

Развитие модели дискретной фазы для расчёта ультразвуковой коагуляции взвешенных частиц в эйкартовских течениях

А. В. Шалунов^{*,1}, Р. Н. Голых^{*}, В. Н. Хмелёв^{*}, В. А. Нестеров^{*},
А. С. Боченков^{*}

** Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», Бийск, Россия*

Аннотация

Одним из наиболее эффективных способов улавливания аэрозольных частиц является предварительное объединение частиц в агломераты под действием синусоидальных ультразвуковых (УЗ) колебаний высокой интенсивности (ультразвуковая агломерация) для дальнейшего улавливания укрупнённых частиц традиционными методами (инерционное или гравитационное осаждение, фильтрация сквозь пористый материал и т. д.). На сегодняшний день эффективность УЗ агломерации многократно доказана для частиц размером более 2.5 мкм [2-4]. Однако ультразвуковая агломерация, основанная на известных механизмах взаимодействия частиц, оказывается мало эффективной при воздействии на частицы размером менее 2.5 мкм и особенно менее 1 мкм. При этом возможности линейного акустического поля на сегодняшний день хорошо изучены, и установлено, что воздействие линейным акустическим полем не обеспечивает эффективной коагуляции частиц PM2.5. А при повышении уровня звукового давления линейного акустического поля укрупнённые частицы (особенно, если речь идёт о твёрдых частицах) начинают разрушаться. Поэтому авторами предложено задействовать нелинейные эффекты, которые заключаются в формировании вихревых акустических (эйкартовских) течений, способных вызвать локальное повышение концентрации частиц и, следовательно, увеличение эффективности коагуляции. Установлено, что формирование вихревых акустических потоков в резонансном промежутке способно дополнительно увеличить эффективность ультразвуковой коагуляции не менее чем в 1.5 раза [3].

Ключевые слова

Эйкартовские течения, коагуляция, ультразвук, излучатель, численная модель.

*Исследования выполнены за счет гранта
Российского научного фонда № 19-19-00121*

Введение

Актуальность проблемы защиты водного бассейна от загрязнения

различными дисперсными частицами последние десятилетия будет только возрастать. При этом значительные усилия

¹ Для переписки:

Email: shalunov@u-sonic.ru

мирового сообщества будут направлены, прежде всего, на удаление из газовых сред частиц микронных и субмикронных размеров (PM 2.5 и менее), которые представляют наибольшую опасность [5].

На сегодняшний день одним из наиболее эффективных способов улавливания аэрозольных частиц является предварительное объединение частиц в агломераты под действием синусоидальных ультразвуковых (УЗ) колебаний высокой интенсивности (ультразвуковая агломерация) для дальнейшего улавливания укрупненных частиц традиционными методами (инерционное или гравитационное осаждение, фильтрация сквозь пористый материал и т. д.) [3, 6–7].

На сегодняшний день эффективность УЗ агломерации многократно доказана для частиц размером более 2.5 мкм. Многими авторами указываются режимы агломерации [3–8], при которых достигается наибольшая степень укрупнения, и предлагается специальное оборудование [8–10], позволяющее коагулировать частицы как на открытом пространстве, так и в замкнутом объёме.

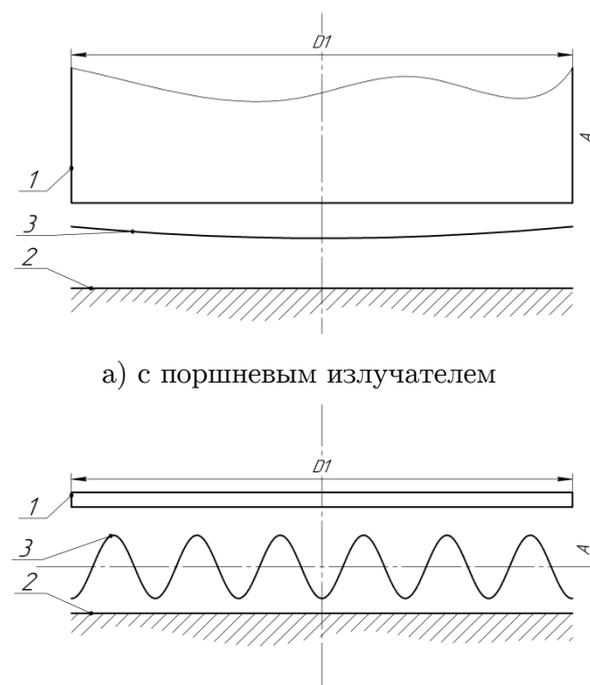
Однако ультразвуковая агломерация, основанная на известных механизмах взаимодействия частиц, оказывается мало эффективной при воздействии на частицы размером менее 2.5 мкм и особенно менее 1 мкм. При этом возможности линейного акустического поля на сегодняшний день хорошо изучены и установлено, что воздействие линейным акустическим полем не обеспечивает эффективной коагуляции частиц PM2.5 [11]. А при повышении уровня звукового давления линейного акустического поля скоагулированные частицы (особенно, если речь идёт о твёрдых частицах) начинают разрушаться.

Необходимость решения проблемы требует исследования процесса взаимодействия тонкодисперсных частиц при

различных условиях УЗ воздействия для выявления новых нелинейных эффектов (вихревых акустических или экартовских течений, способных из-за инерции частиц локально повысить концентрацию), способных увеличить скорость коагуляции таких частиц [3, 11–12].

Модель формирования вихревых акустических течений

На сегодняшний день формирование вихревых акустических течений при различных диапазонах частот является хорошо исследованным. Однако не изучался вопрос моделирования коагуляции дисперсных частиц с учётом вихревых движений и нелинейных эффектов влияния вихрей на скорость коагуляции [12–13].



а) с поршневым излучателем

б) с изгибно-колеблющимся излучателем
1 – излучатель; 2 – отражатель;
3 – форма (распределение) колебаний
излучающей поверхности

Рисунок 1 – Газовые промежутки для коагуляции аэрозолей с использованием различных излучателей

Конечной целью исследования модели является изучение влияния акустических течений на эффективность агломерации частиц и определение эффективности

агломерации частиц, определяемой по остаточной концентрации аэрозоля (чем меньше остаточная концентрация, тем выше эффективность) согласно следующему выражению:

$$\xi = \frac{N(T)}{N(0)} \cdot 100\% \quad (1)$$

где $N(t)$ — суммарное количество частиц в воздушном промежутке в момент времени t ; T — продолжительность воздействия, с; $N(0)$ — суммарное количество частиц в начальный момент времени.

Предложенное математическое описание основывается на стандартных уравнениях формирования акустического поля и вихревого течения, возникающего при разложении удельного импульса газовой фазы до второго порядка, и впервые предложенных авторами уравнениях движения и коагуляции дисперсных частиц в вихревых акустических течениях с использованием подхода дискретной фазы.

Подмодель акустического поля в воздушном промежутке основана на уравнении Гельмгольца, справедливом для линейных акустических колебаний, учитывающем их поглощение в газовой фазе.

Представленные уравнения позволили рассчитать УЗ поле, создаваемое излучателями с различными распределениями амплитуд колебаний:

1. Однородное распределение колебаний, которое создаётся с помощью поршневого излучателя (рисунок 1а).

$$A(x, y) \equiv 1 \quad (2)$$

2. Синусоидальное распределение колебаний, создаваемое изгибно-колеблющимся излучателем (рисунок 1б).

$$A(x, y) = \cos\left(\pi n \frac{2(x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}}}{D}\right) \quad (3)$$

где n — количество «нулей» колебаний излучателя.

Нелинейные уравнения формирования вихревых акустических течений решаются

итерационным методом, согласно которому решается последовательность линейных задач методом конечных элементов. При этом граничные условия задаются только первого рода и только для скорости (скорость акустических течений согласно условию прилипания на границе расчётной области равна нулю [13]).

Уравнение, описывающее изменение функции тока, определяющее положение частицы и учитывающее влияние потенциального течения (стационарный газовый поток, который формируется независимо от акустического поля), выглядит следующим образом:

$$u = \mathbf{U} + \mathbf{V} - \tau(\mathbf{U}, \nabla)U \quad (4)$$

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{\int_{\Gamma} \left(\sum_{i=1}^2 \frac{\partial \psi}{\partial x_i} \frac{V_i}{\|U\|} - \tau \sum_{i,j=1}^2 \frac{\partial \psi}{\partial x_i} \frac{U_j}{\|U\|} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) d\Gamma}{\int_{\Gamma} \frac{d\Gamma}{\|U\|}} \quad (5)$$

где \mathbf{V} — вектор скорости стационарного газового потока, м/с; \mathbf{U} — вектор скорости вихревого акустического течения, м/с.

При наличии стационарного газового потока возможен переход частицы с вихря на вихрь. Переход частицы с вихря на вихрь осуществляется при её нахождении на периферии вихря, где функция тока равна 0. В противном случае частица остаётся во внутренней области сечения вихря на протяжении конечного времени.

Для расчёта коагуляции частиц используется вероятностный подход Зоммерфельда [8], модифицированный усреднением по полному обороту линии тока.

Далее описан более полный алгоритм расчёта движения и коагуляции частиц в вихревых акустических течениях.

Алгоритм заключается в том, что частицы объединяются в группы. Каждая группа представляет собой совокупность частиц, имеющих одинаковые размеры из

дискретного ряда типоразмеров и близкие значения функций тока.

Таким образом, группа частиц характеризуется следующими параметрами:

1. Индекс типоразмера частиц k из дискретного набора типоразмеров: $d_k = k^{\frac{1}{3}}d_0$, где d_0 — условный диаметр наименьшей частицы, м.

2. Значение функции тока для группы Ψ , которое определяет «индекс» линии тока, на которой находится в данный момент группа.

3. Количество частиц в группе на единицу поперечного размера канала, $n - m^{-1}$.

При этом одна группа частиц находится в пределах одного вихря. Между соседними вихрями группа переходит целиком.

Расчёт производится для каждого отдельного вихря независимо за исключением случаев перехода группы частиц между соседними вихрями.

Алгоритм расчёта частицы в пределах отдельного вихря состоит из следующих шагов.

1. Инициализация ансамбля групп частиц. При инициализации принимается, что частицы распределены равномерно по всему объёму вихря. Инициализация проводится при заданном дисперсном составе частиц (заданы массовые концентрации частиц различных типоразмеров G_k , где G_k — массовая концентрация частиц

типоразмера d_k , кг/м³; количество типоразмеров частиц, присутствующих в исходном фракционном составе, $k_{\max.\text{init}}$). Кроме того, задаётся минимальное количество групп частиц N , участвующих в расчёте.

2. Определение интервала времени τ , в течение которого производится расчёт движения частиц без столкновений (речь идёт об интервале времени, в течение которого коагуляции не происходит). Определение интервала времени состоит из следующих этапов:

2.1. Цикл по каждому отрезку разбиения множества $[0; \psi_{\max}]$ (ψ_{\max} — максимальное значение функции тока в отдельном вихре, м²/с) — $[\frac{j}{K}\psi_{\max}; \frac{j+1}{K}\psi_{\max}]$. На каждом отрезке разбиения определяется время, в течение которого столкнутся не менее M пар частиц на единицу поперечного размера канала.

Интервал времени для отрезка $[\frac{j}{K}\psi_{\max}; \frac{j+1}{K}\psi_{\max}]$ определяется по уравнению (6).

Далее интервал времени определяется исходя из выражения:

$$\tau = \min \left\{ \min_{k=1 \dots k_{\max}} \tau_k, \tau_{\text{up}} \right\} \quad (7)$$

где τ_{up} — максимально допустимое значение времени, которое определяется временем перехода группы частиц между соседними вихрями, с.

$$\tau_j = \min_{k=1 \dots k_{\max}} \left| \frac{M}{\Delta S \left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} \beta_{j,i,k-i} \langle n \rangle_{j,i} \langle n \rangle_{j,k-i} - \langle n \rangle_{j,k} \sum_{i=1}^{k_{\max}} \beta_{j,i,k} \langle n \rangle_{j,i} \right)} \right| \quad (6)$$

где $\beta_{j,i,k}$ — вероятность столкновения частиц, м³/с; $\langle n \rangle_{j,k}$ — усреднённая концентрация частиц k -го типоразмера по площади области, в которой значение функции тока принадлежит отрезку $[\frac{j}{K}\psi_{\max}; \frac{j+1}{K}\psi_{\max}]$, м⁻³.

3. Добавление новых групп частиц и пропорциональное уменьшение количества частиц в существующих группах в соответствии с уравнением Смолуховского для усреднённых концентраций:

$$\frac{d}{dt} \langle n \rangle_{j,k} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} \beta_{j,i,k-i} \langle n \rangle_{j,i} \langle n \rangle_{j,k-i} - \langle n \rangle_{j,k} \sum_{i=1}^{k_{\max}} \beta_{j,i,k} \langle n \rangle_{j,i} \quad (8)$$

Шаг 3 выполняется для каждого отрезка значений функции тока $\left[\frac{j}{K} \psi_{\max}; \frac{j+1}{K} \psi_{\max} \right]$. Т.е. на шаге 3 рассматриваются группы частиц, у которых параметр Ψ принимает значение из отрезка $\left[\frac{j}{K} \psi_{\max}; \frac{j+1}{K} \psi_{\max} \right]$, затем согласно выражениям, приведённым в описании шага 2, рассчитывается усреднённая концентрация частиц каждого типоразмера,

рассчитываются вероятности столкновения. Затем, согласно уравнению Смолуховского [7], пропорционально изменяется количество частиц в существующих группах без изменения остальных параметров. После выполнения данной операции добавляются новые группы частиц тех типоразмеров, которые к данному моменту в системе групп частиц не присутствовали. Условие добавления группы частиц с новым типоразмером — количество частиц в группе превышает $M/2$. Функция тока для каждой новой добавленной группы будет иметь значение $\frac{j+1}{K} \psi_{\max}$.

4. Изменение значений функций тока каждой группы в соответствии с уравнением (9).

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\int_{\Gamma} \left(\sum_{i=1}^2 \frac{\partial \psi}{\partial x_i} \frac{V_i}{\|U\|} - \tau \sum_{i,j=1}^2 \frac{\partial \psi}{\partial x_i} \frac{U_j}{\|U\|} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) d\Gamma}{\int_{\Gamma} \frac{d\Gamma}{\|U\|}} \quad (9)$$

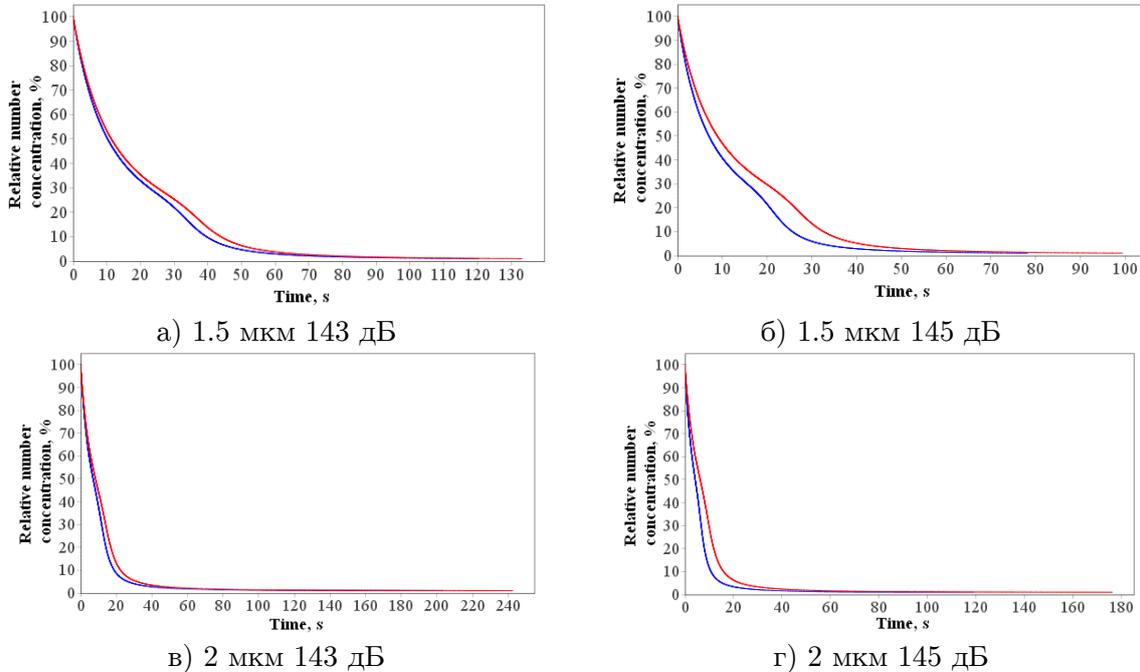


Рисунок 2 — Зависимости относительной концентрации частиц от времени при различных начальных размерах и уровнях звукового давления (красные линии — зависимости при использовании поршневого излучателя, синие линии — зависимости при использовании изгибно-колеблющегося излучателя)

Изменение значений происходит в течение интервала времени τ .

5. Увеличение текущего момента времени t на величину τ .

6. Если t больше заданного времени расчёта, то переход к шагу 7, иначе переход к шагу 2.

7. Расчёт эффективности коагуляции.

Обсуждение полученных результатов

Полученные результаты расчетов представлены на рисунке 2.

Как следует из представленного рисунка 2, при использовании изгибающегося излучателя, способного сформировать множество вихревых акустических течений, скорость коагуляции возрастает до 1.5 раз.

Заключение

Таким образом для повышения скорости коагуляции предложено задействовать нелинейные эффекты, которые заключаются в формировании вихревых акустических (эккартовских) течений, способных вызвать локальное повышение концентрации частиц и, следовательно, увеличение эффективности коагуляции. Предложена модифицированная численная модель ультразвуковой коагуляции, которая учитывает локальное уплотнение частиц за счёт эккартовских течений.

Установлено, что формирование вихревых акустических потоков в резонансном промежутке способно дополнительно увеличить эффективность ультразвуковой коагуляции не менее чем в 1.5 раза

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Halonen J., Lanki T., Yli-Tuomi T., et al. Particulate air pollution acute cardio respiratory hospital admissions and mortality among the elderly. *American Journal of Epidemiology*, 2009, vol. 20(1), pp. 1430153.

[2]. Khmelev V. N., Shalunov A. V., Bochenkov A. S., Nesterov V. A. et al. 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*, 2019, pp. 221-226.

[3]. Khmelev V. N., Nesterov V. A., Bochenkov A. S., Shalunov A. V. The Limits of fine particles ultrasonic coagulation. *Symmetry*, 2021, vol. 13(9), pp. 1–19 DOI: 10.3390/sym13091607.

[4]. 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.

[5]. Hext P. M., Rogers K. O., Paddle G. M., Evans M. et al. *The health effects of PM2.5 (including ultrafine particles)*. 1999 (Brussels: Concawe).

[6]. Chen H., Liu W., Li J., Xun X., Shen X. Experimental Study on Acoustic Agglomeration of Fine Particles from Coal Combustion. *International Conference on Digital Manufacturing and Automation*. 2010, vol. 1, pp. 702-705.

[7]. Andres R. R., Acosta V. M., Lucas M., Riera E. Modal analysis and nonlinear characterization of an airborne power ultrasonic transducer with rectangular plate radiator. *Ultrasonic*. 2018, vol. 82, pp. 954–964.

[8]. Sheng C., Shen X. Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles. *Aerosol Science and Technology*. 2007, vol. 41, pp. 1–13.

[9]. Sarabia E., Gallego-Juarez J. A., Rodrigues-Corral G., Elvira-Segura L., Gonzalez-Gomaz I. Application of high-power ultrasound enhance fluid/solid particle separation processes. *Ultrasonics*. 2000, vol. 38, pp. 642–646.

[10]. Khmelev V. N., Shalunov A. V., Nesterov V. A., Dorovskikh R. S.,

Golykh R. N. Providing the Efficiency and Dispersion Characteristics of Aerosols in Ultrasonic Atomization. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017, vol. 90(4), pp. 831–844.

[11]. Khmelev V. N., Nesterov V. A., Shalunov A. V., Barsukov R. V., Tsyganok S. N. Longitudinally oscillating ultrasonic emitter for influencing gas-dispersed system. *Journal of Physics*. 2020, vol. 1679, pp. 1-8.

DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022008.

[12]. Khmelev V. N., Nesterov V. A., Shalunov A. V. Increasing the uniformity of distribution of the oscillations of the disc ultrasound radiators for gas media. *IOP*

Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 862, pp. 1–8.

DOI: 10.1088/1757-899X/862/6/062079.

[13]. 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. *Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности (ISTS "EESTE-2021")*, 2021, с. 190–194.

Шалунов Андрей Викторович — д-р техн. наук, заведующий кафедрой методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, д. 27)

Голых Роман Николаевич — д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, д. 27)

Хмелёв Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор, заместитель директора по научной работе, кафедра МСИА, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, д. 27)

Нестеров Виктор Александрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, д. 27)

Боченков Александр Сергеевич — аспирант, кафедра методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, д. 27)

Improvement of the Discrete Phase Model for Calculating Ultrasonic Coagulation of Suspended Particles in Eckartian Flows

A. V. Shalunov^{*1}, R. N. Golykh^{*}, V. N. Khmelev^{*}, V. A. Nesterov^{*}, A. S. Bochenkov^{*}

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

Abstract

One of the most effective methods for trapping aerosol particles is the preliminary combination of particles into agglomerates under the action of high-intensity sinusoidal ultrasonic (US) oscillations (ultrasonic agglomeration) for further trapping of coarse particles by traditional methods (inertial or gravitational settling, filtration through a porous material, etc.). To date, the effectiveness of ultrasonic agglomeration has been repeatedly proven for particles larger than 2.5 μm [2–4]. However, ultrasonic agglomeration, based on the known mechanisms of particle interaction, is not very effective when exposed to particles smaller than 2.5 μm and especially less than 1 μm . At the same time, the capabilities of a linear acoustic field are well studied today and it has been established that exposure to a linear acoustic field does not provide effective coagulation of PM2.5. And with an increase in the sound pressure level of a linear acoustic field, enlarged particles (especially when it comes to solid particles) begin to break down. Therefore, the authors proposed to use nonlinear effects, which consist in the formation of vortex acoustic (Eckart) flows that can cause a local increase in the concentration of particles and, consequently, an increase in the efficiency of coagulation. It has been established that the formation of vortex acoustic flows in the resonant gap can additionally increase the efficiency of ultrasonic coagulation by at least 1.5 times [3].

Keywords

Eckartian flows, coagulation, ultrasonic, radiator, numerical model.

REFERENCES

- [1]. Halonen J., Lanki T., Yli-Tuomi T., et al. Particulate air pollution acute cardio respiratory hospital admissions and mortality among the elderly. *American Journal of Epidemiology*, 2009, vol. 20(1), pp. 1430153.
- [2]. Khmelev V. N., Shalunov A. V., Bochenkov A. S., Nesterov V. A. et al. Experimental Stand for the Research of the Process of Ultrasonic Coagulation of Aerosols *20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and*

¹ *Corresponding author:*
Email: shalunov@u-sonic.ru

Electron Devices. EDM'2019, 2019, pp. 221-226.

[3]. Khmelev V. N., Nesterov V. A., Bochenkov A. S., Shalunov A. V. The Limits of fine particles ultrasonic coagulation. *Symmetry*, 2021, vol. 13(9), pp. 1–19 DOI: 10.3390/sym13091607.

[4]. 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.

[5]. Hext P. M., Rogers K. O., Paddle G. M., Evans M. et al. *The health effects of PM2.5 (including ultrafine particles)*. 1999 (Brussels: Concawe).

[6]. Chen H., Liu W., Li J., Xun X., Shen X. Experimental Study on Acoustic Agglomeration of Fine Particles from Coal Combustion. *International Conference on Digital Manufacturing and Automation*. 2010, vol. 1, pp. 702-705.

[7]. Andres R. R., Acosta V. M., Lucas M., Riera E. Modal analysis and nonlinear characterization of an airborne power ultrasonic transducer with rectangular plate radiator. *Ultrasonic*. 2018, vol. 82, pp. 954–964.

[8]. Sheng C., Shen X. Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles. *Aerosol Science and Technology*. 2007, vol. 41, pp. 1–13.

[9]. Sarabia E., Gallego-Juarez J. A., Rodrigues-Corral G., Elvira-Segura L., Gonzalez-Gomaz I. Application of high-power ultrasound enhance fluid/solid particle separation processes. *Ultrasonics*. 2000, vol. 38, pp. 642–646.

[10]. Khmelev V. N., Shalunov A. V., Nesterov V. A., Dorovskikh R. S., Golykh R. N.

Providing the Efficiency and Dispersion Characteristics of Aerosols in Ultrasonic Atomization. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017, vol. 90(4), pp. 831–844.

[11]. Khmelev V. N., Nesterov V. A., Shalunov A. V., Barsukov R. V., Tsyganok S. N. Longitudinally oscillating ultrasonic emitter for influencing gas-dispersed system. *Journal of Physics*. 2020, vol. 1679, pp. 1-8.

DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022008.

[12]. Khmelev V. N., Nesterov V. A., Shalunov A. V. Increasing the uniformity of distribution of the oscillations of the disc ultrasound radiators for gas media. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 862, pp. 1–8.

DOI: 10.1088/1757-899X/862/6/062079.

[13]. Khmelev V. N., Shalunov A. V., Golykh R. T., Nesterov V. A., Bochenkov A. S. Modelirovaniye vikhrevykh akusticheskikh techeniy v vozdushnom promezhutke kak faktora beskontaktnoy ull'trazvukovoy intensifikatsii khimiko-tekhnologicheskikh protsessov [Modeling of vortex acoustic flows in the air gap as a factor of non-contact ultrasonic intensification of chemical-technological processes] *Povysheniye energoresursoeffektivno-sti i ekologicheskoy bezopasnosti pro-tsessov i apparatov khimicheskoy i smezhnykh otrasley promyshlennosti [Improving the energy and resource efficiency and environmental safety of processes and apparatuses in the chemical and related industries] (ISTS "EESTE-2021")*, 2021, c. 190–194.

Shalunov A. V. — Dr. Sc.(Eng.), Head of the Department of Methods and Measuring Instruments and Automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

Golykh R. N. — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, department of methods and instruments of measurement and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

Khmelev V. N. — Dr. Sc. (Eng.), professor, deputy director for research, department of methods and instruments of measurement and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

Nesterov V. A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, department of methods and instruments of measurement and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

Bochenkov A. S. — Postgraduate student, Department of Methods and Measuring Instruments and Automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Развитие модели дискретной фазы для расчёта ультразвуковой коагуляции взвешенных частиц в экартовских течениях / А. В. Шалунов, Р. Н. Голых, В. Н. Хмелёв, В. А. Нестеров, А. С. Боченков // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 2(9). С. 33 – 42.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-33-42

Please cite this article as:

Shalunov A. V. , Golykh R. N., Khmelev V. N., Nesterov V. A., Bochenkov A. S. Improvement of the Discrete Phase Model for Calculating Ultrasonic Coagulation of Suspended Particles in Eckartian Flows. Industrial processes and Technologies, 2023, vol. 3, no. 2(9), pp. 33 – 42.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-33-42