

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА УЛАВЛИВАНИЯ ЧАСТИЦ ЦЕНТРОБЕЖНО-АКУСТИЧЕСКИМ ГАЗООЧИСТНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

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

*Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ, г. Бийск*

В статье показаны результаты экспериментальных исследований процесса улавливания дисперсных частиц с помощью двухступенчатого центробежно-акустического газоочистного оборудования. Представлена фракционная эффективность созданного оборудования, установлено, что применение УЗ-воздействия обеспечивает повышение эффективности улавливания дисперсных частиц размером 3 мкм с 67% до 93 %.

*Ключевые слова:* Ультразвук, газоочистка, коагуляция, акустическое поле, фракционная эффективность.

## ВВЕДЕНИЕ

Для улавливания готового продукта или пыли из отходящих газов на промышленных производствах используют разнообразные конструкции циклонов, фильтров, пылеуловителей, осадительных камер. Из литературных источников хорошо известно, что эффективность наиболее используемых на практике установок сухого пылеулавливания значительно уменьшается улавливании высокодисперсных частиц с размерами менее 10 мкм. При этом многочисленными исследованиями отечественных и зарубежных ученых установлено, что использование внешних энергетических воздействий, способных сообщать улавливаемым частицам дополнительное колебательное движение способствует их объединению, т.е. коагуляции. Одним из наиболее перспективных способов введения дополнительного энергетического воздействия для коагуляции высокодисперсных частиц является использование акустических колебаний звукового и ультразвукового (УЗ) диапазонов [1-15]. Однако практического применения акустических колебаний для осуществления энергетических воздействий при улавливании высокодисперсных частиц с размерами менее 10 мкм реализовано не было из-за отсутствия газоочистного оборудования, способного обеспечивать совместное воздействие на дисперсные частицы силами инерции и акустическими колебаниями в ультразвуковом частотном диапазоне с уровнем звукового давления 130 – 150 дБ. В связи с этим задача создания газоочистного оборудования, способного обеспечить повышение эффективности улавливания высокодисперсных частиц из газовых сред за счет ультразвуковых колебаний высокой интенсивности, является актуальной и требующей решения. Таким образом, целью работы является создание опытных образцов оборудования для ультразвуковой коагуляции и улавливания высокодисперсных частиц и проведение экспериментальных исследований с целью определения функциональных возможностей разработанного оборудования.

## ОПИСАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНО-АКУСТИЧЕСКОГО ГАЗООЧИСТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Для проведения исследований был изготовлен опытный образец центробежно-акустического пылеуловителя, рассчитанный на расход газа 1000 м<sup>3</sup>/час (0,28 м<sup>3</sup>/с.), состоящий из двух ступеней очистки: агломератора (первая ступень для предварительной коагуляции) и аппарата со встречно-закрученными потоками (ВЗП) [16-18]. Для определения эффективности сепарации созданного газоочистного оборудования, а также подтверждения повышения эффективности сепарации при воздействии УЗ колебаниями высокой интенсивности были проведены экспериментальные исследования, которые позволили определить функциональные возможности созданного газоочистного оборудования, реализующего центробежно-акустический способ улавливания частиц. В разработанном стенде определялась степень укрупнения дисперсных частиц в зависимости от режимов работы стенда и условий ультразвукового воздействия на газодисперсный поток. В разработанном оборудовании были использованы ультразвуковые дисковые излучатели, разработанные в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института [19-22]. Технические характеристики используемого УЗ оборудования представлены в таблице 1.

Табл. 1. Технические характеристики ультразвуковых аппаратов

Наименование параметра	Значение
Диаметр излучателя, мм	320
Уровень звукового давления в фокусе, дБ, не менее	159
Резонансная частота колебательной системы, кГц	22±1,65

Внешний вид ультразвукового дискового излучателя показан на рисунке 1.

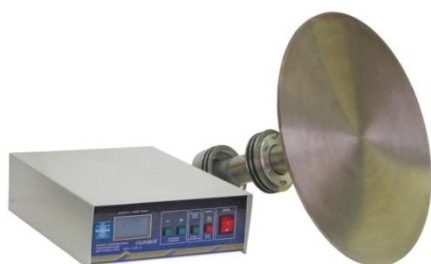
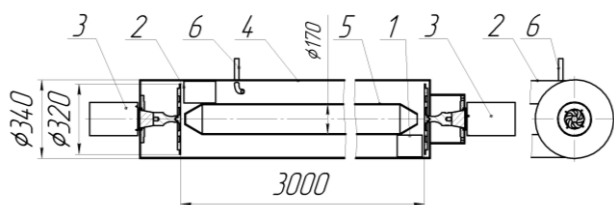


Рис. 1. Внешний вид ультразвукового дискового излучателя

Возможность регулирования мощности электронного генератора позволяет оценить степень повышения эффективности коагуляции и улавливания частиц в зависимости от уровня звукового давления.

Экспериментальный образец агломератора предназначен для центробежного разделения газодисперсной смеси и коагуляции частиц при воздействии УЗ колебаниями высокой интенсивности. При этом агломератор обеспечивает возможность отбора проб по внутреннему объему сепарационной камеры [16].



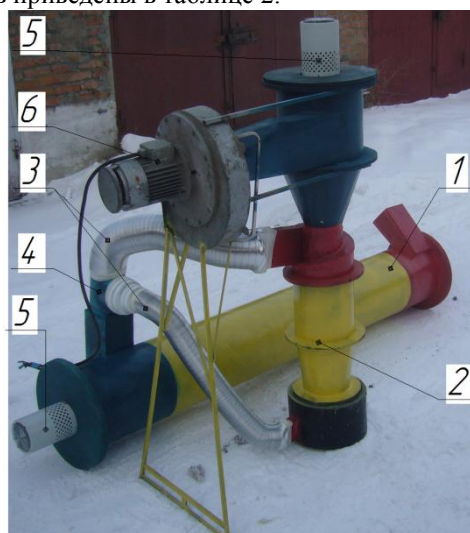
1 – входной патрубок; 2 – выходной патрубок; 3 – УЗ-дисковый излучатель; 4 – коагуляционно-сепарационная камера; 5 – вытеснитель; 6 – трубка отбора проб

Рис. 2. Эскиз стенда для исследований разделения газодисперсной смеси при УЗ-коагуляции

Стенд состоит из тангенциального входного патрубка 1, тангенциального выходного патрубка 2. На торцах стенда установлены ультразвуковые дисковые излучатели 3. Внутри, соосно коагуляционно-сепарационной камере 4, установлен вытеснитель 5. В корпусе 4 установлены через определенное расстояние изогнутые трубки для отбора проб 6, торцы которых направлены навстречу пылегазовому потоку. К выходному патрубку агломератора 2 присоединен делитель потоков, который посредством газоходов соединен с аппаратом ВЗП. Перед входным патрубком 1 установлен распылитель (не показан), который обеспечивает подачу дисперсных частиц. Для высокоэффективной сепарации уже скоагулированных частиц был изготовлен аппарат со встречно-закрученными потоками, дополненный УЗ-дисковым излучателем. На рисунке 3 показан центробежно-акустический пылеуловитель в сборе с вытяжным вентилятором.

Одним из важнейших параметров, характеризующих газодисперсную смесь частиц, является средний условный диаметр частиц, который позволяет оценить степень повышения эффективности улавливания частиц при наложении ультразвуковых колебаний высо-

кой интенсивности за счёт их укрупнения [1-15]. Поэтому дальнейшие экспериментальные исследования были направлены на определение увеличения среднего диаметра частиц. Экспериментальные исследования эффективности процесса коагуляции проводились с использованием нескольких образцов высокодисперсных порошков. Параметры гранулометрического состава использованных в опытах порошковых материалов приведены в таблице 2.



1 – агломератор; 2 – аппарат ВЗП; 3 – воздуховоды; 4 – делитель потоков; 5 – УЗ-дисковые излучатели; 6 – центробежный вентилятор

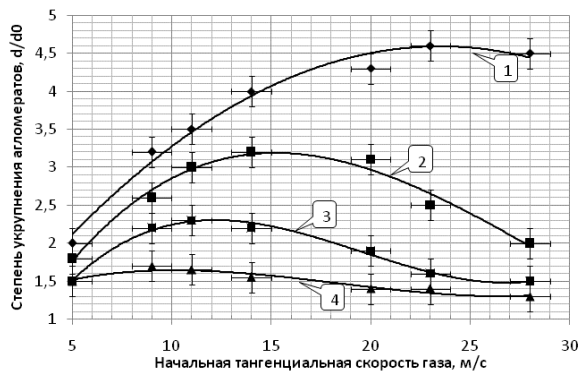
Рис. 3. Центробежно-акустический пылеуловитель в сборе с центробежным вентилятором

Табл. 2. Параметры порошковых материалов, использованных при проведении экспериментов

Порошок	Размер $d_{50}$ , мкм
Аэросил марки А-175	3
Корундовый порошок М7	5
Корундовый порошок М10	7
Корундовый порошок М20	11
Корундовый порошок М28	17

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УЗ КОАГУЛЯЦИИ ЧАСТИЦ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ

Для нахождения оптимальных тангенциальных скоростей газа в зависимости от начального размера дисперсных частиц, при которых обеспечивается максимальная эффективность коагуляции, были проведены экспериментальные исследования, в результате которых проводился отбор проб агломератов частиц при различных тангенциальных скоростях газа. Регулирование скорости осуществлялось изменением геометрии входного и выходного патрубков. На основе анализа отобранных проб были построены зависимости степени укрупнения частиц на выходе из агломератора от начальной тангенциальной скорости газа при постоянном расходе (рисунок 4).



1) D<sub>5,0</sub> = 3 мкм; 2) D<sub>5,0</sub> = 7 мкм; 3) D<sub>5,0</sub> = 11 мкм; 4) D<sub>5,0</sub> = 17 мкм

**Рис. 4. Зависимость степени укрупнения от начальной тангенциальной скорости газа при разных начальных размерах частиц**

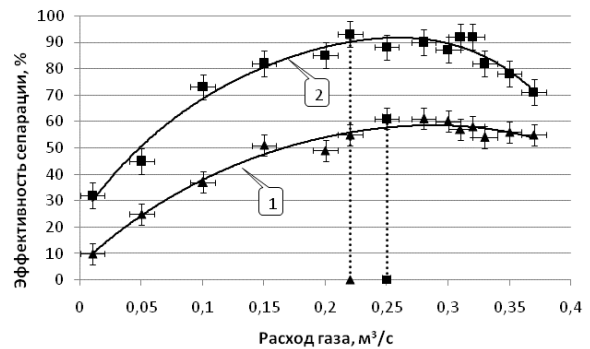
Анализ построенных графиков позволил подтвердить, что для каждого исследуемого порошка, имеющего определенный дисперсный состав, существует оптимальная тангенциальная скорость газового потока, при которой достигается максимальная степень укрупнения. Таким образом, для материала частиц с диаметром 3 мкм оптимальная скорость находится в диапазоне 22-24 м/с, для частиц 5 мкм – 14-16 м/с, для частиц 17 мкм – 8-10 м/с.

Для изучения функциональных возможностей разработанного газоочистного оборудования были проведены исследования, направленные на установление зависимостей эффективности улавливания дисперсных частиц от уровня звукового давления, расхода газа и параметров дисперсной фазы (начальный размер частиц и массовая концентрация).

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАСХОДА ГАЗА**

На первом этапе экспериментов было определено оптимальное отношение расхода вторичного потока к общему расходу газа, поступающего на входные патрубки аппарата ВЗП, которое составило 0,62, согласованное с расчетами экспериментальных данных из литературных источников [23]. Изменение соотношения потоков производилось наклоном заслонки делителя потоков.

Для определения оптимального расхода газа, при котором достигается максимальная эффективность улавливания дисперсных частиц, получена зависимость эффективности сепарации от расхода газа. Исследования проводились с использованием материала Аэросил А-175 при концентрации 50 г/м<sup>3</sup> и оптимальном отношении расхода вторичного потока к общему расходу газа (рисунок 5). Регулирование расхода проводилось изменением сечения выходного патрубка вытяжного вентилятора.



1 – без УЗ-воздействия; 2 – с УЗ-воздействием

**Рис. 5. Зависимость эффективности сепарации от расхода газа**

При анализе полученных данных определены следующие результаты:

1. При малом расходе газа (0,01 – 0,05 м<sup>3</sup>/с) эффективность сепарации центробежно-акустическим пылеуловителем без УЗ-воздействия небольшая, что связано с малой центробежной силой, действующей на дисперсные частицы, и аппарат работает, как пылесадительная камера. Эффективность осаждения составляет до 10 – 25 %.

2. При малом расходе газа (0,01 – 0,05 м<sup>3</sup>/с) при наличии УЗ-воздействия эффективность сепарации возрастает вследствие коагуляции и составляет около 30 – 45 %. При увеличении расхода влияние УЗ-воздействия повышается за счет частичного расслоения газодисперсного потока в агломераторе и повышения концентрации в периферийных областях, вследствие чего увеличивается эффективность УЗ-коагуляции.

3. Без УЗ-воздействия максимальная эффективность сепарации (61 %) получена при расходе газа 0,25 м<sup>3</sup>/с. При воздействии УЗ колебаниями при расходе пылегазового потока 0,22 м<sup>3</sup>/с получена максимальная эффективность сепарации 93 % за счет обеспечения оптимальной тангенциальной скорости газа в агломераторе.

4. Дальнейшее увеличение расхода пылегазового потока уменьшает эффективность сепарации с УЗ-воздействием. Это связано с уменьшением времени воздействия УЗ-колебаниями и появлением дополнительных турбулентных потоков, из-за которых происходит вторичный унос частиц и вторичное разрушение скоагулированных частиц. Без УЗ-воздействия эффективность сепарации незначительно уменьшается из-за появления дополнительных турбулентных потоков.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЧАСТИЦ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕПАРАЦИИ**

Для определения влияния массовой концентрации частиц на эффективность сепарации были проведены экспериментальные исследования, по результатам

которых получена зависимость эффективности сепарации от массовой концентрации дисперсных частиц (рисунок 6). Исследования проводились при выявленном оптимальном расходе газа ( $0,25 \text{ м}^3/\text{с}$ ), соотношении потоков ( $0,62$ ) и максимальном уровне звукового давления ( $148 \text{ дБ}$ ).

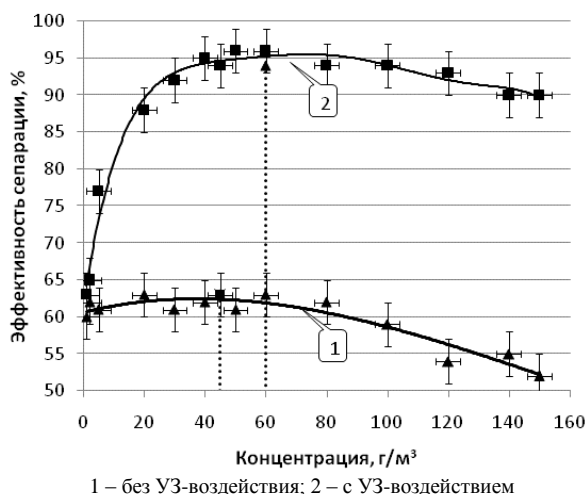


Рис. 6. Зависимость эффективности сепарации массовой концентрации дисперсных частиц

Как видно из графиков, при малой концентрации частиц ( $1 \text{ г}/\text{м}^3$ ) влияние УЗ-воздействия на эффективность сепарации очень мало. Это обусловлено большим расстоянием между частицами, и как следствие, малой вероятностью их столкновения под действием УЗ-колебаний. Таким образом, эффективность улавливания частиц с УЗ-воздействием находится на таком же уровне, как и без него. Дальнейшее увеличение концентрации дисперсных частиц ( $20 \text{ г}/\text{м}^3$ ) приводит к существенному повышению эффективности сепарации и составляет  $87\%$ . При концентрации  $60 \text{ г}/\text{м}^3$  существует максимум эффективности сепарации с УЗ-воздействием. Повышение связано с высокой эффективностью УЗ-коагуляции при такой концентрации, и как следствие, значительным уменьшением счетной концентрации частиц. При этом без УЗ-воздействия наблюдается максимум эффективности сепарации при концентрации  $45 \text{ г}/\text{м}^3$ . Это вызвано самопроизвольной коагуляцией частиц в пристеночном слое агломератора. Дальнейшее увеличение концентрации пыли, как с УЗ-воздействием, так и без него, приводит к снижению эффективности сепарации. Это вызвано снижением скорости частиц, а вследствие этого и центробежной силы. Кроме того, «удар» большой массы частиц по стенкам аппарата ВЗП приводит к разрушению пристеночного слоя отсепарированных частиц и вторичному запылению потока.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕПАРАЦИИ

Для определения влияния уровня звукового давления на эффективность сепарации были проведены экспериментальные исследования при оптимальных значениях расхода газа ( $0,25 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и отношения расхода вторичного потока к общему расходу газа ( $0,62$ ). Исследования проводились при концентрациях  $5 \text{ г}/\text{м}^3$  (соответствует минимально необходимому значению концентрации, выявленному во втором разделе) и  $60 \text{ г}/\text{м}^3$  (соответствует значению концентрации, при которой обеспечивается максимальная эффективность сепарации с УЗ-воздействием). Зависимость эффективности сепарации от уровня звукового давления показана на рисунке 7.

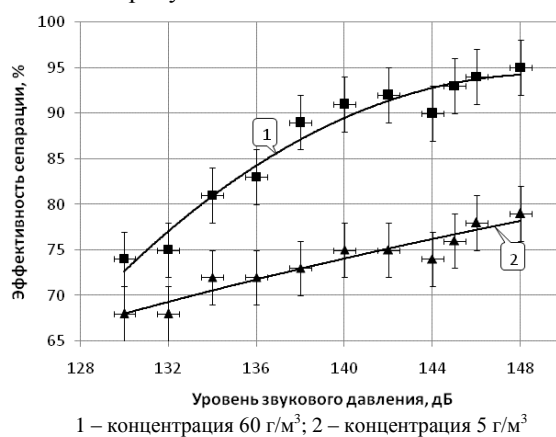


Рис. 7. Зависимость эффективности сепарации от уровня звукового давления

Как видно из графика, чем больше уровень звукового давления, тем выше эффективность сепарации дисперсных частиц. При уровне звукового давления  $130 \text{ дБ}$  УЗ-воздействие почти не влияет на эффективность сепарации. Максимально высокий достигнутый уровень звукового давления внутри объема аппарата ВЗП составил  $148 \text{ дБ}$ . Это позволяет повысить эффективность сепарации частиц  $3 \text{ мкм}$  при их концентрации  $60 \text{ г}/\text{м}^3$  с  $63\%$  до  $95\%$ , а при концентрации  $5 \text{ г}/\text{м}^3$  с  $61\%$  до  $78\%$ . При приближении значения уровня звукового давления к  $150 \text{ дБ}$  рост эффективности коагуляции аэрозолей замедляется. Это позволяет предположить, что в диапазоне  $155\text{--}160 \text{ дБ}$  существует значение уровня звукового давления, превышение которого уже не приведет к дальнейшему заметному росту эффективности коагуляции. Дальнейшее повышение уровня звукового давления приводит к разрушению агломератов объединившихся частиц и будет энергетически невыгодно [1].

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФРАКЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛАВЛИВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНО-АКУСТИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Для определения фракционной эффективности улавливания были проведены экспериментальные

исследования с использованием разработанного центробежно-акустического газоочистного оборудования.

Исследования проводились с использованием порошков, параметры которых приведены в таблице xx при выявленном оптимальном расходе газа  $0,25 \text{ м}^3/\text{с}$  и начальной концентрации частиц  $50 \text{ г}/\text{м}^3$ , при этом средний уровень звукового давления в объеме агломератора и в объеме аппарата ВЗП составлял 145 дБ.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены данные о фракционной эффективности улавливания разработанным газоочистным оборудованием, приведенные на рисунке 8.

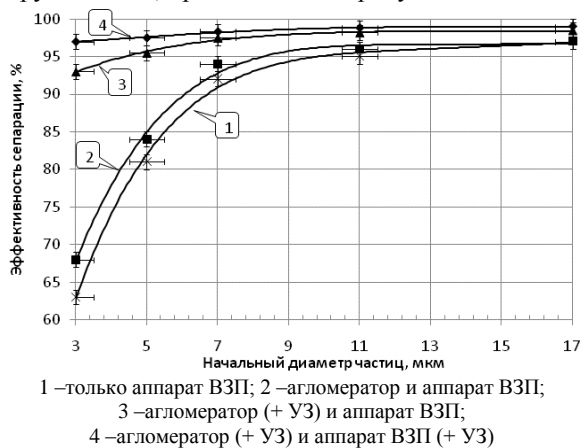


Рис. 8. Фракционная эффективность разработанного оборудования

Анализ графиков показал, что эффективность улавливания только аппаратом ВЗП без УЗ-воздействия (кривая 1 рисунок xx) несколько ниже, чем эффективность последовательно соединенных агломератора и аппарата ВЗП без УЗ-воздействия (кривая 2 рисунок 8). Это связано с улавливанием и самопроизвольной коагуляцией частиц в объеме агломератора даже при отсутствии УЗ-воздействия. Таким образом, эффективность улавливания частиц 3 мкм двухступенчатой конструкцией составила 67 %.

Однако при наличии УЗ-воздействия только в агломераторе (кривая 3 рисунок 8) эффективность двухступенчатой конструкции существенно возрастает (эффективность улавливания частиц 3 мкм повышается до 93 %).

При наличии УЗ-воздействия в агломераторе и аппарате ВЗП (кривая 4 рисунок 8) эффективность улавливания частиц диаметром 3 мкм повышается до 97 % за счет дополнительного укрупнения частиц в объеме аппарата ВЗП. Таким образом, показано, что применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности в газоочистном оборудовании, основанном на центробежной сепарации, является перспективным способом повышения эффективности улавливания твердых высокодисперсных частиц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы проведены экспериментальные исследования процесса сепарации высокодисперсных частиц центробежно-акустическим газоочистным оборудованием и решены следующие задачи:

1) Установлено, что степень очистки от высокодисперсных частиц в условиях закрученного газодисперсного потока может быть увеличена за счет воздействия ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности.

2) Проведенные экспериментальные исследования показали, что при начальном размере частиц 3 мкм за время пребывания в объеме стэнда исходные агломераты увеличиваются в 4,5 раза, что достаточно для эффективного улавливания во второй ступени – аппарате со встречно-закрученными потоками.

3) При определении оптимальных режимов работы газоочистного оборудования (концентрация  $50 \text{ г}/\text{м}^3$ , размер частиц на входе 3 мкм, уровень звукового давления 145 дБ) установлено, что без УЗ-воздействия максимальная эффективность сепарации (61 %) получена при расходе газа  $0,25 \text{ м}^3/\text{с}$ . При воздействии УЗ колебаниями получена максимальная эффективность сепарации 93% с расходом пылегазового потока  $0,22 \text{ м}^3/\text{с}$ .

5) Изготовлен экспериментальный образец центробежно-акустического газоочистного оборудования, состоящий из последовательно установленных агломератора (диаметром 340 мм и длиной 3000 мм) и аппарата ВЗП диаметром 300 мм. Проведенные исследования функциональных возможностей созданного оборудования позволили установить, что применение УЗ-воздействия обеспечивает повышение эффективности улавливания дисперсных частиц размером от 3 мкм с 67% до 93 %.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Алтайского края в рамках научного проекта № 18-48-220009 p\_a и стипендии Президента РФ № СП-4173.2016.1.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Shalunova K.V. Theoretical Study of Acoustic Coagulation of Gas-dispersed Systems // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P.328-333.
2. 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. – IEEE 2015. – P.181-186.
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. – IEEE, 2014. – P. 233 – 239.
4. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Galakhov A.N., Nesterov V.A., Golykh R.N., Khmelev M.V. The Control of the Ultrasonic Coagulation

of Dispersed Nanoscale Particles // 14th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2013, pp. 166–170, 2013.

5. 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 // Archives of Acoustics. – Institute of Fundamental Technological Research PAN, Warszawa, 2016. – Vol. 40, No. 4. – P. 757-771.

6. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Nesterov V.A., Dorovskikh R.S., Shalunova A.V. Providing the Efficiency and Dispersion Characteristics of Aerosols in Ultrasonic Atomization // Journal of Engineering Physics and Thermophysics - 2017, Volume 90, Issue 4, pp 831–844.

7. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A. Theoretical determination of treating modes providing the formation of high-disperse aerosol at two-stage ultrasonic atomization // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2017. pp. 233–237.

8. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Bazhin V.E. Efficiency Increase of Centrifugal Separation of Gas-dispersed Flow by the Application of Ultrasonic Vibrations // 17th International conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2016. - 2016. - P.269-274.

9. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Nesterov V.A., Dorovskikh R.S., Shalunova A.V. Determination of the Modes and the Conditions of Ultrasonic Spraying Providing Specified Productivity and Dispersed Characteristics of the Aerosol // Journal of Applied Fluid Mechanics, 2017. – Vol. 10. – No. 5. – P. 1409-1419.

10. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Tsyganok S.N., Nesterov V.A., Genne D.V., Ilchenko E.V. Efficiency increase of the ultrasonic emitter designed for dust coagulation in ash collecting units //18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2017. pp. 250-254.

11. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A., Golykh R.N., Kozhevnikov I.S. Ultrasonic coagulation to improve the efficiency of the gas cleaning systems//18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2017. pp. 294-297.

12. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Golykh R.N., Nesterov V.A. Efficiency increase of the dust-extraction plant by high-intensity ultrasonic action // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2015. pp. 213-217.

13. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Shalunova K.V., Galakhov A.N., Nesterov V.A. Revealing of optimum modes of ultrasonic coagulation of submicron particles and determining of the shape of the aggregates by mathematical modeling // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2014: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2014. – С. 208-212.

14. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Golykh R.N., Nesterov V.A. Development of high efficiency gas-cleaning equipment for industrial production using high-intensity ultrasonic vibrations // American Journal of Engineering Research. – Stamford (USA): Natural State Research, Inc., 2015. – Vol. 4, Issue 8. – p. 108–119.

15. 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, RU, 2017. pp. 290-293.

16. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov, V.A., Galakhov A.N., Golykh R.N., Shalunova K.V. The development of the agglomerator for efficiency increase of the separation of nanoscale particles // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2013: Conference Proceedings. – IEEE, 2013. – P. 171–175.

17. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Galakhov A.N., Golykh R.N., Shalunova K.V. Development of the construction of the apparatus for centrifugal acoustic collection of nanoscale aerosols // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2013: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2013. – P. 161–165.

18. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Dorovskikh R.S., Kozhevnikov I.S. Development of two-step centrifugal acoustic gas-purifying equipment // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2016: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – P. 264-268.

19. Khmelev V. N., Galakhov A. N., Shalunov A. V., Shalunova A. V. Designing of multi-frequency source of ultrasonic action with radiator in form of stair-step disc // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2014: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2014. – P. 194-198.

20. Khmelev V.N., Galakhov A.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Golykh R.N. Development of the rectangular ultrasonic radiator of the stair-step form // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2014: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2014. – P. C. 187-193.

21. 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 // 16<sup>th</sup> International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM – Novosibirsk: NSTU, 2015. – pp 224 – 228

22. 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.

23. Ужов, В.Н. Очистка промышленных газов от пыли [Текст] / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков, И.К. Решидов. – М.: Химия, 1981. – 392 с.

*Хмелев Владимир Николаевич – заместитель директора по науке, д.т.н., профессор, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854)432581, e-mail: vnh@bti.secpa.ru.*

*Шалунов Андрей Викторович – заведующий кафедрой МСИА БТИ АлтГТУ, д.т.н., Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова», e-mail: shalunov@bti.secpa.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», e-mail: nva@bti.secpa.ru.*

*Терентьев Сергей Александрович – старший преподаватель, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. 432450, e-mail: terser@list.ru.*

# EXPERIMENTAL RESEARCHES OF PROCESS OF TRAPPING OF PARTICLES BY CENTRIFUGAL-ACOUSTIC GAS-CLEANING EQUIPMENT

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

*Biysk Technological Institute, Biysk*

Abstract – The results of experimental researches of process of capturing of disperse particles by two-stage centrifugal-acoustic gas-cleaning equipment are provided in article. It's presented the fractional efficiency of created equipment and it was determined that applying of ultrasonic action increases the efficiency of trapping of disperse particles with size of 3  $\mu\text{m}$  from 67% to 93%.

Index terms: ultrasound, gas-cleaning, coagulation, acoustic field, fractional efficiency.

## REFERENCES

1. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Shalunova K.V. Theoretical Study of Acoustic Coagulation of Gas-dispersed Systems // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P.328-333.
2. 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. – IEEE 2015. – P.181-186.
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. – IEEE, 2014. – P. 233 – 239.
4. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Galakhov A.N., Nesterov V.A., Golykh R.N., Khmelev M.V. The Control of the Ultrasonic Coagulation of Dispersed Nanoscale Particles // 14th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2013, pp. 166–170, 2013.
5. 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 // Archives of Acoustics. – Institute of Fundamental Technological Research PAN, Warszawa, 2016. – Vol. 40, No. 4. – P. 757-771.
6. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Nesterov V.A., Dorovskikh R.S., Shalunova A.V. Providing the Efficiency and Dispersion Characteristics of Aerosols in Ultrasonic Atomization // Journal of Engineering Physics and Thermophysics - 2017, Volume 90, Issue 4, pp 831–844.
7. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A. Theoretical determination of treating modes providing the formation of high-disperse aerosol at two-stage ultrasonic atomization // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2017. pp. 233–237.
8. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Bazhin V.E. Efficiency Increase of Centrifugal Separation of Gas-dispersed Flow by the Application of Ultrasonic Vibrations // 17th International conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2016. - 2016. - P.269-274.
9. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Nesterov V.A., Dorovskikh R.S., Shalunova A.V. Determination of the Modes and the Conditions of Ultrasonic Spraying Providing Specified Productivity and Dispersed Characteristics of the Aerosol // Journal of Applied Fluid Mechanics, 2017. – Vol. 10. – No. 5. – P. 1409-1419.
10. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Tsyganok S.N., Nesterov V.A., Genne D.V., Ilchenko E.V. Efficiency increase of the ultrasonic emitter designed for dust coagulation in ash collecting units //18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2017. pp. 250-254.
11. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A., Golykh R.N., Kozhevnikov I.S. Ultrasonic coagulation to improve the efficiency of the gas cleaning systems//18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2017. pp. 294-297.
12. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Golykh R.N., Nesterov V.A. Efficiency increase of the dust-extraction plant by high-intensity ultrasonic action // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2015. pp. 213-217.
13. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Shalunova K.V., Galakhov A.N., Nesterov V.A. Revealing of optimum modes of ultrasonic coagulation of submicron particles and determining of the shape of the aggregates by mathematical modeling // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2014: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2014. – C. 208-212.
14. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Golykh R.N., Nesterov V.A. Development of high efficiency gas-cleaning equipment for industrial production using high-intensity ultrasonic vibrations // Americal Journal of Engineering Research. – Stamford (USA): Natural State Research, Inc., 2015. – Vol. 4, Issue 8. – p. 108–119.
15. 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, RU, 2017. pp. 290-293.
16. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov, V.A., Galakhov A.N., Golykh R.N., Shalunova K.V. The development of the agglomerator for efficiency increase of the separation of nanoscale particles // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2013: Conference Proceedings. – IEEE, 2013. – P. 171–175.
17. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Galakhov A.N., Golykh R.N., Shalunova K.V. Development of the construction of the apparatus for centrifugal acoustic collection of nanoscale aerosols // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2013: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2013. – P. 161–165.

18. Khmelev, V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Dorovskikh R.S., Kozhevnikov I.S. Development of two-step centrifugal acoustic gas-purifying equipment // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2016: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – P. 264-268.

19. Khmelev V. N., Galakhov A. N., Shalunov A. V., Shalunova A. V. Designing of multi-frequency source of ultrasonic action with radiator in form of stair-step disc // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2014: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2014. – P. 194-198.

20. Khmelev V.N., Galakhov A.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Golykh R.N. Development of the rectangular ultrasonic radiator of the stair-step form // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2014: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2014. – P. C. 187-193.

21. 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 // 16<sup>th</sup> International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM – Novosibirsk: NSTU, 2015. – pp 224 – 228

22. 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.

23. Uzhov, V.N. Purification of industrial gases from dust [Text] / A.U. Waldberg, B.I. Myagkov, I.K. Reshidov. – M.: Chemistry, 1981. – 392 p.

*Khmelev Vladimir Nikolaevich – Doctor of Engineering, professor, Deputy Director for Research, Biysk Technological Institute, e-mail: vnh@bti.secna.ru.*

*Shalunov Andrey Viktorovich – Doctor of Engineering, professor, head of the char of Methods and Means of Measurement and Automation, Biysk Technological Institute, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.*

*Nesterov Viktor Alexandrovich – associate professor at the char of methods and means of measurement and automation, Biysk Technological Institute, (3854)432570, e-mail: [nva@bti.secna.ru](mailto:nva@bti.secna.ru).*

*Terentiev Sergey Alexandrovich - Senior Lecturer, Biysk Technological Institute, tel. (3854)43-22-55, e-mail: terser@list.ru.*