

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОАГУЛЯЦИИ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ВЫСОКОИНТЕНСИВНОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

В.Н. Хмелев, В.А. Нестеров, А.В. Шалунов, А.А. Нестеров, А.Н. Сливин

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

В статье представлены результаты, подтверждающие увеличение эффективности коагуляции в режиме стоячей волны и показана возможность реализации такого режима в практических конструкциях. При этом предложены и разработаны изгибно-колеблющийся дисковый излучатель, который обеспечивает уровень звукового давления в фокусе не менее 160 дБ и излучатель поршневого типа, который обеспечивает уровень звукового давления не менее 162 дБ. Разработанный экспериментальный стенд позволил исследовать влияние различных условий ультразвукового воздействия, выявить условия реализации режима резонансного усиления колебаний в режиме стоячей волны.

Ключевые слова – Ультразвук, газовая среда, ультразвуковой излучатель, ультразвуковая коагуляция, стоячая волна

ВВЕДЕНИЕ

Проблема удаления высокодисперсной твердой фазы из газовых сред требует решения во многих областях деятельности человечества [1-2]. Особенно это важно для улучшения экологии планеты за счет улавливания выбросов аэрозольных частиц в атмосфере. Кроме того, многие промышленные технологии невозможны без отделения готового продукта в технологических процессах, реализуемых в газовых средах (получение высокодисперсного кремния нанокристаллических частиц и т.п.).

В настоящее время для очистки отходящих газов и улавливания готового продукта в виде высокодисперсных (1-10 мкм) частиц разработаны и применяются различные аппараты, отличающиеся друг от друга, как по конструкции, так и по способу осаждения взвешенных частиц [3-6]. Наибольшее распространение получили сухие инерционные пылеуловители - циклоны, осадительные камеры и аппараты со встречно-закрученными потоками. Они обеспечивают эффективность улавливания дисперсных частиц до 95-99%, но для частиц крупнее 20 мкм, поскольку их эффективность существенно падает при улавливании высокодисперсных частиц с размерами менее 10 мкм [7]. Многочисленные попытки разработчиков повысить эффективность таких устройств за счет изменения конструктивных особенностей и режимов движения газодисперсной фазы не приносит желаемых результатов. Причина заключается в невозможности необходимого воздействия на каждую мелкую частицу, увлекаемую газовым потоком.

Одним из способов эффективного воздействия на каждую частицу является воздействие ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности [8-10]. Такое воздействие способно

изменять траектории частиц, движущихся в потоке и осуществлять их предварительную коагуляцию, обеспечивая повышение эффективности улавливания частиц.

При этом воздействие ультразвуковыми колебаниями на газодисперсный поток можно осуществлять различными способами. Для обеспечения максимального энергетического воздействия при реализации процесса акустической коагуляции высокодисперсных частиц необходимо формирование стоячей волны в газовой среде.

Однако, до настоящего времени не было проведено комплексных исследований процесса коагуляции при воздействии на частицы высокоинтенсивными УЗ колебаниями с установлением режима стоячей волны, вследствие отсутствия источников ультразвуковых колебаний, обеспечивающих такой режим излучения.

В связи с необходимостью решения проблем коагуляции и созданием новых источников ультразвукового воздействия возникает необходимость проведения исследований процесса коагуляции высокодисперсных частиц с размерами менее 10 мкм при реализации энергетически выгодного режима стоячей волны.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

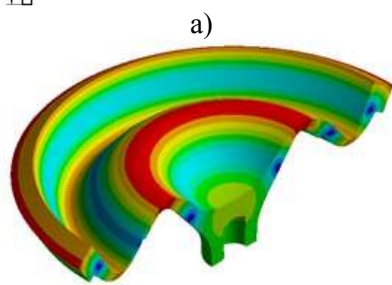
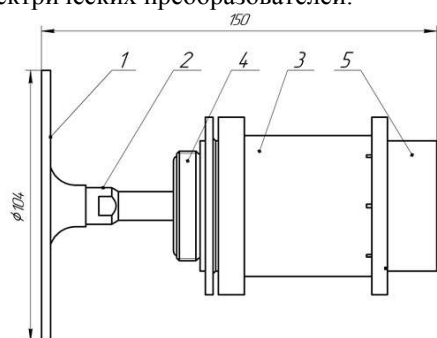
Исследования необходимы для выявления оптимальных режимов и условий ультразвукового воздействия (частота воздействия, уровень звукового давления) на различные по параметрам газодисперсные потоки (с различными по размерам частицами, при различных скоростях потока, временах воздействия и т.п.). Выявление таких режимов и условий воздействия позволит разработать оборудование для практического применения в различных технологических процессах.

Для организации и проведения таких исследований необходимо решить следующие задачи:

- для обеспечения воздействия на газодисперсные системы ультразвуковыми колебаниями с определенными параметрами разработать и изготовить ультразвуковые излучатели;
- создать экспериментальный стенд и разработать методику проведения исследований процесса коагуляции в заданных условиях стоячей волны.
- провести экспериментальные исследования для подтверждения эффективности и установления режимов коагуляции высокодисперсных частиц в различных условиях.

РАЗРАБОТКА ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГАЗОДИСПЕРСНЫЕ СИСТЕМЫ

Для создания в газовых средах УЗ колебаний высокой интенсивности (более 140 дБ) при проведении исследований были предложены и изготовлены два опытных образца ультразвуковых излучателей, основанных на применении пьезоэлектрических преобразователей.

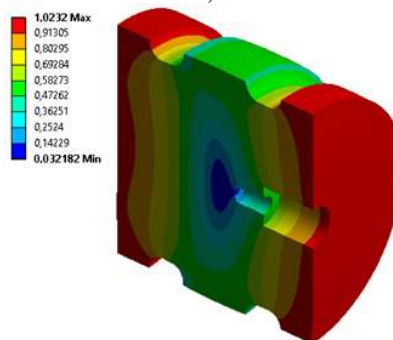
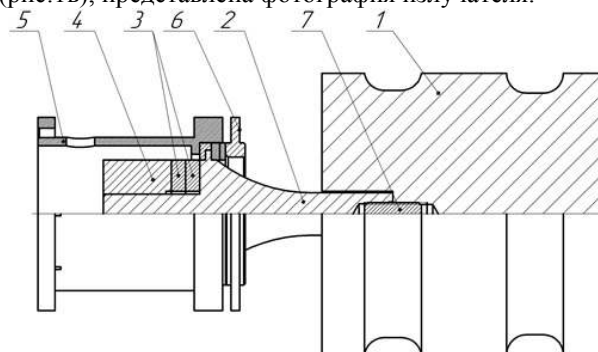


(а) – эскиз; (б) – форма колебаний дискового излучателя; (в) – фото излучателя; 1 – дисковый излучатель; 2 – пьезоэлектрический преобразователь; 3 – корпус; 4 – фланец; 5 – вентилятор

Рис. 1. УЗКС с дисковым излучателем

Излучающий элемент первого образца выполнен специальной формы (рис.1 а,б,в) в виде диска ступенчато-переменного сечения, который преобразует продольные колебания, передаваемые от пьезоэлектрического преобразователя в изгибные колебания излучающей поверхности диска [11-13].

На (рис.1а) представлен эскиз УЗКС с изгибно-колеблющимся дисковым излучателем. На рис.1б показана картина распределения амплитуд изгибных колебаний дискового излучающего элемента. На (рис. 1в), представлена фотография излучателя.



(а) – эскиз излучателя, (б)– форма колебаний УЗ дискового излучателя, (в) – фото излучателя; 1 – УЗ излучатель; 2 – концентратор пьезопреобразователя; 3 – пьезоэлектрические элементы; 4 – отражающая накладка; 5 – корпус; 6 – фланец; 7 – шпилька

Рис. 2. УЗКС с излучателем поршневого типа

Излучающий элемент второго образца выполнен в виде цилиндрического тела резонансной (полуволновой) длины. Эскиз УЗ излучателя вместе с присоединенной ультразвуковой колебательной системой представлен на (рис.2а). На (рис. 2б) представлена форма колебаний излучателя поршневого типа.

В табл. 1 приведены технические характеристики разработанных ультразвуковых излучателей для газовых сред.

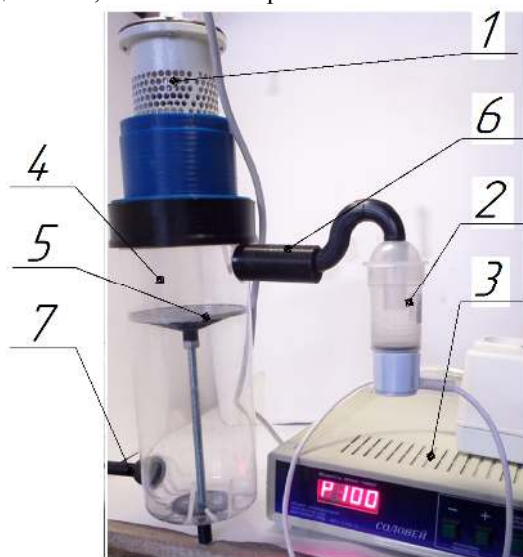
Табл. 1. Технические характеристики ультразвуковых излучателей для газовых сред

Параметр	Значение	
Тип излучающего элемента	Дисковый изгибно-колеблющийся	Поршневой продольно-колеблющийся
Диаметр	104	104
Рабочая частота, кГц	23,5	23,3
Электрическая мощность, Вт	60	90
Уровень звукового давления в фокусе, дБ	160 (на расстоянии 150 мм)	162 (на расстоянии 200 мм)
Уровень звукового давления на расстоянии 1 м, дБ	141	145

Созданные ультразвуковые излучатели способны обеспечить необходимое воздействие для коагуляции субмикронных частиц в газовых потоках.

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ УЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ В РЕЖИМЕ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ

Для проведения исследований разработан стенд, фото которого представлено на (рис3). Стенд обеспечивает различные условия ультразвукового воздействия, в том числе и режим стоячей волны.



1 – УЗ дисковый излучатель; 2 – генератор аэрозоля; 3 – УЗ генератор для питания дискового излучателя; 4 – коагуляционная камера; 5 – отражатель; 6 – входной патрубков; 7 – выходной патрубков

Рис. 3. Фото разработанного стенда

Стенд состоит из коагуляционной камеры (поз.4), на торцах которой установлены ультразвуковой излучатель (поз.1) и отражатель (поз.5). Отражатель имеет возможность перемещаться вдоль коагуляционной камеры. Коагуляционная камера с двух сторон имеет входной (поз.6) и выходной (поз.7) патрубки. Для подачи аэрозоля а коагуляционную камеру к входному патрубку (поз.6) присоединен ингалятор (поз.2). Питания ультразвукового излучателя осуществляет ультразвуковой электронный генератор (поз.3). При подаче твердых частиц в коагуляционную камеру ингалятор (поз.2) заменялся распылителем эжекционного типа, в бункер которого засыпались частицы диоксида кремния.

Режим стоячей волны обеспечивается за счет установки на определенном расстоянии (кратном половине длины волны в среде) от фронтальной поверхности дискового излучателя до отражателя. При этом формирование стоячей волны в газовой среде является наиболее выгодным режимом, позволяющим максимально эффективно использовать энергию ультразвуковых колебаний при осуществлении процесса акустической коагуляции высокодисперсных частиц. Таким образом, установление стоячей волны в объеме камеры предварительной обработки газодисперсного потока позволяет существенно увеличить эффективность коагуляции за счет увеличения концентрации и сближения частиц в узловых областях.

Для исследования процесса коагуляции водного аэрозоля при наличии воздушных потоков на выходном патрубке коагуляционной камеры был установлен вентилятор, создающий разрежение в объеме камеры. На выходном патрубке был установлен приемник и передатчик измерителя концентрации.

Эффективность коагуляции с помощью следующего выражения:

$$K = 1 - \frac{N_{Us}}{N} \cdot 100\% , \quad (1)$$

где N_{Us} – концентрация аэрозоля на выходе при ультразвуковом воздействии, $г/м^3$; N – концентрация аэрозоля на выходе без ультразвукового воздействия, $г/м^3$.

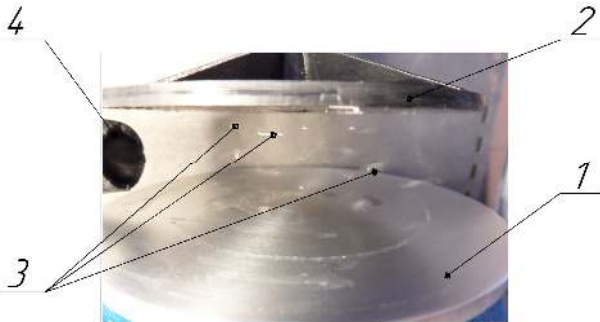
Таким образом при полном осаждении агломератов частиц в коагуляционной камере эффективность коагуляции составляет 100%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе исследований во входной патрубков стенда подавался водяной аэрозоль с размером частиц $d_{32}=5$ мкм аэрозоль (от ингалятора), а также частицы диоксида кремния (аэросил 175, $D_{32} = 1$ мкм).

На (рис. 4) приведена фотография коагуляции водного аэрозоля в стоячей волне.

В ходе эксперимента выявлено, что при отсутствии воздушных потоков в коагуляционной камере агломерация частиц и их осаждение происходило за 1...2 секунды ультразвукового воздействия. При ультразвуковом воздействии на твердые частицы, полученные агломераты перемещались в узлы стоячей волны. Образовавшиеся агломераты имели форму дисков, а условный диаметр достигал 5 мм, при толщине менее 0,3 мм.



1 – ультразвуковой излучатель; 2 – отражатель; 3 – агломераты частиц диоксида кремния; 4 – патрубок для подачи аэрозоля
Рис. 4. Коагуляция в стоячей волне

Однако при ультразвуковом воздействии на водяной аэрозоль в процессе коагуляции агломераты также перемещались в узлы стоячей волны, но при этом имели шарообразную форму (за счет поверхностного натяжения), диаметр которых достигал 2-3 мм. Таким образом, проведенные исследования подтвердили высокую эффективность ультразвукового воздействия в режиме стоячей волне для повышения ускорения процесса коагуляции дисперсных частиц.

На рис. 5 приведена фотография осевших капель воды на стенке коагуляционной камеры.

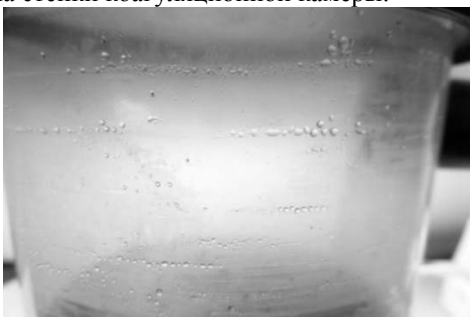


Рис. 5. Распределение капель аэрозоля на стенке коагуляционной камеры

В процессе исследований во входной патрубок подавался аэрозоль. В ходе исследований, для изучения влияния режима стоячей волны изменялось расстояние между излучателем и отражателем.

Исследования проводились с использованием двух разработанных УЗ излучателей – изгибно-колеблющегося и поршневого излучателя. На рис. 6 представлена зависимость эффективности

ультразвуковой коагуляции от расстояния между излучателем и отражателем при использовании изгибно-колеблющегося дискового излучателя.

Анализ полученных данных показал, что существуют оптимальные расстояния от излучателя до отражателя, при которых достигается локальные максимумы эффективности коагуляции. Это связано с формированием внутри коагуляционной камеры режима ультразвуковой стоячей волны. Как видно из полученной зависимости при расстояниях до 170 мм происходит повышение эффективности коагуляции. Это вызвано увеличением времени пребывания аэрозоля в камере, в течение которого ультразвуковое поле интенсифицирует процесс столкновения частиц аэрозоля между собой.

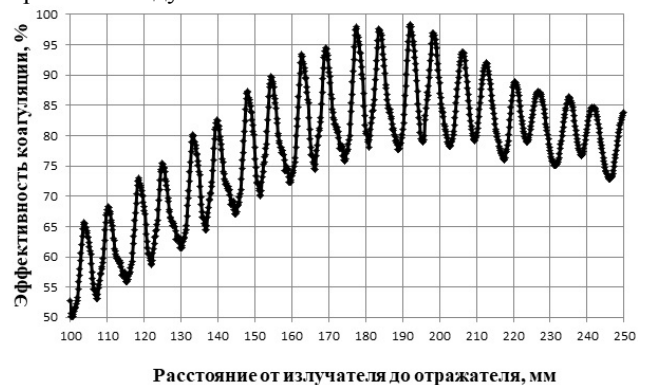


Рис. 6. Зависимости эффективности коагуляции от расстояния от излучателя до отражателя (изгибно-колеблющийся дисковый излучатель)

Достигнув максимального значения эффективности при расстояниях 175-195 мм далее происходит снижение эффективности коагуляции. Обусловлено это затуханием ультразвука, уменьшением объема газодисперсной среды с упорядоченной структурой стоячей волны и снижением уровня звукового давления за счет общего увеличения объема резонансной камеры. Далее были получены огибающие зависимости по максимумам эффективности коагуляции с использованием, как дискового излучателя, так и излучателя поршневого типа (рис. 7).

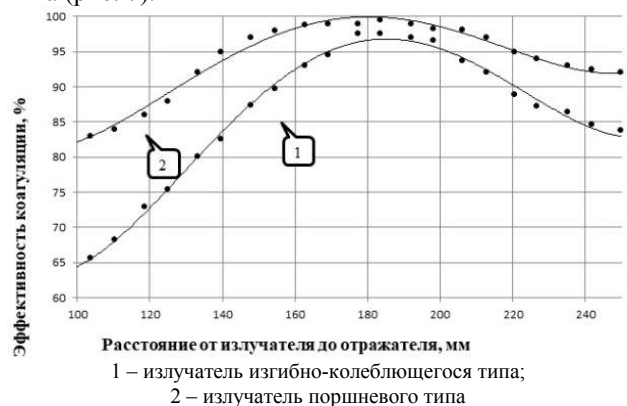


Рис. 7. Зависимости эффективности коагуляции от расстояния от излучателя до отражателя

Исследования проводились при следующих условиях: уровень звукового давления – 147 дБ, расход газа – 0,2 литр в секунду, концентрация аэрозоля – 30 г/м³, размер капель аэрозоля 5 мкм.

Анализ полученных зависимостей показал, что эффективность коагуляции существенно зависит от условий ультразвукового воздействия. При этом установление режима стоячей волны существенно (до 2 раз) повышает эффективность коагуляции.

Таким образом, при использовании обоих типов излучателей максимальная эффективность достигается при расстояниях в диапазоне от 170 до 200 мм, однако необходимо обеспечивать режим стоячей волны. При этом стоячая волна обеспечивается только при условии кратности расстояния половине длины волны в газовой среде. Небольшое изменение расстояния приводит к снижению эффективности коагуляции (в среднем на 20 %) вследствие ухода из резонансного режима воздействия ультразвуковой стоячей волной.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 7 показал также, что эффективность коагуляции выше при использовании поршневого излучателя. Это достигается за счет обеспечения большей эффективной площади колеблющейся поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы получены результаты, подтверждающие увеличение эффективности коагуляции в режиме стоячей волны и показана возможность реализации такого режима в практических конструкциях. Для этого:

– предложены и разработаны два типа ультразвуковых излучателей, пригодных для реализации воздействия на газодисперсные системы. При этом изгибно-колеблющийся дисковый излучатель обеспечивает уровень звукового давления в фокусе не менее 160 дБ, а излучатель поршневого типа не менее 162 дБ;

– разработанный экспериментальный стенд позволил исследовать влияние различных условий ультразвукового воздействия, выявить условия реализации режима резонансного усиления колебаний в режиме стоячей волны.

– проведенные экспериментальные исследования процесса ультразвуковой коагуляции высокодисперсных частиц в стоячей волне с помощью разработанного стенда позволили получить необходимы данные для реализации процесса коагуляции с максимальной эффективностью.

Исследование проводилось при финансовой поддержке РФФИ и Министерства образования и науки Алтайского края в рамках научного проекта № 18-48-220009

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Gallego-Juarez, J.A. Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound [Текст] / J.A. Gallego-Juarez, K.F. Graff. – Woodhead Publishing, 2015. P. 1166.
2. 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.
3. Surmen, A., Avci, A., Karamangil, M.I. Prediction of the maximum-efficiency cyclone length for a cyclone with a tangential entry // Powder Technol. 2011. 207(1). pp. 1-8.
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. 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
12. 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.
13. Khmelev, V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Golykh R.N., Nesterov V.A. The measurements of acoustic power introduced into gas medium by the ultrasonic apparatuses with the disk-Type radiators // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2016: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2016. pp. 251-256.

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.

Нестеров Алексей Александрович – инженер кафедры МСИА, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. +7 (3854) 43-25-70, e-mail: Iron_xx88@mail.ru.

Сливин Алексей Николаевич – доцент кафедры МСИА БТИ АлтГТУ, к.т.н., Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел.: +7 (3854) 43-25-70, e-mail: san@bti.secna.ru.

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF COAGULATION OF HIGHLY DISPERSED PARTICLES IN A HIGH-INTENSITY ULTRASONIC FIELD

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

Biysk Technological Institute (branch) of the AltSTU

Abstract – The article presents the results confirming the increase in the efficiency of coagulation in the standing wave mode and shows the possibility of implementing this mode in practical designs. At the same time, a flexibly oscillating disk emitter that provides a sound pressure level in focus of at least 160 dB and a piston-type emitter that provides a sound pressure level of at least 162 dB are proposed and developed. The developed experimental stand allowed us to study the influence of various conditions of ultrasonic exposure, to identify the conditions for implementing the resonant amplification mode of vibrations in the standing wave mode.

Index terms: Ultrasound, a gaseous medium, ultrasonic transducer, ultrasonic coagulation, standing wave

REFERENCES

1. Gallego-Juarez, J.A. Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound [Текст] / J.A. Gallego-Juarez, K.F. Graff. – Woodhead Publishing, 2015. P. 1166.
2. 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.
3. Surmen, A., Avci, A., Karamangil, M.I. Prediction of the maximum-efficiency cyclone length for a cyclone with a tangential entry // Powder Technol. 2011. 207(1). pp. 1-8.
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. 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
12. 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.
13. Khmelev, V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Golykh R.N., Nesterov V.A. The measurements of acoustic power introduced into gas medium by the ultrasonic apparatuses with the disk-Type radiators // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2016: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2016. pp. 251-256.

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.

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 Institute of technology (branch) fgbou VO "Altai state technical University. I. I. Polzunova", tel (3854) 432570 e-mail: nva@bti.secna.ru.

Nesterov Alexei Alexandrovich, engineer of MSIA Department of Biysk technological Institute (branch) Of the Altai state technical University, phone: +7 (3854) 43-25-70, e-mail: Iron_x88@mail.ru.

Slivin Alexey Nikolayevich -associate Professor of the Department of MSIA BTI AltSTU, Ph. D., Biysk Institute of technology (branch) Of the Altai state technical University phone: +7 (3854) 43-25-70, e-mail: san@bti.secna.ru.