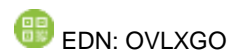




Научная статья  
2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)  
УДК 66.084.065

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.011



## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОАГУЛЯТОРА, ОСНОВАННОГО НА ВИХРЕВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПОТОКАХ

Андрей Викторович Шалунов<sup>1</sup>, Виктор Александрович Нестеров<sup>2</sup>,  
Роман Николаевич Голых<sup>3</sup>, Александр Сергеевич Боченков<sup>4</sup>,  
Роман Сергеевич Доровских<sup>5</sup>, Владимир Николаевич Хмелев<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийск, Россия

<sup>1</sup> Shalunov@u-sonic.ru

<sup>2</sup> nva@u-sonic.ru

<sup>3</sup> romangl90@gmail.com

<sup>4</sup> sanya.bochankov@mail.ru

<sup>5</sup> dorovskih\_Roman@mail.ru

<sup>6</sup> vnh@u-sonic.ru

**Аннотация.** В работе представлен новый способ и конструкция газоочистного оборудования, состоящего из ультразвукового коагулятора обеспечивающего повышенную эффективность отделения частиц размером менее 2,5 мкм от газовой среды и циклона для последующего улавливания укрупненных частиц на выходе коагулятора. Повышение эффективности улавливания частиц достигается за счет сочетания двух акустических механизмов: воздействие в стоячей волне и формирование вихревых акустических потоков. Для практической реализации ультразвукового коагулятора использован плоский изгибно-колеблющийся дисковый излучатель. Экспериментально выявлено, что при размере воздушного промежутка между излучателем и отражателем, кратным половине длине волны, в нем формируются вихревые акустические течения. При этом дисперсные частицы вовлекаются в колебательное движение, осуществляется многократное перенаправление частиц вдоль линий тока газа. Это обеспечивает локальное повышение концентрации дисперсных частиц в периферийной области вихря и их взаимное перемещение в пределах узловых областей и между ними. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что совместное воздействие двумя акустическими механизмами обеспечивает увеличение вероятности столкновения частиц и их время пребывания в ультразвуковом поле. Проведенные эксперименты показали, что эффективность улавливания частиц 2.5 мкм разработанным газоочистным оборудованием повышается с 50 % до 96%.

**Ключевые слова:** ультразвук, ультразвуковой излучатель, коагуляция, стоячая волна, вторичные эффекты, коагулятор.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00121.

**Для цитирования:** Разработка и исследование ультразвукового коагулятора, основанного на вихревых акустических потоках / А. В. Шалунов [и др.]. // Ползуновский вестник. 2022. № 4. Т.2. С. 84–92. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.011. EDN: <https://elibrary.ru/OVLXGO>.

Original article

## DEVELOPMENT AND RESEARCH OF ULTRASONIC COAGULATOR BASED ON VORTEX ACOUSTIC FLOWS

Andrey V. Shalunov <sup>1</sup>, Viktor A. Nesterov <sup>2</sup>, Roman N. Golykh <sup>3</sup>,  
Alexander S. Bochenkov <sup>4</sup>, Roman S. Dorovskikh <sup>5</sup>, Vladimir N. Khmelev <sup>6</sup>

1, 2, 3, 4, 5, 6 Biysk Technological Institute (branch) of the Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russia

<sup>1</sup> Shalunov@u-sonic.ru

<sup>2</sup> nva@u-sonic.ru

<sup>3</sup> romangl90@gmail.com

<sup>4</sup> sanya.bochankov@mail.ru

<sup>5</sup> dorovskikh\_Roman@mail.ru

<sup>6</sup> vnh@u-sonic.ru

**Abstract.** *The paper presents a new method and design of gas cleaning equipment, consisting of an ultrasonic coagulator providing increased efficiency in separating particles smaller than 2.5 μm from the gaseous medium and a cyclone for subsequent capture of coarse particles at the coagulator outlet. An increase in the efficiency of particle trapping is achieved through a combination of two acoustic mechanisms: exposure in a standing wave and the formation of vortex acoustic flows. For the practical implementation of the ultrasonic coagulator, a flat flexural-oscillating disk radiator was used. It has been experimentally revealed that when the size of the air gap between the radiator and the reflector is a multiple of half the wavelength, vortex acoustic flows are formed in it. In this case, dispersed particles are involved in oscillatory motion, and the particles are repeatedly redirected along the gas flow lines. This provides a local increase in the concentration of dispersed particles in the peripheral region of the vortex and their mutual movement within the nodal regions and between them. The results of the experimental studies have shown that the combined action of two acoustic mechanisms provides an increase in the probability of collision of particles and their residence time in the ultrasonic field. The experiments performed have shown that the efficiency of capturing 2.5 μm particles by the developed gas cleaning equipment increases from 50 % to 96 %.*

**Keywords:** *ultrasonic, ultrasonic transducer, coagulation, standing wave, secondary effects, coagulator.*

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

**For citation:** Shalunov, A. V., Nesterov, V. A., Golykh, R. N., Bochenkov, A. S., Dorovskikh, R. S. & Khmelev, V. N. (2021). Development and research of ultrasonic coagulator based on vortex acoustic flows. *Polzunovskiy vestnik*, 4(2), 84-92. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.011. EDN: <https://elibrary.ru/OVLXGO>.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время остро стоит проблема загрязнения окружающей среды промышленными выбросами аэрозолей. Такие выбросы негативно влияют на окружающую среду и в том числе на здоровье человека. Среди них наиболее опасными считаются частицы менее 2,5 мкм, обладающие высокой общей поверхностью (55 % и более от общей поверхности частиц) и счетной концентрацией (95 % и более от суммарной счетной концентрации) [1].

Разработанное и применяемое газоочистное оборудование недостаточно эффективно для очистки промышленных выбросов от частиц такого размера [2–4]. Наиболее перспективным способом повышения эффективности газоочистного оборудования является воздействие на газовые среды ультразвуковыми колебаниями с целью укрупнения частиц. Однако проведенные многими авторами исследования (V.N. Khmelev, J.A. Gallego-Juarez, R.R. Andres, C. Sheng) показали, что ультразвуковая коагуляция имеет недостаточную эффективность для частиц размером менее 2,5 мкм [5–8].

Поэтому задача повышения эффективности ультразвуковой (УЗ) коагуляции на сегодняшний день является актуальной и требующей решения.

Для решения поставленной задачи авторами были рассмотрены механизмы УЗ коагуляции. Анализ ортокинетического и гидродинамического механизмов акустической коагуляции [6–8] свидетельствует о том, что повышение эффективности коагуляции частиц размером менее 2,5 мкм за счет ультразвуковых колебаний не приносит желаемого результата, что обусловлено следующими факторами:

- использование низкой частоты ультразвукового воздействия (менее 22 kHz), при которой все частицы размером 2,5 мкм и меньше в равной степени вовлекаются в колебательное движение, что не способствует их соударениям;

- отсутствие условий для возникновения вторичных эффектов, повышающих эффективность ультразвуковой (УЗ) коагуляции вследствие воздействия на открытые объемы воздушного пространства с размерами, во много раз превышающих длину волны ультразвуковых колебаний;

- отсутствие взаимодействия между частицами при реализации режима стоячей волны вследствие удерживания уже укрупненных частиц ультразвуковым полем в узловых областях, вследствие чего не происходит более эффективная коагуляция. При этом не происходит взаимного перемещения частиц без наличия дополнительного потока газа;

- низкая вероятность столкновения частиц при малых концентрациях даже при высоком уровне звукового давления за счет больших расстояний между частицами.

### **СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОАГУЛЯЦИИ**

Анализ механизмов УЗ коагуляции позволил установить, что для повышения вероятности столкновения частиц необходимо создать дополнительное движение частиц, способствующее их столкновению и объединению.

В качестве интенсифицирующего фактора, увеличивающего эффективность взаимодействия частиц, авторами предложено использовать вторичные эффекты, возникающие при формировании высокоинтенсивного ультразвукового воздействия. При этом высокоинтенсивное УЗ воздействие на газодисперсные системы формирует две основные группы нелинейных эффектов:

- возникающие за счет явлений переноса импульса газовой фазы между частицами;

- возникающие за счет колебательных движений твердых частиц друг относительно друга.

Одним из таких интенсифицирующих эффектов, относящихся к первой группе, является так называемый ультразвуковой ветер [3–4, 8–9]. Однако воздействие ультразвуковыми (УЗ) колебаниями в открытом объеме или протяженном газоходе формирует лишь радиационное давление, позволяющее перемещать частицы в одном направлении без существенного увеличения эффективности взаимодействия частиц между собой [3–4].

Для увеличения эффективности взаимодействия частиц необходимо реализовать их многократное перенаправление, чтобы осуществлялось их взаимное перемещение. Помимо этого, существенно повысить эффективность объединения частиц, особенно при малой концентрации частиц, позволяет их локализация с целью повышения концентрации частиц в определенных областях.

Наиболее эффективным способом осуществлять перенаправление и локализацию частиц является формирование потоков вихревого характера.

Вихревые потоки позволяют увеличить эффективность коагуляции за счет следующих факторов:

- увеличения скорости взаимного перемещения частиц;

- увеличения времени взаимодействия частиц в УЗ поле за счет их удержания в вихревых областях;

- формирования зон с повышенной концентрацией частиц.

Поэтому для создания зон с вихревыми акустическими потоками авторами статьи предложено формировать неоднородное ультразвуковое поле. В таком поле формируются вихревые течения между областями, колеблющимися в противофазе. Формирование неоднородного ультразвукового поля и воздействие им на газодисперсный поток осуществляют изгибно-колеблющимся дисковым излучателем с плоской фронтальной излучающей поверхностью и установленным на определенном расстоянии отражателем. При этом на фронтальной поверхности излучателя формируются максимумы и минимумы колебаний, чередующиеся последовательно на расстоянии друг от друга, соответствующем половине длины волны изгибных колебаний в материале пластины [9–12].

Для увеличения интенсивности воздействия (повышения уровня звукового давле-

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОАГУЛЯТОРА, ОСНОВАННОГО НА ВИХРЕВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПОТОКАХ

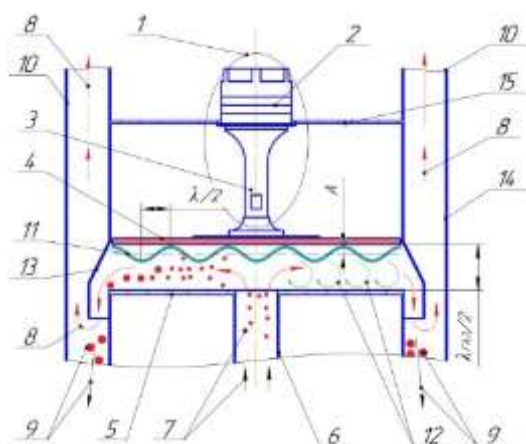
ния) отражатель должен быть установлен на резонансном расстоянии от излучателя для формирования стоячей волны.

Характерные размеры вихрей определяются длиной волны в газовой среде, а их количество – расстоянием между соседними участками УЗ поля, колеблющимися в противофазе, размерами излучателя и расстоянием между излучателем и отражателем [8–9, 13–15].

Для обеспечения минимального затухания при обеспечении достаточно большого одновременно обрабатываемого объема расстояние между излучателем и отражателем выбрано равным длине волны ( $\lambda$ ).

### ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОАГУЛЯЦИИ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ

Для повышения эффективности коагуляции частиц с использованием вторичных эффектов (потоков вихревого характера) было разработано устройство (рисунок 1).



1 – ультразвуковая колебательная система (УЗКС); 2 – преобразователь электрических колебаний в механические; 3 – концентратор-усилитель механических колебаний; 4 – дисковый излучатель; 5 – отражатель; 6 – входной патрубок; 7 – загрязненный газ; 8 – очищенный газ; 9 – объединенные частицы; 10 – выходные патрубки; 11 – распределение амплитуд; 12 – вихревые течения; 13 – перегородка; 14 – корпус; 15 – фланец;

$\lambda$  – расстояние между излучателем и отражателем

Рисунок 1 – Устройство для реализации ультразвуковой коагуляции

Figure 1 - Device for the implementation of ultrasonic coagulation

Основу устройства коагуляции дисперсных частиц составляет корпус (поз. 14), и оно работает следующим образом.

Газовый поток поступает в патрубок (поз. 6), установленный в центре отражателя (поз. 5). Таким образом, газодисперсный поток равномерно распространяется от центральной области к периферии (к перегородке, поз. 13). В процессе распространения на поток осуществляется воздействие неоднородным УЗ-полем, которое формируется между поверхностями отражателя (поз. 5) и излучателя (поз. 4). Выведение потока (поз. 8) газа и укрупненных частиц осуществляется через патрубки (поз. 10). При этом определенная доля укрупненных частиц (поз. 9) при огибании перегородки (поз. 13) попадает в бункер.

Для осуществления УЗ воздействия на газодисперсную среду был использован дисковый излучатель диаметром  $D = 200$  мм. Характеристики используемой колебательной системы приведены в таблице 1.

Внешний вид ультразвукового дискового излучателя представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Фото ультразвукового дискового излучателя

Figure 2 - Photo of ultrasonic disk radiator

Возможность регулирования мощности электронного генератора позволяет оценить степень повышения эффективности коагуляции и улавливания частиц в зависимости от уровня звукового давления.

Для определения возможности формирования равномерного распределения звукового поля со средним уровнем звукового давления не ниже  $L = 165$  dB, а также для определения резонансного расстояния между излучателем и отражателем, при котором обеспечивается максимальный уровень звукового давления, проведено моделирование звукового поля методом конечных элементов (МКЭ) в системе ANSYS. Картина распределения уровня звукового давления приведена на рисунке 3.

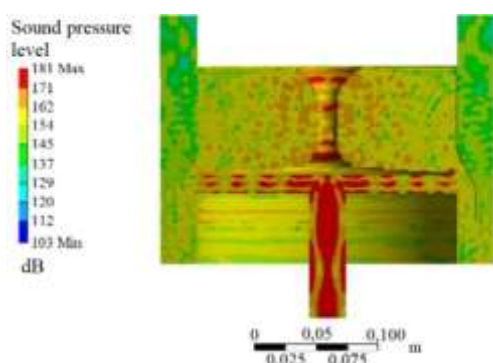


Рисунок 3 – Распределение уровня звукового давления внутри разработанной коагуляционной камеры

Figure 3 - Sound pressure level distribution inside the developed coagulation chamber

Таблица 1 – Технические характеристики ультразвукового аппарата

Table 1 - Technical characteristics of the ultrasonic apparatus

Наименование параметра	Значение
Диаметр дискового излучателя, мм	200
Частота колебаний излучателя, Гц	22400
Мощность, Вт	150
Амплитуда колебаний излучателя, мкм	45

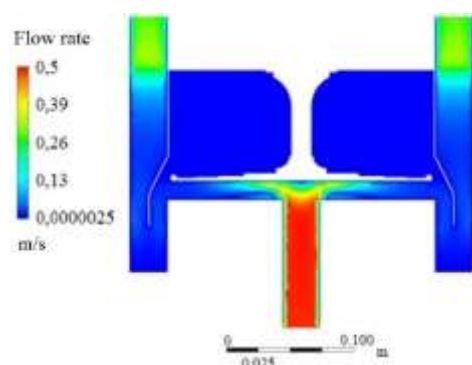


Рисунок 4 – Распределение скоростей потока газа внутри разработанного оборудования для коагуляции частиц

Figure 4 - Distribution of gas flow rates inside the developed equipment for particle coagulation

Для определения оптимального расхода газа, в соответствии с проведенными исследованиями [16] было установлено, что необходимое время воздействия должно быть не менее 0,7 секунд.

Далее для определения оптимального расхода было проведено моделирование распределения скоростей потока газа в системе конечно-элементного анализа Ansys (рисунок 4).

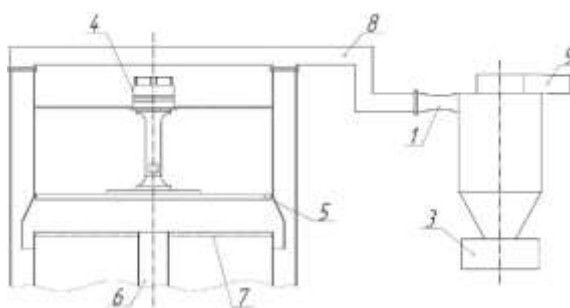
В качестве исходных данных при разработке были использованы: диаметр излучателя –  $D = 0,2$  м; время ультразвукового воздействия –  $T = 0.7$  секунд; расстояние между излучателем и отражателем  $\lambda = 0,015$  м (15 мм – резонансное расстояние). На основе этих данных была проведена оптимизация конструкции камеры коагуляции. Для расчета оптимального расхода газа использовано следующие выражение:

$$Q = \frac{\lambda S}{T} = 0,67 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с} = 2,4 \text{ м}^3/\text{час}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – расстояние между излучателем и отражателем, м;  $S$  – площадь свободного сечения камеры коагуляции,  $\text{м}^2$ ;  $T$  – минимально необходимое время УЗ воздействия (время пребывания частиц в камере), с.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛАВЛИВАНИЯ МЕЛКИХ ЧАСТИЦ

Для практического применения разработанного устройства для коагуляции высокодисперсных частиц она была дополнена циклоном, установленным на выходе коагуляционной камеры (рисунок 5).



1 – входной патрубок циклона; 2 – выходной патрубок циклона (к вентустановке); 3 – бункер циклона; 4 – УЗКС; 5 – дисковый излучатель; 6 – входной патрубок камеры коагуляции; 7 – отражатель; 8 – соединительный патрубок; 9 – отводной патрубок

Рисунок 5 – Схема газоочистного оборудования

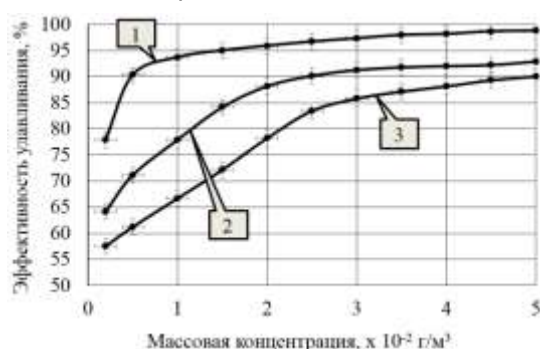
Figure 5 - Sketch of gas cleaning equipment

Для изучения возможностей эффективности улавливания частиц с помощью разработанного газоочистного оборудования были

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОАГУЛЯТОРА, ОСНОВАННОГО НА ВИХРЕВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПОТОКАХ

проведены экспериментальные исследования влияния на эффективность массовой концентрации, уровня звукового давления и начального размера частиц.

Для определения влияния массовой концентрации частиц на эффективность коагуляции были проведены исследования, по результатам которых получена зависимость эффективности коагуляции от массовой концентрации частиц различного диаметра (рисунок 6). Исследования проводились при следующих условиях: уровень звукового давления –  $L = 165$  дБ; время воздействия –  $T = 0,7$  с; расстояние от отражателя до излучателя –  $\lambda = 15$  мм; расход газа  $Q = 2,4$  м<sup>3</sup>/час.

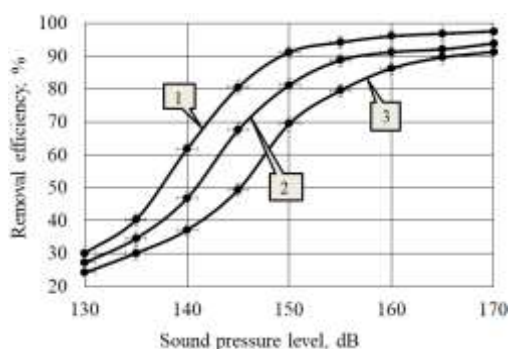


1 –  $d_{32(0)} = 2,5$  мкм; 2 –  $d_{32(0)} = 1,5$  мкм;  
3 –  $d_{32(0)} = 0,5$  мкм

Рисунок 6 – Зависимость эффективности улавливания от массовой концентрации частиц

Figure 6 - Dependence of particle removal efficiency on the mass concentration of particles

Как видно из графиков, при малых концентрациях до  $N_{inlet} = 2 \cdot 10^{-2}$  г/м<sup>3</sup> происходит заметное повышение эффективности процесса коагуляции. При концентрации  $N_{inlet} = 3 \cdot 10^{-2}$  г/м<sup>3</sup> и выше рост эффективности замедляется.



1 –  $d_{32(0)} = 2,5$  мкм; 2 –  $d_{32(0)} = 1,5$  мкм;  
3 –  $d_{32(0)} = 0,5$  мкм

Рисунок 7 – Зависимость эффективности улавливания от уровня звукового давления

Figure 7 - Dependence of particle removal efficiency on sound pressure level

Для определения влияния уровня звукового давления на эффективность коагуляции были проведены экспериментальные исследования при различных размерах частиц ( $d_{32(0)} = 2,5$  мкм;  $d_{32(0)} = 1,5$  мкм;  $d_{32(0)} = 0,5$  мкм). Исследования проводились при следующих условиях: время воздействия –  $T = 0,7$  с; расстояние от отражателя до излучателя –  $\lambda = 15$  мм; концентрация  $N_{inlet} = 2 \cdot 10^{-2}$  г/м<sup>3</sup>; расход газа  $Q = 2,4$  м<sup>3</sup>/час. Результаты исследования (рисунок 7).

Проанализировав графики, можно сделать вывод, о том, что чем выше уровень звукового давления, тем выше эффективность коагуляции. При уровне звукового давления  $L = 130$  дБ УЗ воздействие практически не влияет на эффективность процесса коагуляции. Максимально высокий уровень звукового давления внутри камеры коагуляции, разработанного оборудования составил  $L = 170$  дБ. Однако стоит отметить, что максимум значения эффективности достигается при уровне звукового давления  $L = 160$  дБ. При больших значениях уровня звукового давления рост эффективности сильно замедляется. Это позволяет установить, что при уровне звукового давления  $L = 160$  дБ вихревые акустические потоки дискового излучателя вносят наибольший вклад в эффективность коагуляции. Отсутствие роста эффективности после  $L = 165$  дБ свидетельствует о разрушении агломератов при слишком высоких уровнях звукового давления.

Далее была определена фракционная эффективность с использованием разработанного газоочистного оборудования.

Для генерации частиц различного начального диаметра использовали Aerosol Toras ATM 226 для генерации частиц от 0,2 до 1 мкм (жидкость DEHS) и ультразвуковой ингалятор MUSSON для генерации частиц размером от 1 до 10 мкм (водопроводная вода). Средний уровень звукового давления в объеме коагуляционной камеры составлял  $L = 165$  дБ.

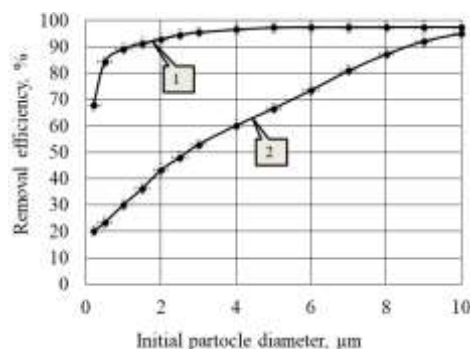


Рисунок 8 – Фракционная эффективность разработанного газоочистного оборудования

Figure 8 - Fractional efficiency of the developed gas cleaning equipment

В результате проведенных экспериментальных исследований получены данные о фракционной эффективности разработанного газоочистного оборудования (рисунок 8). Исследования проводились при следующих условиях: уровень звукового давления –  $L = 165$  дБ; время воздействия –  $T = 0,7$  с; расстояние от отражателя до излучателя –  $\lambda = 15$  мм; начальная концентрация  $N_{inlet} = 2 \cdot 10^{-2}$  г/м<sup>3</sup>; расход газа  $Q = 2,4$  м<sup>3</sup>/час.

Анализ графиков показал, что эффективность улавливания частиц без ультразвукового воздействия (кривая 2, рис. 8) для частиц размером менее 5 мкм на 30 % ниже, чем при использовании ультразвукового воздействия (кривая 1, рис. 8) в качестве предварительной подготовки газодисперсного потока, а для частиц размером менее 2,5 мкм эффективность улавливания частиц без УЗ ниже, более чем на 40 %.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы были рассмотрены основные механизмы акустической коагуляции, анализ которых выявил факторы, влияющие на эффективность коагуляции мелких частиц размером менее 2,5 мкм. Основными из них являются создание условий для формирования вторичных эффектов (вихревых акустических потоков). Разработана конструкция устройства для эффективной коагуляции тонкодисперсных частиц, обеспечивающая создание вихревых акустических потоков с характерными размерами, равными половине длине волны ультразвуковых колебаний (вихревые течения формируются между областями, колеблющимися в противофазе). Проведенные экспериментальные исследования данного газоочистного оборудования выявили, что эффективность удаления частиц размером менее 2,5 мкм достигает 96–98 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Halonen, J., Lanki, T., Yli-Tuomi, T., Tittanen, P., Kumala, V. & Pekkanen, J. (2009). Particulate air pollution acute cardio respiratory hospital admissions and mortality among the elderly. *American Journal of Epidemiology*, 20(1), 143-153.

2. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Bochenkov, A.S., Nesterov, V.A., Terentiev, S.A. & Zorin, S.S. Experimental Stand for the Research of the Process of Ultrasonic Coagulation of Aerosols. *20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2019: Conference Proceedings*. NSTU: Novosibirsk, Russia.

3. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Nesterov, V.A.,

Dorovskikh, R.S. & Golykh, R.N. Ultrasonic radiators for the action on gaseous media at high temperatures. *EDM'2015: Conference Proceedings*. NSTU: Novosibirsk, Russia.

4. Khmelev, V.N., Nesterov, V.A., Bochenkov, A.S. & Shalunov, A.V. (2021). The Limits of fine particles ultrasonic coagulation. *Symmetry*, 13(9), 1-19, DOI: 10.3390/sym13091607.

5. Gallego-Juarez, J.A., Rodriguez, G., Acosta, V. & Riera, E. (2010). Power ultrasonic transducer with extensive radiator for industrial processing. *Ultrasonic Sonochemistry*, 17, 954-964.

6. Andres, R.R., Acosta, V.M., Lucas, M. & Riera, E. (2018). Modal analysis and nonlinear characterization of an airborne power ultrasonic transducer with rectangular plate radiator. *Ultrasonic*, 82, 345-356.

7. Khmelev, V.N., Nesterov, V.A., Shalunov, A.V., Barsukov, R.V. & Tsyganok, S.N. (2020). Longitudinally oscillating ultrasonic emitter for influencing gas-dispersed systems. *J. Phys.*, 1679, 1-8, DOI:10.1088/1742-6596/1679/2/022008.

8. Sheng, C. & Shen, X. (2007). Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles. *Aerosol Science and Technology*, 41, 1-13.

9. Capperan, P., Somers, J., Richter, K. & Fourcaudot, S. (1995). Acoustic agglomeration of a glycol for aerosol: Influence of particle concentration and intensity of the sound field at two frequencies. *Aerosol Sci.* 26, 595-612.

10. Sarabia, E., Gallego-Juarez, J.A., Rodrigues-Corral, G., Elvira-Segura, L. & Gonzalez-Gomaz, I. (2000). Application of high-power ultrasound enhance fluid/solid particle separation processes. *Ultrasonics*, 38, 642-646.

11. Song, L., Koopmann, G.H. & Hoffmann, T.L. (1994). An improved theoretical model of acoustic agglomeration. *J Vib Acoust.* 116, 208-214.

12. Riera, E., Gonzalez, I., Rodrigues-Corral, G. & Gallego-Juarez, J.A. (2015). Ultrasonic agglomeration and preconditioning of aerosol particles for environmental and other applications. *Ultrasonics*. 1023-1058.

13. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Dorovskikh, R.S., Golykh, R.N. & Nesterov, V.A. The measurements of acoustic power introduced into gas medium by the ultrasonic apparatuses with the disk-type radiators. *EDM'2016: Conference Proceedings*. NSTU: Novosibirsk, Russia.

14. Ta-Chih, H., Sheng-Hsiu, H., Chia-Wei, H., Chih-Chieh, C. & Po-Kai, C. (2015). Effects of the geometric configuration on cyclone performance. *Journal of Aerosol Science*, 86, 1-12.

15. Xie, B., Li, S., Jin, H., Hu, S., Wang, F. & Zhou, F. (2018). Analysis of the performance of a novel dust collector combining cyclone separator and cartridge filter. *Powder Technology*, 339, 695-701.

16. Хмелев, В.Н., Шалунов, А.В., Голых, Р.Н., Нестеров, В.А., Боченков, А.С. Моделирование вихревых акустических течений в воздушном промежутке как фактора бесконтактной ультразвуковой интенсификации химико-технологических процессов // Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума, посвященного 110-летию А.Н. Плановского, в

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОАГУЛЯТОРА, ОСНОВАННОГО НА ВИХРЕВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПОТОКАХ

рамках Третьего Международного Косыгинского форума "Современные задачи инженерных наук". Москва: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2021. – С. 190–194.

### Информация об авторах

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

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

**Р. Н. Голых** – доктор технических наук, профессор кафедры МСИА Бийского технологического института (филиал) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова».

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

**Р. С. Доровских** – научный сотрудник отдела научно-исследовательской работы сотрудников и преподавателей Бийского технологического института (филиал) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова».

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

### REFERENCES

1. Halonen, J., Lanki, T., Yli-Tuomi, T., Tittanen, P., Kumala, V. & Pekkanen, J. (2009). Particulate air pollution acute cardio respiratory hospital admissions and mortality among the elderly. *American Journal of Epidemiology*, 20(1), 143-153.

2. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Bochenkov, A.S., Nesterov, V.A., Terentiev, S.A. & Zorin, S.S. Experimental Stand for the Research of the Process of Ultrasonic Coagulation of Aerosols. *20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2019: Conference Proceedings*. NSTU: Novosibirsk, Russia.

3. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Nesterov, V.A., Dorovskikh, R.S. & Golykh, R.N. Ultrasonic radiators for the action on gaseous media at high temperatures. *EDM'2015: Conference Proceedings*. NSTU: Novosibirsk, Russia.

4. Khmelev, V.N., Nesterov, V.A., Bochenkov, A.S. & Shalunov, A.V. (2021). The Limits of fine particles

ultrasonic coagulation. *Symmetry*, 13(9), 1-19, DOI: 10.3390/sym13091607.

5. Gallego-Juarez, J.A., Rodriguez, G., Acosta, V. & Riera, E. (2010). Power ultrasonic transducer with extensive radiator for industrial processing. *Ultrasonic Sonochemistry*, 17, 954-964.

6. Andres, R.R., Acosta, V.M., Lucas, M. & Riera, E. (2018). Modal analysis and nonlinear characterization of an airborne power ultrasonic transducer with rectangular plate radiator. *Ultrasonic*, 82, 345-356.

7. Khmelev, V.N., Nesterov, V.A., Shalunov, A.V., Barsukov, R.V. & Tsyganok, S.N. (2020). Longitudinally oscillating ultrasonic emitter for influencing gas-dispersed systems. *J. Phys.*, 1679, 1-8, DOI:10.1088/1742-6596/1679/2/022008.

8. Sheng, C. & Shen, X. (2007). Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles. *Aerosol Science and Technology*, 41, 1-13.

9. Capperan, P., Somers, J., Richter, K. & Fourcaudot, S. (1995). Acoustic agglomeration of a glycol for aerosol: Influence of particle concentration and intensity of the sound field at two frequencies. *Aerosol Sci.* 26, 595-612.

10. Sarabia, E., Gallego-Juarez, J.A., Rodrigues-Corral, G., Elvira-Segura, L. & Gonzalez-Gomaz, I. (2000). Application of high-power ultrasound enhance fluid/solid particle separation processes. *Ultrasonics*, 38, 642-646.

11. Song, L., Koopmann, G.H. & Hoffmann, T.L. (1994). An improved theoretical model of acoustic agglomeration. *J Vib Acoust.* 116, 208-214.

12. Riera, E., Gonzalez, I., Rodrigues-Corral, G. & Gallego-Juarez J.A. (2015). Ultrasonic agglomeration and preconditioning of aerosol particles for environmental and other applications. *Ultrasonics*. 1023-1058.

13. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Dorovskikh, R.S., Golykh, R.N. & Nesterov, V.A. The measurements of acoustic power introduced into gas medium by the ultrasonic apparatuses with the disk-type radiators. *EDM'2016: Conference Proceedings*. NSTU: Novosibirsk, Russia

14. Ta-Chih, H., Sheng-Hsiu, H., Chia-Wei, H., Chih-Chieh, C. & Po-Kai, C. (2015). Effects of the geometric configuration on cyclone performance. *Journal of Aerosol Science*, 86, 1-12.

15. Xie, B., Li, S., Jin, H., Hu, S., Wang, F. & Zhou, F. (2018). Analysis of the performance of a novel dust collector combining cyclone separator and cartridge filter. *Powder Technology*, 339, 695-701.

16. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Golykh, R.N., Nesterov, V.A. & Bochenkov, A.S. Simulation of vortex acoustic flows in air gaps as a factor of contactless ultrasonic intensification of chemical-technological processes. *Proceedings III International Kosygin Forum Modern problems of engineering sciences* (Moscow: Russian State University named after A.N. Kosygin).



А. В. ШАЛУНОВ, В. А. НЕСТЕРОВ, Р. Н. ГОЛЫХ, А. С. БОЧЕНКОВ,  
Р. Н. ДОРОВСКИХ, В. Н. ХМЕЛЕВ

**Information about the authors**

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

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

*R. N. Golykh - Doctor of Engineering Sciences Associate Professor of the Department of Methods and Measuring Instruments and Automation of the Biysk Technological Institute*

*(branch) of the Polzunov Altai State Technical University.*

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

*R. S. Dorovskikh - Research Fellow of the Department of Research Work of Staff and Faculty of the Biysk Technological Institute (branch) of the Polzunov Altai State Technical University.*

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

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

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

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