

УДК 534.29.66.084:534-13  
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4395  
Шифр специальности ВАК: 2.6.13

## Повышение эффективности коагуляции в резонансных промежутках за счет формирования акустических течений

В.Н. Хмелев, В.А. Нестеров<sup>✉</sup>, А.В. Шалунов, С.А. Терентьев

Алтайский государственный технический университет, Россия, г. Бийск

<sup>✉</sup>nva@bti.secna.ru

**Аннотация.** *Актуальность* исследования обусловлена острой необходимостью ликвидации загрязнений окружающей среды промышленными выбросами различных твердых частиц. При этом максимальное внимание уделяется очистке отходящих газов от частиц размером 2,5 мкм и менее. Одним из наиболее перспективных способов повышения эффективности существующего газоочистного оборудования при улавливании таких частиц является их коагуляция за счет воздействия на газовый поток высокоинтенсивными акустическими колебаниями ультразвуковой частоты. Однако при низкой концентрации, даже при максимально допустимом уровне звукового давления, эффективность коагуляции частиц размером менее 2,5 мкм недостаточна для увеличения степени улавливания газоочистного оборудования. Поэтому существует настоятельная необходимость поиска новых путей дальнейшего повышения эффективности ультразвуковой коагуляции частиц размером менее 2,5 мкм. **Цель:** определение условий формирования вихревых потоков в ультразвуковых полях с максимальным по уровню звукового давления ультразвуковым воздействием; проведение сравнительных исследований процесса коагуляции частиц с размером 2,5 мкм при наличии вихревых потоков и без них. Это позволит определить реальные значения повышения эффективности УЗ-коагуляции при турбулизации газодисперсного потока акустическими течениями в сравнении с коагуляцией в равномерном УЗ-поле и без него. **Объекты:** процесс коагуляции частиц под воздействием однородного и неоднородного ультразвуковых полей. **Методы:** Компьютерное моделирование формируемого ультразвукового поля методом конечных элементов с помощью гармонического акустического анализа. Моделирование и разработка дисковых излучателей методом конечных элементов в модальном анализе. Рассматривается экспериментальный метод исследования процесса объединения частиц под воздействием ультразвуковых колебаний. Для определения характеристик аэрозоля при проведении экспериментальных исследований использован измеритель ТИПАС-1, основанный на методе малоуглового рассеяния и методе спектральной прозрачности. **Результаты.** Представлены результаты исследований процесса коагуляции частиц размером 2,5 мкм и менее в ультразвуковом поле, формируемом в резонансных промежутках колеблющимися дисковыми излучателями. Предложен новый путь повышения эффективности коагуляции в резонансных промежутках за счет применения ультразвуковых дисковых излучателей, способных формировать в резонансных промежутках чередующиеся зоны максимальных и минимальных по амплитуде колебаний. Создание таких зон обеспечило формирование акустических течений вихревого типа, способных перемещать частицы в пределах узловых областей стоячей волны и между ними. Вовлечение в формируемые течения мелких частиц позволило повысить вероятность их столкновения. Установлено, что более эффективная УЗ-коагуляция обеспечивает повышение степени инерционного улавливания для частиц размером 2,5 мкм на 6 % – от 89 до 95 %, для частиц размером 1,5 мкм на 7 % – от 85 до 92 %, а для частиц размером 0,5 мкм на 9 % – от 76 до 85 %.

**Ключевые слова:** ультразвук, газоочистка, коагуляция, агломерация, акустическое поле, фракционная эффективность, резонансный промежуток, вихревой поток

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №19-19-00121, <https://rscf.ru/project/19-19-00121/>.

**Для цитирования:** Повышение эффективности коагуляции в резонансных промежутках за счет формирования акустических течений / В.Н. Хмелев, В.А. Нестеров, А.В. Шалунов, С.А. Терентьев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 112–124. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4395

---

UDC 534.29.66.084:534-13  
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4395

## Increasing the efficiency of coagulation in resonant gaps due to acoustic flow formation

V.N. Khmelev, V.A. Nesterov<sup>✉</sup>, A.V. Shalunov, S.A. Terentyev

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

<sup>✉</sup>nva@bti.secna.ru

**Abstract. Relevance.** The urgent need to eliminate environmental pollution from industrial emissions of various solid particles. At the same time, maximum attention is paid to cleaning exhaust gases from particles of 2.5 microns in size or less. One of the most promising ways to increase the efficiency of existing gas purification equipment in capturing such particles is their coagulation by exposing the gas flow to high-intensity acoustic vibrations of ultrasonic frequency. However, at low concentrations, even at the maximum permissible sound pressure level, the coagulation efficiency of particles smaller than 2.5 microns is insufficient to increase the recovery rate of gas cleaning equipment. Therefore, there is an urgent need to find new ways to further improve the efficiency of ultrasonic coagulation of particles smaller than 2.5  $\mu\text{m}$ . **Aim.** To determine the conditions for the formation of vortex flows in ultrasonic fields with the maximum ultrasonic influence in terms of sound pressure level. Conducting comparative studies of the coagulation of particles with a size of 2.5 microns with and without vortex flows. This will make it possible to determine the real values of increasing the efficiency of ultrasonic coagulation during turbulization of a gas-dispersed flow by acoustic flows in comparison with coagulation in a uniform ultrasonic field and without it. **Objects.** Coagulation of particles under the influence of homogeneous and inhomogeneous ultrasonic fields. **Methods.** Computer modeling of the formed ultrasonic field by the finite element method using harmonic acoustic analysis. The paper considers the experimental method for studying the process of combining particles under the influence of ultrasonic vibrations. To determine the characteristics of an aerosol during experimental studies, a TIPAS-1 meter based on the small-angle scattering method and the spectral transparency method was used. **Results.** The paper introduces the results of studies of coagulation of particles with a size of 2.5 microns or less in an ultrasonic field formed in resonant gaps by oscillating disk emitters. The authors proposed to increase the efficiency of coagulation in resonant gaps through the use of ultrasonic disk emitters capable of forming alternating zones of maximum and minimum amplitude oscillations in the resonant gaps. The creation of such zones ensured the formation of vortex-type acoustic flows capable of moving particles within the nodal regions of a standing wave and between them. The involvement of small particles in the formed flows made it possible to increase the probability of their collision. It was established that more effective ultrasonic coagulation provides an increase in the degree of inertial capture for particles of 2.5 microns in size by 6% – from 89 to 95%, for particles of 1.5 microns in size by 7% – from 85 to 92%, and for particles of 0.5 microns by 9% – from 76 to 85%.

**Keywords:** ultrasound, gas purification, coagulation, agglomeration, acoustic field, fractional efficiency, resonant gap, vortex flow

**Acknowledgements:** This study was carried out with a grant from the Russian Science Foundation. (project no. 19-19-00121), <https://rscf.ru/project/19-19-00121/>.

**For citation:** Khmelev V.N., Nesterov V.A., Shalunov A.V., Terentyev S.A. Increasing the efficiency of coagulation in resonant gaps due to acoustic flow formation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 112–124. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4395

### Введение

При добыче, переработке и сжигании георесурсов в атмосферу выбрасывается большое количество опасных загрязнений в виде пыли, сажи и твердых частиц различного происхождения. В связи с этим одной из глобальных проблем человечества является необходимость ликвидации загрязнений окружающей среды промышленными выбросами различных твердых частиц. При этом максимальное внимание уделяется очистке отходящих газов от частиц размером 2,5 мкм и менее, которые при малом массовом содержании обладают высокой счетной концентра-

цией (более 95 % от суммарной концентрации частиц в атмосфере) [1–4]. При этом частицы столь малого размера длительное время удерживаются в воздухе и легко проникают через альвеолы легких в кровь человека, вызывая опасные заболевания. Разработанное и применяемое в настоящее время газоочистное оборудование практически непригодно для очистки промышленных выбросов от частиц такого размера [5–8].

Одним из наиболее перспективных способов повышения эффективности существующего газоочистного оборудования при улавливании таких

частиц является воздействие на газовый поток с мелкими частицами высокоинтенсивными акустическими колебаниями ультразвуковой (УЗ) частоты. Такое воздействие вплоть до уровней звукового давления в 160...170 дБ (до разрушения укрупненных частиц) позволяет объединить мелкие частицы для их последующего удаления [9–12], эффективно решая проблему удаления частиц, имеющих размеры более 2,5 мкм. Однако, как показали результаты исследований различных авторов [9, 11, 13, 14] ультразвуковая коагуляция, обеспечивая значительное увеличение эффективности (до 99 %) при удалении частиц размером более 2,5 мкм, теряет свои преимущества при объединении частиц размером менее 2,5 мкм для их последующего удаления [13–15].

Проведенный различными авторами анализ механизмов УЗ-коагуляции (гидродинамического и ортокинетического) [16, 17] позволил установить, что эффект, достигаемый за счет явлений переноса импульса газовой фазы между частицами и за счет колебательных движений твердых частиц друг относительно друга, существенно снижается по следующим причинам:

- использование достаточно низкой частоты ультразвукового воздействия (менее 22 кГц) в равной степени вовлекает в колебательное движение все частицы размером менее 2,5 мкм, что не способствует их соударениям и объединению;
- отсутствие взаимодействия (соударений) между частицами при реализации режима стоячей волны приводит к удерживанию уже укрупненных частиц ультразвуковым полем в узловых областях и без наличия дополнительного потока газа не обеспечивается присоединение к ним новых мелких частиц.

По этим причинам низкая вероятность столкновения частиц, особенно при малых концентрациях (больших расстояниях между частицами), приводит к тому, что даже при максимально допустимом уровне звукового давления (до разрушения образовавшихся агломератов) повышение эффективности коагуляции частиц размером менее 2,5 мкм за счет ультразвуковых колебаний становится практически невозможным [18].

Существует настоятельная необходимость поиска новых путей дальнейшего повышения эффективности УЗ-коагуляции частиц размером менее 2,5 мкм.

Понимание реальных механизмов УЗ-коагуляции позволяет предположить, что при невозможности дальнейшего увеличения уровня звукового давления (величины прямого воздействия на частицы) повышение вероятности столкновения мелких частиц можно обеспечить за счет придания им дополнительных перемещений, способствующих их

столкновению и объединению. Обеспечить такое дополнительное воздействие на мелкие частицы в ультразвуковом поле можно только за счет использования вторичных эффектов, возникающих при определенных условиях формирования высокоинтенсивного ультразвукового воздействия.

Одним из таких вторичных интенсифицирующих эффектов является так называемый «ультразвуковой ветер». Однако при реализации ультразвукового воздействия в открытом пространстве или протяженном газоходу формируемое радиационное давление позволяет перемещать частицы только в одном направлении без существенного увеличения эффективности взаимодействия частиц между собой [19, 20].

По этой причине для увеличения эффективности взаимодействия мелких частиц в максимальном по уровню звукового давления ультразвуковом поле необходимо сформировать движение частиц в различных направлениях, чтобы осуществлялось их взаимное перемещение и взаимодействие.

Кроме того, для существенного увеличения эффективности объединения частиц, особенно при их малой концентрации, необходимо обеспечивать повышение концентрации частиц в определенных областях путем их перемещения [9, 11, 13, 21] за счет формирования потоков вихревого характера, поскольку только вихревые потоки позволяют увеличить эффективность взаимодействия (объединения) частиц за счет действия следующих факторов:

- увеличения скорости взаимного перемещения частиц различных размеров;
- увеличения времени взаимодействия частиц за счет их удержания в вихревых областях;
- формирования зон с повышенной концентрацией частиц.

Поэтому представленные далее исследования направлены на выявление условий формирования вихревых потоков в ультразвуковых полях с максимальным по уровню звукового давления УЗ-воздействием. Проведение сравнительных исследований процесса коагуляции частиц с размером 2,5 мкм при наличии вихревых потоков и без них позволит определить реальные значения повышения эффективности УЗ-коагуляции при турбулизации газодисперсного потока акустическими течениями в сравнении с коагуляцией в равномерном УЗ-поле и без него.

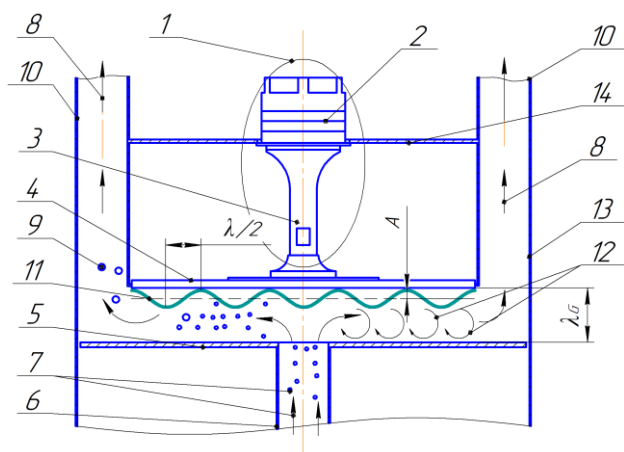
### **Экспериментальная установка**

#### **Описание стенда для исследования коагуляции высокодисперсных частиц**

Для изучения процесса коагуляции частиц с размером 2,5 мкм и проведения сравнительных исследований при наличии вихревых потоков и без них был использован стенд на базе газоочисти-

тельного оборудования, реализующего УЗ коагуляцию и последующее улавливание укрупненных частиц.

Стенд состоит из коагуляционной камеры (рис. 1) и последовательно установленного циклона, основанного на конструкции ВНИИОГАЗ ЦН-15 с производительностью  $10 \text{ м}^3/\text{час}$ . Отводной патрубок циклона соединен с вентустановкой.



**Рис. 1.** Схема УЗ коагуляционной камеры: 1 – УЗ колебательная система (УЗКС); 2 – пьезопреобразователь; 3 – концентратор; 4 – дисковый излучатель; 5 – отражатель; 6 – входной патрубок; 7 – загрязненный газ; 8 – отходящий газодисперсный поток (к циклону); 9 – объединенные частицы; 10 – выходные патрубки; 11 – распределение амплитуд; 12 – вихревые течения; 13 – корпус; 14 – фланец излучателя;  $\lambda$  – длина волны изгибных колебаний;  $\lambda_G$  – расстояние между излучателем и отражателем

**Fig. 1.** Schematic diagram of the ultrasonic agglomeration chamber: 1 – ultrasonic vibrating system; 2 – piezoelectric transducer; 3 – concentrator; 4 – disk radiator; 5 – reflector; 6 – inlet tube; 7 – polluted gas; 8 – outgoing gas-dispersion flow (to cyclone); 9 – aggregated particles; 10 – outlet tubes; 11 – amplitude distribution; 12 – vortex flows; 13 – housing; 14 – radiator flange;  $\lambda$  – flexural vibration wavelength;  $\lambda_G$  – distance between radiator and reflector

Разработанная и изготовленная коагуляционная камера стенда (Патент РФ № 2759506) пригодна для реализации разнообразных условий и режимов воздействия высокоинтенсивными УЗ-колебаниями за счет использования различных типов ультразвуковых излучателей, а также за счет возможности резонансного усиления колебаний путем изменения расстояния между излучателем и отражателем [21].

В качестве источника УЗ-воздействия в коагуляционной камере использованы две УЗКС – 1 с дисковыми излучателями – 4 двух различных типов, создающие неравномерное или равномерное

распределение колебаний для УЗ воздействия с формированием потоков и без них. Напротив дискового излучателя установлен отражатель – 5 с размещенным по центру входным патрубком – 6.

Процесс объединения частиц в коагуляционной камере осуществляется следующим образом. Газовый поток поступает в патрубок – 6, установленный в центре отражателя – 5. После этого газодисперсный поток равномерно распространяется от центральной области к периферии. В процессе распространения на поток воздействуют УЗ-колебания, которые формируются между поверхностями излучателя – 4 и отражателя – 5. Выведение потока – 8 газа и укрупненных частиц – 9 осуществляется через патрубки – 10.

Конструкция коагуляционной камеры позволяет позиционировать по высоте отражатель для точной настройки резонансного режима (режима стоячей волны в газовой среде). Когда расстояние между излучателем и отражателем обеспечивает формирование стоячей волны, происходит увеличение эффективности воздействия за счет повышения уровня звукового давления.

Стенд для проведения исследований был укомплектован измерительным и вспомогательным оборудованием. Для измерения основного параметра – уровня звукового давления – был использован шумомер Экофизика-110А. Для измерения параметров формируемых частиц был использован измеритель дисперсных характеристик аэрозоля ТИПАС-1, который состоит из двух блоков:

- 1) реализует оптический метод малоуглового рассеивания (передатчик, приемник) и предназначен для измерения размеров частиц микронного аэрозоля и концентрации в диапазоне  $1\text{--}100 \text{ мкм}$  и  $0,009\text{--}8,0 \text{ г/м}^3$ ;
- 2) реализует оптический метод спектральной прозрачности (передатчик и приемник) и предназначен для измерения размеров частиц субмикронного аэрозоля и концентрации в диапазоне  $0,1\text{--}2 \text{ мкм}$  и  $0,009\text{--}8,0 \text{ г/м}^3$ .

Отбор проб осуществлялся на входном патрубке коагуляционной камеры и на выходном патрубке циклона. Подача дисперсных частиц осуществлялась пневматическим распылителем эжекционного типа, установленным перед входным патрубком коагуляционной камеры.

Для определения траекторий движения частиц в камере установлен лазерный построитель плоскости. Лазерная плоскость проходит через ось симметрии излучателя. Фотокамера сфокусирована на лазерную плоскость и позволяет производить видеосъемку движения частиц между излучателем и отражателем. Направления потоков газа определяются косвенно, по траекториям светорассеивающих (трассирующих) частиц.

### Ультразвуковые излучатели

Для проведения исследований были использованы два УЗ-излучателя, состоящие из пьезоэлектрического преобразователя Ланжевена и изгибно-колеблющегося излучателя в форме диска. При этом за счет возбуждения колебаний на неосновной моде на фронтальной поверхности излучателя формируются максимумы и минимумы колебаний, чередующиеся последовательно на расстоянии друг от друга, соответствующем половине длины волны изгибных колебаний в материале излучателя [14, 18, 22].

Для формирования неоднородного ультразвукового поля и воздействия им на газодисперсный поток был использован изгибно-колеблющийся дисковый излучатель с плоской фронтальной поверхностью (далее плоский излучатель). В свою очередь, для создания однородного УЗ-поля был использован излучатель, на фронтальной поверхности которого выполнены фазовыравнивающие кольцевые выступы с высотой, равной половине длины волны в газе (далее ступенчатый излучатель).

На рис. 2 представлены схемы, поясняющие принцип работы использованных для проведения сравнительных исследований двух типов дисковых излучателей.

Применяемые для исследований излучатели были изготовлены с равными по размерам поверхностями излучения и с максимально близкими рабочими частотами.

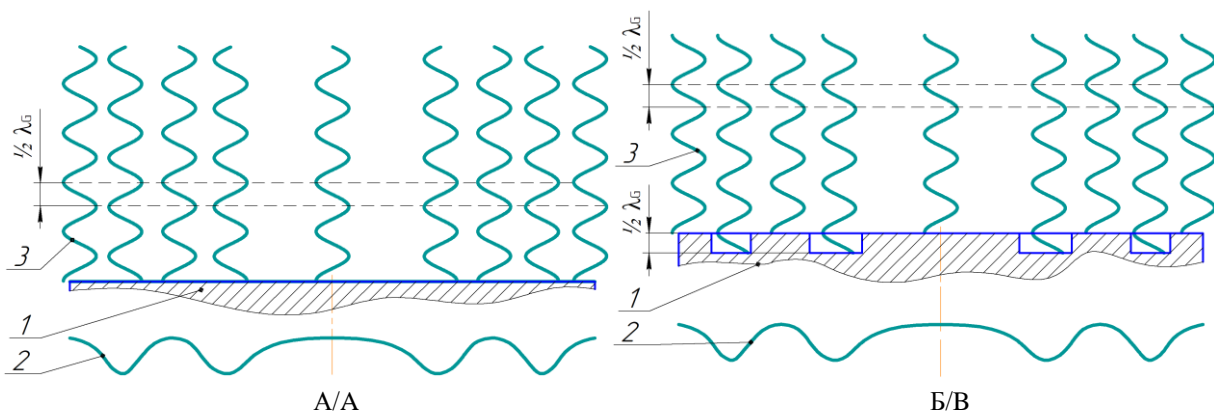
Как видно из рис. 2, А, соседние кольцевые области диска формируют равноамплитудные колебания в противофазе. Такой излучатель позволяет создавать неоднородное ультразвуковое поле, в котором возможно формирование вихревых тече-

ний между областями, колеблющимися в противофазе. В таком варианте исполнения излучателя характерные размеры создаваемых вихрей будут определяться длиной волны УЗ-колебаний в газовой среде, а их количество – числом соседних участков УЗ-поля, колеблющихся в противофазе, и расстоянием между излучателем и отражателем [14, 21, 22].

Для обеспечения синфазности (формирования однородного УЗ-поля) излучаемых колебаний в газовую среду с каждого кольцевого участка профиль фронтальной поверхности этого типа излучателей (рис. 2, Б) выполнен ступенчато-переменным. Местоположение и размеры выступов на фронтальной поверхности определяют основные характеристики УЗ-поля, формируемого излучателем. Поэтому для создания равномерного УЗ-поля ступенчатые переходы выполняются в зонах узловых окружностей с высотой равной половине длины волны УЗ-колебаний в газовой среде. Таким образом обеспечивается формирование равномерного ультразвукового поля как при наличии, так и при отсутствии отражателя, установленного на резонансном расстоянии от колеблющейся поверхности излучателя.

На рис. 3 представлены распределения колебаний и фотографии изготовленных излучателей двух типов.

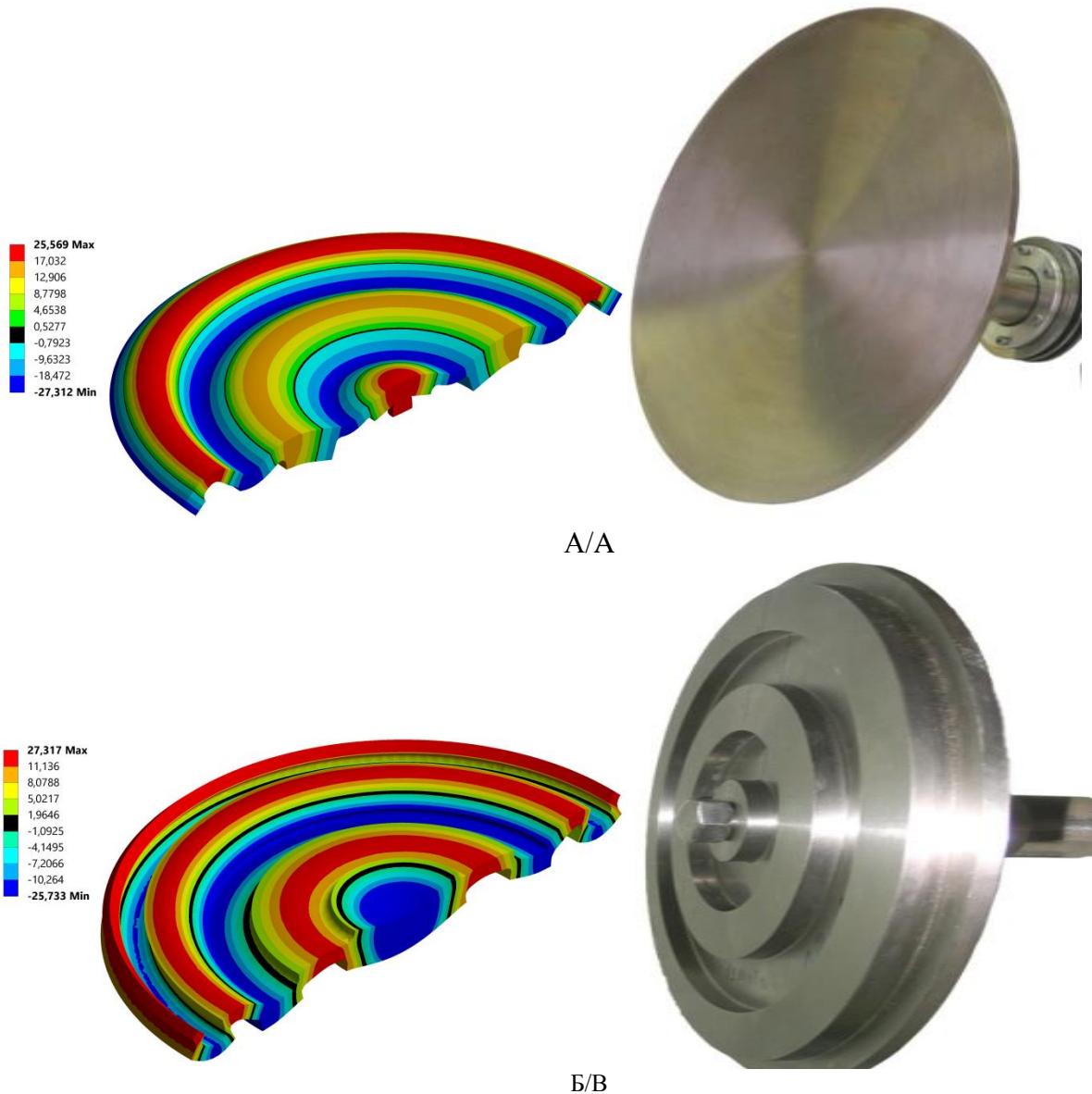
Каждый пьезопреобразователь, соединенный с излучателем, снабжен электронным генератором для его питания, который обеспечивает поддержание постоянной амплитуды колебаний. Технические характеристики УЗ-излучателей представлены в табл. 1.



**Рис. 2.** Схемы формирования УЗ-излучения с помощью изгибно-колеблющихся ультразвуковых дисковых излучателей: А) излучатель с плоской фронтальной поверхностью (плоский); Б) излучатель с фазовыравнивающими кольцевыми выступами (ступенчатый); 1 – излучатель; 2 – распределение амплитуд колебаний; 3 – колебания, излучаемые в газовую среду;  $\lambda_g$  – длина волны в газовой среде

**Fig. 2.** Diagrams of generation of ultrasonic radiation using bending and oscillating ultrasonic disk radiators: А) radiator with a flat frontal surface (flat radiator); Б) radiator with phase-aligning collars (step-function radiator); 1 – radiator; 2 – vibration amplitudes distribution; 3 – vibrations emitted into a gaseous medium;  $\lambda_g$  – wavelength in a gaseous medium





**Рис. 3.** Форма колебаний и фото ультразвуковых дисковых излучателей: А) плоский излучатель; Б) ступенчатый излучатель

**Fig. 3.** Shape of vibrations and photo of ultrasonic disk radiators: (A) flat emitter; (B) step-function radiator

**Таблица 1.** Технические характеристики ультразвуковых излучателей

**Table 1.** Technical characteristics of ultrasonic emitters

Тип дискового излучателя Disk transducer type	Плоский излучатель Flat emitter	Ступенчатый излучатель Step-function radiator
Диаметр излучателя, мм Radiator diameter, mm	Ø320	Ø320
Потребляемая мощность, Вт Power consumption, W	245	240
Частота колебаний, кГц Oscillation frequency, kHz	22,1	22,2
Амплитуда колебаний поверхности мах/мин, мкм Surface oscillation amplitude max/min, µm	51/45	51/47

### Расчет распределения звукового давления в коагуляционной камере

Расчет параметров ультразвукового поля был проведен с целью определения условий максимально эффективного воздействия и сравнительного анализа распределений уровня звукового давления, создаваемого с помощью разных излучателей, при условии обеспечения расстояния от излучателя до отражателя (для каждого типа излучателя – плоского и ступенчатого), при котором формируется стоячая волна.

Моделирование распределения колебаний было проведено посредством конечно-элементного анализа с использованием модуля гармонического акустического анализа Harmonic Acoustics. При

моделировании были установлены граничные условия на основе полученных экспериментальных данных о параметрах разработанных и изготовленных УЗ-излучателей (частота колебаний и распределение амплитуд колебаний излучающей поверхности). Поверхности внутренних стенок камеры заданы как отражающие границы с определенным уровнем поглощения. Путем сравнения результатов моделирования со значениями уровня звукового давления, измеренными экспериментально, определен уровень поглощения УЗ-колебаний стенками коагуляционной камеры, который составил 11 %. Это значение принято в дальнейших расчетах.

#### Анализ распределения звукового давления

Распределения уровня звукового давления для обоих излучателей представлены на рис. 4.

Представленные результаты свидетельствуют о наличии уровня звукового давления в объеме камеры коагуляции между излучателем и отражателем (160–172 дБ) достаточного для коагуляции с максимальной эффективностью. Также определено расстояние (длина волны  $\lambda_G=15$  мм), при котором

обеспечивается максимальный уровень звукового давления.

Установлено, что уровень звукового давления между отражателем и излучателем при использовании излучателя с фазовывравнивающими кольцевыми выступами составляет 168–171 дБ, при этом формируется равномерное УЗ-поле, а при использовании плоского излучателя – 168–172 дБ, формируемое поле неоднородное, ярко выражены области минимального уровня звукового давления, которые расположены вблизи нулей колебаний дискового излучателя.

#### Анализ траекторий движения частиц

На первом этапе был проведен анализ траекторий движения частиц в коагуляционной камере с помощью разработанного стенда. Траектории частиц определялись на основании покадрового отслеживания трассирующих частиц, отснятых с помощью фотоаппарата. Выходная мощность генератора была установлена таким образом, чтобы уровень звукового давления при использовании обоих типов дисков был не менее 165 дБ. Полученные кадры съемки показаны на рис. 5.

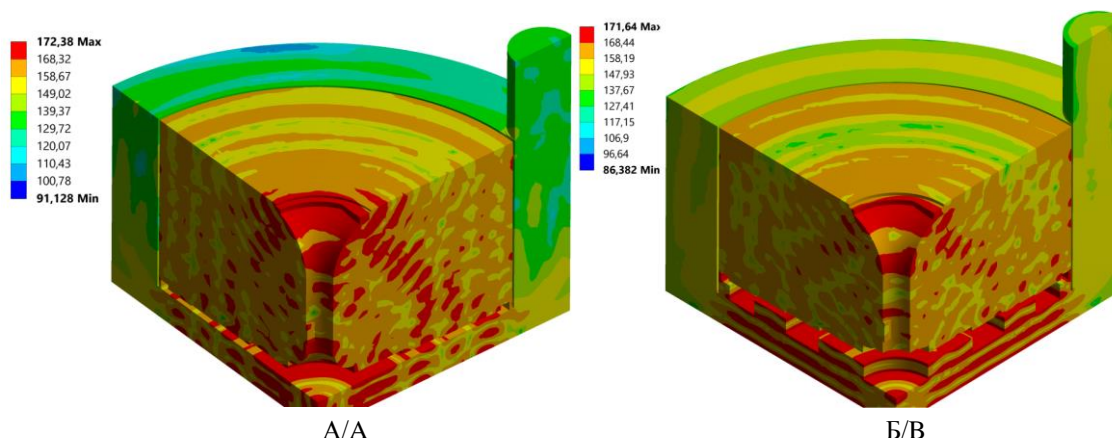


Рис. 4. Распределения уровня звукового давления внутри коагуляционной камеры: А) плоский излучатель; Б) ступенчатый излучатель

Fig. 4. Sound pressure level distribution inside the agglomeration chamber: A) flat emitter; B) step-function radiator

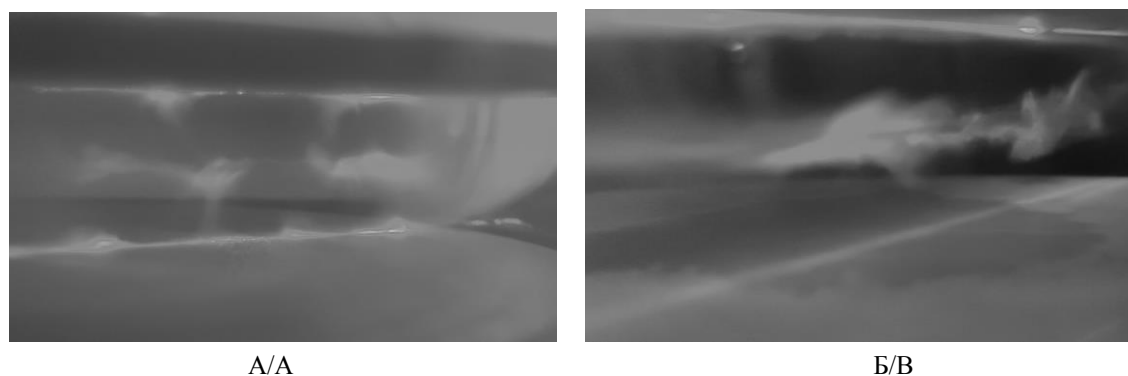
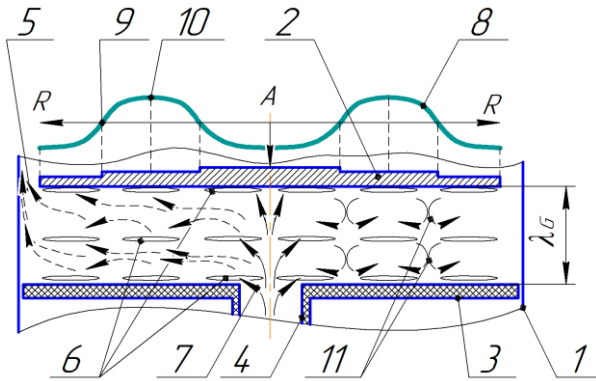


Рис. 5. Распределение частиц в коагуляционной камере: А) плоский излучатель; Б) ступенчатый излучатель

Fig. 5. Particle distribution in the agglomeration chamber: A) flat emitter; B) step-function radiator

На основе анализа полученных данных о траекториях движения частиц были построены схемы перемещения частиц в коагуляционной камере при использовании обоих типов излучателей (рис. 6, 7).



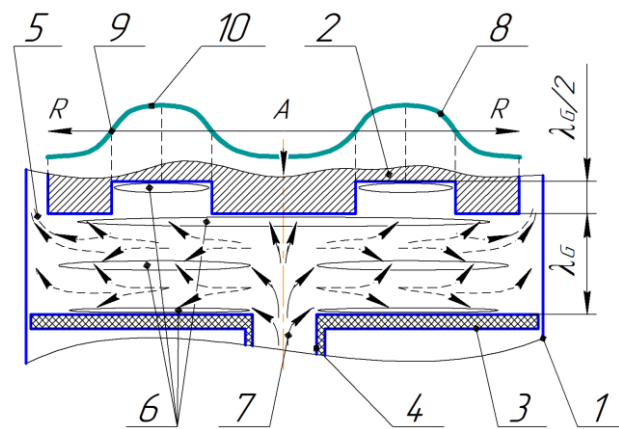
**Рис. 6.** Схема перемещения частиц в коагуляционной камере при использовании плоского излучателя: 1 – корпус камеры; 2 – излучатель; 3 – отражатель; 4 – входной патрубок; 5 – кольцевая область для выхода озвученного газодисперсного потока; 6 – области формирования агломератов; 7 – газодисперсный поток; 8 – распределение амплитуд колебаний дискового излучателя; 9 – нули колебаний излучателя; 10 – области максимальных амплитуд колебаний; 11 – вихревые области;  $\lambda_G$  – длина волны в газовой среде

**Fig. 6.** Diagram of particle paths in the agglomeration chamber when using a flat radiator: 1 – chamber body; 2 – radiator; 3 – reflector; 4 – inlet tube; 5 – annular domain for emission of the sounded gas-disperse flow; 6 – areas of agglomerates formation; 7 – gas-disperse flow; 8 – distribution of amplitudes of vibrations of the disk radiator; 9 – zeros of vibrations of the radiator; 10 – areas of maximum vibration amplitudes; 11 – vortex areas;  $\lambda_G$  – wavelength in a gaseous medium

При использовании плоского излучателя (при расстояниях 7,5 и 15 мм) формируется стоячая волна с двумя и тремя узловыми плоскостями колебательной скорости, соответственно, в которые перемещаются, коагулируют и удерживаются твердые частицы. При этом возникают интенсивные вихревые течения, образуемые за счет смежно-расположенных колеблющихся в противофазе областей УЗ-поля. В результате чего частицы включаются в вихревое движение как в пределах одной узловой области, так и между ними через зоны низкого уровня звукового давления, расположенные вблизи (напротив) нулей колебаний дискового излучателя. При этом помимо коагуляции частиц в узловых областях колебательной скорости происходит их дополнительное взаимное вихревое перемещение и взаимодействие между собой, что дополнительно приводит к увеличению эффективности коагуляции.

Изменение расстояния в большую или меньшую сторону относительно резонансного расстояния приводит к возникновению бегущей волны и исчезновению узловых областей. При этом вихревые потоки практически не формируются, снижая эффективность коагуляции. Также установлено, что при расстоянии, равном  $\lambda$ , интенсивность вихревых течений выше, чем при расстоянии, равном  $\lambda_G/2$ . При расстояниях, равных  $1/4 \lambda_G$  и  $3/4 \lambda_G$ , наступают условия, при которых уровень звукового давления достигает своего минимального значения.

Для сравнения на рис. 7 приведена схема движения потоков для излучателя, формирующего равномерное УЗ-поле.



**Рис. 7.** Схема перемещения частиц в коагуляционной камере при использовании ступенчатого излучателя: 1 – корпус камеры; 2 – излучатель; 3 – отражатель; 4 – входной патрубок; 5 – кольцевая область для выхода озвученного газодисперсного потока; 6 – области формирования агломератов; 7 – газодисперсный поток; 8 – распределение амплитуд колебаний дискового излучателя; 9 – нули колебаний излучателя; 10 – области максимальных амплитуд колебаний;  $\lambda_G$  – длина волны в газовой среде

**Fig. 7.** Diagram of particle paths in the agglomeration chamber when using a step-function radiator: 1 – chamber body; 2 – radiator; 3 – reflector; 4 – inlet tube; 5 – annular domain for emission of the sounded gas-disperse flow; 6 – areas of agglomerates formation; 7 – gas-disperse flow; 8 – distribution of amplitudes of vibrations of the disk radiator; 9 – zeros of vibrations of the radiator; 10 – areas of maximum vibration amplitudes;  $\lambda_G$  – wavelength in a gaseous medium

Как и в предыдущем случае, при использовании ступенчатого излучателя при расстоянии между излучателем и отражателем 7,5 мм, а также при расстоянии 15 мм формируется стоячая волна с двумя и тремя узловыми плоскостями колебательной скорости, соответственно, в которые перемещаются, коагулируют и удерживаются твердые частицы.



Дальнейшая коагуляция частиц не происходит из-за удерживания уже сформированных частиц в узлах стоячей волны. При этом не происходит взаимного перемещения частиц в пределах узловой зоны без наличия какого-либо дополнительного принудительного потока газа. Продолжительная подача аэрозоля приводит к дополнительному увеличению размеров частиц, удерживаемых ультразвуковым полем в узловых областях. При этом наличие вихревых потоков не обнаруживается.

### Определение эффективности улавливания частиц от параметров газодисперсного потока и ультразвукового воздействия

Для выявления возможности повышения эффективности улавливания с помощью разработанного стенда были проведены экспериментальные исследования, позволившие определить влияние различных факторов (расход газодисперсного потока, уровень звукового давления, массовая концентрация) на эффективность улавливания дисперсных частиц, а также определить фракционную эффективность.

Для того чтобы определить вклад в процесс коагуляции частиц эффектов, возникающих при ультразвуковом воздействии, и исключить другие факторы, влияющие на эффективность (например, электризация частиц), был проведен сравнительный анализ данных, полученных при наличии УЗ-воздействия (как однородным, так и неоднородным полем) и без УЗ-воздействия. Без УЗ-воздействия все гидродинамические параметры течения газодисперсного потока были неизменными, поэтому эффекты, связанные с электризацией в равной степени учитываются и влияют на коагуляцию частиц как в отсутствие ультразвука, так и при его наличии. Такая постановка задачи позволяет однозначно установить взаимосвязь между ультразвуковым воздействием и повышением эффективности коагуляции.

Эффективность коагуляции считалась прямо пропорциональной эффективности улавливания частиц в циклоне. При этом эффективность улавливания рассчитывалась с помощью выражения (1):

$$\eta = \left(1 - \frac{N_{outlet}}{N_{inlet}}\right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

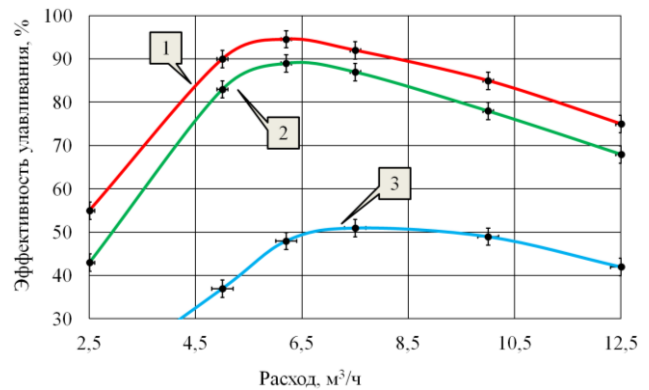
где  $N_{outlet}$  – концентрация частиц на выходе из циклона,  $г/м^3$ ;  $N_{inlet}$  – концентрация частиц на входе в коагуляционную камеру,  $г/м^3$ .

### Определение оптимального расхода газа

На следующем этапе был определен расход газодисперсного потока, при котором обеспечивается максимальная эффективность улавливания частиц, как при наличии, так и при отсутствии акустического воздействия. Исследования проводились при следующих условиях: уровень звукового давления составлял 165 дБ;

начальная массовая концентрация  $N_{inlet}=2 \cdot 10^{-2} г/м^3$ . Расход газа изменялся в пределах от 2,5 до 10  $м^3/ч$ . В качестве дисперсного материала при проведении исследований был использован микротальк Jetfine T1 СА с диаметром частиц  $d_{50}=1 мкм$ ,  $d_{95}=3 мкм$ .

На рис. 8 представлены зависимости эффективности улавливания частиц от расхода газа.



**Рис. 8.** Зависимости эффективности улавливания частиц от расхода газа: 1 – плоский излучатель; 2 – ступенчатый излучатель; 3 – без УЗ-воздействия

**Fig. 8.** Dependences of particle capture efficiency on gas flow rate: 1 – flat radiator; 2 – step-function radiator; 3 – without ultrasonic influence

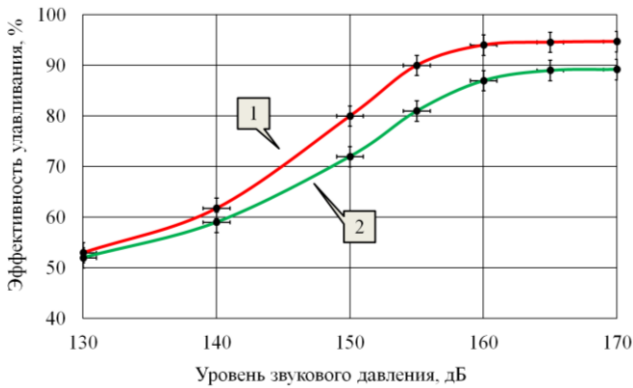
Полученные зависимости позволяют сделать вывод, что оптимальный расход газа, при котором обеспечивается максимальная эффективность улавливания частиц, составляет  $6,2 м^3/ч$  при использовании плоского и ступенчатого дисковых излучателей. Однако без УЗ-воздействия оптимальный расход составил  $8–10 м^3/ч$ , что соответствует оптимальному расходу потока для циклона. Дальнейшие исследования проводились с оптимальным расходом  $6,2 м^3/ч$ .

Это свидетельствует о том, что эффективность коагуляции частиц оказывает большее влияние на эффективность улавливания, чем установление оптимального расхода газа.

Таким образом, эффективность коагуляции частиц под воздействием УЗ колебаний зависит от расхода газа (от времени УЗ-воздействия). При этом очевидно, что чем больше время УЗ-воздействия, тем выше эффективность коагуляции.

### Влияние уровня звукового давления на эффективность улавливания частиц

Для определения влияния уровня звукового давления на эффективность улавливания были проведены отдельные экспериментальные исследования при концентрации  $N_{inlet}=2 \cdot 10^{-2} г/м^3$ . На рис. 9 представлены полученные зависимости.



**Рис. 9.** Зависимость эффективности улавливания от уровня звукового давления: 1 – плоский излучатель; 2 – ступенчатый излучатель

**Fig. 9.** Dependence of the capture efficiency on the sound pressure level: 1 – flat radiator; 2 – step-function radiator

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что при начальном уровне звукового давления  $L=130$  дБ эффективность улавливания практически не зависит от типа используемого излучателя, прирост эффективности за счет вихревых течений практически отсутствует, что свидетельствует об их недостаточном развитии и влиянии.

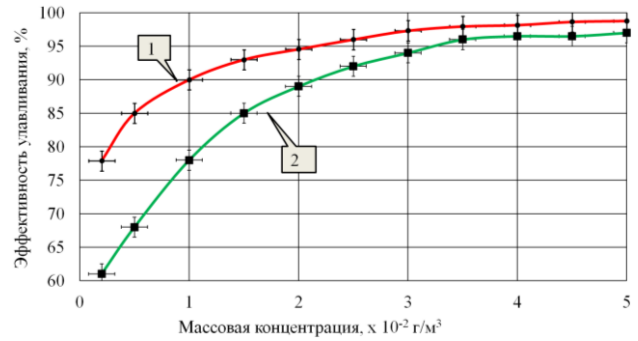
При увеличении уровня звукового давления наблюдается повышение эффективности улавливания частиц. При этом увеличение эффективности при воздействии неоднородным полем оказывается более значительным. Это связано с интенсификацией вихревых течений при увеличении уровня звукового давления.

Рост эффективности улавливания продолжается до достижения уровнем звукового давления значительный 165 дБ, при этом для ступенчатого излучателя эффективность составляет менее 90 %. В свою очередь, формируемые плоским излучателем вихревые акустические потоки при уровне звукового давления 165 дБ позволяют увеличить эффективность улавливания на 6 %.

Известно, что при воздействии газовых потоков или в неоднородном УЗ-поле крупные агломераты начинают распадаться вследствие воздействия акустических потоков. Поэтому дальнейшего роста эффективности не наблюдается, что свидетельствует о начале разрушения агломератов, их разрушение происходит одновременно с коагуляцией.

#### **Влияние массовой концентрации на эффективность улавливания частиц**

Для определения влияния массовой концентрации частиц на эффективность улавливания были проведены экспериментальные исследования при уровне звукового давления 165 дБ, по результатам которых получены зависимости (рис. 10).



**Рис. 10.** Зависимость эффективности улавливания от массовой концентрации частиц: 1 – плоский излучатель; 2 – ступенчатый излучатель

**Fig. 10.** Dependence of capture efficiency on particle mass concentration: 1 – flat radiator; 2 – step-function radiator

Как следует из представленных зависимостей, при концентрациях до  $N_{inlet}=2 \cdot 10^{-2}$  г/м<sup>3</sup> происходит значительный рост эффективности улавливания частиц. При этом эффективность улавливания выше при использовании плоского излучателя вследствие повышенной эффективности коагуляции частиц. При концентрации  $N_{inlet}=3 \cdot 10^{-2}$  г/м<sup>3</sup> и выше рост эффективности замедляется, а при концентрации выше  $N_{inlet}=4 \cdot 10^{-2}$  г/м<sup>3</sup> эффективности улавливания становятся практически одинаковыми с использованием обоих типов излучателей. Это происходит, поскольку при указанных концентрациях расстояния между частицами оказываются достаточными для реализации механизмов ортокинетического и гидродинамического механизмов коагуляции частиц, и влияние вихревых потоков слабо сказывается на повышении вероятности столкновения частиц.

#### **Определение фракционной эффективности**

Для подтверждения эффективности улавливания частиц различных размеров были проведены экспериментальные исследования с использованием смеси микротальков различных марок (Jetfine T1 CA  $d_{50}=1$  мкм, Luzenac St30  $d_{50}=6$  мкм, Luzenac H50  $d_{50}=9$  мкм), имеющей полидисперсный состав. Сравнительные эксперименты проведены при начальной концентрации частиц  $N_{inlet}=0,2 \cdot 10^{-2}$  г/м<sup>3</sup> при трех различных вариантах работы коагуляционной камеры: воздействие плоским излучателем; воздействие ступенчатым излучателем; без ультразвукового воздействия. В результате получены данные о фракционной эффективности, показанные на рис. 11.

- Анализ полученных зависимостей показывает, что:
  - эффективность улавливания частиц без ультразвукового воздействия (рис. 11, кривая 3) существенно ниже, чем при его наличии;

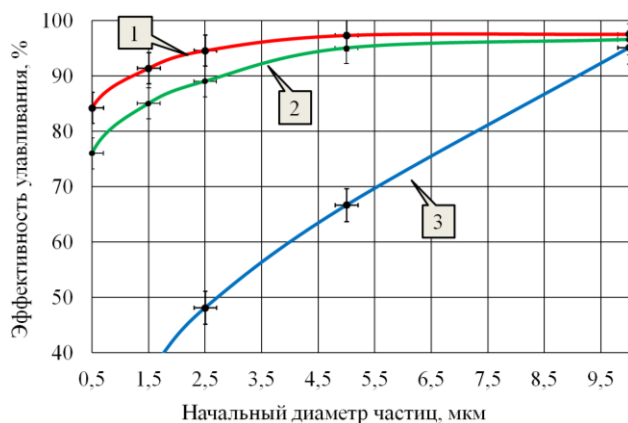


Рис. 11. Фракционная эффективность: 1 – плоский излучатель; 2 – ступенчатый излучатель; 3 – без УЗ-воздействия

Fig. 11. Fractional efficiency: 1 – flat radiator; 2 – step-function radiator; 3 – without ultrasonic influence

- с использованием ступенчатого излучателя (рис. 11, кривая 2) при формировании стоячей волны частицы почти не взаимодействуют между собой в пределах узловой области, а при очень низкой концентрации эффективность агломерации сводится к нулю;
- применение плоского излучателя (рис. 11, кривая 1) позволяет формировать вихревые течения между смежно-расположенными областями, колеблющимися в противофазе, что существенно повышает взаимодействие частиц, расположенных в узловых зонах.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтвердили, что повышение эффективности УЗ-коагуляции возможно за счет создания акустических течений в виде вихревых потоков. При этом эффективность улавливания частиц размером 2,5 мкм возрастает на 6 % – от 89 до 95 %, частиц размером 1,5 мкм на 7 % – от 85 до 92 %, а частиц размером 0,5 мкм на 9 % – от 76 до 85 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Particulate air pollution acute cardio respiratory hospital admissions and mortality among the elderly / J. Halonen, T. Lanki, T. Yli-Tuomi, P. Tiittanen, V. Kulmala, J. Pekkanen // *American Journal of Epidemiology*. – 2009. – Vol. 20. – № 1. – P. 143–153.
2. Progress of air pollution control in China and its challenges and opportunities in the ecological civilization era / X. Lu, S. Zhang, J. Xing, Y. Wang, W. Chen, D. Ding, J. Hao // *Engineering*. – 2020. – Vol. 6. – № 12. – P. 1423–1431.
3. Miller L., Xu X. Ambient PM2.5 human health effects – findings in China and research directions // *Atmosphere*. – 2018. – Vol. 9. – № 424. – P. 1–16.
4. Mortality risk and PM 2.5 air pollution in the USA: an analysis of a national prospective cohort / C.A. Pope, M. Ezzati, J.B. Cannon, R.T. Allen, M. Jerrett, R.T. Burnett // *Air Quality, Atmosphere & Health*. – 2017. – Vol. 11. – № 3. – P. 245–252.
5. Wang L. Theoretical study of cyclone design. Diss. – Texas, 2004. – 137 p.
6. Пищуха Е. А., Теплицкий Ю. С., Жукова Ю.В. Исследование течений в циклонной камере. // *Инженерно-физический журнал*. – 2011. – Т. 84. – № 4. – С. 813–819.
7. Пищуха Е.А., Теплицкий Ю.С., Бородуля В.А. Унос частиц из циклонной камеры // *Инженерно-физический журнал*. – 2012. – Т. 85. – № 6. – С. 1196–1201.
8. Hoekstra A.J. Gas flow field and collection efficiency of cyclone separators. Diss. – Stevinweg, 2000. – 165 p.

## Заключение

В ходе выполнения работы были проведены теоретические и экспериментальные исследования процесса коагуляции частиц размером 2,5 мкм и менее в ультразвуковом поле, формируемом в резонансных промежутках колеблющимися дисковыми излучателями. Представлены результаты исследований коагуляции частиц размером 2,5 мкм и менее в равномерном поле УЗ-колебаний, и показана невозможность реализации процесса с эффективностью для частиц размером менее 2,5 мкм.

Предложено новое направление повышения эффективности коагуляции за счет применения ультразвуковых дисковых излучателей, способных формировать в резонансных промежутках чередующиеся зоны, колеблющиеся в противофазе. Создание и применение таких излучателей обеспечило формирование акустических течений вихревого типа, способных перемещать частицы в пределах узловых областей стоячей волны и между ними, что увеличило вероятность их столкновения.

Проведенные исследования и полученные экспериментальные результаты позволили выявить условия и режимы повышения эффективности УЗ-коагуляции за счет формирования акустических течений, способных перемещать частицы в пределах узловых областей стоячей волны и между ними. Показано, что более эффективная УЗ-коагуляция обеспечивает повышение степени инерционного улавливания для частиц размером 2,5 мкм на 6 % – от 89 до 95 %, для частиц размером 1,5 мкм на 7 % – от 85 до 92 %, а для частиц размером 0,5 мкм на 9 % – от 76 до 85 %.

Дальнейшее повышение эффективности коагуляции и улавливания дисперсных частиц может быть обеспечено за счет комплексного воздействия на газодисперсные системы полями различной физической природы (например, ультразвуковыми совместно с электростатическими). Реализация комплексного воздействия входит в планы развития предложенного подхода коагуляции аэрозолей.

9. Ultrasonic agglomeration and preconditioning of aerosol particles for environmental and other applications / E. Riera, I. González-Gomez, G. Rodriguez, J.A., Gallego-Juarez // *Power Ultrasonics* / Eds. J.A. Gallego-Juarez, K.F. Graff. – Oxford: Woodhead Publ., 2015. – P. 1023–1058.
10. 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.
11. Experimental study on acoustic agglomeration of fine particles from coal combustion / H. Chen, W. Liu, J. Li, X. Xun, X. Shen // *Proceedings – 2010 International Conference on Digital Manufacturing and Automation*. – ICDMA 2010. – Vol. 1. – P. 702–705.
12. Numerical investigation of PM<sub>2.5</sub> size enlargement by heterogeneous condensation for particulate abatement / F. Fan, S. Zhang, W. Wang, J. Yan, M. Su // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2019. – Vol. 125. – P. 197–206.
13. Ng B.F., Xiong J.W., Wan M.P. Application of acoustic agglomeration to enhance air filtration efficiency in airconditioning and mechanical ventilation (ACMV) systems // *PLoS One*. – 2017. – Vol. 12. – № 6. – e0178851.
14. Power ultrasonic transducer with extensive radiator for industrial processing / J.A. Gallego-Juarez, G. Rodriguez, V. Acosta, E. Riera // *Ultrasonic Sonochemistry*. – 2010. – Vol. 17. – P. 954–964.
15. Sheng C., Shen X. Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles // *Aerosol Science and Technology*. – 2007. – Vol. 4. – № 1. – P. 1–13.
16. König. W. Hydrodynamisch-akustische Untersuchungen. Über die Kräfte zwischen zwei Kugeln in einer schwingenden Flüssigkeit und über die Entstehung der Kundtschen Staubfiguren // *Ann. Phys. und Chem.* – 1891. – Vol. 42. – № 4. – P. 549.
17. Brandt O., Freund H., Niedemann E. Zur Theorie der akustischen Koagulation // *Kolloid-Zeitschrift*. – 1936. – Vol. 77. – P. 103–115.
18. 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.
19. Руденко О.В., Солуян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики. – М.: Наука, 1975. – 287 с.
20. Yong S., Sangmo K. Acoustic Streaming // *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*. – New York: Springer, 2014. – P. 25–33.
21. Способ ультразвуковой коагуляции: пат. Рос. Федерация №2759506; заявл. 12.02.2021; опубл. 15.11.2021, Бюл. № 32. – 9 с.
22. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A. Summation of high-frequency Langevin transducers vibrations for increasing of ultrasonic radiator power // *Ultrasonics*. – 2021. – Vol. 114. – 106413.

#### Информация об авторах

**Владимир Николаевич Хмелев**, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27. vnh@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7089-3578>

**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>

**Сергей Александрович Терентьев**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27. sergey@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6989-9769>

Поступила в редакцию: 15.09.2023

Поступила после рецензирования: 29.09.2023

Принята к публикации: 24.05.2024

#### REFERENCES

1. Halonen J., Lanki T., Yli-Tuomi T., Tiittanen P., Kulmala V., Pekkanen J. Particulate air pollution acute cardio respiratory hospital admissions and mortality among the elderly. *American Journal of Epidemiology*, 2009, vol. 20, no. 1, pp. 143–153.
2. Lu X., Zhang S., Xing J., Wang Y., Chen W., Ding D., Hao J. Progress of air pollution control in China and its challenges and opportunities in the ecological civilization era. *Engineering*, 2020, vol. 6, no. 12, pp. 1423–1431.
3. Miller L., Xu X. Ambient PM<sub>2.5</sub> human health effects – findings in China and research directions. *Atmosphere*, 2018, vol. 9, no. 424, pp. 1–16.
4. Pope C.A., Ezzati M., Cannon J.B., Allen R.T., Jerrett M., Burnett R.T. Mortality risk and PM 2.5 air pollution in the USA: an analysis of a national prospective cohort. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 245–252.
5. Wang Lingjuan. *Theoretical study of cyclone design*. Diss. Texas, 2004. 137 p.
6. Pitsukha E.A., Teplitsky Yu.S., Zhukova Yu.V. Study of flows in a cyclone chamber. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2011, vol. 84, no. 4, pp. 813–819. (In Russ.)
7. Pitsukha E. A., Teplitsky Yu. S., Borodulya V. A. Entrainment of particles from the cyclone chamber. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2012, vol. 85, no. 6, pp. 1196–1201. (In Russ.)
8. Hoekstra A.J. *Gas flow field and collection efficiency of cyclone separators*. Diss. Stevinweg, 2000. 165 p.

9. Riera E., González-Gomez I., Rodriguez G., Gallego-Juarez J.A. Ultrasonic agglomeration and preconditioning of aerosol particles for environmental and other applications. *Power Ultrasonics*. Eds. J.A. Gallego-Juarez, K.F. Graff. Oxford, Woodhead Publ., 2015. pp. 1023–1058.
10. 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 Russ.)
11. Chen H., Liu W., Li J., Xun X., Shen X. Experimental study on acoustic agglomeration of fine particles from coal combustion. *Proceedings – 2010 International Conference on Digital Manufacturing and Automation, ICDMA, 2010*, vol. 1, pp. 702–705.
12. Fan F., Zhang S., Wang W., Yan J., Su M. Numerical investigation of PM2.5 size enlargement by heterogeneous condensation for particulate abatement. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, vol. 125, pp. 197–206.
13. Ng B.F., Xiong J.W., Wan M.P. Application of acoustic agglomeration to enhance air filtration efficiency in airconditioning and mechanical ventilation (ACMV) systems. *PLoS One*, 2017, vol. 12, no. 6, e0178851.
14. Gallego-Juarez J.A., Rodriguez G., Acosta V., Riera E. Power ultrasonic transducer with extensive radiator for industrial processing. *Ultrasonic Sonochemistry*, 2010, vol. 17, pp. 954–964.
15. Sheng C., Shen X. Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles. *Aerosol Science and Technology*, 2007, vol. 41, no. 1, pp. 1–13.
16. König. W. Hydrodynamic-acoustic investigations. On the forces between two spheres in a vibrating fluid and on the formation of Kundt's dust figures. *Ann. Phys. und Chem.*, 1891, vol. 42, no. 4, pp. 549. (In Germ.)
17. Brandt O., Freund H., Hiedemann E. On the theory of acoustic coagulation. *Kolloid-Zeitschrift*, 1936, vol. 77, pp. 103–115. (In Germ.)
18. 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  $\mu\text{m}$ . *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 10, pp. 127–139. (In Russ.)
19. Rudenko O.V., Soluyan S.I. *Theoretical bases of nonlinear acoustics*. Moscow, Nauka Publ., 1975. 287 p. (In Russ.)
20. Yong S., Sangmo K. Acoustic streaming. *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*. New York, Springer, 2014. pp. 25–33.
21. Bochenkov A.S., Golykh R.N., Nesterov V.A., Tertishnikov P.P., Khmelev V.N., Khmelev M.V., Tsyganok S.N., Shalunov A.V. *Ultrasonic coagulation method*. Patent RF, no. 2759506, 2021. (In Russ.)
22. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A. Summation of high-frequency Langevin transducers vibrations for increasing of ultrasonic radiator power. *Ultrasonics*, 2021, vol. 114, 106413.

#### Information about the authors

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

**Viktor A. Nesterov**, Cand. Sc., Leading Researcher, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay 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, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation. shalunov@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5299-9931>

**Sergey A. Terentyev**, Cand. Sc., Senior Researcher, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation. sergey@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6989-9769>

Received: 15.09.2023

Revised: 29.09.2023

Accepted: 24.05.2024