

УДК 534-13
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4822
Шифр специальности ВАК: 2.6.13
Научная статья

Двухчастотная система ультразвуковых излучателей для коагуляции пыли и дыма

В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов[✉], С.Н. Цыганок, С.А. Терентьев, В.А. Шакура

*Бийский Технологический институт (филиал) Алтайского технического университета
им. И.И. Ползунова, Россия, г. Бийск*

[✉]shalunov@bti.secna.ru

Аннотация. Актуальность. Определяется отсутствием эффективных, безопасных и экологичных методов осаждения взвесей твердых частиц и дымов в процессах, связанных с добычей, транспортировкой и переработкой полезных ископаемых, и пожаротушением. **Цель.** Разработка и исследование двухчастотной системы ультразвуковых излучателей для повышения эффективности осаждения опасных взвесей пыли и дыма. **Методы.** Экспериментальные исследования, направленные на получение данных для построения диаграмм направленности, расчета погонного затухания и акустической мощности ультразвуковых излучателей. **Результаты и выводы.** Разработаны ультразвуковые дисковые излучатели, состоящие из пьезоэлектрического модернизированного преобразователя, выполненного по конструктивной схеме Ланжевена, и изгибно-колеблющегося излучателя, оснащенные отражателями, фазовыравнивающими конусами и рупорами. Создан экспериментальный стенд, состоящий из двух одновременно работающих ультразвуковых дисковых излучателей с близкими собственными резонансными частотами и измерителя звукового давления. Показано, что применение отражателей увеличило суммарное звуковое давление двух ультразвуковых излучателей на 3–3,5 дБ. Угол основного лепестка диаграммы направленности составил $\pm 7,5$ градусов. Использование фазовыравнивающих конусов обеспечило формирование акустических колебаний в одной фазе с колеблющимися поверхностями в разных фазах и увеличило звуковое давление системы на 8–9 дБ. При одновременном воздействии двумя ультразвуковыми излучателями на воздушную среду формируется зона возникновения биений на низкой частоте акустических колебаний (300 Гц), при этом звуковое давление достигает 97,6 дБ на расстоянии 1 м и 77,1 дБ на удалении в 20 м. Установлено, что осаждение цементной пыли происходит не менее чем в 300 раз быстрее, чем при естественном осаждении, и менее чем в 50 раз быстрее, чем при осуществлении воздействия одним дисковым излучателем равной площади. Время воздействия, необходимое для осаждения дыма, возникающего при сжигании сосновых опилок, не превышало 10 секунд для установления дальности видимости не менее 10 м.

Ключевые слова: ультразвуковой излучатель, пылеподавление, осаждение дыма, звуковое давление, биения

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РФ (проект № 24-19-00900).

Для цитирования: Двухчастотная система ультразвуковых излучателей для коагуляции пыли и дыма / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.Н. Цыганок, С.А. Терентьев, В.А. Шакура // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 8. – С. 108–119. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4822

UDC 534-13
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4822
Scientific paper

Dual-frequency ultrasonic emitter system for dust and smoke coagulation

V.N. Khmelev, A.V. Shalunov[✉], S.N. Tsyganok, S.A. Terentiev, V.A. Shakura

Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk, Russian Federation

[✉]shalunov@bti.secna.ru

Abstract. Relevance. The lack of effective, safe and environmentally friendly methods for settling suspended solid particles and smoke in processes related to the extraction, transportation and processing of minerals, and fire extinguishing. **Aim.** Development and research of a dual-frequency ultrasonic emitter system to improve the efficiency of settling hazardous dust and smoke suspensions. **Methods.** Experimental studies aimed at obtaining data for constructing radiation patterns, calculating the linear attenuation and acoustic power of ultrasonic emitters. **Results and conclusions.** The authors have developed the ultrasonic disk emitters, consisting of a piezoelectric modernized transducer, made according to the Langevin design scheme and a bending-oscillating emitter, equipped with reflectors, phase-aligning cones and horns. They developed the experimental stand, consisting of two simultaneously operating ultrasonic disk emitters with close natural resonant frequencies and a sound pressure meter. It was shown that the use of reflectors increased the total sound pressure of two ultrasonic emitters by 3–3.5 dB. The angle of the main lobe of the directivity pattern was ± 7.5 degrees. The use of phase-aligning cones ensured the formation of acoustic oscillations in one phase from oscillating surfaces in different phases and increased the sound pressure of the system by 8–9 dB. When two ultrasonic emitters simultaneously act on the air environment, a zone of occurrence of beats at a low frequency of acoustic oscillations (300 Hz) is formed, while the sound pressure reaches 97.6 dB at a distance of 1 m and 77.1 dB at a distance of 20 m. It was established that the sedimentation of cement dust occurs at least 300 times faster than with natural sedimentation, and less than 50 times faster than with the implementation of the effect of one disk emitter of the same area. The time of action required for the sedimentation of smoke arising from the combustion of pine sawdust did not exceed 10 seconds to establish a visibility range of at least 10 m.

Keywords: ultrasonic emitter, dust suppression, smoke precipitation, sound pressure, beats

Acknowledgements: The research was carried out using the RSF grant (project no. 24-19-00900).

For citation: Khmelev V.N., Shalunov A.V., Tsyganok S.N., Terentiev S.A., Shakura V.A. Dual-frequency ultrasonic emitter system for dust and smoke coagulation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 8, pp. 108–119. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4822

Введение

Добыча, транспортировка и переработка полезных ископаемых приводит к образованию большого количества опасных аэрозолей твердых частиц – пыли, образующей взвесь, висящую в воздухе и переносимую воздушными потоками. В зависимости от происхождения такие взвеси твердых частиц могут представлять огромную экологическую (например, пыли руды редкоземельных материалов, в т. ч. радиоактивных) и техногенную (например, угольная пыль) опасности. Методы, которые на сегодняшний день применяются для пылеподавления (в первую очередь это распыление различных растворов ПАВ) не позволяют решить эту актуальную задачу, а применяемые составы не являются экологичными [1, 2]. Это обуславливает актуальность разработки новых способов борьбы с образованием пыли в горнодобывающей, горнотранспортной и перерабатывающей промышленности.

Отдельной проблемой является образование опасных аэрозолей – дымов при пожарах. Снижение видимости при пожаротушении, сложность ориентирования в пространстве и невозможность выявления наиболее опасных очагов горения обуславливает повышенную сложность и опасность реализации процесса пожаротушения и требует создания способов осаждения дыма и соответствующего технического оснащения для борьбы с дымом.

Одним из перспективных способов осаждения опасной пыли и дымов, образующихся при пожарах, является использование направленных акустических колебаний [3–7]. Воздействие ультразвукового излучателя с высоким уровнем звукового да-

вления в создаваемой волне приводит к ускоренному объединению частиц в агломераты. В процессе объединения агломераты частиц увеличивают свои размеры (более 10–100 мкм) и массу, вследствие чего гораздо легче осаждаются под действием гравитационных сил.

Однако, как показывают исследования, проведенные различными авторами, одиночного ультразвукового излучателя недостаточно для эффективного осаждения частиц дыма и пыли, так как сложно обеспечить необходимый для этого уровень звукового давления [8, 9]. Решением проблемы может стать использование нескольких излучателей, работающих на близких частотах. Такая конструкция обеспечивает увеличение суммарной выходной мощности излучателей и дополнительное сужение диаграммы направленности излучения, а также формирует биения разностной частоты в зоне взаимодействия нескольких ультразвуковых излучателей.

Для биений разностной частоты характерны высокая направленность излучения, широкополосность и подавление боковых лепестков диаграммы направленности. При незначительном различии резонансных частот ультразвуковых излучателей возникнут акустические колебания звукового диапазона, которые эффективно справляются с осаждением частиц размером более 5 мкм.

Объекты и методика исследования

Для практической реализации предложенного способа могут быть использованы пакетные пьезоэлектрические излучатели на основе классического преобразователя Ланжевена, которые позволяют

получить значительные амплитуды колебаний при высоком КПД электроакустического преобразования [10]. Применение ультразвуковых колебаний с высоким уровнем звукового давления (более 150 дБ) обеспечивает максимально возможную эффективность (минимальные энергозатраты) осаждения частиц дыма и пыли. Однако эти колебания необходимо передать в воздушную среду с максимально возможным КПД и узкой направленностью излучения. А поскольку воздушная среда отличается малым акустическим сопротивлением, передача энергии колебаний с единицы площади поверхности излучателя существенно ограничена. Поэтому для создания таких колебаний применяются специальные устройства – пьезоэлектрические колебательные системы. В таких системах формирование колебаний осуществляется при помощи продольно колеблющихся пьезоэлектрических преобразователей, а в качестве излучателей используются соединенные с ними изгибно-колеблющиеся металлические диски переменного сечения [11].

Такая форма колебаний обеспечивает максимально возможный выход энергии УЗ колебаний, поскольку волновое сопротивление изгибно-колеблющегося излучателя лучше согласуется с волновым сопротивлением газовой среды. Практически реализованные в настоящее время излучатели способны работать на 5–7 модах основной частоты, что позволяет создавать излучатели диаметром в 300–400 мм [7, 11].

Увеличение диаметров излучателей приводит к относительному снижению эффективности излучения из-за чередующихся кольцевых зон излучения с различными фазами и обуславливает ограничение на дальнейшее увеличение размеров излучателей (рис. 1).

Видно, как различные точки поверхности диска излучают колебания в противоположенных фазах. Это приводит к тому, что на некотором расстоянии от диска акустическое излучение взаимно компенсируется и не может обеспечить требуемого ультразвукового воздействия на обрабатываемые объекты [12]. Практически это приводит к невозможности формирования уже на расстоянии 1 м от излучателя ультразвуковых колебаний с уровнем звукового давления более 130 дБ.

Известный путь устранения этого недостатка за счет ступенчатого изменения толщины диска для выравнивания фаз колебаний не позволяют увеличить площадь поверхности излучения с одной фазой даже до 70 %, но существенно снижает прочностные характеристики излучателя и требует соответствующего уменьшения (практически в 2 раза) амплитуды колебаний (мощности излучения). Вместе с тем использование титановых дисков, совершающих колебания на второй моде, обеспечи-

вает не менее чем двукратное увеличение поверхности излучения с одной фазой (площадь центрального и крайнего кольцевого кольца излучения может превышать 75 % от всей поверхности). Однако необходимо использовать несколько таких излучателей для создания требуемого уровня звукового давления.

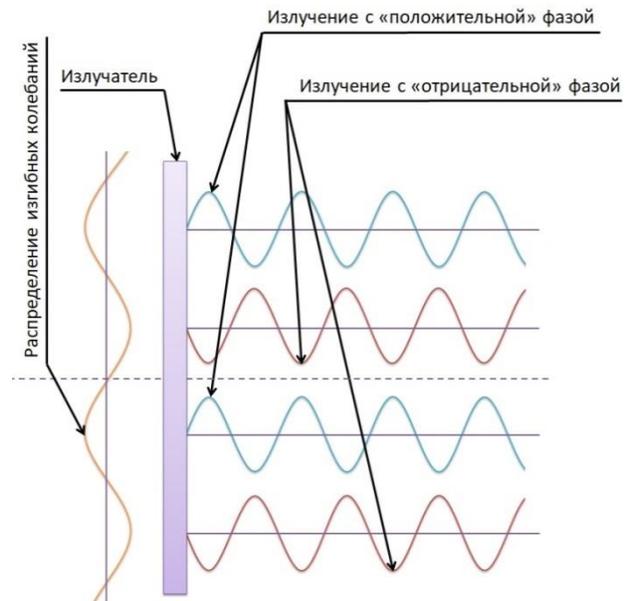


Рис. 1. Приблизительное распределение изгибных колебаний по поверхности плоского диска и излучение отдельных точек поверхности диска в воздух

Fig. 1. Approximate distribution of bending vibrations over the surface of a flat disk and radiation of individual points of the disk surface into the air

При разработке конструкции излучателя были исключены варианты ступенчатого изменения толщины дисков для увеличения поверхности колебаний с одной фазой. Исследования формы колебаний и амплитуды колебаний центральных дисковых и различных кольцевых участков излучателей трех типов позволили установить следующее. В колеблющемся на второй моде основных колебаний диске возможна реализация изгибных колебаний, при которых колеблющиеся синфазно центральная и крайняя кольцевая зоны колебаний составляют по площади более 75 % от излучающей поверхности всего диска, т. е. позволяют излучать не менее 75 % колебаний в одной фазе. При этом максимальная амплитуда колебаний центральной зоны превышает амплитуду соседней кольцевой зоны, формирующей колебания в противофазе, не менее чем в два раза. В ходе исследований было установлено, что плавное увеличение толщины центральной и крайней кольцевой зоны обеспечи-

вадет не только увеличение их суммарной площади, создающей синфазные колебания, но и позволяет обеспечить формирование колебаний с одинаковой амплитудой, близкой в амплитуде колебаний, расположенной между ними кольцевой зоны, формирующей противофазные колебания.

Моделирование процессов формирования колебаний и исследование технических характеристик колеблющихся дисков позволили выбрать оптимальную конструктивную схему излучателя (рис. 2).

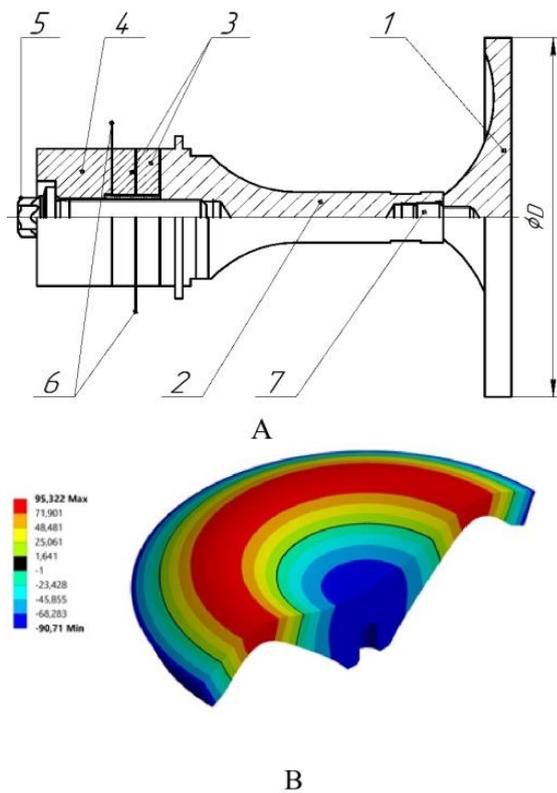


Рис. 2. А) эскиз излучателя в сборе с пьезоэлектрической колебательной системой; В) распределение амплитуд колебаний дискового излучателя; 1 – излучатель; 2 – излучающая накладка пьезопреобразователя; 3 – пьезокерамические кольца; 4 – отражающая накладка; 5 – стягивающий болт; 6 – медный электрод

Fig. 2. А) sketch of the emitter assembled with the piezoelectric oscillating system; В) pattern of the distribution of the oscillation amplitudes of the disk emitter; 1 – emitter; 2 – emitting pad of the piezoelectric transducer; 3 – piezoceramic rings; 4 – reflective pad; 5 – tightening bolt; 6 – copper electrode

Конструкция включает: излучатель в форме диска, совершающий изгибные колебания, – 1; пьезоэлектрический преобразователь, состоящий из излучающей накладки пьезопреобразователя, – 2, пьезокерамических колец – 3 и отражающей

накладки – 4 (рис. 1). Ультразвуковые колебания в газовой среде возникают за счет изгибных колебаний диска. В свою очередь дисковый излучатель приводится в колебательное движение при помощи центрального возбуждения пьезоэлектрической колебательной системой. Проведенные расчеты позволили установить, что диаметр такого излучателя, колеблющегося на второй моде, на частоте 22–23 кГц будет равен 100 мм. Точное значение частоты обеспечивается расчетом соответствующей толщины диска. Расчет параметров диска производится в системе конечно-элементного моделирования с указанием параметров материала, соответствующих титановому сплаву ВТ-6.

На рис. 2, В показаны три чередующиеся области, совершающие колебания в противоположных фазах в разработанной конструкции излучателя. Фаза колебаний центральной и периферийной областей (синий цвет) отличается на 90 градусов от средней области колебаний (красный цвет). Как уже упоминалось, это приводит к тому, что на некотором расстоянии от излучателя излучение этих зон взаимно компенсируется.

Кроме того, излучение тыльной стороны диска направлено в противоположную сторону и не используется для воздействия на газовые среды. Для устранения этих недостатков был разработан отражатель. Отражатель представляет собой два соосно-расположенных усеченных конуса [13, 14]. Использование обратной стороны изгибно-колеблющегося диска позволяет увеличить звуковое давление и уменьшить расхождение формируемого ультразвукового излучения. Для минимизации потерь полезной площади излучателя было предложено использовать специальный рупор с фазовывравнивающими конусами [15–18]. В результате на выходе устройства формируется акустическое поле преимущественно одной фазы.

Для измерения диаграммы направленности ультразвуковых излучателей был собран стенд, представленный на рис. 3. Ультразвуковой излучатель – 1 находился вертикально. Микрофон – 4 шумомера – 6 находился на акустической оси ультразвукового излучателя. Вертикальность и горизонтальность положения устройств в рассматриваемом стенде контролировалась при помощи лазерного нивелира. Стойка ультразвуковых излучателей – 2 была жестко закреплена. Стойка микрофона – 5 имела возможность перемещения, изменяя угол положения микрофона относительно оси симметрии. Угол изменялся от 0° до 90°. При этом выдерживалось расстояние в 1000 мм между излучающей поверхностью ультразвукового излучателя и микрофоном. Межосевое расстояние выбиралось таким, чтобы обеспечить минимальный зазор между изгибно-колеблющимися дисковыми излучателями.

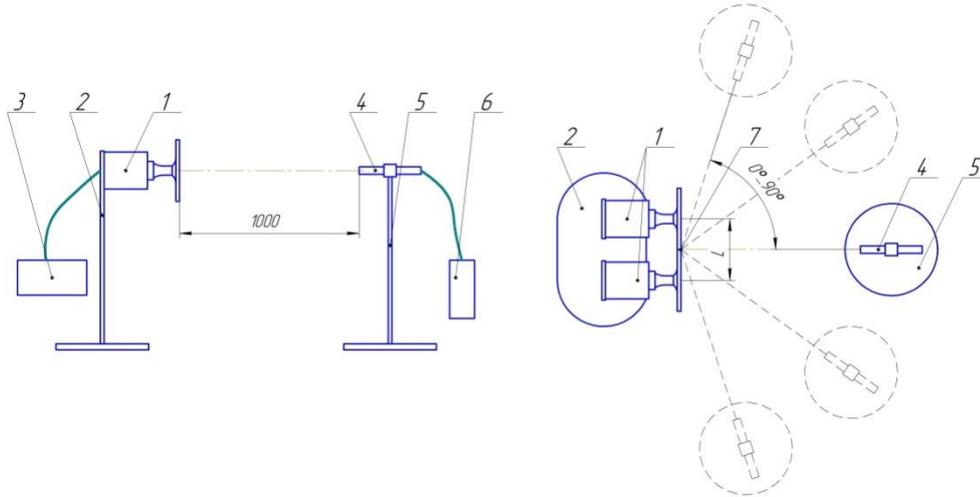


Рис. 3. Структурная схема стенда для измерения диаграммы направленности ультразвукового излучателя: 1 – ультразвуковая акустическая система, 2 – стойка излучателя, 3 – электронный генератор, 4 – микрофон, 5 – стойка микрофона, 6 – измерительный блок шумомера

Fig. 3. Structural diagram of the stand for measuring the directional pattern of an ultrasonic emitter: 1 – ultrasonic acoustic system, 2 – emitter stand, 3 – electronic generator, 4 – microphone, 5 – microphone stand, 6 – noise meter measuring unit

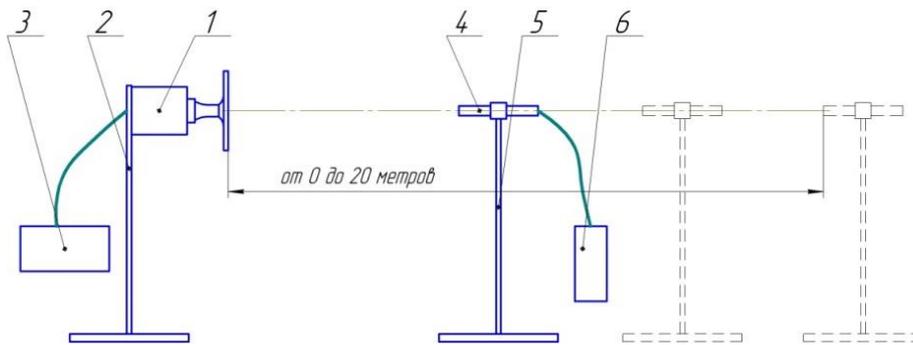


Рис. 4. Структурная схема стенда для измерения затухания звукового давления ультразвукового излучателя: 1 – ультразвуковая акустическая система, 2 – стойка излучателя, 3 – электронный генератор, 4 – микрофон, 5 – стойка микрофона, 6 – измерительный блок шумомера

Fig. 4. Structural diagram of the stand for measuring the attenuation of sound pressure of an ultrasonic emitter: 1 – ultrasonic acoustic system, 2 – emitter stand, 3 – electronic generator, 4 – microphone, 5 – microphone stand, 6 – measuring unit of the noise meter

Электронный генератор [19] подавал напряжение с частотой, соответствующей собственной резонансной частоте каждого ультразвукового излучателя. Измерение звукового давления проводилось с помощью шумомера Экофизика-110А.

Для измерения затухания звукового давления вдоль акустической оси ультразвуковой акустической системы был собран стенд, описанный ранее и представленный на рис. 4.

Стойка микрофона – 5 (рис. 4) имела возможность перемещения вдоль акустической оси. Положение микрофона на акустической оси контролировалось с помощью лазерного нивелира. Расстояние от излучающей поверхности ультразвукового излучателя в ближнем поле (до 500 мм) измерялось

при помощи линейки, а в дальнем поле (от 0,5 м до 20 м) – при помощи лазерного дальномера.

Акустическая мощность ультразвукового излучателя определялась как разница между полной потребляемой электрической мощностью излучателя и мощностью собственных потерь (т. е., потребляемой излучателем при работе без нагрузки) в излучателе (1). Для определения мощности собственных потерь излучатель помещался в вакуумную камеру [20]. Откачка воздуха из вакуумной камеры осуществлялась до остаточного давления, не превышающего 1000 Па. КПД ультразвукового излучателя определялся как отношение акустической мощности к полной потребляемой мощности излучателя (2).

$$P_{\text{ак}} = P_{\text{полн}} - P_{\text{потерь}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ак}}$ – акустическая мощность ультразвукового излучателя; $P_{\text{полн}}$ – полная потребляемая электрическая мощность излучателя; $P_{\text{потерь}}$ – мощность собственных потерь в излучателе.

$$\eta = \frac{P_{\text{ак}}}{P_{\text{полн}}} 100\%, \quad (2)$$

где η – КПД ультразвукового излучателя.

Измерение электрической мощности, потребляемой излучателем, осуществлялось при помощи измерителя МТ-1010. Фотография стенда представлена на рис. 5.



Рис. 5. Стенд для измерения акустической мощности
 Fig. 5. Stand for measuring acoustic power

Результаты исследования

Для проведения исследований были разработаны и изготовлены два ультразвуковых излучателя с изгибно-колеблющимися дисками диаметром 100 мм с близкими резонансными частотами. Материал – титановый сплав ВТ-6. Далее проводились сравнительные измерения диаграмм направленности между отдельным дисковым излучателем и системой из двух ультразвуковых преобразователей.

На рис. 6 приведен внешний вид стенда из двух ультразвуковых излучателей с собственными резонансными частотами 22634 и 22934 Гц соответственно. Разница резонансных частот составила 300 Гц.

С помощью созданного стенда было проведено измерение диаграммы направленности акустического поля, которое создается двумя однотипными ультразвуковыми излучателями, работающими одновременно на разных частотах. Межосевое расстояние было выбранным чуть превышающим диаметр изгибно-колеблющегося диска и составило

100 мм. При проведении измерений микрофон располагался на расстоянии один метр от точки, показанной на рис. 6.

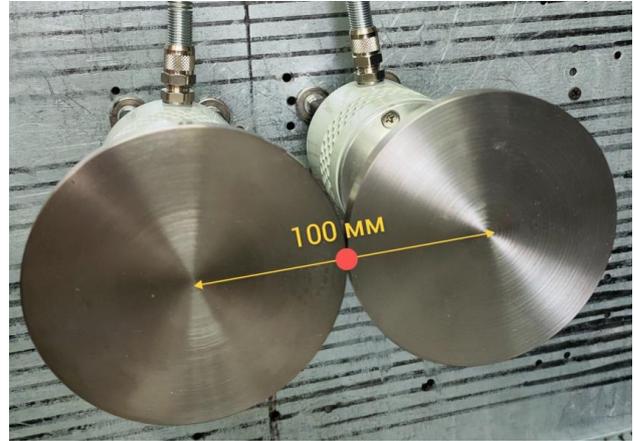


Рис. 6. Стенд из двух ультразвуковых излучателей
 Fig. 6. Stand of two ultrasonic emitters

Также для сравнения были проведены аналогичные измерения, но с использованием одного излучателя с частотой 22634 Гц. На рис. 7 приведены сравнительные диаграммы направленности одного ультразвукового излучателя (синяя кривая) и двух одновременно работающих излучателей (оранжевая кривая – горизонтальная ось, красная кривая – вертикальная ось).

Так как одиночный ультразвуковой излучатель формирует симметричное звуковое поле относительно акустической оси, его диаграммы направленности по горизонтальной и вертикальной осям одинаковые. Поэтому для него приведены диаграммы направленности только по горизонтальной оси.

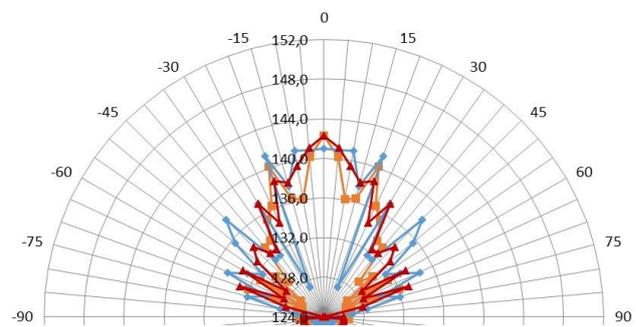


Рис. 7. Сравнительные диаграммы направленности одного ультразвукового излучателя (синяя кривая), двух излучателей по горизонтальной оси (оранжевая кривая), двух излучателей по вертикальной оси (красная кривая)

Fig. 7. Comparative radiation patterns of one ultrasonic emitter (blue curve), two emitters along the horizontal axis (orange curve), two emitters along the vertical axis (red curve)

Как видно из диаграммы, при использовании двух одновременно работающих ультразвуковых преобразователей угол излучения уменьшился до ± 10 градусов, по сравнению с одиночным излучателем (± 20 градусов). При этом уровень звукового давления увеличился на 1,9–2,2 дБ и достиг показателя в 142,0–142,3 дБ. Также на диаграмме ярко выражены два пика при углах измерений ± 20 градусов, что соответствует 140,1 дБ для каждого ультразвукового излучателя. Дальнейшие исследования должны показать влияние отражателей.

Поскольку полученные уровни звукового давления превышают значения в 110 дБ (ГОСТ 12.4.077), допустимые для длительного воздействия на рабочем месте, при проведении исследований были использованы индивидуальные средства защиты (беруши). При практическом использовании ультразвуковых излучателей для коагуляции дыма или пыли следует избегать нахождения на линии распространения ультразвуковых колебаний и использовать индивидуальные средства защиты от звукового воздействия.

Внешний вид стенда из двух ультразвуковых излучателей с отражателями представлен на рис. 8. Внешний диаметр отражателя составил 158 мм с углом раскрытия конуса 90 градусов. Указанный диаметр излучателя был выбран для обеспечения переотражения и направления в сторону воздействия колебаний, создаваемых средней и периферийной зонами (красной и крайней синей на рис. 2, В) тыльной стороны диска. По результатам моделирования их размер равен 19 мм (от края диска). Межосевое расстояние было выбрано чуть превышающим диаметр отражателя и составило 160 мм. При проведении измерений микрофон располагался на расстоянии один метр от точки, показанной на рис. 8.

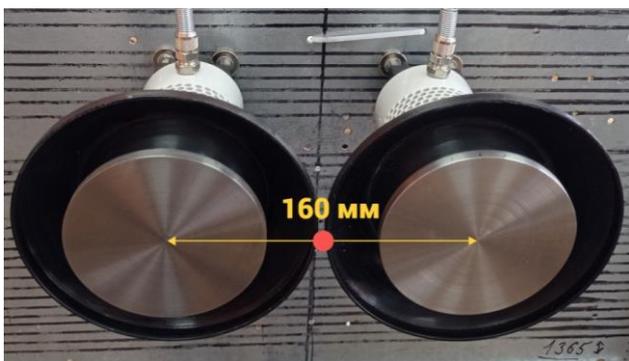


Рис. 8. Два ультразвуковых излучателя с отражателями
Fig. 8. Two ultrasonic emitters with reflectors

На рис. 9 представлены сравнительные результаты измерений одного излучателя (синяя кривая) и системы из двух излучателей при использовании отражателей (оранжевая кривая – горизонтальная ось, красная кривая – вертикальная ось).

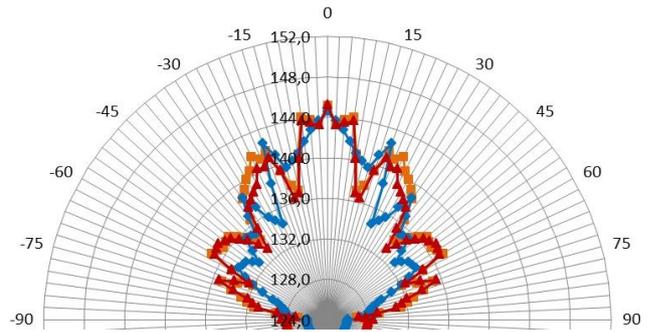


Рис. 9. Сравнительные диаграммы направленности одного ультразвукового излучателя (синяя кривая), двух излучателей по горизонтальной оси (оранжевая кривая) и двух излучателей по вертикальной оси (красная кривая) при использовании отражателей

Fig. 9. Comparative radiation patterns of one ultrasonic emitter (blue curve), two emitters along the horizontal axis (orange curve) and two emitters along the vertical axis (red curve) using reflectors

Анализ работы системы из двух излучателей (оранжевая кривая) показывает, что на диаграмме заметны два пика на углах $\pm 7,5$ градусов, что соответствует 144,0 дБ для каждого ультразвукового излучателя. Суммарное звуковое давление от двух ультразвуковых излучателей увеличилось до 145,1–145,5 дБ, то есть на 3,1–3,5 дБ, по сравнению с вариантом стенда без отражателей. Единичный ультразвуковой излучатель показал меньшие показатели – угол основного лепестка составил ± 10 градусов, а звуковое давление на расстоянии 1 м достигало 144,5 дБ.

Таким образом, использование обратной стороны изгибно-колеблющегося диска позволило увеличить звуковое давление и уменьшить расхождение формируемого ультразвукового излучения. Дальнейшие исследования позволяют оценить влияние отражающих экранов на акустические колебания, излучаемые различными зонами дискового излучателя.

Использование специальных устройств – экранов, позволяющих минимизировать воздействие акустическими колебаниями в противоположных фазах (рис. 10), вместе с отражателем позволяет также увеличить звуковое давление, создаваемое дисковым излучателем. Зона 1 дискового излучателя совершает колебания в одной фазе, а зона 2 – в противоположной фазе.

Поскольку эффективнее всего закрывать зону 2, были проведены исследования именно с такими экранами (рис. 11).

Межосевое расстояние было выбранным чуть превышающим диаметр отражателя и составило 160 мм. При проведении измерений микрофон располагался на расстоянии один метр от точки, показанной на рис. 11.

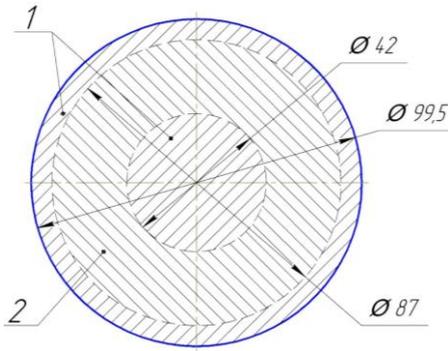


Рис. 10. Зоны излучения изгибно-колеблющегося диска
Fig. 10. Radiation zones of a flexural-oscillating disk

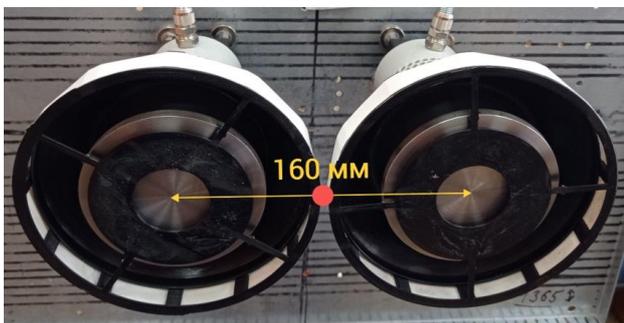


Рис. 11. Два ультразвуковых излучателя с отражателями и экранами
Fig. 11. Two ultrasonic emitters with reflectors and screens

На рис. 12 приведены сравнительные диаграммы направленности одного ультразвукового излучателя с отражателем и экраном (синяя кривая) и двух одновременно работающих излучателей с отражателями и экранами (оранжевая кривая – горизонтальная ось, красная кривая – вертикальная ось).

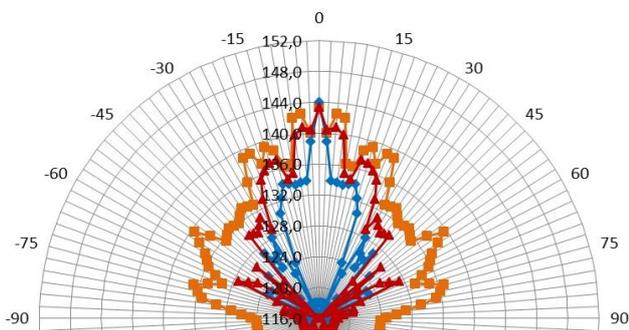


Рис. 12. Сравнительные диаграммы направленности одного ультразвукового излучателя (синяя кривая), двух излучателей по горизонтальной оси (оранжевая кривая) и двух излучателей по вертикальной оси (красная кривая) при использовании отражателей и экранов
Fig. 12. Comparative radiation patterns of one ultrasonic emitter (blue curve), two emitters along the horizontal axis (orange curve) and two emitters along the vertical axis (red curve) using reflectors and screens

Для случая двух одновременно работающих излучателей на диаграмме заметны два пика на углах ± 5 градусов, что соответствует 142,6 дБ для каждого ультразвукового излучателя. Суммарное звуковое давление уменьшилось до 143,0–143,4 дБ. Если рассматривать измерения для одного ультразвукового излучателя, то заметно, что уровень звукового давления остался прежним (144,5 дБ), при этом угол излучения диаграммы направленности снизился до ± 5 градусов.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование экранов, закрывающих зоны акустических колебаний, возникающих в противофазе, нецелесообразно. Необходимо полностью использовать излучение, формируемое в зонах с противоположными фазами колебаний.

Использование специальных устройств – рупоров, позволяющих создавать акустические колебания в одной фазе с колеблющихся поверхностей в разных фазах, вместе с отражателем позволяет увеличить звуковое давление, создаваемое дисковым излучателем. Фото стенда с двумя одновременно работающими ультразвуковыми излучателями представлено на рис. 13. Внешний диаметр фазывыравнивающего конуса составил 205 мм с углом раскрытия 90 градусов. Внешний диаметр рупора – 70 мм. Межосевое расстояние было выбрано чуть превышающим внешний диаметр рупора и составило 210 мм. При проведении измерений микрофон располагался на расстоянии один метр от точки, показанной на рис. 13.



Рис. 13. Два ультразвуковых излучателя с отражателями и рупорами
Fig. 13. Two ultrasonic emitters with reflectors and horns

На рис. 14 приведены сравнительные диаграммы направленности одного ультразвукового излучателя с отражателем и рупором (синяя кривая) и двух одновременно работающих излучателей с отражателями и рупорами (оранжевая кривая – горизонтальная ось, красная кривая – вертикальная ось).

Как видно из рис. 14, угол основного лепестка диаграммы направленности двух одновременно работающих излучателей составляет ± 5 градусов.

Суммарное звуковое давление на основном лепестке диаграммы направленности при использовании отражателей и рупоров увеличилось до 150,5–151 дБ. По обе стороны от основного лепестка диаграммы направленности находятся вторичные пики на углах $\pm 7,5$ градусов, уровень звукового давления на которых соответствует 149 дБ. Вторичные пики могут быть устранены при помощи дополнительного рупорного устройства, единого для обоих излучателей.

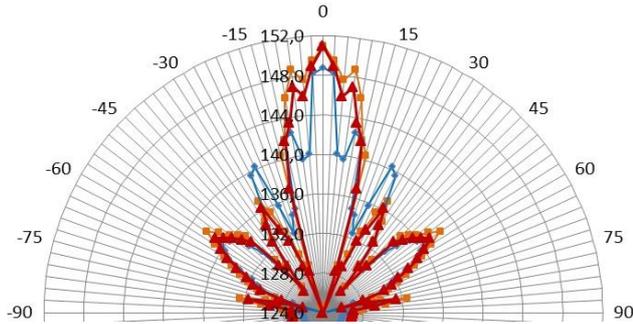


Рис. 14. Сравнительные диаграммы направленности одного ультразвукового излучателя (синяя кривая), двух излучателей по горизонтальной оси (оранжевая кривая) и двух излучателей по вертикальной оси (красная кривая) при использовании отражателей и рупоров

Fig. 14. Comparative radiation patterns of one ultrasonic emitter (blue curve), two emitters along the horizontal axis (orange curve) and two emitters along the vertical axis (red curve) using reflectors and horns

Звуковое давление одиночного излучателя оказалось ниже и не достигло 150 дБ, при этом угол направленности основного лепестка составил ± 4 градуса.

Далее был произведен расчет акустической мощности и КПД системы из двух излучателей (3), (4):

$$P_{\text{ак}} = 155 - 95 = 60 \text{ Вт}, \quad (3)$$

$$\eta = \frac{60}{155} 100\% = 39\%. \quad (4)$$

При одновременном воздействии несколькими ультразвуковыми излучателями на воздушную среду обеспечивается пересечение диаграмм направленности и формирование зоны возникновения биений на низкой частоте акустических колебаний. На рис. 15 приведена структурная схема формирования области биений для системы из двух излучателей.

Для формирования зоны с разностной частотой использовались два излучателя с отражателями и рупорами и межосевыми расстоянием 210 мм. Резонансная частота первого излучателя – 22634 Гц, второго – 22934 Гц. В результате формировалась область биений с частотой 300 Гц. На рис. 16 представлена диаграмма направленности разностной частоты.

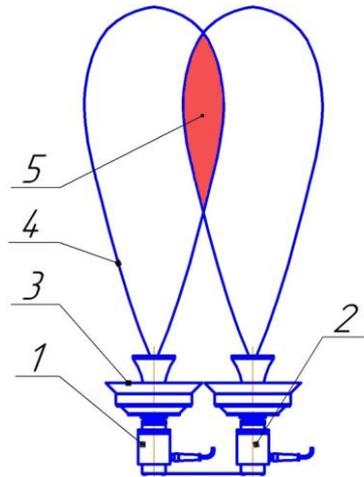


Рис. 15. Формирование зоны возникновения биений для двух излучателей: 1, 2 – ультразвуковые излучатели, 3 – система фазовыравнивающих рупоров и отражателей, 4 – область формирования ультразвуковых колебаний, 5 – зона взаимодействия ультразвуковых колебаний

Fig. 15. Formation of the beat occurrence zone for two emitters: 1, 2 – ultrasonic emitters, 3 – system of phase-equalizing horns and reflectors, 4 – area of ultrasonic vibration formation, 5 – interaction zone of ultrasonic vibrations

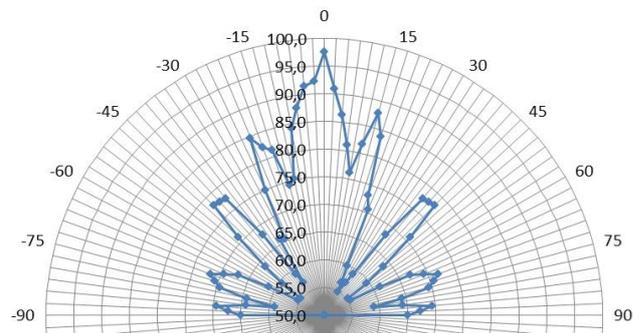


Рис. 16. Диаграмма направленности разностной частоты

Fig. 16. Directional pattern of difference frequency

Угол основного лепестка диаграммы направленности составил ± 10 градусов, при этом звуковое давление на основном лепестке диаграммы направленности достигло 97,6 дБ.

Результаты измерения погонного затухания системы из двух ультразвуковых излучателей с отражателями и рупорами показаны на рис. 17.

На расстоянии 1 м от излучающей поверхности ультразвуковых излучателей интенсивность звукового давления составила 97,6 дБ, на расстоянии 20 м – 77,1 дБ.

Для проверки эффективности созданной системы излучателей были проведены экспериментальные исследования и визуальные наблюдения процесса осаждения цементной пыли и древесного

дыма. Эффективность осаждения оценивалась по изменению относительного светопропускания луча светодиодного лазера через запыленный объем.

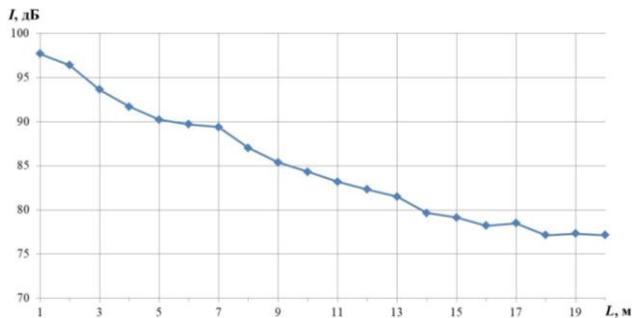


Рис. 17. Затухание звукового давления системы из двух ультразвуковых излучателей

Fig. 17. Attenuation of sound pressure of a system of two ultrasonic emitters

В ходе опытов с цементной пылью было обнаружено, что наблюдается турбулизация пылевого облака и его осаждение в зоне формирования биений за 1 секунду на расстоянии до 3 м и за 5 секунд на расстоянии до 10 м. Проведенные сравнительные испытания позволили установить, что осаждение цементной пыли при реализации предложенного способа происходит не менее чем в 300 раз быстрее, чем при естественном осаждении, и менее чем в 50 раз быстрее, чем при осуществлении воздействия одним дисковым излучателем равной площади.

Для оценки эффективности предложенного способа осаждения дыма были проведены исследования по осаждению дымов, возникающих при сжигании сосновых опилок. В ходе исследований было установлено, что время воздействия, необходимое для осаждения дыма, не превышало 10 секунд для установления дальности видимости не менее 10 м.

Обсуждение и заключение

В результате проведенного исследования были разработаны ультразвуковые дисковые излучатели, состоящие из пьезоэлектрического модернизированного преобразователя, выполненного по конструктивной схеме Ланжевена и изгибно-колеблющегося излучателя, оснащенные отражате-

лями, фазовыравнивающими конусами и рупорами. Создан экспериментальный стенд, состоящий из двух одновременно работающих ультразвуковых дисковых излучателей и измерителя звукового давления.

Проведенные экспериментальные исследования позволили показать перспективность применения двух излучателей, работающих на близких частотах. Было показано, что применение отражателей позволяет эффективно использовать энергию колебаний обратной стороны изгибно-колеблющегося диска. Суммарное звуковое давление двух ультразвуковых излучателей увеличилось на 3,1–3,5 дБ. Угол основного лепестка диаграммы направленности составил $\pm 7,5$ градусов. Использование фазовыравнивающих конусов обеспечило формирование акустических колебаний в одной фазе с колеблющимися поверхностями в разных фазах. Вместе с отражателями фазовыравнивающие конусы обеспечили увеличение звукового давления, создаваемого двумя дисковыми излучателями, на 8,5–9 дБ по сравнению с излучением дисков без конусов.

Было показано, что при одновременном воздействии двумя ультразвуковыми излучателями на воздушную среду формируется зона возникновения биений на низкой частоте акустических колебаний (300 Гц), при этом звуковое давление достигает 97,6 дБ на расстоянии 1 м и 77,1 дБ на удалении в 20 м.

Для проверки эффективности созданной системы излучателей были проведены экспериментальные исследования и визуальные наблюдения процесса осаждения цементной пыли и древесного дыма. Было установлено, что осаждение цементной пыли происходит не менее чем в 300 раз быстрее, чем при естественном осаждении, и менее чем в 50 раз быстрее, чем при осуществлении воздействия одним дисковым излучателем равной площади.

В свою очередь, для оценки эффективности предложенного способа осаждения дыма были проведены исследования по осаждению дымов, возникающих при сжигании сосновых опилок. Было установлено, что время воздействия, необходимое для осаждения дыма, не превышало 10 секунд для установления дальности видимости не менее 10 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ пожаротушения: пат. № 2067465, Российская Федерация, С1; заявл. 09.03.1992; опубл. 10.10.1996. – 6 с.
2. Способ предотвращения взрыва метаноугольно-воздушной смеси и устройство для его осуществления: пат. № 2129211, Российская Федерация, С1; заявл. 05.03.1998; опубл. 20.04.1999. – 7 с.
3. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин. – Бийск: Изд-во Алтайского государственного технического университета, 2010. – 228 с.
4. Способ осаждения дыма: пат. № 2069576, Российская Федерация, С1; заявл. 05.10.1992; опубл. 27.11.1996. – 5 с.

5. Экспериментальное исследование осаждения аэрозоля в закрытой трубе с изменяющимся сечением / Д.А. Губайдуллин, Р.Г. Зарипов, Л.А. Ткаченко, Л.Р. Шайдуллин // Теплофизика высоких температур. – 2022. – Т. 60. – № 1. – С. 146–148. DOI: 10.31857/S0040364422010057.
6. Тукмаков А.Л., Ахунов А.А. Эволюция состава и изменение характера колебаний коагулирующей газовой смеси в волновом поле акустического резонатора // Теплофизика высоких температур. – 2022. – Т. 60. – № 6. – С. 873–879. DOI: 10.31857/S0040364422050131.
7. Gallego-Juárez J.A., Rodriguez-Corral G., Gaete-Garreton L. An ultrasonic transducer for high power applications in gases // Ultrasonics. – 1978. – Vol. 16 (6). – P. 267–271. DOI: 10.1016/0041-624X(78)90053-7.
8. Harris C.M. Absorption of sound in air versus humidity and temperature // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1966. – Vol. 40. – P. 148–159. DOI: 10.1121/1.1910031.
9. Акустика: Справочник / А.П. Ефимов, А.В. Никонов, М.А. Сапожков, В.И. Шоров / под ред. М.А. Сапожкова. – М.: Радио и связь, 1989. – 336 с.
10. Ultrasonic transducer with sleeve: pat. № 6924585, United States, B2; 19.09.2003; 01.07.2004. – 16 p.
11. Ультразвуковая колебательная система для газовых сред: пат. № 2822084, Российская Федерация, С1; заявл. 22.03.2024; опубл. 01.07.2024, Бюл. № 19. – 16 с.
12. Способ измерения амплитуды колебаний излучающей поверхности ультразвуковой колебательной системы: пат. № 2271521, Российская Федерация, С1; заявл. 03.11.2004; опубл. 10.03.2006, Бюл. № 7. – 9 с.
13. Phanomchoeng G., Rajamani R., Hourdos J. Directional sound for long-distance auditory warnings from a highway construction work zone // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2010. – Vol. 59 (5). – P. – 2266–2276. DOI: 10.1109/TVT.2010.2042090.
14. Ultrasonic transducer assembly having a vibrating member and at least one reflector: pat. № 20080007142, A1; 25.06.2007; 10.01.2008. – 16 p.
15. Фурдуев В.В. Электроакустика. – М.; Л.: Гостехиздат, 1948. – 518 с.
16. Simulation of acoustic characteristics in the vector-phase field of the horn at low frequencies / G.I. Sokol, O.V. Alkhimov, T.S. Molnar, E.O. Zagrevskiy // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2023. – Vol. 15. – P. 05026-1. DOI: 10.21272/jnep.15(5).05026.
17. Rai P., Patel R. Modal analysis of horns used in rotary ultrasonic machining // NanoWorld Journal. – 2023. – Vol. 9. – P. 144–147. DOI: 10.17756/nwj.2023-s1-029.
18. Douglas Mast T., Yu Feng. Simplified expansions for radiation from a baffled circular piston // Acoustical Society of America. – 2005. – Vol. 118 (6). – P. 3457–3464. DOI: 10.1121/1.2108997.
19. Ультразвук. Принципы построения, алгоритмы и системы управления ультразвуковыми аппаратами / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, Д.В. Генне, Д.С. Абраменко, А.Р. Барсуков. – Бийск: Изд-во Алтайского государственного технического университета, 2021. – 200 с.
20. The measurements of acoustic power introduced into gas medium by the ultrasonic apparatuses with the disk-type radiators / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.S. Dorovskikh, R.N. Golykh, V.A. Nesterov // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Erlagol, 30 June – 04 July 2016. – IEEE, 2016. – P. 251–256.

Информация об авторах

Владимир Николаевич Хмелев, доктор технических наук, профессор кафедры методов и средств измерений и автоматизации, заместитель директора по науке, Бийский Технологический институт (филиал) Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27; vnh@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7089-3578>

Андрей Викторович Шалунов, доктор технических наук, заведующий кафедрой методов и средств измерений и автоматизации, Бийский Технологический институт (филиал) Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27; shalunov@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5299-9931>

Сергей Николаевич Цыганок, доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский Технологический институт (филиал) Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27; grey@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7832-3510>

Сергей Александрович Терентьев, доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский Технологический институт (филиал) Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27; sergey@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6989-9769>

Владислав Анатольевич Шакура, младший научный сотрудник отдела научно-исследовательской работы сотрудников и преподавателей, Бийский Технологический институт (филиал) Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27; shakura-main@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0003-7549-8165>

Поступила в редакцию: 06.09.2024

Поступила после рецензирования: 09.10.2024

Принята к публикации: 13.05.2025

REFERENCES

1. Ostakh S.V., Akimov M.N. *Fire extinguishing method*. Patent RF, no. 2067465, 1996. (In Russ.)
2. Mishuev A.V. *Method for preventing explosion of methane-coal-air mixture and device for its implementation*. Patent RF, no. 2129211, 1999. (In Russ.)

3. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Shalunova K.V., Barsukov R.V., Tsyganok S.N., Slivin A.N. *Ultrasonic coagulation of aerosols*. Biysk, Altai State Technical University Publ. house, 2010. 228 p. (In Russ.)
4. Akimov M.N., Zvonov V.S., Ostakh S.V. *Method of smoke precipitation*. Patent RF, no. 2069576, 1996. (In Russ.)
5. Gubaydullin D.A., Zaripov R.G., Tkachenko L.A., Shaidullin L.R. Experimental study of aerosol deposition in a closed tube with a changing cross-section. *High Temperature Thermophysics*, 2022, vol. 60, no. 1, pp. 146–148. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0040364422010057.
6. Tukmakov A.L., Akhunov A.A. Evolution of the composition and change in the nature of oscillations of a coagulating gas suspension in the wave field of an acoustic resonator. *High Temperature Thermophysics*, 2022, vol. 60, no. 6, pp. 873–879. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0040364422050131.
7. Gallego-Juárez J.A., Rodriguez-Corral G., Gaete-Garretón L. An ultrasonic transducer for high power applications in gases. *Ultrasonics*, 1978, vol. 16 (6), pp. 267–271. DOI: 10.1016/0041-624X(78)90053-7.
8. Harris C.M. Absorption of sound in air versus humidity and temperature. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1966, vol. 40, pp. 148–159. DOI: 10.1121/1.1910031.
9. Efimov A.P., Nikonov A.V., Sapozhkov M.A., Shorov V.I. *Acoustics: handbook*. Moscow, Radio and Communications Publ., 1989. 336 p. (In Russ.)
10. Goodson J.M. *Ultrasonic transducer with sleeve*. Patent US, no. 6924585, 2004.
11. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Tsyganok S.N., Terentiev S.A., Sinkin A.A. *Ultrasonic oscillatory system for gas media*. Patent RF, no. 2822084, 2024. (In Russ.)
12. Khmelev V.N., Savin I.I., Barsukov R.V., Tsyganok S.N. *Method for measuring the amplitude of oscillations of the radiating surface of an ultrasonic oscillatory system*. Patent RF, no. 2271521, 2006. (In Russ.)
13. Phanomchoeng G., Rajamani R., Hourdos J. Directional sound for long-distance auditory warnings from a highway construction work zone. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, vol. 59 (5), pp. 2266–2276. DOI: 10.1109/TVT.2010.2042090.
14. Toda M. *Ultrasonic transducer assembly having a vibrating member and at least one reflector*. Patent US, no. 20080007142, 2008.
15. Furduiev V.V. *Electroacoustics*. Moscow, Leningrad, Gostekhizdat Publ., 1948. 518 p. (In Russ.)
16. Sokol G.I., Alkhimov O.V., Molnar T.S., Zagrevskiy E.O. Simulation of acoustic characteristics in the vector-phase field of the horn at low frequencies. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2023, vol. 15, pp. 05026-1. DOI: 10.21272/jnep.15(5).05026.
17. Rai P., Patel R. Modal analysis of horns used in rotary ultrasonic machining. *NanoWorld Journal*, 2023, vol. 9, pp. 144–147. DOI: 10.17756/nwj.2023-s1-029.
18. Douglas Mast T., Yu Feng. Simplified expansions for radiation from a baffled circular piston. *Acoustical Society of America*, 2005, vol. 118 (6), pp. 3457–3464. DOI: 10.1121/1.2108997.
19. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Genne D.V., Abramenko D.S., Barsukov A.R. *Ultrasound. Principles of construction, algorithms and control systems of ultrasonic devices*. Biysk, Altai State Technical University Publ. house, 2021. 200 p. (In Russ.)
20. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Golykh R.N., Nesterov V.A. The measurements of acoustic power introduced into gas medium by the ultrasonic apparatuses with the disk-type radiators. *17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. Erlagol, June 30–July 04, 2016. pp. 251–256.

Information about the authors

Vladimir N. Khmelev, Dr. Sc., Professor, Deputy Director for Science, Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation; vnh@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7089-3578>

Andrey V. Shalunov, Dr. Sc., Head of the Department of Methods and Means of Measuring and Automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation; shalunov@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5299-9931>

Sergey N. Tsyganok, Associate Professor, Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation; grey@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7832-3510>

Sergey A. Terentiev, Associate Professor, Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation; sergey@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6989-9769>

Vladislav A. Shakura, Junior Research Fellow, Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation; shakura-main@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0003-7549-8165>

Received: 06.09.2024

Revised: 09.10.2024

Accepted: 13.05.2025