

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АГЛОМЕРАЦИИ СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ С УЧЕТОМ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СРЕДЫ

В.Н. Хмелев, Р.Н. Голых, В.А. Нестеров, А.С. Боченков, А.В. Шалунов
Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Бийск

В статье представлены результаты численного эксперимента, показывающие, что акустические потоки, формирующиеся в резонансном газовом промежутке, обеспечивают повышение эффективности агломерации субмикронных частиц не менее 4 раз. Разработана численная модель процесса ультразвуковой агломерации, впервые учитывающая вихревое движение взвешенных частиц в акустических потоках.

Ключевые слова: ультразвук, ультразвуковая агломерация, вихревые акустические течения

ВВЕДЕНИЕ

При решении проблем повышения эффективности процессов газоочистки [1-3] особое внимание уделяется поиску путей очистки воздуха от частиц размером менее 2,5 мкм. Это связано с огромной опасностью таких частиц вызванной их высокой суммарной поверхностью (более 55% от суммарной поверхности частиц, выбрасываемых в атмосферу) и счетной концентрацией (более 95% от суммарной счетной концентрация даже при незначительной массовой доле, менее 1% от суммарной доли аэрозолей, содержащихся в атмосфере). При этом, благодаря малым размерам и массе такие аэрозоли могут длительное время удерживаться в воздухе и способны легко проникать в альвеолы легких человека, вызывая необратимые изменения организма.

Удаление таких частиц, даже с помощью ультразвуковых (УЗ) колебаний представляет собой трудноразрешимую задачу по следующим причинам:

- недостаточной вероятностью столкновения таких частиц из-за малой площади сечения столкновения. При этом крупные частицы размером 10 мкм и более сталкиваются эффективнее за счёт увеличенной площади сечения столкновения;
- незначительными силами гидродинамического взаимодействия из-за малой площади сечения частиц;
- низкой инерционностью таких частиц, приводящей к их практически 100%-му увлечению в колебательное движение.

Анализ известных исследований свидетельствует о том, что инерционность частиц и степень их увлечения в колебательное движение можно уменьшить (до 80% и менее), используя высокие частоты УЗ воздействия (для частиц размером менее 2,5 мкм – это 100 кГц и более) [4-6]. К сожалению, создание высокочастотных излучателей (высокие потери в материале излучателя, высокие потери на

поглощение колебаний в газовой фазе и т.д.) технически сложно реализуемо. Дополнительное введение вспомогательного аэрозоля для уменьшения расстояния между частицами (и, следовательно, увеличения сил гидродинамического взаимодействия, обратно пропорциональных четвёртой степени расстояния) не всегда реализуемо и часто приводит к негативным последствиям.

В связи с этим возникает необходимость поиска и исследования других нелинейных эффектов в УЗ поле, способных обеспечить сближение частиц и их осаждение.

Очевидно, что для повышения вероятности агломерации необходимо рассмотреть такие эффекты, которые способны влиять на концентрацию частиц в обрабатываемом объёме. Поскольку плотность частиц велика по сравнению с плотностью газовой фазы и, как следствие, колебания газа не приводят к существенным упругим деформациям частиц (частицы размером менее 2,5 мкм сложно деформировать даже в жидком агрегатном состоянии, не только из-за высокой плотности, но и из-за высокой силы поверхностного натяжения), необходимо, в первую очередь, рассматривать эффекты, происходящее в объёме газовой фазы.

Как было установлено авторами [5-8], УЗ колебания в газовой фазе способствуют появлению стационарных акустических течений. Поскольку течения вызваны потерями энергии при поглощении колебаний, и они совершают работу против сил трения, обуславливающих это поглощения, то эти течения имеют вихревой характер.

Согласно многочисленным исследованиям и разработкам в области инерционного пылеотделения, при центростремительном ускорении 10 м/с^2 и более наблюдается локальное уплотнение частиц вблизи периферии вихревого потока. За счёт этого в существующих аппаратах, основанных на

инерционном принципе пылеотделения, обеспечивается улавливание частиц.

Отсюда следует потенциальная возможность применения акустических течений для локального повышения концентрации частиц и, следовательно, повышения эффективности агломерации. Однако экспериментальное определение эффективности агломерации под действием акустических течений и величины концентрации частиц в зонах локального уплотнения является затруднительным, поскольку:

– масштаб акустических течений сопоставим с половиной длины ультразвуковой волны и время, за которое делает оборот один вихрь при скорости, способной вызвать локальное уплотнение частиц, не превышает 0,05 с. В то время как существующие приборы и методы анализа дисперсного состава аэрозоля имеют характерное время отклика более 0,1 с;

– концентрация аэрозоля и скорости акустических течений отличаются характерной неоднородностью с масштабом градиента не более четверти длины ультразвуковой волны (не более 0,04 м), недоступной для обнаружения с помощью современных анализаторов аэрозольных частиц.

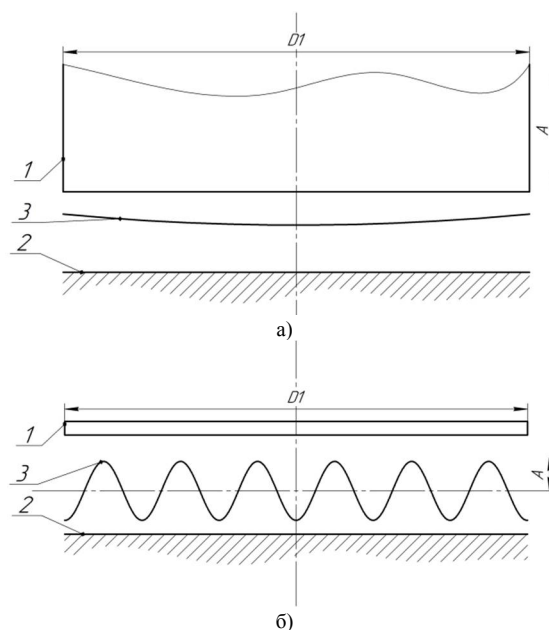
Поэтому для выявления оптимальных режимов и условий УЗ воздействия, обеспечивающих формирование акустических течений, способных внести существенный вклад в повышение эффективности агломерации, необходимо разработать численную модель влияния таких течений на эффективность УЗ агломерации субмикронных частиц.

МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОЛЕБАНИЙ В ПЛОСКОМ СЛОЕ

На сегодняшний день для формирования ультразвуковых колебаний в газовых средах наибольшее распространение получили 2 типа излучателей – совершающие плоские колебания (поршневой излучатель) и изгибные колебания (изгибно-колеблющаяся мембрана) [8-9].

Схематично формирование колебаний с помощью каждого излучателя изображено на рис. 1.

Вне зависимости от формы распределения колебаний поверхности излучателей математическая постановка задачи формулируется следующим образом. Процесс рассматривается в воздушном промежутке между излучающей и отражающей поверхностями. При этом толщина воздушного промежутка не превышает длины ультразвуковой волны в газе. Выбор малой толщины воздушного промежутка обусловлен необходимостью создать условия, обеспечивающие максимальное резонансное усиление колебаний (за счёт синфазного сложения первичной и отражённой волны) [8-12].



а) поршневой излучатель; б) изгибно-колеблющийся излучатель; 1 – излучатель; 2 – отражатель; 3 – форма (распределение) колебаний излучающей поверхности

Рис. 1. Излучатели для формирования ультразвуковых колебаний в газовых средах

Исходными данными задачи являются геометрические размеры воздушного промежутка – диаметр D и толщина H ; диаметр исходных частиц d_0 и плотность вещества дисперсной фазы ρ_p ; плотность несущей газовой фазы – ρ_0 ; динамическая η и кинематическая ν вязкости несущей газовой фазы; коэффициент поглощения ультразвуковых колебаний в газовой фазе k_{**} ; относительное распределение амплитуд колебаний поверхности излучателя $a(r)$; уровень звукового давления вблизи центра излучателя при отсутствии отражателя – L_{sp} ; частота колебаний излучателя – f .

Для выявления возможности формирования вихревых акустических течений первоначально был проведён расчёт акустического поля вблизи каждого излучателя.

Согласно проведённым расчётам, поршневой излучатель не способен создать условия, способствующие дополнительному повышению эффективности агломерации частиц. Выбор определённого расстояния между излучателем и отражателем может привести к повышению уровня звукового давления за счёт явления резонанса. Однако даже при резонансной толщине слоя (7,77 мм) создаваемое звуковое поле не позволит обеспечить эффективную агломерацию частиц из-за их малого времени пребывания в газовом промежутке. Например, при скорости потока газа 0,1 м/с время пребывания частиц в слое не превысит 3 с.

В свою очередь, изгибно-колеблющийся излучатель, как и поршневой, способен обеспечить

уровень звукового давления более 170 дБ при резонансной толщине воздушного промежутка. При этом максимальный уровень звукового давления вблизи каждого из рассмотренных излучателей при отсутствии отражателя составляет 150 дБ (соответствует амплитуде колебаний центра излучателя 16 мкм).

Однако при изгибно-колеблющемся излучателе, градиент амплитуды звукового давления (а так как есть поглощение колебаний, то будет и градиент фазы) имеет ненулевые компоненты по всем координатным осям. При этом, в зависимости от положения наблюдаемой точки в пространстве, градиент амплитуды может быть направлен под различным углом (от 0 до 2π) к поверхности излучателя. Это означает, что и эквивалентная объёмная сила, способная инициировать «звуковой ветер», имеет аналогичные направления, создавая вихревое движение. В этом случае поверхность излучателя и отражателей не препятствуют движению газового потока и, следовательно, возникновение акустических течений при изгибно-колеблющемся излучателе возможно.

Кроме того, поскольку агломерируемые частицы, находящиеся в слое, обладают инерционностью, возможно влияние акустических течений на вероятность агломерации этих частиц. Для исследования возникновения акустических течений.

Распределение скоростей вихревых потоков в воздушном промежутке и формы линий тока полностью определяются функцией тока $\psi(\mathbf{r})$. Исходными данными подмодели является распределение комплексных амплитуд звукового давления $P(\mathbf{r})$, рассчитываемое согласно подмодели акустического поля, описанной в предыдущем разделе.

Для определения функции тока использовалось уравнение сохранения импульса газа в вихревом потоке под действием эквивалентной силы, определяемой на основании распределений звукового давления, полученных в предыдущем подразделе.

$$\left(-\frac{\partial \psi}{\partial z} \left(-\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial^3 \psi}{\partial z^3} \right) - u_r \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \begin{pmatrix} -y \\ x \\ 0 \end{pmatrix}, \text{rot } \mathbf{F} \quad (1)$$

$$\omega \rho_0 \text{rot } \mathbf{F} = 2kk_{**} (\nabla(\text{Re } P) \times \nabla(\text{Im } P)) - \frac{\mu \pi f}{c^2 \rho_0} \Delta (\nabla(\text{Re } P) \times \nabla(\text{Im } P)) \quad (2)$$

При этом на границе воздушного промежутка функция тока тождественно равна нулю. Решение представленной системы уравнений позволяет рассчитать функцию тока формируемых вихрей (рис. 2).

Как следует из представленных рисунков, линии тока при изгибно-колеблющемся излучателе имеют большую кривизну и, следовательно, способствуют локальному уплотнению частиц. Поэтому далее рассматривается влияние на эффективность агломерации только акустических течений, формируемых изгибно-колеблющимся излучателем.

МОДЕЛЬ АГЛОМЕРАЦИИ ЧАСТИЦ С УЧЕТОМ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ

Для расчета эффективности агломерации получено кинетическое уравнение, учитывающее вихревое движение.

$$\frac{\partial n_k}{\partial t}(\psi, t) + \frac{\partial n_k}{\partial \psi}(\psi, t) \frac{\int_{\psi=\text{const}} \frac{r(u_r a_z - u_z a_r) \tau_{rel} dS}{|\nabla \psi|} + \int_{\psi=\text{const}} \frac{dS}{|\nabla \psi|} \text{div}(\mathbf{u}_{pk,n}) \frac{dS}{|\nabla \psi|}}{\int_{\psi=\text{const}} \frac{dS}{|\nabla \psi|}} = \quad (3)$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} B_{i,k-i}(\psi) n_i(\psi, t) n_{k-i}(\psi, t) - \sum_{i=1}^{\infty} B_{i,k}(\psi) n_i(\psi, t) n_k(\psi, t)$$

$$B_{i,k}(\psi) = \frac{\int_{\psi=\text{const}} \frac{\beta_{i,k}(P(\mathbf{r})) dS}{|\nabla \psi|}}{\int_{\psi=\text{const}} \frac{dS}{|\nabla \psi|}}$$

где $\beta_{i,k}$ – вероятность столкновения частиц, зависящая от амплитуды звукового давления $P(\mathbf{r})$ и определяемая силами ортокинетики и гидродинамического взаимодействия частиц в ультразвуковом поле.

Полученное уравнение (13) решается путём разложения n_k и коэффициентов при $\partial n_k / \partial \psi$, n_k в ряд по степеням ψ . Это позволило свести задачу к системе обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка.

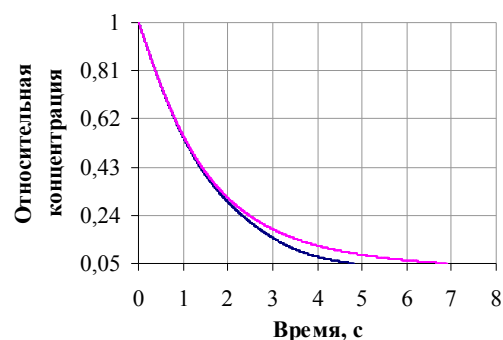
Далее представлены результаты численного исследования эффективности агломерации с учётом влияния акустических течений на базе полученной системы уравнений.

Эффективность агломерации считалась как отношение текущей счётной концентрации к начальной:

$$\xi = \frac{\int_{x^2+y^2 \leq \frac{D^2}{4}} \int_{0 \leq z \leq H} f_k(\mathbf{r}, \mathbf{u}_p, t) d\mathbf{u}_p d\mathbf{r}}{\int_{x^2+y^2 \leq \frac{D^2}{4}} \int_{0 \leq z \leq H} f_k(\mathbf{r}, \mathbf{u}_p, 0) d\mathbf{u}_p d\mathbf{r}} =$$

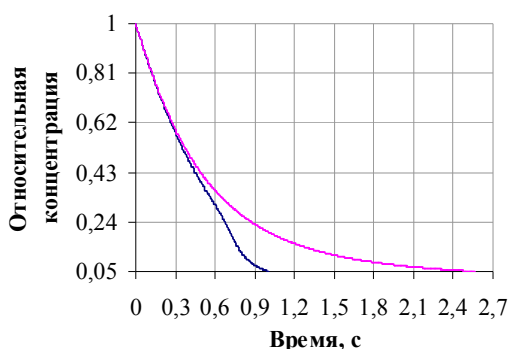
$$= \frac{\int_V n_k(\psi(\mathbf{r}), t) dV}{\int_V n_k(\psi(\mathbf{r}), 0) dV} \quad (4)$$

Чем меньше это отношение (чем меньше остаточная концентрация), тем выше эффективность. Зависимости относительной концентрации от времени при различных уровнях звукового давления (рис. 3).



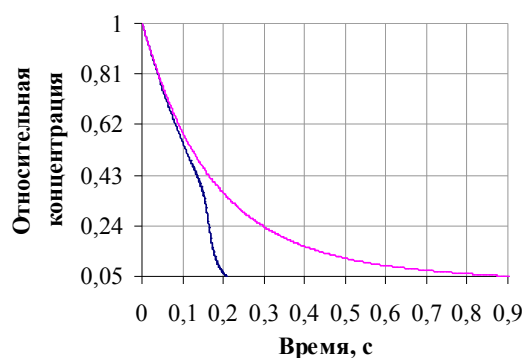
— Изгибно-колеблющийся излучатель
— Поршневой излучатель

а) 145 дБ



— Изгибно-колеблющийся излучатель
— Поршневой излучатель

б) 150 дБ



— Изгибно-колеблющийся излучатель
— Поршневой излучатель

в) 155 дБ

Рис. 3. Зависимости относительной концентрации от времени при различных уровнях звукового давления

Представленные зависимости позволяют определить диапазон уровней звукового давления, обеспечивающий наибольший вклад вихревых потоков. Представленные зависимости позволяют считать таким диапазоном значения от 150 до 155 дБ (без отражателя, этому диапазону соответствует диапазон амплитуд колебаний излучателя от 15 до 25,5 мкм), при котором время агломерации при использовании изгибно-колеблющегося излучателя сокращается как минимум на 22 % по сравнению с поршневым излучателем (при уровне звукового давления 150 дБ). Здесь и далее под временем агломерации понимается время, которое необходимо для уменьшения счётной концентрации ровно в 20 раз. При уровне звукового давления 155 дБ время агломерации сокращается более чем в 4 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена модель влияния вихревых акустических течений на эффективность агломерации. В результате численного анализа модели выявлена принципиальная возможность существенного (более чем в 4 раза) повышения эффективности ультразвуковой агломерации субмикронных частиц за счет формирования вихревых акустических течений в резонансных промежутках.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-19-00121.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ужов В.Н. Очистка промышленных газов от пыли [Текст] / В.Н. Ужов, А.У. Вальдберг, Б.И. Мягков, И.К. Решидов. – М.: Химия, 1981. – 392 с.
2. Oren N and R. Finkelstein Invasive pulmonary aspergillosis in neutropenic patients during hospital construction: before and after chemoprophylaxis and institution of HEPA filters, Am. J. Hematol, 2001, p. 257.
3. Тимошенко, В.И. Осаждение и осадконакопление промышленных дымов / В.И. Тимошенко, Н.Н. Чернов. – Ростов-на-Дону: Ростиздат – 2004. – 224 с.
4. P.M. Hext, K.O. Rogers, G.M. Paddle. The health effects of PM2.5 (including ultrafine particles) – Brussels: Concawe, 1999. – 105 p.
5. N. Ilieva, Y. Nikolova, I. Predyov, N. Kozarev Sensors applicability for PM2.5 and PM10 air concentration measurements // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2018. – vol. 54. – P. 496-503.
6. E. Riera, I. González-Gomez, G. Rodriguez, J.A. Gallego-Juarez Ultrasonic agglomeration and preconditioning of aerosol particles for environmental and other applications // Power Ultrasonics: Application of High-intensity Ultrasound. – 2015. – Number 66. – P. 1023-1058.
7. J.A. Gallego-Juarez, G. Rpdroquez-Corral, L. Gaeta-Garretton, An ultrasonic transducer for high power applications in gases // Ultrasonic – 1998. – Issue 16 (6). P. 267-271.
8. J.A. Gallego-Juarez, G. Rodriguez, V. Acosta, E. Riera Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing // Ultrasonic Sonochemistry. – 2010. – P. 953-964.
9. Khmelev, V.N. Ultrasonic coagulation of suspended particles in resonant gas gaps / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, A.S. Bochenkov, V.A. Nesterov, A.A. Neverov // Journal of Physics: Conference Series. 2020. – T. 1679. – C. 1-8. – DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022024.

10. Khmelev, V.N. Efficiency increase of wet gas cleaning from dispersed admixtures by the application of ultrasonic fields / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.S. Dorovskikh, V.A. Nesterov, S.S. Khmelev, K.V. Shalunova // Archives of Acoustics. 2016. Т. 41. № 4. С. 757-771.

11. Khmelev, V.N. Experimental stand for the research of the process of ultrasonic coagulation of aerosol / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, A.S. Bochenkov, V.A. Nesterov, S.A. Terentiev, S.S. Zorin // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM Proceedings. 2019. С. 221-226.

12. Khmelev, V.N. Development of the rectangular ultrasonic radiator of the stair-step form / V.N. Khmelev, A.N. Galakhov, A.N. Shalunov, V.A. Nesterov, R.N. Golykg // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM Proceedings. 2014. С. 187-193.

Хмелев Владимир Николаевич – д.т.н., заместитель директора по научной работе, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. (3854)432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Шалунов Андрей Викторович – д.т.н., профессор, заведующий каф. МСИА, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. (3854)432571, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.

Гольх Роман Николаевич – доцент кафедры МСИА БТИ АлтГТУ, к.т.н., Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова», тел (3854) 432570, e-mail. romangl90@gmail.com

Нестеров Виктор Александрович- доцент кафедры МСИА БТИ АлтГТУ, к.т.н., Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова», тел (3854) 432570, e-mail: nva@bti.secna.ru.



Рис. 2. Линии тока вихревых акустических течений в газовой фазе при различных типах излучателей

NUMERICAL ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF VORTEX ACOUSTIC FLOWS ON THE EFFICIENCY OF AGGLOMERATION

V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh, V.A. Nesterov, A.S. Bochenkov
Biysk Technological Institute (branch) of the AltSTU

A model of the influence of vortex acoustic flows on the efficiency of agglomeration is proposed. As a result of the numerical analysis of the model, the fundamental possibility of a significant (more than 4 times) increase in the efficiency of ultrasonic agglomeration of submicron particles due to the formation of vortex acoustic flows in resonant gaps has been revealed.

Index terms: ultrasonic, ultrasonic agglomeration, vortex acoustic flows

REFERENCES

1. Uzhov V.N., Valdberg A.Yu., Myagkov B.I., Reshidov I.K. Cleaning of industrial gases from dust. Moscow, Khimiya, 1981. 392 p.
2. Oren N and R. Finkelstein Invasive pulmonary aspergillosis in neutropenic patients during hospital construction: before and after chemoprophylaxis and institution of HEPA filters, Am. J. Hematol, 2001, p. 257.
3. Timoshenko V.I., Chernov N.N. Sedimentation and sedimentation of industrial fumes. Rostov-on-Don, Rostizdat, 2004, 224 p.
4. P.M. Hext, K.O. Rogers, G.M. Paddle. The health effects of PM2.5 (including ultrafine particles) – Brussels: Concawe, 1999. – 105 p.
5. N. Ilieva, Y. Nikolova, I. Predyov, N. Kozarev Sensors applicability for PM2.5 and PM10 air concentration measurements // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2018. – vol. 54. – P. 496-503.
6. E. Riera, I. González-Gomez, G. Rodriguez, J.A. Gallego-Juarez Ultrasonic agglomeration and preconditioning of aerosol particles for environmental and other applications // Power Ultrasonics: Application of High-intensity Ultrasound. – 2015. – Number 66. – P. 1023-1058.
7. J.A. Gallego-Juarez, G. Rpdroquez-Corral, L. Gaete-Garretón, An ultrasonic transducer for high power applications in gases // Ultrasonic – 1998. – Issue 16 (6). P. 267-271.
8. J.A. Gallego-Juarez, G. Rodriguez, V. Acosta, E. Riera Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing // Ultrasonic Sonochemistry. – 2010. – P. 953-964.
9. Khmelev, V.N. Ultrasonic coagulation of suspended particles in resonant gas gaps / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, A.S. Bochenkov, V.A. Nesterov, A.A. Neverov // Journal of Physics: Conference Series. 2020. – T. 1679. – C. 1-8. – DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022024.
10. Khmelev, V.N. Efficiency increase of wet gas cleaning from dispersed admixtures by the application of ultrasonic fields / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.S. Dorovskikh, V.A. Nesterov, S.S. Khmelev, K.V. Shalunova // Archives of Acoustics. 2016. T. 41. № 4. C. 757-771.
11. Khmelev, V.N. Experimental stand for the research of the process of ultrasonic coagulation of aerosol / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, A.S. Bochenkov, V.A. Nesterov, S.A. Terentiev, S.S. Zorin // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM Proceedings. 2019. C. 221-226.
12. Khmelev, V.N. Development of the rectangular ultrasonic radiator of the stair-step form / V.N. Khmelev, A.N. Galakhov, A.N. Shalunov, V.A. Nesterov, R.N. Golykh // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM Proceedings. 2014. C. 187-193.

Vladimir Nikolayevich Khmelev - Doctor of Technical Sciences, Deputy Director for Research, Biysk Technological Institute (Branch) ASTU named after I.I. Polzunova, tel. (3854) 432581 e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Golykh Roman Nikolaevich - Associate Professor of the Associate Professor of Biysk Technological Institute (Branch) ASTU named after I.I. Polzunova, tel (3854) 432570, e-mail. romang190@gmail.com

Nesterov Victor Alexandrovich - Associate Professor of Biysk Technological Institute (Branch) ASTU named after I.I. Polzunova, tel (3854) 432570, e-mail: nva@bti.secna.ru.

Bochenkov Alexander Sergeevich – graduate student, Biysk Technological Institute, tel. (3854)43-22-55, e-mail:sanya.bochankov@mail.ru

Shalunov Andrey Viktorovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department. MSIA, Biysk Technological Institute (branch) of ASTU named after I.I. Polzunova, tel. (3854) 432571, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.