и выполняется в местах узловых окружностей, соответствующих нулям колебаний излучателя.

Для исключения взаимной компенсации колебаний в воздухе на некотором расстоянии от излучателя, а также для обеспечения необходимой диаграммы направленности излучателя фронтальную поверхность излу-

чателю предложено также выполнить ступенчато-переменной по толщине. Местоположение и размеры фронтальных выступов или углублений определяют основные характеристики акустического поля, формируемого излучателем.

Это позволило разработать 4 типа излучателей и определить их основные характеристики. Было установлено, что излучатель с плоской фронтальной поверхностью обеспечивает 167 дБ и позволяет интенсифицировать ряд технологических процессов в ближней зоне (до 1 метра), таких как коагуляция и сушка.

Излучатель второго типа со ступенчато-переменной поверхностью и преимущественным излучением одной фазы колебаний позволяет создать в воздушной среде однородное ультразвуковое поле при уровне звукового давления 155-157 дБ на расстоянии до 2 метров до излучателя.

Излучатели 3 и 4 типов позволяют существенно увеличить уровень формируемого звукового давления за счет фокусировки и обеспечивают до 173 дБ и 177 дБ в фокусе соответственно. После прохождения точки фокусировки, ультразвуковые колебания становятся расходящимися. Поэтому с увеличением расстояния от излучателя уровень звукового давления у них падает сильнее, чем у ранее рассмотренных излучателей.

Таким образом, в результате проделанной работы предложены принципы разработки и созданы ультразвуковые излучатели для газовых сред с различными диаграммами направленности и создаваемым уровнем звукового давления.

Созданные излучатели могут быть использованы для интенсификации большого числа процессов в газовых средах, в том числе разрушения туманов, газоочистки, сушки, разрушения пены и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенберг Л.Д. Источники мощного ультразвука. Москва: Наука, 1969. 380 с.
2. Агранат Б.А., Дубровин М.Н. Основы физики и техники ультразвука. Москва: Высшая школа, 1987. 352 с.
3. Ультразвук. Аппараты и технологии: монография / В.Н. Хмелев [и др.]. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2015. 687 с.
4. Разработка пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для интенсификации процессов в газодисперсных системах / В.Н. Хмелев [и др.] // Известия Тульского Государственного университета. 2010. №1. С.148–153.

5. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Golykh, R.N. & Nesterov, V.A. (2018). The disk radiator for the influence on the gas media. *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*. 15(2), 122–129.

6. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Abramenko D.S., Barsukov, R.V. & Lebedev, A.N. (2011). Studies of ultrasonic dehydration efficiency. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*. 12(4), 247–254.

7. Mitin, A. & Efimov, Y. (2001). Gas-jet ultrasonic generators for NDT. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 17, 341–350.

8. Бабаков И.М. Теория колебаний. Москва: Дрофа, 2004. 591 с.

9. Ультразвуковой преобразователь с радиально расположенными пьезокерамическими пакетами / В.Н. Хмелев [и др.] // Ползуновский вестник. 2022. Т.2, № 4. С. 66–76.

10. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Nesterov, V.A. & Bochenkov, A.S. (2021). The limits of fine particle ultrasonic coagulation. *Symmetry*. 13, 1–19.

11. Разработка и исследование ультразвукового коагулятора, основанного на вихревых акустических потоках / А.В. Шалунов [и др.] // Ползуновский вестник. 2022. Т.2, №4. С. 84–92.

12. Ультразвуковая коагуляция в скрубберах вентури: особенности реализации и эффективность применения / В.Н. Хмелев [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. № 331. С. 128–139.

13. Разработка и исследование нового способа газоочистки от частиц размером менее / В.Н. Хмелев [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. № 332. С.127–139.

Информация об авторах

Р. С. Доровских – кандидат технических наук, научный сотрудник Бийского технологического института (филиал) АлтГТУ.

А. Е. Пужайкина – инженер кафедры МСИА Бийского технологического института (филиал) АлтГТУ.

А. С. Боченков – инженер кафедры МСИА Бийского технологического института (филиал) АлтГТУ.

А. В. Шалунов – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Бийского технологического института (филиал) АлтГТУ.

В. А. Нестеров – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Бийского технологического института (филиал) АлтГТУ.

REFERENCES

1. Rosenberg, L.D. (1969). Sources of powerful ultrasound. Moscow: Nauka. (In Russ.)
2. Agranat, B.A. & Dubrovin, M.N. (1987).

ИЗЛУЧАТЕЛИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Fundamentals of physics and technology of ultrasound. Moscow: Higher School. (In Russ.).

3. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Khmelev, S.S. & Tsyganok, S.N. (2015). Ultrasound. Apparatus and technology. Biysk: Alt. state tech. university (In Russ.).

4. Khmelev, V.N., Galakhov, A.N., Shalunov, A.V., Khmelev, S.S., Tsyganok, S.N. & Lebedev, A.N. (2010). Development of piezoelectric ultrasonic oscillatory systems for the intensification of processes in gas-dispersed systems. *Bulletin of the Tula State University*, (1). 148–153. (In Russ.).

5. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Golykh, R.N. & Nesterov, V.A. (2018). The disk radiator for the influence on the gas media. *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*. 15(2), 122–129.

6. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Abramenko D.S., Barsukov, R.V. & Lebedev, A.N. (2011). Studies of ultrasonic dehydration efficiency. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*. 12(4), 247–254.

7. Mitin, A. & Efimov, Y. (2001). Gas-jet ultrasonic generators for NDT. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 17, 341–350.

8. Babakov, I.M. (2004). Theory of vibrations. Moscow: Drofa. (In Russ.).

9. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Nesterov, V.A. & Bochenkov, A.S. (2022). Ultrasonic Transducer with Radially Arranged Piezoceramic Packages. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 66–76. (In Russ.).

10. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Nesterov, V.A. & Bochenkov, A.S. (2021). The limits of fine particle ultrasonic coagulation. *Symmetry*. 13, 1–19.

11. Shalunov, A.V., Nesterov, V.A., Golykh, R.N., Bochenkov, A.S., Dorovskikh, R.S. & Khmelev, V.N. (2022). Development and research of an ultrasonic coagulator based on vortex acoustic flows. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 84–92. (In Russ.).

12. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Tsyganok, S.N. & Nesterov, V.A. (2020). Ultrasonic Coagulation in Venturi Scrubbers: Features of Implementation and

Efficiency of Application. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*, (331), 128–139. (In Russ.).

13. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Nesterov, V.A. & Bochenkov, A.S. (2021). Development and research of a new method of gas purification from particles smaller than 2.5 μm . *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*, (332), 127–139.

Information about the authors

R. S. Dorovskikh – Candidate of Technical Sciences, Researcher at the Biysk Institute of Technology (branch) of the Polzunov Altai State Technical University.

A. E. Puzhaykin – Engineer of the Biysk Institute of Technology (Branch) of the Biysk Institute of Technology of the Polzunov Altai State Technical University.

A. S. Bochenkov – Engineer of the Biysk Institute of Technology Department. 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.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 28.03.2023; одобрена после рецензирования 13.08.2023; принята к публикации 11.09.2023.

The article was received by the editorial board on 28 Mar 2023; approved after editing on 13 Aug 2023; accepted for publication on 11 Sep 2023.