

УДК 534.29.66.084

DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4146

Влияние высокоинтенсивного ультразвукового поля на эффективность коагуляции капель тумана

Р.С. Доровских, А.Е. Пужайкина, П.П. Тертишников, В.А. Нестеров, А.В. Шалунов[✉]

Алтайский государственный технический университет, Россия, г. Бийск

✉ shalunov@bti.secna.ru

Аннотация

Актуальность исследования обусловлена острой необходимостью борьбы с туманами с целью предотвращения ограниченной видимости и формирования улучшенных метеорологических условий. Воздействие на газодисперсные системы механическими колебаниями ультразвуковой частоты можно рассматривать как наиболее эффективный способ борьбы с образованием туманов. Однако акустический способ не нашел промышленного применения для разрушения туманов в основном из-за отсутствия эффективных источников акустического воздействия. Поэтому необходимо создание излучателей более высокой мощности, обеспечивающих значительно большую дальность излучения с уровнем звукового давления не менее 140 дБ и исследование их функциональных возможностей. **Цель:** определение эффективности разрушения туманов за счет применения ультразвуковых колебаний, генерируемых разработанными ультразвуковыми излучателями; выявление наиболее перспективной конструкции ультразвукового оборудования, обеспечивающего эффективное разрушение туманов на открытой местности. **Объекты:** процесс объединения капель тумана под ультразвуковым воздействием с помощью специально разработанных ультразвуковых излучателей для газовых сред четырех типов. **Методы:** экспериментальный метод исследования процесса объединения капель тумана под воздействием ультразвуковых колебаний и их гравитационное осаждение. Для определения характеристик аэрозоля (водность и дисперсный состав) при проведении экспериментальных исследований использован измеритель ТИПАС-1, основанный на методе малоуглового рассеяния и методе спектральной прозрачности. **Результаты.** Установлена и показана эффективность ультразвукового воздействия на туманы, а также возможность его использования для разрушения туманов на открытой местности. Показано, что все разработанные дисковые ультразвуковые излучатели способны формировать уровень звукового давления в пределах 140...145 дБ при частоте воздействия $22 \pm 2,0$ кГц. Достигается сокращение времени естественного разрушения тумана в аэрозольной камере до 11,5 раз. Основываясь на полученных результатах, установлено, что необходимо использовать более мощные дисковые излучатели, поскольку они позволяют в значительной мере сокращать время разрушения туманов и увеличивать озвучиваемые одновременно объемы. Установлено, что минимальное время установления требуемой метрологической дальности видимости обеспечивается при помощи направленного излучателя со ступенчато-переменной поверхностью, формирующей плоскую волну.

Ключевые слова: Ультразвуковое воздействие, акустическое поле, коагуляция, частицы, амплитуда.

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

Для цитирования: Влияние высокоинтенсивного ультразвукового поля на эффективность коагуляции капель тумана / Р.С. Доровских, А.Е. Пужайкина, П.П. Тертишников, В.А. Нестеров, А.В. Шалунов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 11. – С. 230–243. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4146

UDC 534.29.66.084

DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4146

Effect of a high-intensity ultrasonic field on fog droplets coagulation efficiency

R.S. Dorovskikh, A.E. Puzhaikina, P.P. Tertishnikov, V.A. Nesterov, A.V. Shalunov✉

Altai State Technical University, Biysk, Russian Federation

✉ shalunov@bti.secna.ru

Abstract

Relevance. The urgent need to deal with fog for preventing limited visibility and creating improved meteorological conditions. Exposure to gas dispersed systems by mechanical vibrations of the ultrasonic frequency can be considered as the most effective way to deal with fog formation. However, the acoustic method has not found an industrial application for fog destruction mainly due to the lack of effective sources of acoustic exposure. Therefore, it is necessary to create emitters of higher power that provide a significantly greater range of radiation with a sound pressure level of at least 140 dB and study of their functionality. **Aim.** To determine the effectiveness of fog destruction through the use of ultrasonic vibrations generated by the developed ultrasonic emitters; identify the most promising design of ultrasonic equipment that ensures effective destruction of fogs in open areas. **Objects.** Combining fog droplets under high-intensity ultrasonic exposure using specially designed ultrasonic emitters for gas media of four types. **Methods.** Experimental method for studying fog droplets combination under the influence of ultrasonic vibrations and their gravitational deposition. To determine the aerosol (water content and disperse composition) characteristics, during experimental studies, the authors have used the TIPAS-1 meter based on the method of small-angle scattering and the method of spectral transparency. **Results.** The authors established and shown the effectiveness of ultrasonic effect on fogs, as well as the possibility of its use for fog destruction in an open area. All developed disc ultrasonic emitters are capable of forming a sound pressure level within 140... 145 dB at 22 ± 2.0 kHz. The time of fog natural destruction in the aerosol chamber is reduced by up to 11.5 times. The results obtained demonstrate that it is necessary to use more powerful disc emitters, since they can significantly reduce the time of fog destruction and increase the volumes voiced at the same time. The minimum time for establishing the required metrological range of visibility is provided by means of a directional emitter with a stepped-variable surface, forming a flat wave.

Keywords: Ultrasonic impact, acoustic field, coagulation, particles, amplitude.

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

For citation: Dorovskikh R.S., Puzhaikina A.E., Tertishnikov P.P., Nesterov V.A., Shalunov A.V. Effect of a high-intensity ultrasonic field on fog droplets coagulation efficiency. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 11, pp. 230–243. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4146

Введение

Туман представляет собой устойчивую среду, которая очень медленно эволюционирует при неизменных природных условиях. При таких условиях туман может рассеяться только при возрастании температуры и уменьшении содержания влаги в воздухе. Как правило, данный процесс может длиться несколько дней.

В современном мире существуют различные методы воздействия на природные туманы с целью предотвращения ограниченной видимости и улучшения метеорологических условий [1]. Как правило, используют способ, который основан на воздействии реагентов на туманы с целью дальнейшей конденсации капель жидкости тумана [2, 3]. Однако, он имеет ряд недостатков, связанных с ухудше-

нием экологической обстановки в районе, подверженном обработке реагентами, и значительными финансовыми затратами на его реализацию.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что существует острая необходимость применения новых способов для осаждения туманов.

Воздействие на газодисперсные системы механическими колебаниями ультразвуковой частоты можно рассматривать как наиболее эффективный способ борьбы с образованием туманов [4, 5]. Осаждение туманов происходит за счет сближения и коагуляции капель воды под ультразвуковым воздействием [6–10].

Акустический способ не нашел промышленного применения для разрушения туманов вследствие

ряда факторов. Одним из основных является отсутствие эффективных источников ультразвукового воздействия.

При этом существующие источники, такие как газоструйные излучатели [11], имеют ряд существенных недостатков:

- КПД таких излучателей значительно ниже 25 %;
- низкий ресурс работы (менее 100 часов) из-за износа узлов частицами, находящимися в сжатом воздухе;
- низкий уровень звукового давления, формируемого газоструйными излучателями. Мощность таких излучателей не превышает 1Вт, частота формируемых колебаний не превышает 18–20 кГц (диаметр сопла составляет порядка 1 мм).

Для того чтобы излучать колебания, уровень звукового давления которых будет превышать 130–140 дБ, возникает необходимость увеличения диаметра сопла до 5–10 мм. При таких диаметрах сопла частота колебаний не превышает 5 кГц, что делает недопустимым использование такого оборудования при наличии людей и животных в зоне воздействия.

В дополнение к этому отсутствие ультразвуковых излучателей, способных формировать мощные ультразвуковые колебания, и методологии их разработки не позволяло провести исследования для установления оптимальных режимов и условий, обеспечивающих высокоэффективное воздействие на туманы.

Описание разработанных ультразвуковых излучателей

Проведенные ранее исследования позволили разработать источники ультразвукового (УЗ) воздействия на газодисперсные среды [12, 13]. Источники УЗ воздействия представляют собой электроакустический преобразователь, состоящий из пьезоэлектрической ультразвуковой колебательной системы и излучающего элемента в виде изгибно-колеблющегося диска [14–18]. Геометрические размеры дискового излучателя зависят от его резонансной частоты, а также от направленности излучения.

Эскиз конструкции ультразвуковой пьезоэлектрической колебательной системы (УЗКС), предназначенной для воздействия на газовые среды, представлен на рис. 1.

УЗКС состоит из: излучателя в форме диска, совершающего изгибные колебания (1), трансформатора колебательной скорости (2), пьезоэлектрического преобразователя (3). Пьезопреобразователь может представлять собой продольно-колеблющуюся полуволновую конструкцию Ланжевена. Ультразвуковые колебания в газовой среде возникают за счет изгибных колебаний диска. В свою очередь диско-

вый излучатель приводится в колебательное движение при помощи центрального возбуждения пьезоэлектрической колебательной системой (2, 3). Электрическое питание дисковых излучателей обеспечивается специально разработанными электронными генераторами.

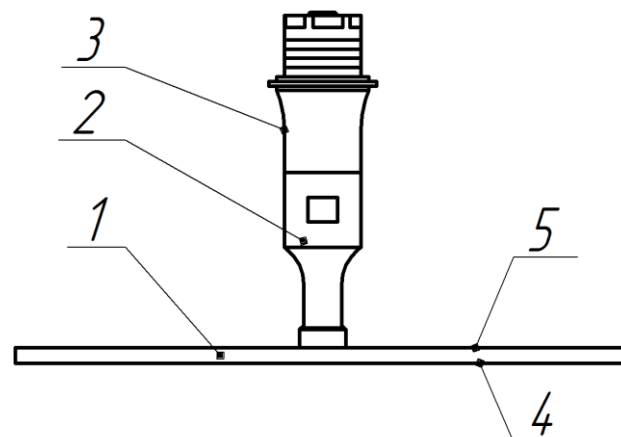


Рис. 1. Эскиз излучателя в сборе пьезоэлектрической колебательной системой: 1 – дисковый излучатель; 2 – трансформатор колебательной скорости; 3 – пьезоэлектрический преобразователь; 4 – фронтальная сторона; 5 – тыльная сторона

Fig. 1. Sketch of an emitter assembly of a piezoelectric oscillatory system: 1 – disk radiator; 2 – oscillatory velocity transformer; 3 – piezoelectric transducer; 4 – front side; 5 – rear side

С целью выявления эффективности УЗ воздействия на туманы было разработано и изготовлено четыре дисковых излучателя (излучатель с плоской фронтальной поверхностью, направленный излучатель со ступенчато-переменной поверхностью, фокусирующий излучатель со ступенчато-вогнутым профилем, фокусирующий излучатель со ступенчато-радиальным профилем излучающей поверхности). Представленные излучатели изготовлены из титанового сплава марки ВТ1-0.

Так как одним из основных факторов, влияющих на эффективность, является частота воздействия, при этом оптимальная частота колебаний обратно пропорциональна размеру капель тумана (для размеров капель тумана 3–10 мкм оптимальная частота составляет 20–25 кГц). Созданные излучатели рассчитывались для работы на средней частоте $22 \pm 2,0$ кГц в указанном диапазоне частот [19].

Далее принципы работы каждого из перечисленных типов излучателей рассмотрены более подробно. На рис. 2 представлен эскиз излучателя с плоской фронтальной поверхностью и его фото.

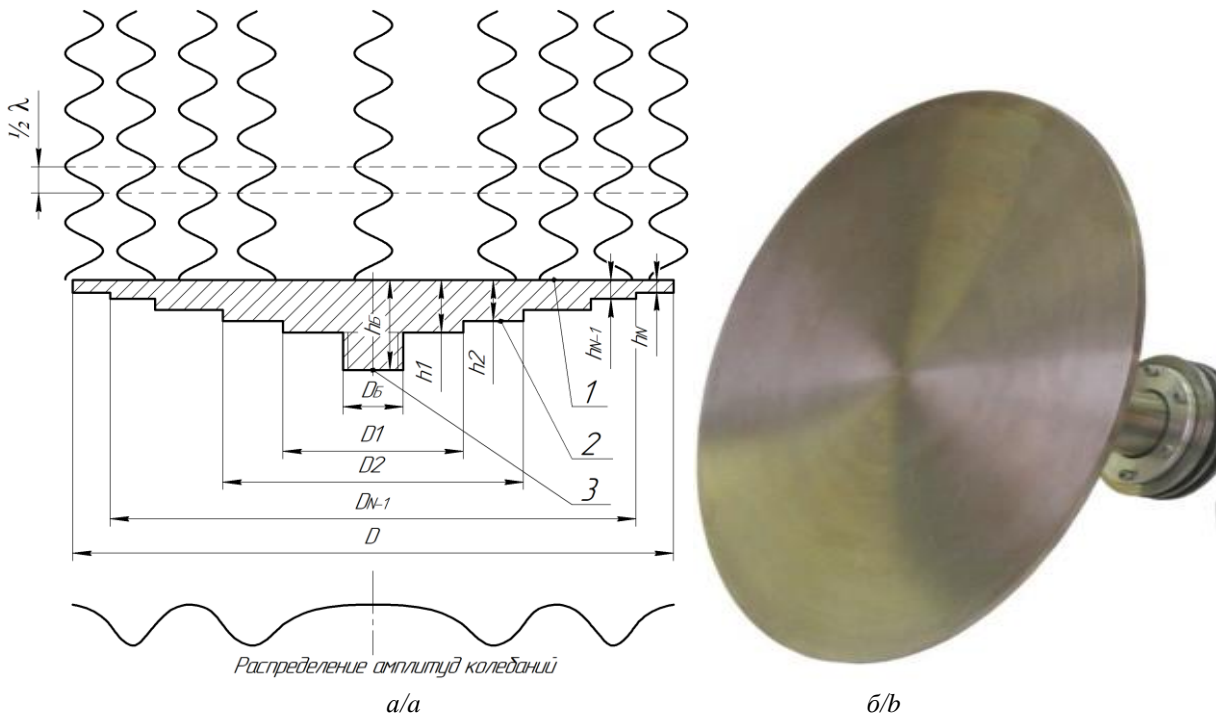


Рис. 2. Эскиз (а) и фотография (б) изгибно-колеблющегося дискового излучателя с плоской фронтальной поверхностью: 1 – фронтальная сторона; 2 – тыльная сторона; 3 – присоединительный хвостовик

Fig. 2. Sketch (a) and photograph (b) of a flexural-oscillating disk radiator with a flat front surface: 1 – front side; 2 – rear side; 3 – connecting shank

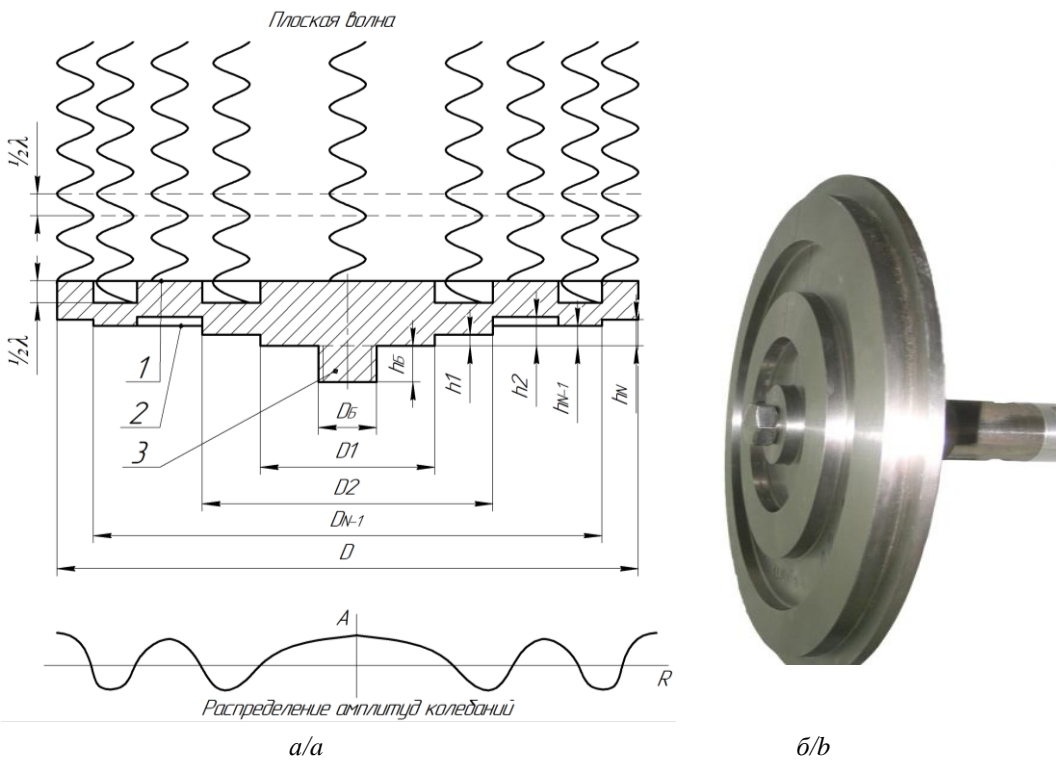


Рис. 3. Эскиз (а) и фотография (б) направленного излучателя со ступенчато-переменной поверхностью: 1 – фронтальная сторона; 2 – тыльная сторона; 3 – присоединительный хвостовик

Fig. 3. Sketch (a) and photograph (b) of a directional radiator with a step-variable surface: 1 – front side; 2 – rear side; 3 – connecting shank

Как видно из рис. 2, а, соседние кольцевые области диска формируют равноамплитудные колебания в противофазе. Из-за этого в газовой среде 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 (рис. 3).

Для обеспечения синфазности излучаемых колебаний профиль фронтальной поверхности этого типа излучателей 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 $\lambda/2$ колебаний в газовой среде. Таким образом, фаза излучения всех точек поверхности выравнивается, и формируется синфазная плоская волна.

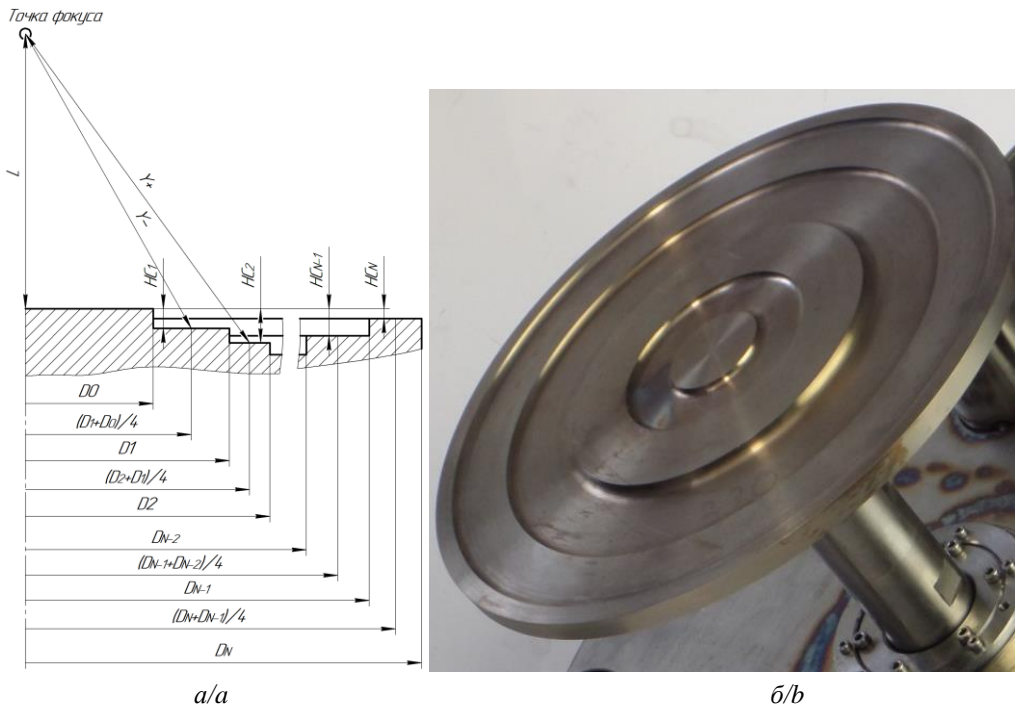


Рис. 4. Эскиз (а) и фотография (б) фокусирующего излучателя со ступенчато-вогнутым профилем излучающей поверхности

Fig 4. Sketch (a) and photograph (b) of a focusing radiator with a stepped concave profile of a radiating surface

Выравнивание амплитуд колебаний кольцевых областей всех конструкций изгибно-колеблющихся дисковых излучателей обеспечивается за счет геометрии тыльной стороны (ступенчатые переходы с высотами h_1 – h_N , рис. 3, 4).

Увеличить уровень звукового давления, формируемый в газовой среде, можно за счет фокусировки колебаний на некотором расстоянии от излучателя. На рис. 4 представлен эскиз фронтальной стороны фокусирующего излучателя со ступенчато-вогнутым профилем излучающей поверхности и фотография такого излучателя.

Для обеспечения сложения волн в требуемой области (точка фокуса) и излучения ультразвуковых колебаний профиль фронтальной стороны излучателя выполняется таким образом (высоты h_{C1} – h_{CN}), чтобы каждая точка колеблющейся поверхности излучала в воздушную среду акустическую волну, при этом «положительные» максимумы ко-

лебательных смещений должны быть расположены на расстояниях от центра излучателя согласно формуле (1):

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

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

«Отрицательные» максимумы должны быть расположены на расстояниях, рассчитанных по формуле (2):

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

где $n=1,3,5,\dots$

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

Дальнейшее увеличение уровня звукового давления в фокусе достигается за счет выполнения радиального профиля сечения кольцевых областей диска выполняется радиальным, с центром радиуса в точке фокуса. При этом радиус сферы каждой кольцевой поверхности кратен половине длины волны и должен отличаться от соседней на полови-

ну длины волны. На рис. 5 представлен эскиз фронтальной стороны фокусирующего излучателя со ступенчато-радиальным профилем излучающей поверхности и фотография такого излучателя.

На рис. 6 представлены диаграммы направленности (расстояние от излучателя до микрофона 1 м) разработанных излучателей.

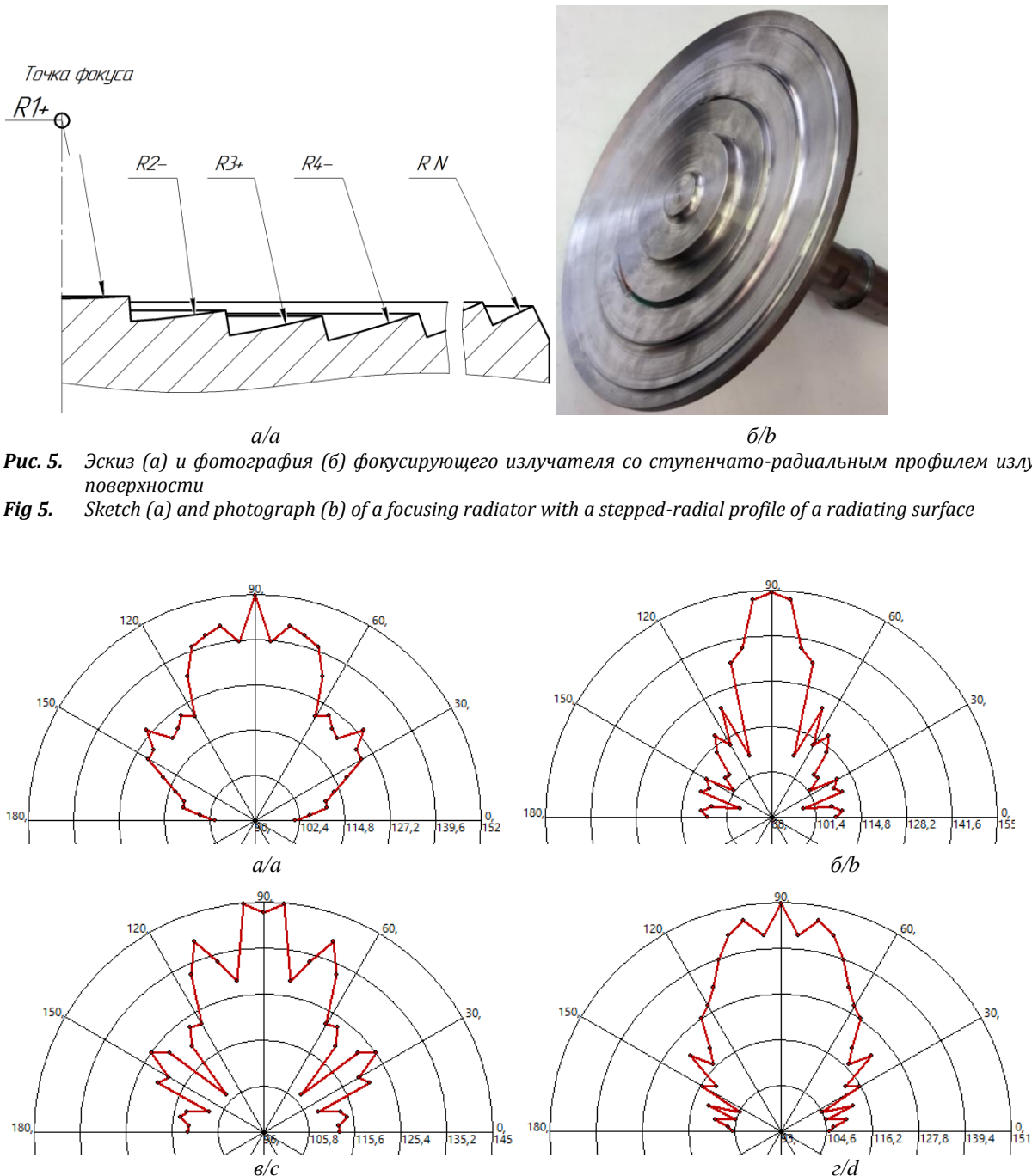


Рис. 5. Эскиз (а) и фотография (б) фокусирующего излучателя со ступенчато-радиальным профилем излучающей поверхности

Fig 5. Sketch (a) and photograph (b) of a focusing radiator with a stepped-radial profile of a radiating surface

Рис. 6. Диаграммы направленности дисковых излучателей: а – излучатель с плоской фронтальной поверхностью; б – направленный излучатель со ступенчато-переменной поверхностью; в – фокусирующий излучатель со ступенчато-вогнутым профилем; г – фокусирующий излучатель со ступенчато-радиальным профилем

Fig. 6. Radiation patterns of disc radiators: a – disk radiator with a flat front surface; б – directional emitter with a step-variable surface; в – focusing radiator with a stepped concave profile of a radiating surface; г – focusing radiator with a stepped-radial profile of a radiating surface

Из представленных диаграмм видно, что форма излучающей поверхности является определяющей для угла раскрытия основного лепестка диаграммы направленности. Поэтому в зависимости от степени рассеяния формируемого излучения эффективность рассеяния туманов ультразвуковыми излучателями будет различная.

Основные параметры разработанных излучателей приведены в таблице.

Таблица. Технические характеристики ультразвуковых излучателей

Table. Technical characteristics of ultrasonic emitters

Наименование параметра/Parameter				
Тип дискового излучателя Disc emitter type	Излучатель с плоской фронтальной поверхностью Emitter with a flat front surface	Направленный излучатель со ступенчато-переменной поверхностью Directional emitter with a step-variable surface	Фокусирующий излучатель со ступенчато-вогнутым профилем излучающей поверхности Focusing emitter with a stepped-concave radiation surface profile	Фокусирующий излучатель со ступенчато-радиальным профилем излучающей поверхности Focusing emitter with a stepped-radial profile of a radiating surface
Диаметр излучателя, мм Emitter diameter, mm	Ø320	Ø320	Ø 320	Ø 320
Потребляемая мощность, Вт Power consumption, W	250	240	245	255
Частота колебаний, кГц Oscillation frequency, kHz	22,1	22,5	22,3	21,8
Амплитуда колебаний поверхности, макс–мин Amplitude of surface oscillations, max–min	51–44	52–48	50–48	50–49
Акустическая мощность, Вт Acoustic power, W	115	110	121	125

Акустическая мощность определялась путем измерения мощности собственных потерь в излучателе в вакууме и вычитания её из полной потребляемой электрической мощности излучателя [20].

Описание экспериментальной коагуляционной камеры

Для проведения необходимых исследований с целью выявления эффективности УЗ воздействия на туманы для их разрушения была оборудована специализированная коагуляционная камера, которая позволяет зрительно наблюдать за процессом, а

также регистрировать изменения водности и дисперсного состава формируемого тумана.

Коагуляционная камера (рис. 7) выполнена в виде замкнутой комнаты с размерами, показанными на рис. 3, 4–6. На полу расположен дисковый излучатель – 1. К потолку прикреплены три УЗ распылителя – 7. Ультразвуковые распылители используются для создания жидко-капельной газозвеси с размерами капель 2...10 мкм, которая служит для имитации природного тумана. Такие распылители позволяют получать устойчивый туман длительное время. Внутри камеры установлен вентилятор –8, предназначенный для равномерного распределения полученного тумана. Глубина камеры 5,5 м, а ее объем составляет 250 м³.

Для понижения температуры воздуха до +2 °С в коагуляционной камере установлена холодильная установка (кондиционер). Для формирования равномерного распределения аэрозоля по всему объему камеры в ней установлены вентиляторы, которые создавали воздушные потоки со скоростью, не превышающей 0,2 м/с. Также охлажденный поток воздуха от кондиционера равномерно распределялся по всей камере с помощью воздуховодов. Это исключало образование высокоскоростного центрального потока из кондиционера.

Для контроля уровня звукового давления в камере был установлен микрофон шумомера Экофизика-110А (9).

Также в камере установлены сенсорные датчики температуры ТСМ 9417 (11) для контроля распределения температуры по камере. Для контроля влажности в центре камеры, на высоте в 1500 мм, располагался гигрометр. Уровень давления в камере измерялся лабораторным барометром LB-750. Для измерения скорости воздушных потоков использовался Анемометр LV 110.

Экспериментальные исследования были разделены на четыре группы:

1. Определение степени затухания уровня звукового давления в зависимости от расстояния от источника УЗ колебаний. Измерение звукового давления осуществлялось измерителем уровня звукового давления Экофизика-110А.
2. Определение дисперсного состава формируемого аэрозоля в коагуляционной камере и его контроль во время эксперимента. Исследования проводились как при наличии, так и при отсутствии ультразвукового воздействия. Дисперсный состав аэрозоля и водность определялись с помощью измерителя дисперсного состава ТИПАС-1, основанного на методе малоуглового рассеяния и методе спектральной прозрачности [21]. Для этого внутри камеры установлена оптическая система (приемник и передатчик – 12) измерителя характеристик аэрозоля ТИПАС-1.

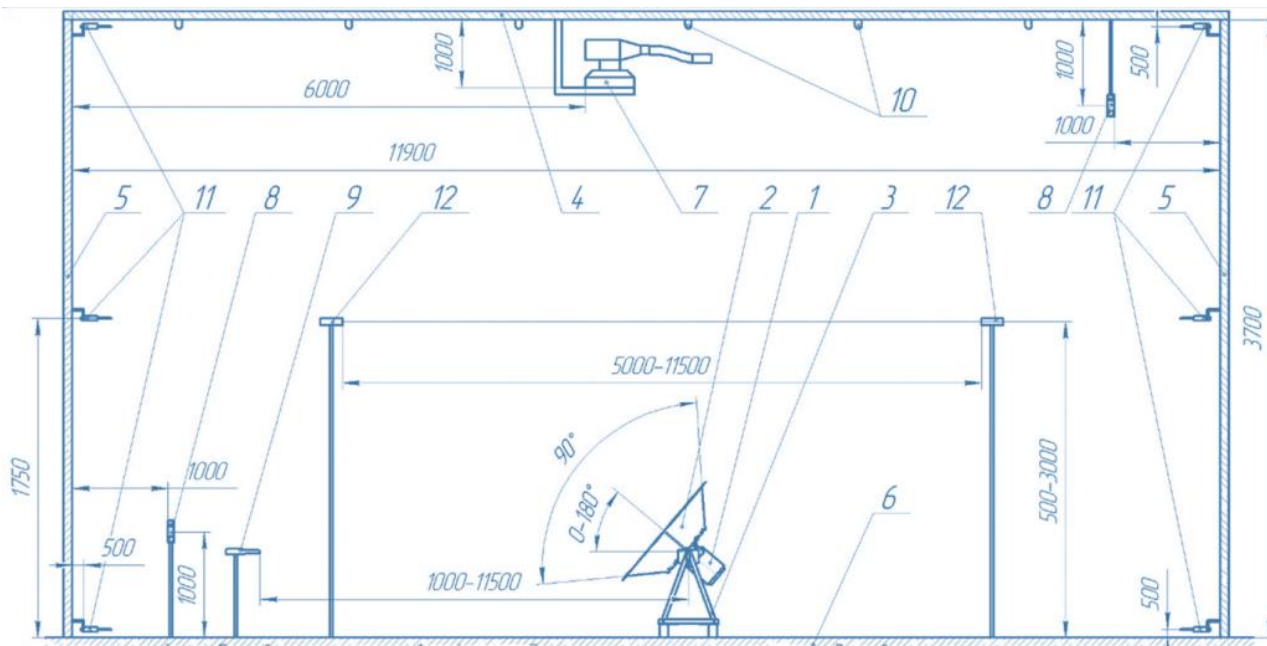


Рис. 7. Эскиз коагуляционной камеры: 1 – электроакустический преобразователь; 2 – отражатель; 3 – поворотный кронштейн; 4 – потолок; 5 – стены; 6 – пол; 7 – распылители для формирования аэрозоля; 8 – вентиляторы для распределения воздушных потоков; 9 – микрофон шумомера; 10 – подсветка; 11 – датчики температуры; 12 – приемник и передатчик измерителя характеристик аэрозоля

Fig. 7. Sketch of a coagulation chamber: 1 – electroacoustic transducer; 2 – reflector; 3 – swivel bracket; 4 – ceiling; 5 – walls; 6 – floor; 7 – sprayers for aerosol formation; 8 – fans for air flow distribution; 9 – sound level meter microphone; 10 – backlight; 11 – temperature sensors; 12 – receiver and transmitter of the aerosol characteristics meter

3. Оценка метрологической дальности видимости в коагуляционной камере как при ультразвуковом воздействии, так и без него проводилась на основании способа, описанного в [22] с помощью выражения (3):

$$L = \frac{d}{0,78w}, \text{ м,} \quad (3)$$

где w – концентрация, г/м^3 ; d – диаметр аэрозольных капель, $\mu\text{м}$.

4. Контроль потребляемой мощности УЗ генератором проводился с помощью измерителя МТ-1010.

Результаты и обсуждения

Первоначально было измерено погонное затухание ультразвуковых колебаний в воздухе. Измерения заключались в определении 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. В диапазоне расстояний от 1 до 2 м измерения проводились через каждые 200 мм, в диапазоне от 2 до 10 м – через каждый метр.

На рис. 8 представлена полученная зависимость уровня звукового давления (УЗД) до поверхности излучателя для излучателей различного типа.

Результаты измерений уровня звукового давления на расстоянии менее 1 м (в ближней зоне излучателя) не представлены вследствие малой информативности (присутствуют хаотично расположенные локальные минимумы и максимумы, отличающиеся более чем на 15 дБ). Анализ полученных данных показал, что зависимость УЗД от расстояния от дискового излучателя имеет нелинейный характер. Среднее значение ослабления УЗД для излучателя с плоской фронтальной поверхностью составляет 3 дБ/м, для направленного излучателя со ступенчато-переменной поверхностью – 1,2 дБ/м, для фокусирующего излучателя со ступенчато-вогнутым профилем излучающей поверхности – 1,3 дБ/м и для фокусирующего излучателя со ступенчато-радиальным профилем излучающей поверхности – 2,3 дБ/м.

Также видно, что наиболее оптимальной конструкцией является направленный излучатель со ступенчато-переменной поверхностью. Этот излучатель обеспечивает минимальное затухание, при расстоянии 12 м уровень звукового давления на акустической оси составляет 144 дБ, что является достаточным для ультразвуковой коагуляции воздушно-капельной дисперсии [14, 15, 23, 24].

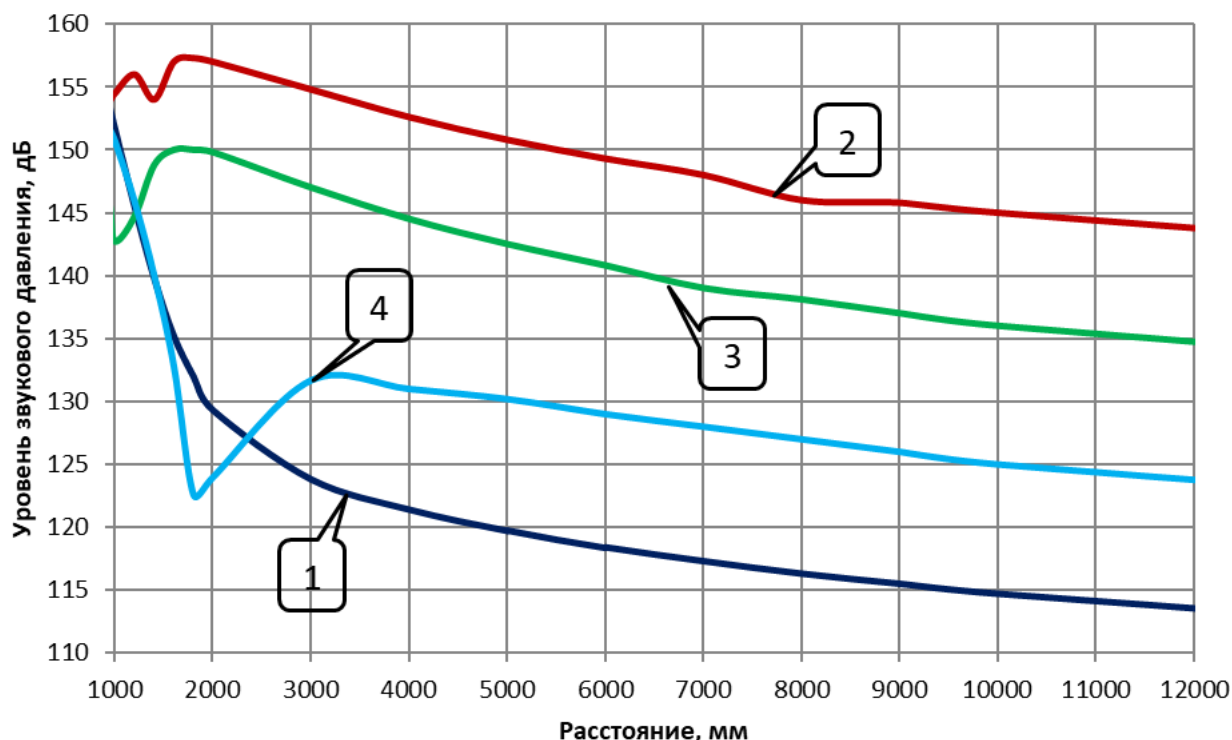


Рис. 8. Зависимость уровня звукового давления от расстояния до колеблющейся поверхности ультразвукового излучателя: 1 – излучатель с плоской фронтальной поверхностью; 2 – направленный излучатель со ступенчато-переменной поверхностью; 3 – фокусирующий излучатель со ступенчато-вогнутым профилем; 4 – фокусирующий излучатель со ступенчато-радиальным профилем

Fig. 8. Dependence of the sound pressure level on the distance to the oscillating surface of the ultrasonic radiator: 1 – disk radiator with a flat front surface; 2 – directional emitter with a step-variable surface; 3 – focusing radiator with a stepped concave profile of a radiating surface; 4 – focusing radiator with a stepped-radial profile of a radiating surface

На следующем этапе исследований были проведены измерения с помощью измерителя характеристик аэрозоля ТИПАС-1 для определения дисперсного состава формируемого аэрозоля (тумана) в процессе его осаждения, как при ультразвуковом воздействии, так и без него. Для получения достоверных данных обеспечивались постоянные условия проведения экспериментов: высота тумана 3 м; влажность 99 %; средняя температура в камере 3,5 °С; скорость движения газозвеси 0,1 м/с; атмосферное давление 748 мм рт. ст.

Перед началом эксперимента камера полностью заполнялась воздушно-капельной дисперсией (имитатором тумана) до достижения начальной метеорологической дальности видимости (МДВ) не более 20 м.

Продолжительность измерений зависела от метеорологической дальности видимости. Таким образом, дисперсный состав определялся до момента, пока метеорологическая дальность видимости не становилась менее 100 м. На рис. 9 представлены зависимости изменения среднего объемно-поверхностного диаметра капель тумана от времени.

Как можно видеть, озвучивание газодисперсной среды приводит к возрастанию диаметра капель.

Эффективность объединения частиц тем выше, чем выше уровень звукового давления обеспечивает излучатель и чем ниже уровень погонного затухания. При проведении контрольного эксперимента с отсутствующим акустическим воздействием установлено, что за предельное время (36 минут) дальность видимости увеличивается в незначительной степени и только вследствие снижения концентрации частиц из-за их осаждения.

Далее определялась степень эффективности УЗ воздействия на туман. В качестве критерия эффективности разрушения тумана (эффективность коагуляции) использовалась МДВ.

На первом этапе исследований с помощью распылителей, установленных вблизи потолка, коагуляционная камера наполнялась аэрозолем до тех пор, пока МДВ не достигнет 20 м.

На следующем этапе проводилось озвучивание аэрозоля до тех пор, пока МДВ не достигнет 100 м. Таким образом определялось время разрушения тумана, т. е. время, за которое МДВ возрастает с 20 до 100 м. На рис. 10 представлены зависимости метеорологической дальности видимости от времени акустического воздействия. Графики приведены для четырех типов излучателей.

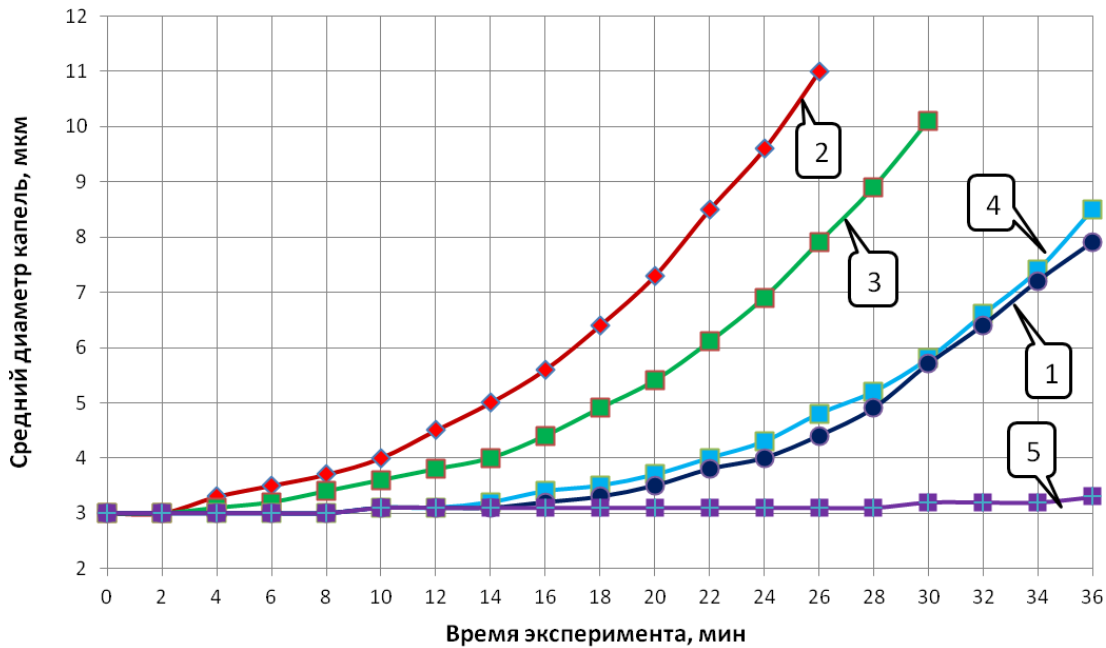


Рис. 9. Зависимость размера капель тумана от времени воздействия: 1 – излучатель с плоской фронтальной поверхностью; 2 – направленный излучатель со ступенчато-переменной поверхностью; 3 – фокусирующий излучатель со ступенчато-вогнутым профилем излучающей поверхности; 4 – фокусирующий излучатель со ступенчато-радиальным профилем излучающей поверхности; 5 – без акустического воздействия

Fig. 9. Dependence of fog droplets size on exposure time: 1 – disk radiator with a flat front surface; 2 – directional emitter with a step-variable surface; 3 – focusing radiator with a stepped concave profile of a radiating surface; 4 – focusing radiator with a stepped-radial profile of a radiating surface; 5 – without acoustic influence

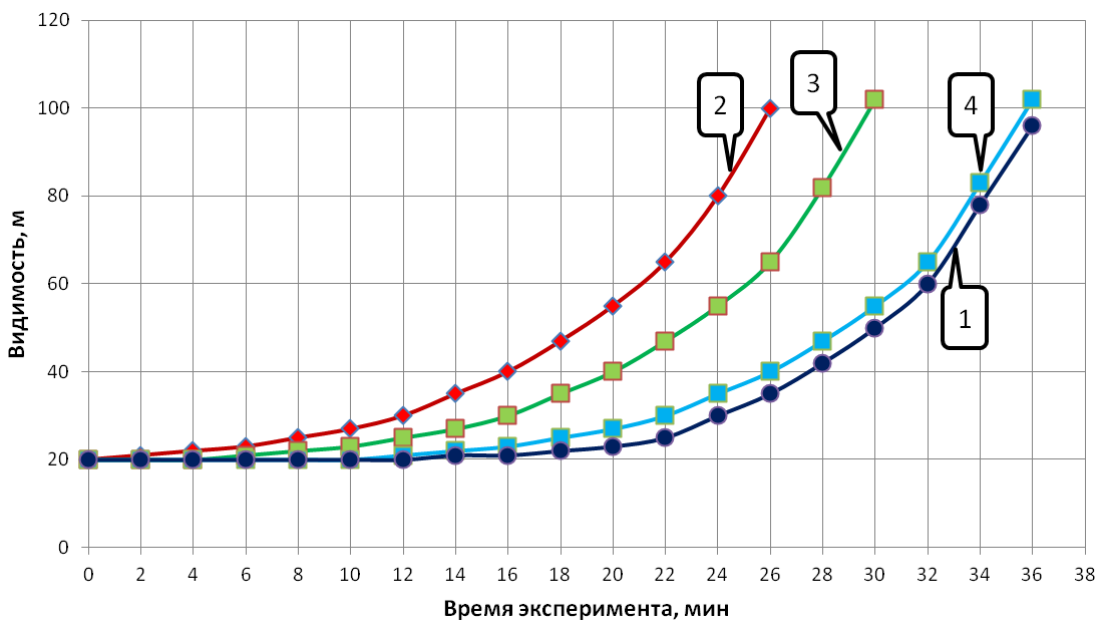


Рис. 10. Зависимости метеорологической дальности видимости от времени ультразвукового воздействия при использовании различных типов излучателей: 1 – излучатель с плоской фронтальной поверхностью; 2 – направленный излучатель со ступенчато-переменной поверхностью; 3 – фокусирующий излучатель со ступенчато-вогнутым профилем излучающей поверхности; 4 – фокусирующий излучатель со ступенчато-радиальным профилем излучающей поверхности

Fig. 10. Dependences of the meteorological range of visibility on ultrasonic exposure time when using different types of radiators: 1 – disk radiator with a flat front surface; 2 – directional emitter with a step-variable surface; 3 – focusing radiator with a stepped concave profile of a radiating surface; 4 – focusing radiator with a stepped-radial profile of a radiating surface

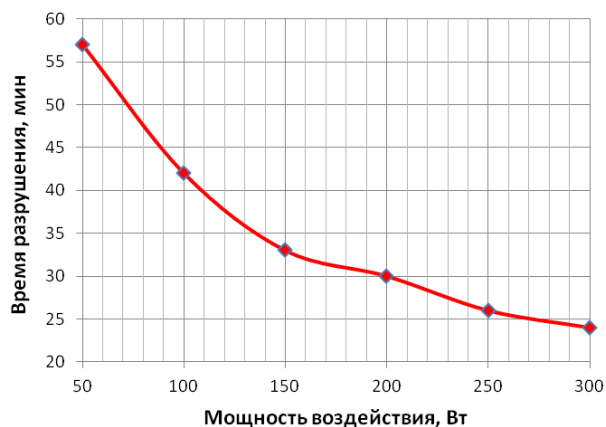


Рис. 11. Зависимость времени разрушения тумана в коагуляционной камере от мощности акустического воздействия

Fig. 11. Dependence of fog destruction time in a coagulation chamber on the acoustic effect power

Анализ зависимостей показал, что направленный излучатель со ступенчато-переменной поверхностью обеспечивает самую высокую эффективность коагуляции и, соответственно, минимальное время разрушения тумана.

Таким образом, дальнейшие исследования направлены на выявление времени разрушения тумана от мощности ультразвукового воздействия. При этом использовалась наиболее оптимальная конструкция излучателя, выявленная на предыдущем этапе, – направленный излучатель со ступенчато-переменной поверхностью.

Мощность генератора изменялась от 50 до 300 Вт (определялась с помощью измерителя мощности). Нижняя граница в 50 Вт объясняется тем, что на более низкой мощности эффект от акустического воздействия отсутствует. Максимальная потребляемая мощность составляет 300 Вт. Верхнюю границу мощности в процессе проведения исследований подняли с 250 Вт (нормальная настройка излучателя) до 300 Вт, чтобы определить предельные возможности излучателя. При этом преобразователь излучателя начинал чрезмерно нагреваться, что может сказаться на ресурсе излучателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 464 с.
2. Смирнов В.В. Перестройка микроструктуры туманов под действием гигроскопических частиц // Труды ИЭМ. – 1980. – Т. 25. – № 93. – С. 3–9.
3. Методы и средства рассеяния теплых туманов и слоистообразной облачности в интересах гидрометеорологического обеспечения деятельности Военно-морского флота России / А.П. Доронин, В.М. Петроченко, А.А. Свиначук, Н.А. Козлова, С.А. Шмалько // Записки по гидрографии. Материалы научной конференции «Перспективы развития гидрографической службы военно-морского флота до 2030 года». – СПб, 2017. – № 301. – С. 68–74.
4. Разработка и исследование нового способа газоочистки от частиц размером менее 2,5 мкм / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.С. Боченков, В.А. Нестеров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 10. – С. 127–139.
5. Ультразвуковая коагуляция в скрубберах вентури: особенности реализации и эффективность применения / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.Н. Цыганок, В.А. Нестеров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 5. – С. 128–139.

Коагуляционная камера заполнялась аэрозолем до тех пор, пока МДВ не составит 20 м. Зависимость времени разрушения тумана (время, за которое МДВ изменяется от 20 до 100 м) от мощности УЗ-воздействия показана на рис. 11.

Согласно полученным характеристикам видно, что более мощное ультразвуковое оборудование позволяет значительно быстрее разрушать туман.

Повышение мощности с 250 до 300 Вт привело к уменьшению времени озвучивания с 26 до 24 мин. (на 7 %).

Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований получены следующие результаты:

1. Определена эффективность коагуляции аэрозоля при использовании ультразвуковых излучателей, формируемых ультразвуковое поле с высоким уровнем звукового давления, при этом показана возможность использования разработанных излучателей для разрушения туманов на открытой местности.
2. Показано, что все разработанные дисковые ультразвуковые излучатели способны формировать уровень звукового давления в диапазоне от 140 до 145 дБ.
3. За счет воздействия ультразвуковыми колебаниями достигается сокращение времени осаждения аэрозоля в 11,5 раз по сравнению со временем осаждения тумана без ультразвукового воздействия.
4. Анализ результатов показывает, что существует необходимость использования более мощных ультразвуковых дисковых излучателей, поскольку они позволяют в значительной мере сокращать время разрушения туманов и увеличивать озвучиваемые одновременно объемы.
5. Выявлено, что минимальное время установления требуемой метеорологической дальности видимости обеспечивается при помощи направленного излучателя со ступенчато-переменной поверхностью, формирующей плоскую волну.

6. Ultrasonic agglomeration and preconditioning of aerosol particles for environmental and other applications / E. Riera, I. González-Gómez, G. Rodríguez, J.A. Gallego-Juárez // *Power Ultrasonics*. 2nd ed. – 2023. – V. 38. – P. 861–886.
7. Nesterov V.A., Khmelev V.N., Shalunov A.V. Improving the separation efficient of particles smaller than 2.5 micrometer by combining ultrasonic agglomeration and swirling flow techniques // *PLoS ONE* 15(9): e0239593. September 24, 2020. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239593> (дата обращения 24.03.2023).
8. Various wastewaters treatment by sono-electrocoagulation process: a comprehensive review of operational parameters and future outlook / M. Moradi, Y. Vasseghian, H. Arabzade, A. Mousavi Khaneghah // *Chemosphere*. – 2021. – 128314. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128314> (дата обращения 24.03.2023).
9. Posavcic H., Halkijevic I., Vouk D. Oily wastewater treatment by hybrid ultrasound and electrocoagulation batch process // *Desalin. Water Treat.* – 2021. – P. 127–134. URL: <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27665> (дата обращения 24.03.2023).
10. Posavcic H., Vouk D., Halkijevic I. The effects of ultrasound and electrocoagulation on removal of manganese from wastewater // *Engineering Review*. – 2022. – V. 42. – № 2. – P. 50–58.
11. Mitin A.G., Efimov Y.G. Gas-jet ultrasonic generators for NDT // *Nondestructive Testing and Evaluation*. – 2000. – V. 17. – № 6. – P. 341–350. URL: <https://doi.org/10.1080/10589750108953119> (дата обращения 24.03.2023).
12. Khmelev V.N., Nesterov V.A., Shalunov A.V. Ultrasonic transducer with increased exposure power and frequency up to 100 kHz // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. – 2021. – V. 5. – № 68. – P. 1773–1782.
13. The disk radiator for the influence on the gas media / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh, V.A. Nesterov // *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*. – 2018. – V. 15. – № 2. – P. 122–129.
14. Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing / J. Gallego-Juarez, G. Rodriguez, V. Acosta, E. Riera // *Ultrasonic Sonochemistry*. – 2010. – V. 17. – № 6. – P. 953–964. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2009.11.006> (дата обращения 24.03.2023).
15. Acoustic agglomeration of submicron particles in diesel exhausts: first results of the influence of humidity at two acoustic frequencies / E. Riera-Franco de Sarabia, J.A. Gallego-Juárez, V.M. Acosta-Aparicio, J.J. Rodríguez-Maroto, J.L. Dorronsoro, D. Sanz-Rivera, F.J. Gómez-Moreno, M. Martín-Espigares // *J. Aerosol Sci.* – 2000. – V. 31. – P. 827–828. URL: [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(00\)90837-1](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(00)90837-1) (дата обращения 24.03.2023).
16. A review of N-functionalized solid adsorbents for postcombustion CO₂ capture / X.Y. Hu, L.B. Liu, X. Luo, G.K. Xiao, E. Shiko, R. Zhang, X.F. Fan, Y.F. Zhou, Y. Liu, Z.G. Zeng, C.E. Li // *Appl. Energy*. – 2020. – V. 260. – 114244.
17. Improving the removal of inhalable particles by combining flue gas condensation and acoustic agglomeration / K. Li, E. Wang, Q.I. Wang, N. Husnain, D. Li, S. Fareed // *J. Cleaner Prod.* – 2020. – 121270. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121270> (дата обращения 24.03.2023).
18. Experimental and computational study on the separation performance of an electrostatic precipitator with curved transvers collecting plates / Y. Shen, Y. Tong, Y. Zhao, L. Zhang, S. Bu, W. Xu, C. Pan, H. Ding, Z. Yang // *Adv. Powder Technol.* – 2021. – V. 32. – № 6. – P. 1858–1868.
19. Frequency dependence of acoustic agglomeration rate of a glycol fog / J. Magill, Ph. Caperan, J. Somers, K. Richter, G. Rodriguez, E. Riera, J.A. Gallego-Juarez // *J. Aerosol Sci.* – 1991. – V. 22. – P. 27–30.
20. Измерение акустической мощности, вводимой в газовую среду ультразвуковыми аппаратами с излучателями дискового типа / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.С. Доровских, Р.Н. Голых, В.А. Нестеров // *Датчики и системы*. – 2016. – Т. 203. – № 5. С. 3–11.
21. Ахмадеев И.Р. Модифицированный метод малоуглового рассеяния для измерения дисперсности аэрозольных частиц // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы V Всероссийской научной конференции*. – Томск, 2006. – С. 55–56.
22. Способ определения основных параметров структуры воздушно-капельных образований облаков и туманов: пат. Рос. Федерация № 2758843, заявл. 10.11.2020, опубл. 02.11.2021, Бюл. № 31. – 15 с.
23. Multifield modeling of particle dynamics in an electrostatic precipitator equipped with pointed-end arista on corona / Y. Tong, L. Zhang, S. Bu, F. Chen, W. Xu, R. Wu, L. Liu, Y. Xu // *Powder Technol.* – 2020. – V 362 – P. 680–689.
24. Turbulent coagulation of micron and submicron particles in swirling flow / Z. Yu, S. Bu, L. Zhang, R. Wu, F. Chen, W. Xu, L. Liu, Y. Zhao, Y. Xu // *Sep. Purif. Technol.* – 2020. – 117098. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117098> (дата обращения 24.03.2023).

REFERENCES

1. Kachurin L.G. *Fizicheskie osnovy vozdeystviya na atmosferye protsessy* [Physical basis of influence on atmospheric processes]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990. 464 p.
2. Smirnov V.V. Perestroyka mikrostruktury tumanov pod deystviyem gigroskopicheskikh chastits [Restructuring of fog microstructure under the action of hygroscopic particles]. *Trudy IEM*, 1980, vol. 25, no. 93, pp. 3–9.
3. Doronin A.P., Petrochenko V.M., Svinarchuk A.A., Kozlova N.A., Shmalko S.A. Metody i sredstva rasseyaniya teplykh tumanov i sloistoobraznoy oblachnosti v interesakh gidrometeorologicheskogo obespecheniya deyatelnosti Voyenno-morskogo flota Rossii [Methods and means of dispersing warm fogs and stratus clouds in the interests of hydrometeorological support for the activities of the Russian Navy]. *Zapiski po gidrografii. Materialy nauchnoy konferentsii. Perspektivy razvitiya gidrograficheskoy sluzhby voenno-morskogo flota do 2030 goda* [Notes on hydrography. Proc. of the scientific conference. Prospects for the development of the hydrographic service of the navy until 2030]. St Petersburg, 2017. No. 301, pp. 68–74.
4. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Bochenkov A.S., Nesterov V.A. Development and research of a new method of gas cleaning from particles smaller than 2.5 μm. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 10, pp. 127–139. In Rus.
5. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Tsyganok S.N., Nesterov V.A. Ultrasonic coagulation in venturi scrubbers: features of implementation and efficiency of application. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 5, pp. 128–139. In Rus.

6. Riera E., González-Gómez I., Rodríguez G., Gallego-Juárez J.A. Ultrasonic agglomeration and preconditioning of aerosol particles for environmental and other applications. *Power Ultrasonics*, 2023, vol. 38, pp. 861–886.
7. Nesterov V.A., Khmelev V.N., Shalunov A.V. Improving the separation efficient of particles smaller than 2.5 micrometer by combining ultrasonic agglomeration and swirling flow techniques. *PLoS ONE*, September 24, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239593> (accessed 24 March 2023).
8. Moradi M., Vasseghian Y., Arabzade H., Mousavi Khaneghah A. Various wastewaters treatment by sono-electrocoagulation process: a comprehensive review of operational parameters and future outlook. *Chemosphere*, 2021, 128314. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128314> (accessed 24 March 2023).
9. Posavcic H., Halkijevic I., Vouk D. Oily wastewater treatment by hybrid ultrasound and electrocoagulation batch process. *Desalin. Water Treat.*, 2021, pp. 127–134. Available at: <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27665> (accessed 24 March 2023).
10. Posavcic H., Vouk D., Halkijevic I. The effects of ultrasound and electrocoagulation on removal of manganese from wastewater. *Engineering Review*, 2022, vol. 42, no. 2, pp. 50–58.
11. Mitin A.G., Efimov Y.G. Gas-jet ultrasonic generators for NDT. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2000, vol. 17, no. 6, pp. 341–350. Available at: <https://doi.org/10.1080/10589750108953119> (accessed 24 March 2023).
12. Khmelev V.N., Nesterov V.A., Shalunov A.V. Ultrasonic Transducer with Increased Exposure Power and Frequency up to 100 kHz. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2021, vol. 5, no. 68, pp. 1773–1782.
13. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Nesterov V.A., The disk radiator for the influence on the gas media. *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*, 2018, vol. 15, no. 2, pp. 122–129.
14. Gallego-Juarez J., Rodriguez G., Acosta V., Riera E. Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing. *Ultrasonic Sonochemistry*, 2010, vol. 17, no. 6, pp. 953–964. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2009.11.006> (accessed 24 March 2023).
15. Riera-Franco de Sarabia E., Gallego-Juárez J.A., Acosta-Aparicio V.M., Rodríguez-Maroto J.J., Dorronsoro J.L., Sanz-Rivera D., Gómez-Moreno F.J., Martín-Espigares M. Acoustic agglomeration of submicron particles in diesel exhausts: first results of the influence of humidity at two acoustic frequencies. *J. Aerosol Sci.*, 2000, vol. 31, pp. 827–828. Available at: [https://doi.org/10.1016/s0021-8502\(00\)90837-1](https://doi.org/10.1016/s0021-8502(00)90837-1) (accessed 24 March 2023).
16. Hu X.Y., Liu L.B., Luo X., Xiao G.K., Shiko E., Zhang R., Fan X.F., Zhou Y.F., Liu Y., Zeng Z.G., Li C.E. A review of N-functionalized solid adsorbents for postcombustion CO₂ capture. *Appl. Energy*, 2020, vol. 260, 114244.
17. Li K., Wang E., Wang Q.I., Husnain N., Li D., Fareed S. Improving the removal of inhalable particles by combining flue gas condensation and acoustic agglomeration. *J. Cleaner Prod.*, 2020, 121270. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121270> (accessed 24 March 2023).
18. Shen Y., Tong Y., Zhao Y., Zhang L., Bu S., Xu W., Pan C., Ding H., Yang Z. Experimental and computational study on the separation performance of an electrostatic precipitator with curved transvers collecting plates. *Adv. Powder Technol.*, 2021, vol. 32, no. 6, pp. 1858–1868.
19. Magill J., Caperan Ph., Somers J., Richter K., Rodriguez G., Riera E., Gallego-Juárez J.A. Frequency dependence of acoustic agglomeration rate of a glycol fog. *J. Aerosol Sci.*, 1991, vol. 22, pp. 27–30.
20. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Golykh R.N., Nesterov V.A. Measurement of acoustic power introduced into the gas medium ultrasonic devices with disk radiators. *Sensors and systems*, 2016, vol. 203, no. 5, pp. 3–11. In Rus.
21. Akhmadeev I.R. Modifitsirovanny metod malouglovogo rasseyaniya dlya izmereniya dispersnosti aerolnykh chastits [Modified method of small-angle scattering for measuring the dispersion of aerosol particles]. *Fundamentalnye i prikladnye problemy sovremennoy mekhaniki. Materialy V Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Fundamental and applied problems of modern mechanics. Proc. of the V All-Russian Scientific Conference]. Tomsk, 2006. pp. 55–56.
22. Levin E.V., Okunev A.Yu. *Sposob opredeleniya osnovnykh struktur vozdušno-kapelnykh obrazovaniy oblakov i tumanov* [Method of determining the main parameters of the structure of airborne formations of clouds and fogs]. Patent. RF, no. 2758843, 2021.
23. Tong Y., Zhang L., Bu S., Chen F., Xu W., Wu R., Liu L., Xu Y. Multifield modeling of particle dynamics in an electrostatic precipitator equipped with pointed-end arista on corona. *Powder Technol.*, 2020, vol. 362, pp. 680–689.
24. Yu Z., Bu S., Zhang L., Wu R., Chen F., Xu W., Liu L., Zhao Y., Xu Y. Turbulent coagulation of micron and submicron particles in swirling flow. *Sep. Purif. Technol.*, 2020, 117098. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117098> (accessed 24 March 2023).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Роман Сергеевич Доровских, научный сотрудник Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27; dorovskikh_roman@bti.secna.ru
Анна Евгеньевна Пужайкина, младший научный сотрудник Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27; zyatkova.ae@bti.secna.ru

Павел Павлович Тertiшников, студент кафедры методов и средств измерений и автоматизации Бийского технологического института Алтайского государственного

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Roman S. Dorovskikh, Researcher, Altai State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation; dorovskikh_roman@bti.secna.ru

Anna E. Puzhaikina, Junior Researcher, Altai State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation; zyatkova.ae@bti.secna.ru

Pavel P. Tertishnikov, Student, Altai State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation; tertishnikov

технического университета, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27; tertishnikov.pp@bti.secna.ru

Виктор Александрович Нестеров, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27; nva@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6140-5699>

Андрей Викторович Шалунов, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27; shalunov@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5299-9931>; шифр специальности ВАК: 2.6.13

pp@bti.secna.ru

Viktor A. Nesterov, Cand. Sc., Leading Researcher, Altai State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation; nva@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6140-5699>

Andrey V. Shalunov, Dr. Sc., Leading Researcher, Altai State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation; shalunov@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5299-9931>

Поступила в редакцию: 29.03.2023

Поступила после рецензирования: 03.04.2023

Принята к публикации: 15.06.2023

Received: 29.03.2023

Revised: 03.04.2023

Accepted: 15.06.2023