

КОАГУЛЯЦИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СТОЯЧЕЙ ВОЛНОЙ

В.Н. Хмелёв, В.А. Нестеров, А.В. Шалунов, А.С. Боченков

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

Статья посвящена разработке коагуляционных камер для предварительного озвучивания газодисперсного потока с целью коагуляции частиц. Увеличение эффективности коагуляции высокодисперсных частиц достигается за счет формирования за-крученного газодисперсного потока, находящегося в ультразвуковой стоячей волне, что в свою очередь обеспечивает повышение уровня звукового давления и формирование зон с повышенной концентрацией дисперсных частиц.

Особенностью конструкции коагуляционной камеры является использование в ее основе протяженного ультразвукового трубчатого излучателя, работающего на изгибно-диаметральной моде колебаний и формирующего кольцевую стоячую волну с уровнем звукового давления 162 дБ.

Ключевые слова: ультразвук, газовая среда, ультразвуковая коагуляция, стоячая волна, закрученный поток.

ВВЕДЕНИЕ

Для очистки газовых сред от примесей в виде высокодисперсных частиц различного происхождения разработаны и применяются на практике газоочистные аппараты, основанные на использовании широкого спектра физических способов отделения частиц от газового потока. Наибольшее распространение на практике получили следующие способы улавливания сухие инерционные пылеуловители (циклоны, осадительные камеры и аппараты со встречно-закрученными потоками), мокрые пылеуловители (скрубберы Вентури, барботажно-пенные устройства), электрофильтры и другие [1-6]. В дополнение к этому, во многих промышленных отраслях производства требуется улавливание высокодисперсных частиц в качестве готового продукта, где также предъявляются высокие требования к газоочистному оборудованию. При этом разработанное на сегодняшний день оборудование не удовлетворяют, предъявляемым к ним требованиям по степени улавливания частиц [7]. Это обуславливает актуальность и необходимость поиска путей повышения эффективности улавливания частиц, как промышленных выбросов, так и частиц готового продукта. Для этого необходима разработка новых технологий и современных устройств, позволяющих осаждать дисперсные примеси с высокой эффективностью.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности газоочистного оборудования является предварительная коагуляция высокодисперсных частиц в высокоинтенсивных акустических полях. В первую очередь это связано с тем, что акустическая коагуляция является одним из немногих известных

способов время, не вносящим изменения в химический состав или физические свойства коагулируемых частиц [8-10].

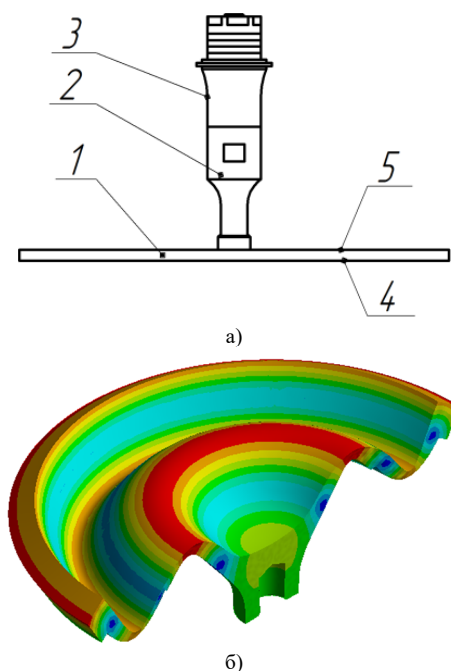
В проведенных ранее исследованиях [11] было установлено, что воздействие на закрученный газодисперсный поток высокоинтенсивными ультразвуковыми колебаниями приводит к повышению эффективности коагуляции частиц. При этом, внутри коагуляционных установок обеспечивалась максимальная равномерность распределения интенсивности колебаний с уровнем звукового давления не более 150дБ. Вследствие низкой интенсивности ультразвукового воздействия эффективность коагуляции была недостаточной [11].

Для повышения уровня звукового давления и, следовательно, эффективности коагуляции в настоящем исследовании авторами предложено формировать стоячую волну в коагуляционных камерах специальной формы и размеров. Далее рассмотрены различные конструкции ультразвуковых излучателей и коагуляционных камер в которых увеличение эффективности коагуляции достигается за счет действия двух факторов: увеличения уровня звукового давления и формирования узловых областей, в которых происходит локальное повышение концентрации.

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ ДЛЯ ГАЗОВЫХ СРЕД

На первом этапе, авторами статьи были проанализированы различные варианты наиболее перспективных УЗ излучателей предназначенных для создания высокоинтенсивных колебаний в газовых средах [12-14]. Одним из таких излучателей является изгибно-колеблющийся дисковый излучатель. На

рисунке 1 представлен эскиз изгибно-колеблющегося излучателя и его форма колебаний.

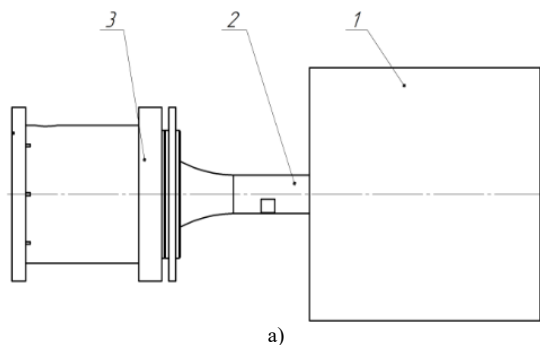


1 – дисковый излучатель; 2 – трансформатор колебательной скорости; 3 – электроакустический преобразователь; 4 – фронтальная сторона; 5 – тыльная сторона

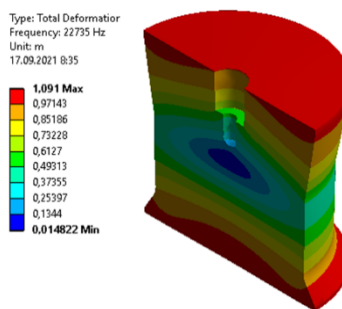
Рис. 1. Эскиз УЗ изгибно-колеблющегося излучателя (а) и его форма колебаний (б)

Основной недостаток показанного излучателя заключается в малой эффективной колеблющейся площади воздействия. Однако диаметр излучателя такого типа может достигать до 0.5 метра при частоте 20 кГц. Поэтому такой излучатель целесообразно применять при большом диаметре коагуляционной камеры.

Следующим рассмотренным излучателем является продольно-колеблющийся излучатель. На рисунке 2 представлен эскиз продольно-колеблющегося излучателя и его форма колебаний.



а)



б)

1 – излучатель; 2 – трансформатор колебательной скорости; 3 – электроакустический преобразователь

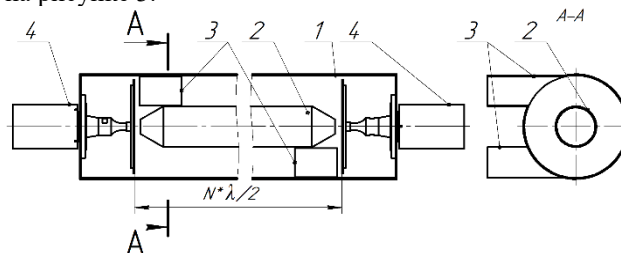
Рис. 2. Эскиз УЗ продольно-колеблющегося излучателя (а) и его форма колебаний (б)

Площадь колеблющейся торцевой поверхности такого излучателя может достигать 100%, при этом поперечное сечение может представлять собой сечение прямоугольник, круг или другую форму. При этом усложнение формы может привести к снижению надежности излучателя.

Основным недостатком такого излучателя является ограниченный размер колеблющейся поверхности. Диаметр такого излучателя не превышает 250-300 мм при частоте 20 кГц.

КОАГУЛЯЦИОННАЯ КАМЕРА С ЗАКРУЧЕННЫМ ПОТОКОМ

На следующем этапе была разработана коагуляционная камера на основе трубы с тангенциальным подводом и отводом газодисперсного потока. Эскиз камеры представлен на рисунке 3.



1 – корпус агломератора; 2 – вытеснитель; 3 – тангенциальный входной/выходной патрубок; 4 – УЗ излучатель

Рис. 3. Эскиз коагуляционной камеры с тангенциальным входным и выходным патрубками

Конструкция камеры обеспечивает установку как изгибно-колеблющегося, так и продольно-колеблющегося излучателя. Коагуляционная камера работает следующим образом. Газодисперсный поток, поступает в камеру (поз.1) через тангенциальный входной патрубок (поз. 3). Внутри камеры, в результате движения по спиральной траектории, под действием центробежных сил происходит расслоение закрученного газодисперсного потока и смещение дисперсных частиц к периферийной области потока, в направлении внешнего корпуса (поз. 1). Вытеснитель (поз. 2) исключает попадания частиц в приосевую

область, в которой центробежные силы малы и недостаточны для отнесения частиц на периферию.

Для формирования стоячей волны внутри камеры источники УЗ колебаний расположены друг от друга на расстоянии кратном половине длины волны ультразвуковых колебаний на частоте воздействия в газовой среде. При таких условиях частицы смещаются в узлы стоячей волны, в результате чего формируются зоны локального повышения концентрации. Это приводит к сближению частиц и образованию агломератов. В тоже время, увеличение размеров и повышение массы агломератов приводит к дальнейшему увеличению скорости смещения дисперсных частиц к периферийной области потока. Газодисперсный поток, содержащий агломераты дисперсных частиц покидает камеру через выходной патрубок (поз.3). Для обеспечения высокой равномерности УЗ воздействия внутренний диаметр коагуляционной камеры равен диаметру ультразвукового излучателя.

Для сравнительного анализа формируемых распределений уровня звукового давления при использовании обоих типов излучателей (изгибно-колеблющегося и продольно-колеблющегося) на следующем этапе были проведены расчеты формируемого ультразвукового поля. Расчеты проведены методом конечно-элементного анализа с помощью гармонического акустического анализа.

На рисунке 4 приведены распределения уровня звукового давления, формируемого в коагуляционной камере при использовании изгибно-колеблющегося излучателя (рис. 4, а) и продольно-колеблющегося излучателя (рис 4, б).

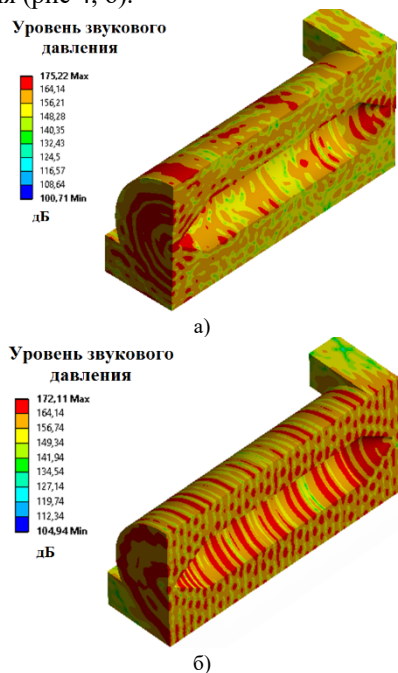


Рис. 4. Распределение уровня звукового давления в коагуляционной камере при использовании изгибно-

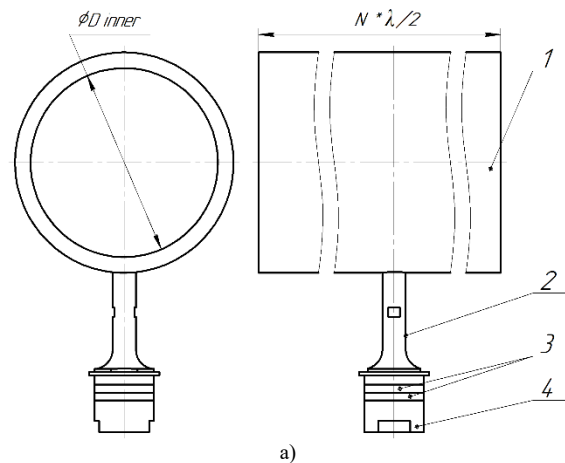
колеблющегося излучателя (а) и продольно-колеблющегося излучателя (б).

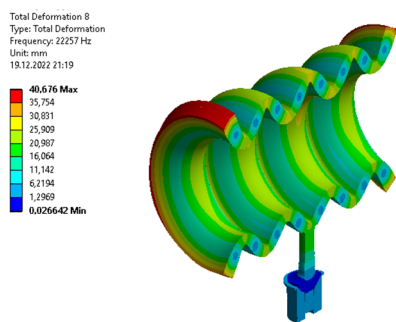
Анализ распределений уровня звукового давления показал, что продольно-колеблющийся излучатель обеспечивает большую равномерность и регулярную структуру ультразвукового поля (средний уровень звукового давления составил 161 дБ). При использовании изгибно-колеблющегося излучателя средний уровень звукового давления составил 157 дБ. В процессе исследований установлено, что увеличение расстояния между излучателем и отражателем более 20-30 длин волн (при амплитуде колебаний излучателя не более 50 мкм) приводит к существенному затуханию УЗ колебаний в газе, вследствие чего резонансного усиления колебаний не происходит, а стоячая волна не формируется. Критическое расстояние во многом зависит от уровня звукового давления, формируемого ультразвуковым излучателем и концентрации дисперсных частиц. Таким образом, ограниченная длина камеры и малый диаметр излучателей является основной причиной низкой эффективности или низкой производительности такой системы коагуляции [15].

КОАГУЛЯЦИОННАЯ КАМЕРА НА ОСНОВЕ ТРУБЧАТОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Для увеличения времени озвучивания газодисперсного потока в стоячей волне на следующем этапе было предложено использовать протяженный ультразвуковой трубчатый излучатель. Трубчатый излучатель представляет собой трубу, обеспечивающую формирование изгибно-диаметральных или диаметральных колебаний на частоте выше 20 кГц.

В процессе исследований была разработана конструкция трубчатого излучателя. Расчет проводился посредством модального анализа в системе конечно-элементного моделирования. На рисунке 5 представлен эскиз трубчатого излучателя и его форма колебаний.



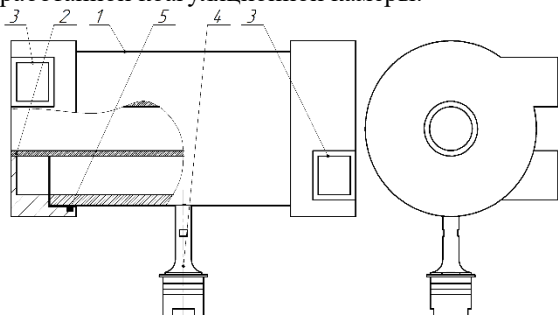


б)

Рис. 5. Эскиз УЗ трубчатого излучателя (а) и форма его колебаний (б)

Использование такого типа излучателя позволяет создать регулярную структуру колебаний большой протяженности. Так как данный тип излучателя формирует диаметральные колебания по всей своей длине на изгибно-диаметральной моде колебаний, протяженность такого излучателя ограничена только затуханием колебаний в материале излучателя, мощностью пьезоэлектрического преобразователя и надежностью узла присоединения излучателя к пьезоэлектрическому преобразователю.

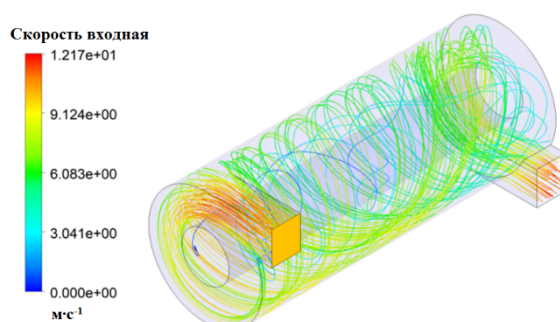
На следующем этапе была разработана коагуляционная камера, основанная на конструкции трубчатого излучателя. На рисунке 6 приведен эскиз разработанной коагуляционной камеры.



1 – УЗ трубчатый излучатель; 2 – вытеснитель; 3 – тангенциальные завихрители; 4 – пьезоэлектрический преобразователь; 5 – кольцевое уплотнение

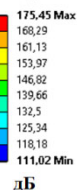
Рис. 6. Эскиз коагуляционной камеры на базе ультразвукового трубчатого излучателя с тангенциальными входным и выходным завихрителями

Принцип работы коагуляционной камеры аналогичен принципу работы ранее разработанной камеры, однако, ультразвуковое воздействие создается трубчатым излучателем (являющимся одновременно корпусом коагуляционной камеры). Далее были проведены расчеты, позволившие получить поле скоростей газовых потоков внутри камеры (скорость на входе задана 10 м/с) и распределение уровня звукового давления. На рисунке 7 представлено распределение газовых потоков (а) и распределение уровня звукового давления (б) в коагуляционной камере, основанной на трубчатом излучателе.

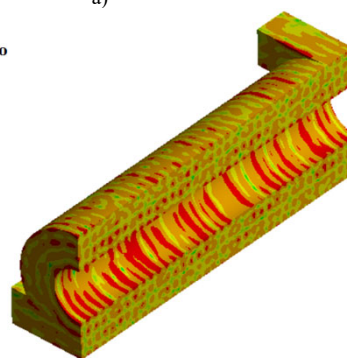


а)

Уровень звукового давления



дБ



б)

Рис. 7. Распределение газовых потоков (а) и распределение уровня звукового давления (б) в коагуляционной камере

Для формирования стоячей волны расстояние между внутренней стенкой излучателя и внешней стенкой вытеснителя должно быть кратно половине длины волны в газовой среде.

Анализ распределения уровня звукового давления показал, что трубчатый излучатель совместно с вытеснителем формирует регулярную структуру ультразвукового поля (средний уровень звукового давления составил 162 дБ) с множеством узлов колебаний. Анализ картины скоростей потоков газа показал, что в большей части коагуляционной камеры обеспечивается высокая тангенциальная скорость, не менее 70% от скорости входящего потока.

За счет диаметральных колебаний трубчатого излучателя формируется кольцевая стоячая волна с узлами колебаний в виде колец. За счет этого частицы удерживаются в кольцевых областях, что способствует повышению эффективности концентрирования частиц и их объединение в узлах колебаний и на периферии у стенок излучателя. Для герметичного присоединения тангенциальных завихрителей (поз.3) к трубчатому излучателю (поз.1) используется кольцевое уплотнение (поз.5), которое находится в зоне минимальных изгибных колебаний излучателя. Это позволяет снизить влияние присоединительных элементов конструкции на распределение колебаний и потребляемую мощность. Помимо этого, кольцевые уплотнения выступают в роли демпферов, исключая возникновение

паразитных низкочастотных колебаний и процессе работы излучателя.

За счет того, что внутри камеры создается кольцевая стоячая волна поперек движения потока и наличие различных элементов конструкции внутри объема не влияет на устойчивость стоячей волны, возможна периодическая установка завихрителей внутри камеры для обеспечения высокой (квазипостоянной) тангенциальной составляющей скорости потока. При этом закрепление завихрителей (тангенциальных или жалюзийных) осуществляется на вытеснителе. Длина коагуляционной камеры, основанной на трубчатом излучателе, в данном случае, ограничена гидравлическими потерями давления в камере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований были разработаны коагуляционные камеры для предварительного озвучивания газодисперсного потока с целью коагуляции частиц. Увеличение эффективности коагуляции высокодисперсных частиц достигается за счет формирования закрученного газодисперсного потока, находящегося в ультразвуковой стоячей волне, что в свою очередь обеспечивает повышение уровня звукового давления и формирование зон с повышенной концентрацией.

Особенностью конструкции коагуляционной камеры второго типа является использование в ее основе протяженного ультразвукового трубчатого излучателя, работающего на изгибно-диаметральной моде колебаний и формирующего кольцевую стоячую волну с уровнем звукового давления 162 дБ.

Расчет и исследование коагуляционных камер были выполнены при поддержке стипендии Президента РФ для аспирантов и молодых ученых СП-4705.2022.1, расчет продольно колеблющихся и изгибных ультразвуковых дисковых излучателей был проведен при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Алтайского края Российской Федерации в рамках научного проекта № 19-48-220001.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ветошкин, А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки [Текст]: учебное пособие / А.Г. Ветошкин. – Пенза.: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 210 с.
2. Козлова, С.А. Оборудование для очистки газов от промышленных печей [Текст]: электронный курс лекций / С.А. Козлова, И.М. Шалаев, О.В. Раева, А.В. Киселев. – Красноярск: СФУ, 2007. – 156 с.
3. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Golykh R.N., Dorovskikh R.S. Increase of separation efficiency in the inertial gas-purifying equipment by high-intensity ultrasonic vibrations // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2014: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2014. – p. 233–239.
4. Mazyan, W.I., Ahmadi, A., Ahmed, H., Hoorfar, M. Increasing efficiency of natural gas cyclones through addition of tangential chambers // J. Aerosol Sci. – 2017. – № 110. – p. 36–42.

5. Oliveira, R.A.F., Guerra, V.G., Lopes, G.C. Improvement of collection efficiency in a cyclone separator using water nozzles: A numerical study // Chem. Eng. Process. Process Intensif. – 2019. – № 145. – p. 107667.
6. Xiong, Z., Ji, Z., Wu, X. Investigation on the Separation Performance of a Multicyclone Separator for Natural Gas Purification // Aerosol Air Qual. Res. – 2014. – № 14. – p. 1055–1065.
7. Uzhov, V.N. Purification of industrial gases from dust [Text] / A.U. Waldberg, B.I. Myagkov, I.K. Reshidov. – M.: Chemistry, 1981. – 392 p.
8. Gallego-Juarez, J.A. Application of acoustic agglomeration to reduce fine particle emissions from coal combustion plants [Текст] // Environ. Sci. Technol. – 1999. – № 33(21). – p. 3843–3849.
9. Riera-Franco de Sarabia, E. Investigation of the influence of humidity on the ultrasonic agglomeration of submicron particles in diesel exhausts [Текст] // Ultrasonics. – 2003. – № 41(4). – p. 277–281.
10. Khmelev, V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Golykh R.N., Dorovskikh R.S. Efficiency increase of the dust-extraction plant by high-intensity ultrasonic action // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2015. – p. 181–186.
11. Нестеров В. А. Повышение эффективности инерционного газоочистного оборудования наложением ультразвуковых полей высокой интенсивности. дис. ... канд. техн. наук. – Бийск, 2014. – 161 с.
12. 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 // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM – Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2015. pp. 224 – 228.
13. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A., Bobrova G.A. Study of the influence of secondary modes of vibrations on the uniformity of the distribution of working ring disk of ultrasonic disk radiators // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM2017: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2017. – p. 290–293.
14. 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 // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2016: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – p. 251–256.
15. Khmelev V.N., Nesterov V.A., Slivin A.N., Shalunov A.V., Nesterov A.A. Study of ultrasonic coagulation of dispersed particles in the implementation of the standing wave mode // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2019: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – p. 268–274.

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.

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.

Боченков Александр Сергеевич – аспирант кафедры МСИА, БТИ АлтГТУ, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова», тел (3854) 432570, e-mail: sanya.bochankov@mail.ru.

COAGULATION OF HIGHLY DISPERSED PARTICLES IN A SWIRLING FLOW UNDER THE INFLUENCE OF AN ULTRASONIC STANDING WAVE

V.N. Khmelev, V.A. Nesterov, A.V. Shalunov, A.S. Bochenkov

Biysk Technological Institute (branch) of the AltSTU, Biysk

The article is devoted to the development of coagulation chambers for preliminary sounding of a gas-dispersed flow in order to co-agulate particles. An increase in the efficiency of coagulation of highly dispersed particles is achieved due to the formation of a swirling gas-dispersed flow located in an ultrasonic standing wave, which in turn ensures an increase in the sound pressure level and the formation of zones with an increased concentration of dispersed particles.

A feature of the design of the coagulation chamber is the use of an extended ultrasonic tubular emitter at its base, operating on a flexural-diametric oscillation mode and forming an annular standing wave with a sound pressure level of 162 dB.

Index terms: ultrasonic, gas medium, ultrasonic coagulation, standing wave, swirling flow.

REFERENCES

1. Vetoshkin, A.G. Processes and devices for dust cleaning [Text]: textbook / A.G. Vetoshkin. - Penza.: Penz Publishing House. state University, 2005. - 210 p.
2. Kozlova, S.A. Equipment for cleaning gases from industrial furnaces [Text]: electronic course of lectures / S.A. Kozlova, I.M. Shalaev, O.V. Raeva, A.V. Kiselev. - Krasnoyarsk: SFU, 2007. - 156 p.
3. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Golykh R.N., Dorovskikh R.S. Increase of separation efficiency in the inertial gas-purifying equipment by high-intensity ultrasonic vibrations // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2014: Conference Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2014. pp. 233 - 239.
4. Mazyan, W.I., Ahmadi, A., Ahmed, H., Hoorfar, M. Increasing efficiency of natural gas cyclones through addition of tangential chambers // J. Aerosol Sci. 2017. 110, pp. 36-42.
5. Oliveira, R.A.F., Guerra, V.G., Lopes, G.C. Improvement of collection efficiency in a cyclone separator using water nozzles: A numerical study // Chem. Eng. Process. Process Intensif. - 2019. 145. 107667.
6. Xiong, Z., Ji, Z., Wu, X. Investigation on the Separation Performance of a Multicyclone Separator for Natural Gas Purification // Aerosol Air Qual. Res. - 2014. 14. pp. 1055-1065.
7. Uzhov, V.N. Purification of industrial gases from dust [Text] / A.U. Waldberg, B.I. Myagkov, I.K. Reshidov. - M.: Chemistry, 1981. - 392 p.
8. Gallego-Juarez, J.A. Application of acoustic agglomeration to reduce fine particle emissions from coal combustion plants [Текст] / J.A. Gallego-Juarez, E. Riera-Franco de Sarabia, G. Rodrigues-Corral, T.L. Hoffman, J. C. Galvez-Moraleda, J.J. Rodriguez-Maroto, F.J. Gomez-Moreno, A. Bahillo-Ruiz, M. Martin-Espigares, M. Acha // Environ. Sci. Technol. 1999. 33(21). pp. 3843-3849.
9. Riera-Franco de Sarabia, E. Investigation of the influence of humidity on the ultrasonic agglomeration of submicron particles in diesel exhausts [Текст] / E. Riera-Franco de Sarabia, L. Elvira-Segura, I. Gonzalez-Gomez, J.J. Rodriguez-Maroto, R. Munoz-Bueno, J.L. Dorronsoro-Areal // Ultrasonics. 2003. 41(4). pp. 277-281.
10. Khmelev, V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Golykh R.N., Dorovskikh R.S. Efficiency increase of the dust-extraction plant by high-intensity ultrasonic action // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015: Conference Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2015. pp. 181-186.
11. Nesterov V. A. Improving the efficiency of inertial gas cleaning equipment by applying high-intensity ultrasonic fields. dis. ... cand. tech. Sciences. - Biysk, 2014. - 161 p.
12. 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 // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM - Conference Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2015. pp. 224 - 228
13. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A., Bobrova G.A. Study of the influence of secondary modes of vibrations on the uniformity of the distribution of working ring disk of ultrasonic disk radiators // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2017. pp. 290-293.
14. 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 // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2016: Conference Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2016. pp. 251-256.
15. Khmelev V.N., Nesterov V.A., Slivin A.N., Shalunov A.V., Nesterov A.A. Study of ultrasonic coagulation of dispersed particles in the implementation of the standing wave mode // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2019: Conference Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2016. pp. 268-274.

Khmelev Vladimir Nikolayevich – 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.

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.

Nesterov Victor Alexandrovich – associate Professor of the Department MSIA BTI AltSTU, Ph. D., Biysk Technological Institute (branch) of ASTU named after I.I. Polzunova, tel. (3854) 432571, e-mail: nva@bti.secna.ru.

Bochenkov Alexander Sergeevich – post graduate student, Biysk Technological Institute (branch) of ASTU named after I.I. Polzunova, tel. (3854) 432571, e-mail: sanya.bochankov@mail.ru.