

ВЫЯВЛЕНИЕ УСЛОВИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОАГУЛЯЦИИ СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ

В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых

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

В работе предложен и теоретически обоснован подход к повышению эффективности коагуляции субмикронных взвешенных частиц под действием ультразвуковых колебаний. Воздействовать на частицы предложено нелинейными импульсами длительностей импульса от 2 мкс и более, в диапазонах интенсивностей УЗ воздействия, усреднённых за период времени, до 0,06 Вт/см² и ограниченных конструктивными особенностями источников излучения (средний уровень звукового давления в дальнем поле не превышает 150 дБ). На базе математического моделирования показано, что при импульсном воздействии возрастает площадь эффективного сечения столкновения частиц. Это обеспечивает возможность дополнительного, по сравнению с синусоидальным воздействием, повышения эффективности коагуляции не менее 5 раз.

Ключевые слова: газоочистка, ультразвук, коагуляция, колебания, излучатель.

ВВЕДЕНИЕ

Человечество вынуждено непрерывно бороться с туманами, смогом, пылью, аэрозолями вредных, ядовитых, взрывоопасных и радиоактивных веществ [1–4].

Перспективным способом удаления субмикронных частиц является их коагуляция под действием ультразвуковых (УЗ) колебаний с целью повышения эффективности процессов газоочистки [3, 4, 8–12].

Различными авторами [2–4, 11] показана эффективность УЗ воздействия и созданы аппараты для практического использования.

Однако, особая проблема связана с необходимостью улавливания малых по размерам частиц, поскольку они способны легко проникать в альвеолы легких человека, и не улавливаются с помощью существующего пылеулавливающего оборудования [3–8]. Сегодня она не решена даже с учетом увеличения площади эффективного сечения столкновения [14, 15] из-за полного увлечения субмикронных частиц в колебательное движение газового потока, которое нивелирует их ортокинетику взаимодействие [9–11].

Это приводит к необходимости поиска новых условий УЗ воздействия, в частности, использования ударно-волновых воздействий [16, 17].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для анализа влияния таких воздействий целесообразно применять вероятностный подход Смолуховского (X. Shen, C. Sheng), описывающий эволюцию концентраций частиц различных масс при заданной вероятности столкновения пары частиц (1):

$$\frac{\partial n_k}{\partial t}(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} \beta_{i,k-i} n_i(t) n_{k-i}(t) - n_k \sum_{i=1}^N \beta_{i,k} n_i(t) \quad (1)$$

где n_k – концентрация частиц с условным диаметром

$d_0 \sqrt[3]{k}$, м³; $\beta_{i,k}$ – вероятность столкновения час-

тиц с условными диаметрами $d_0 \sqrt[3]{i}$ и $d_0 \sqrt[3]{k}$, м³/с.

Исследования проводились в диапазоне длительностей импульса от 2 мкс и более, в диапазонах интенсивностей УЗ воздействия, усреднённых за период времени, до 0,06 Вт/см², ограниченных конструктивными особенностями источников излучения (средний уровень звукового давления в дальнем поле не превышает 150 дБ) [3, 6, 8].

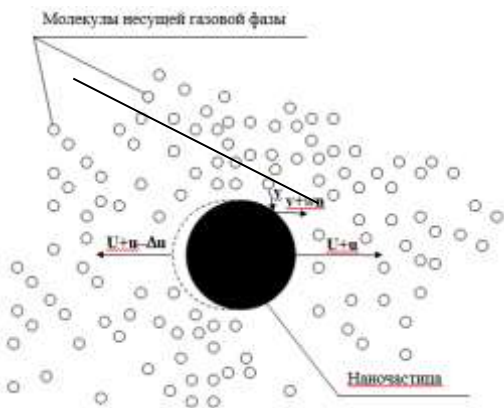
Исследуемый диапазон размеров частиц составлял 0,1...0,5 мкм – субмикронные частицы, образуемые на практике в технологических процессах. Плотность вещества частиц составляла – 2000 кг/м³, характерная плотность диоксида кремния или золы.

Наиболее изучено влияние гидродинамического и ортокинетику взаимодействия, при которых вероятность столкновения [9, 10]:

$$\beta[p](t) = \beta_H[p](t) + \beta_O[p](t) \quad (2)$$

где $\beta_H[p](t)$ – компонента гидродинамического взаимодействия, м³/с; $\beta_O[p](t)$ – компонента ортокинетического взаимодействия, м³/с.

Сравнительные оценки 2-х компонент показывают, что для исходных параметров из указанного диапазона гидродинамическое взаимодействие является основным. Поскольку вероятность гидродинамического взаимодействия пропорциональна площади эффективного сечения столкновения [18, 19] субмикронных частиц, следует определить влиянием броуновского движения. Очевидно, что случайные флуктуации пространственного положения частиц, определяемые дисперсией σ_r , вызваны соударением молекул несущей газовой фазы с поверхностью частицы (рис. 1) и определяются частотой соударений и скоростью молекул в момент соударения [16–18].



v – случайная скорость движения молекул несущей газовой фазы;
 u – случайная составляющая скорости движения частицы, вызванная тепловым соударением молекул несущей газовой фазы с частицей;
 U – детерминированная составляющая скорости движения, вызванная увлечением частицы в колебательное движение газового потока

Рис. 1. Схематичное изображение процесса соударения молекул несущей газовой фазы с субмикронной частицей и изменения скорости частицы в результате элементарного акта соударения

При этом флуктуации пространственного положения частицы приводят к изменению площади эффективного сечения столкновения

Для определения дисперсии пространственного положения частицы предложена численная модель, основанная на методе Монте-Карло, которая позволила установить зависимости площади эквивалентного сечения столкновения и вероятности столкновения от амплитуды давления для различных условий УЗ воздействия [20-29]:

1. Непрерывное синусоидальное

$$p'(t) = p_A \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right).$$

2. Ударно-волновое (импульсное)

$$p'(t) = p_A e^{-\frac{t - \lfloor \frac{t}{T} \rfloor T}{\tau}}.$$

2.1. Ударная волна сжатия:

$$p_A > 0.$$

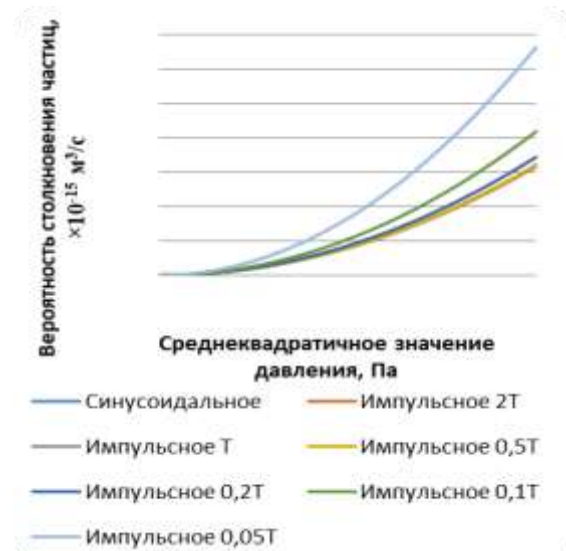
2.2. Ударная волна разрежения:

$$p_A < 0.$$

Произведенные расчеты позволили установить, что при синусоидальном воздействии ширина диапазона изменения площади сечения столкновения близка к нулю. Воздействие волнами сжатия приводит к уменьшению площади эквивалентного сечения столкновения.

И только при воздействии волнами разрежения увеличивается площадь эффективного сечения столкновения, причем площадь эффективного сечения столкновения может увеличиться для субмикронных частиц до 2 раз при энергиях колебаний, обеспечиваемых современными излучателями [3, 4].

Установленные значения сечений столкновения позволили определить вероятности столкновения в зависимости от условий воздействия для различных частиц. Исследуемый диапазон длительностей импульса составил от 0,05T (2 мкс) до 2T (90 мкс). Типичные зависимости представлены на рис. 2.



а) волны разрежения

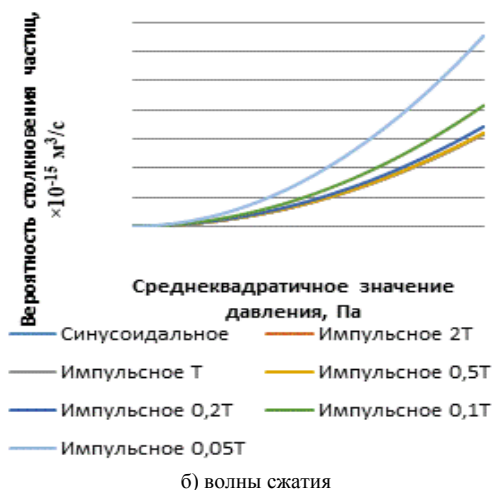


Рис. 2. Зависимости вероятности столкновения частиц размером 500 нм при ударно-волновом воздействии (диаметр частиц)

Как следует из представленных зависимостей, воздействие ударными волнами (как волнами сжатия, так и волнами разрежения) увеличивает вероятность столкновения по сравнению с синусоидальным воздействием.

Это подтверждает принципиальную возможность повышения эффективности коагуляции с помощью ударно-волнового воздействия без увеличения суммарной вводимой энергии в несущую газовую фазу.

При этом воздействие ударной волны обеспечивает повышение вероятности столкновения до 5 раз и более при ударно-волновом воздействии (воздействии волнами сжатия и разрежения) по сравнению с синусоидальным воздействием, использование волн разрежения приводит к дополнительному увеличению вероятности столкновения до 1,5 раз по сравнению с воздействием ударной волны сжатия.

Поскольку на практике создать ударные волны сжатия при отсутствии периодов разрежения или волны разрежения при отсутствии периодов сжатия невозможно были проведены исследования при различных соотношениях между длительностями волны сжатия и следующей за ней волной разрежения

$\frac{\tau_c}{\tau_d}$, позволившие установить, что наибольший

эффект (ускорение коагуляции более чем в 5 раз по сравнению с синусоидальным воздействием) на единицу введённой энергии обеспечивает воздействие последовательностью ударных волн, где длительность волны сжатия меньше длительности волны разрежения. Это объясняется тем, что волна разрежения даёт больший прирост площади сечения столкновения, который превышает модуль изменения площади сечения в меньшую сторону при воздействии волной сжатия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная и разработана модель влияния ультразвукового воздействия в газовой среде, учитывающая влияние броуновского движения на площадь эффективного сечения столкновения частиц позволила выявить возможность дополнительного, по сравнению с синусоидальным воздействием, повышения эффективности коагуляции до 5 раз и более при использовании ударно-волнового воздействия на субмикронные частицы при неизменных энергозатратах.

Анализ возможностей практической реализации выявленных условий УЗ воздействия имеющимися источниками УЗ колебаний (например, многочастотными излучателями, генерирующими последовательность гармоник кратных частот, прерывателями потока, мембранами), позволил установить, что наиболее выгодно обеспечивать ударно – волновое воздействие, имеющее увеличенную длительность волны разрежения по сравнению с волной сжатия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Алтайского края Российской Федерации в рамках научного проекта № 19-48-220006.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. I. Oren, N. Haddad 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.
2. Тимошенко, В.И. Осаждение и осадконакопление промышленных дымов / В.И. Тимошенко, Н.Н. Чернов. – Ростов-на-Дону: Ростиздат – 2004. – 224 с.
3. V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh, R.S.Dorovskikh, V.A. Nesterov, S.S. Khmelev, K.V. Shalunova. Efficiency Increase of Wet Gas Cleaning from Dispersed Admixtures by the Application of Ultrasonic Fields // *Archives of Acoustics.* – Institute of Fundamental Technological Research PAN, Warszawa, 2016. – Vol. 40, No. 4. – P. 757-771.
4. V. N. Khmelev, Andrey V. Shalunov, Sergey N. Tsyganok, Roman N. Golykh, Ksenija V. Shalunova. Experimental Investigations of the Effectiveness of Acoustic Vibration Influence of Ultrasonic Frequency on Fogs // *Romanian Journal of Acoustics and Vibration.* – 2017. – No. 2 – P. 69–74.
5. A. Mizuno, Electrostatic precipitation // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* – 2000. – P. 615.
6. E. Rieraa, A. Cardonib, J. A. Gallego-Juárez, V. M. Acostaa, A. Blancoa, G. Rodrígueza,b, M. Blascoc, L. E. Herranzd. Recent advances in the development and application of power plate transducers in dense gas extraction and aerosol agglomeration processes // *43rd Annual Symposium of the Ultrasonic Industry Association.* – 2015. – P. 67 – 72.
7. B. Crook, Non-inertial Samplers // *Biological Perspectives*, in *Bioaerosols Handbook*, edited by C. S. Cox and C. M. Wathes, CRC Press, – 1995.
8. E. Riera, J.Gallego-Juarez, T. Mason Airborne ultrasound for the precipitation of smokes and powders and the destruction of foams // *Ultrasonics Sonochemistry.* 2006. – V.13. – P. 107.
9. Sheng, C.D. Modeling Acoustic Agglomeration Processes Using Direct Simulation Monte Carlo Method / C.D. Sheng, X.L. Shen // *Journal of Aerosol Science.* – 2006. – Issue 37. – P. 16–36.
10. Sheng, C.D. Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particle / C.D. Sheng, X.L. Shen // *Journal of Aerosol Science and Technology.* – 2007. – Issue 41. – P. 1–13.

11. Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970. – 689 с.
 12. Ramin Imani Jajarmi. Acoustic separation and electrostatic sampling of submicron particles suspended in air // Technical Reports from, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. – 2016. – 99 p. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1049359/FULLTEXT01.pdf>
 13. Мюллер Г.В. Теория коагуляции полидисперсных систем. – В. Кн.: Коагуляция коллоидов [Текст] / Под ред А.И. Рабиновича и П.С. Васильева. М.–Л.: ОНТИ, 1936, С. 7-40.
 14. Протодьяконов И.О., Цибаров В.А., Чесноков Ю.Г. Кинетическая теория газозвесей [Монография] / Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. – 1985. – 200 с.
 15. Цибаров В.А. Кинетический метод в теории газозвесей [Монография] / Санкт-Петербург. гос. ун-т. — СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. ун-та, 1997. – 191 с.
 16. K. Shuster, M. Fichman, A. Goldshtein, C. Gutfinger. Agglomeration of submicrometer particles in weak periodic shock waves // Physics of Fluids. – 2002. – Vol.14. – NO. 5 – P. 1802 – 1805.
 17. A. Goldshtein, K. Shuster, P. Vainshtein, M. Fichman, C. Gutfinger. Particle motion in resonance tubes // Journal of Fluid Mechanics. – 1998. – Vol. 360. – NO. 1. – P. 1 – 20.
 18. Efstathios E. Michaelides. Brownian movement and thermophoresis of nanoparticles in liquids // International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 81, 2015, Pages 179-187.
 19. H. Yang, Matteo Cornaglia, Raphaël Trouillon, Thomas Lehnert, Martin A. M. Gijs. Study of constrained Brownian motion of nanoparticles near an interface using optical tweezers / SPIE, 2015.
 20. Oren I., Haddad N., Finkelstein R. Invasive pulmonary aspergillosis in neutropenic patients during hospital construction: before and after chemoprophylaxis and institution of HEPA filters // Am. J. Hematol, 2001. P. 257.
 21. Тимошенко В.И., Чернов Н.Н. Осаждение и осадконакопление промышленных дымов. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004.
 22. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A., Khmelev S.S., Shalunova K.V. Efficiency Increase of Wet Gas Cleaning from Dispersed Admixtures by the Application of Ultrasonic Fields // Arch. of Acoustics. – Institute of Fundamental Technological Research PAN. Warszawa, 2016. V. 40. № 4. P. 757.
 23. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Tsyganok S.N., Golykh R.N., Shalunova K.V. Experimental Investigations of the Effectiveness of Acoustic Vibration Influence of Ultrasonic Frequency on Fogs // Roman. J. of Ac. and Vibr. 2017. No. 2. P. 69.
 24. Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1970.
 25. Riera E., Gallego-Juarez J., Mason T. Airborne ultrasound for the precipitation of smokes and powders and the destruction of foams // Ultras. Sonochem. 2006. V.13. P. 107.
 26. Sheng, C.D., Shen X.L. Modelling acoustic agglomeration processes using direct simulation Monte Carlo method // J. of Aerosol Sci. 2006. – № 37. P. 16.
 27. Mizuno A. Electrostatic precipitation // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2000. P. 615.
 28. Riera E., Cardoni A., Gallego-Juárez J.A., Acosta V.M., Blanco A., Rodríguez G., Blasco M., Herranz L.E. Recent advances in the development and application of power plate transducers in dense gas extraction and aerosol agglomeration processes // 43rd Ann. Symp. of the Ultras. Ind. Assoc. 2015. P. 67.
 29. Jajarmi R.I. Acoustic separation and electrostatic sampling of submicron particles suspended in air // Tech. Reports from Royal Inst. of Tech. Stockholm, Sweden, 2016.
- 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.*
- Голых роман Николаевич, к.т.н., доцент кафедры МСИА, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru*

IDENTIFICATION OF ULTRASONIC IMPACT CONDITIONS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF COAGULATION OF SUBMICRON PARTICLES

V. N. Khmelev, A.V. Shalunov, R. N. Golykh

Biysk Institute of technology (branch) of the Altai state technical University. I. I. Polzunova", Biysk

The paper proposes and theoretically justifies an approach to improving the efficiency of coagulation of submicron suspended particles under the action of ultrasonic vibrations. It is proposed to influence particles with nonlinear im pulses of pulse durations from 2 microseconds or more, in the ranges of ULTRASONIC impact intensities averaged over a period of time, up to 0.06 W / cm² and limited by the design features of radiation sources (the average sound pressure level in the far field does not exceed 150 dB). On the basis of mathematical modeling, it is shown that the area of the effective cross-section of the collision of particles increases under the impulse action. This makes it possible to increase the coagulation efficiency at least 5 times more than the sinusoidal effect.

Index terms: gas cleaning, ultrasound, coagulation, vibrations, emitter.

REFERENCES

1. I. Oren, N. Haddad 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.
2. Timoshenko, V.I. Precipitation and sedimentation of industrial fumes / V.I. Timoshenko, N.N. Chernov. - Rostov-on-Don: Rostizdat - 2004. -- 224 p.
3. V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh, R.S. Dorovskikh, V.A. Nesterov, S.S. Khmelev, K.V. Shalunova. Efficiency Increase of Wet Gas Cleaning from Dispersed Admixtures by the Application of Ultrasonic Fields // *Archives of Acoustics.* - Institute of Fundamental Technological Research PAN, Warszawa, 2016. - Vol. 40, No. 4. - P. 757-771.
4. V. N. Khmelev, Andrey V. Shalunov, Sergey N. Tsyganok, Roman N. Golykh, Ksenija V. Shalunova. Experimental Investigations of the Effectiveness of Acoustic Vibration Influence of Ultrasonic Frequency on Fogs // *Romanian Journal of Acoustics and Vibration.* - 2017. - No. 2 - P. 69–74.
5. A. Mizuno, Electrostatic precipitation // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* - 2000. -- P. 615.
6. E. Riera, A. Cardonib, J. A. Gallego-Juárez, V. M. Acosta, A. Blanco, G. Rodríguez, b, M. Blascoc, L. E. Herranzd. Recent advances in the development and application of power plate transducers in dense gas extraction and aerosol agglomeration processes // *43rd Annual Symposium of the Ultrasonic Industry Association.* - 2015. -- P. 67 - 72.
7. B. Crook, Non-inertial Samplers // *Biological Perspectives*, in *Bioaerosols Handbook*, edited by C. S. Cox and C. M. Wathes, CRC Press, - 1995.
8. E. Riera, J. Gallego-Juarez, T. Mason Airborne ultrasound for the precipitation of smokes and powders and the destruction of foams // *Ultrasonics Sonochemistry.* 2006. - V.13. - P. 107.
9. Sheng, C.D. Modeling Acoustic Agglomeration Processes Using Direct Simulation Monte Carlo Method / C.D. Sheng, X.L. Shen // *Journal of Aerosol Science.* - 2006. - Issue 37. - P. 16–36.
10. Sheng, C.D. Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particle / C.D. Sheng, X.L. Shen // *Journal of Aerosol Science and Technology.* - 2007. - Issue 41. - P. 1–13.
11. Physical foundations of ultrasound technology / ed. L.D. Rosenberg. - M.: Nauka, 1970. -- 689 p.
12. Ramin Imani Jajarmi. Acoustic separation and electrostatic sampling of submicron particles suspended in air // *Technical Re-ports from, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.* - 2016. - 99 p. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1049359/FULLTEXT01.pdf>
13. Muller G.V. The theory of coagulation of polydisperse systems. - V. Kn.: Coagulation of colloids [Text] / Ed. By A.I. Rabin-vich and P.S. Vasilieva. M. – L.: ONTI, 1936, S. 7-40.
14. Protodyakonov I.O., Tsibarov V.A., Chesnokov Yu.G. The kinetic theory of gas suspensions [Monograph] / L.: Publishing house of Le-Ningr. un-that. - 1985. - 200 p.
15. Tsibarov V.A. Kinetic method in the theory of gas suspensions [Monograph] / St. Petersburg. state Univ. - St. Petersburg: Publishing House St. Petersburg. University, 1997. - 191 p. K. Shuster, M. Fichman, A. Goldshtein, C. Gutfinger. Agglomeration of submicrometer particles in weak periodic shock waves // *Physics of Fluids.* – 2002. – Vol.14. – NO. 5 – P. 1802 – 1805.
16. A. Goldshtein, K. Shuster, P. Vainshtein, M. Fichman, C. Gutfinger. Particle motion in resonance tubes // *Journal of Fluid Mechanics.* - 1998. - Vol. 360. - NO. 1. - P. 1 - 20.
17. Efstathios E. Michaelides. Brownian movement and thermophoresis of nanoparticles in liquids // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 81, 2015, Pages 179-187.
18. H. Yang, Matteo Cornaglia, Raphaël Trouillon, Thomas Lehnert, Martin A. M. Gijs. Study of constrained Brownian motion of nanoparticles near an interface using optical tweezers / *SPIE*, 2015.
19. Oren I., Haddad N., Finkelstein R. Invasive pulmonary aspergillosis in neutropenic patients during hospital construction: before and after chemoprophylaxis and institution of HEPA filters // *Am. J. Hematol*, 2001. P. 257.
20. Timoshenko V.I., Chernov N.N. Precipitation and sedimentation of industrial fumes. Rostov-on-Don: Rostizdat, 2004.
21. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A., Khmelev S.S., Shalunova K.V. Efficiency Increase of Wet Gas Cleaning from Dispersed Admixtures by the Application of Ultrasonic Fields // *Arch. of Acoustics.* - Institute of Fundamental Technological Research PAN. Warszawa, 2016. V. 40. No. 4. P. 757.
22. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Tsyganok S.N., Golykh R.N., Shalunova K.V. Experimental Investigations of the Effectiveness of Acoustic Vibration Influence of Ultrasonic Frequency on Fogs // *Roman. J. of Ac. and Vibr.* 2017.No. 2. P. 69.
23. Physical foundations of ultrasound technology / ed. L.D. Rosenberg. M.: Nauka, 1970.

24. Riera E., Gallego-Juarez J., Mason T. Airborne ultrasound for the precipitation of smokes and powders and the destruction of foams // *Ultras. Sonochem.* 2006. V.13. P. 107.
25. Sheng, C.D., Shen X.L. Modeling acoustic agglomeration processes using direct simulation Monte Carlo method // *J. of Aerosol Sci.* 2006. - No. 37. P. 16.
26. Mizuno A. Electrostatic precipitation // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2000.P. 615.
27. Riera E., Cardoni A., Gallego-Juárez J.A., Acosta V.M., Blanco A., Rodríguez G., Blasco M., Herranz L.E. Recent advances in the development and application of power plate transducers in dense gas extraction and aerosol agglomeration processes // *43rd Ann. Symp of the Ultras. Ind. Assoc.* 2015.P. 67.
28. Jajarmi R.I. Acoustic separation and electrostatic sampling of submicron particles suspended in air // *Tech. Reports from Royal Inst. of Tech. Stockholm, Sweden, 2016.*

Khmelev Vladimir Nikolaevich – doctor of technical Sciences, Deputy Director on scientific work of Biysk technological Institute (branch) FGBOU VPO Altai state technical University. I. I. Polzunova, tel. (3854)432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Shalunov Andrey Viktorovich-doctor of technical Sciences, Professor, head of the KAF. MSIA, Biysk technological Institute (branch) FGBOU VPO Altai state technical University. I. I. Polzunova, tel. (3854)432571, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.

Golykh Roman Nikolaevich - associate Professor of the Department of MSIA, Biysk technological Institute (branch) of the Polzunov AltSTU, tel. (3854)432570, e-mail grn@bti.secna.ru