

УДК 534.29.66.084:534-18

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КОАГУЛЯЦИЯ В СКРУББЕРАХ ВЕНТУРИ: ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Хмелев Владимир Николаевич<sup>1</sup>,  
vnh@bti.secna.ru

Шалунов Андрей Викторович<sup>1</sup>,  
shalunov@bti.secna.ru

Цыганок Сергей Николаевич<sup>1</sup>,  
grey@bti.secna.ru

Нестеров Виктор Александрович<sup>1</sup>,  
nva@bti.secna.ru

<sup>1</sup> Алтайский государственный технический университет,  
Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27.

**Актуальность** исследования обусловлена экологическими требованиями к дымовым газам предприятий ТЭЦ и ТЭС, работающих на угле. Обеспечение экологических требований осуществляется с помощью ультразвуковой коагуляции твердых золовых частиц с каплями жидкости, которая реализуется в устройствах мокрой очистки газов – в скрубберах Вентури.

**Цель:** увеличение эффективности скрубберов Вентури для мокрой очистки газов за счет улучшения условия поглощения золовых частиц каплями жидкости в акустических полях, которые создаются при ультразвуковой коагуляции.

**Объекты:** процессы ультразвуковой коагуляции золовых частиц с каплями орошаемой жидкости в скруббере Вентури.

**Методы.** Теоретические методы основывались на численном решении уравнений, описывающих движение газодисперсного потока в скруббере Вентури и коагуляцию золовых частиц в акустическом поле. Экспериментальные результаты были получены при проведении промышленных испытаний на котлоагрегате БКЗ-220-100Ф ТЭЦ, работающем на угле Харанорского месторождения, по утвержденной стандартом методике РД 153-34.1-27.301-2001.

**Результаты.** Разработана физико-математическая модель, описывающая движение газодисперсного потока в скруббере и взаимодействие дисперсных частиц между собой в акустическом поле. Модель позволила рассчитать эффективность газоочистки в различных условиях и определить оптимальные режимы ультразвукового воздействия: уровень звукового давления не менее 145 дБ, частота 22 кГц, зона воздействия во всем объеме скруббера Вентури, направление акустического поля перпендикулярно потоку газа. Критериями оптимальности являлись максимальная эффективность коагуляции золовых частиц в скруббере Вентури и максимальная степень очистки дымовых газов. Проведены испытания созданного ультразвукового оборудования на котлоагрегате БКЗ-220-100Ф ТЭЦ в золоулавливающей установке: в акустическом поле уменьшается концентрация золовых частиц в отводящих газах до четырех и более раз (эффективность не менее 98 %), процентное содержание золовых частиц (размером менее 5 мкм) снижается до 15 раз.

### Ключевые слова:

Ультразвуковая коагуляция, акустическое поле, скруббер Вентури, звуковое давление, очистка газов, золовая частица.

### Введение

Для удаления твердых частиц из газообразных сред применяются разные подходы, а именно: фильтрация, электрическая очистка, сухая и мокрая очистка. Конструктивными особенностями аппаратов, которые реализуют способ мокрой очистки, является улавливание твердых частиц жидкостью (пленкой или каплями), пузырьками газа, при воздействии газового потока с поверхностью жидкости и последующим удалением из аппарата их в виде шлама. Одними из наиболее распространенных пылеуловителей являются скрубберы Вентури. Они характеризуются лучшей эффективностью для промышленной очистки газов среди устройств мокрого типа. Могут применяться для удаления высокодисперсной (субмикронной) пыли (твердых частиц) из газообразных сред для широкого диапазона ее начальных концентраций – 0,05–100 г/м<sup>3</sup> [1, 2].

Количество удаленных твердых частиц в скрубберах Вентури зависит от многих параметров: размера и дисперсного состава частиц; относительных скоро-

стей движения; скорости газового потока на входе в горловину; расхода орошаемой жидкости. При увлечении относительной скорости газового потока и расхода жидкости для орошения повышается степень очистки. Максимальная эффективность улавливания частиц размером 1–2 мкм в скрубберах Вентури может достигать 60–65 %.

Несмотря на высокое качество очистки, эффективность применяемых скрубберов Вентури в ряде случаев не удовлетворяет действующим экологическим требованиям по уровню выбросов вредных частиц в атмосферу. Главным образом это зависит от физических эффектов, реализуемых в аппаратах мокрой очистки, и также от степени захватывания высокодисперсных частиц газовым потоком. Как показали исследования [1–4], улучшение процесса мокрой очистки с целью повышения эффективности коагуляции твердых частиц (фактически повышения вероятности столкновения их с каплями орошаемой жидкости) достигается при помощи оптимизации режимных или конструктивных параметров скрубберов Вентури.

К сожалению, такой подход к совершенствованию не позволяют увеличить эффективность улавливания частиц размером менее 1–2 мкм.

Одним из перспективных подходов, который не обуславливает внесение изменений в технологические режимы работы оборудования для газоочистки и может применяться для увеличения эффективности улавливания высокодисперсных частиц каплями жидкости, является ультразвуковая коагуляция в акустическом поле высокой интенсивности [5–8]. Ультразвуковая коагуляция является процессом сближения и объединения взвешенных твердых частиц в газовом потоке при помощи дополнительного соударения. Оно обусловлено тем фактом, что твердым частицам придается дополнительное колебательное встречное движение. В конечном итоге это приводит к их укрупнению и более эффективному осаждению. Повышение эффективности газоочистки с помощью ультразвукового воздействия имеет ряд преимуществ [6, 9].

#### Физико-математическая модель и ее решение

Существует два механизма взаимодействия близкорасположенных твердых частиц, находящихся в акустическом поле [10–15]:

- ортокинетический – разная степень вовлечения твердых частиц в колебательный процесс, которая

зависит от их массы и диаметра: мелкие твердые частицы, совершающие колебательные движения, соударяются неподвижными каплями жидкости (рис. 1, а);

- гидродинамический – сближение твердых частиц с каплями жидкости под действием силы Осеена с последующей коагуляцией. Сила сближения возникает из-за асимметрии акустического поля, в котором находятся дисперсные частицы при ультразвуковом воздействии (рис. 1, б).

Вероятность столкновения частиц (зола и капля воды) в трубе Вентури прямо пропорциональна разности их скоростей движения. Наложение дополнительного колебательного движения на частицы приводит к увеличению их относительных скоростей движения и в итоге позволяет улучшить эффективность улавливания. Степень укрупнения частиц зола в акустическом поле определяется частотой ультразвукового воздействия и уровнем звукового давления, создаваемого при этом [6–8]. Таким образом, если накладывать акустическое поле на высокодисперсные частицы (размером менее 5 мкм), траектория движения которых практически совпадает с потоком газа и огибающих капли жидкости, то должно обеспечиваться улучшение условий их столкновения с каплями жидкости.

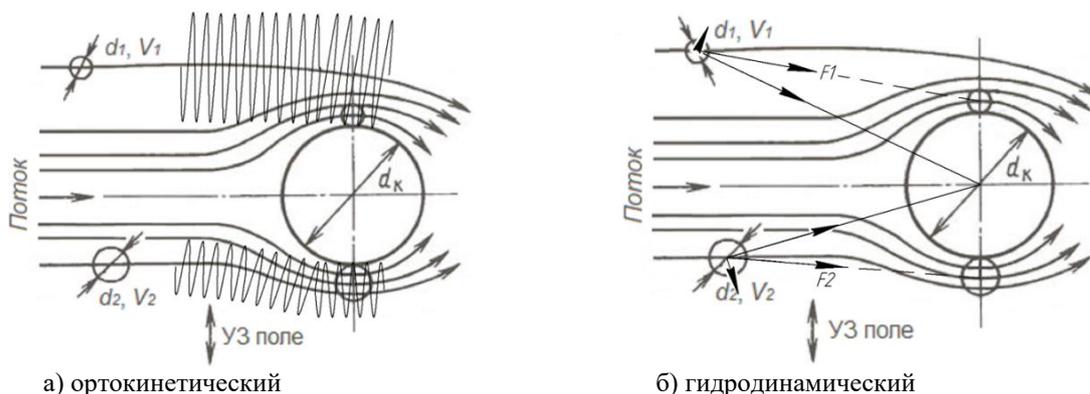


Рис. 1. Механизмы взаимодействия частиц, находящихся в акустическом поле:  $d_1, d_2$  – диаметры частиц;  $v_1, v_2$  – скорости частиц;  $d_k$  – диаметр капли;  $F_1, F_2$  – силы притяжения частиц

Fig. 1. Mechanisms of interaction of two particles in an acoustic field:  $d_1, d_2$  – diameters of particles;  $v_1, v_2$  – velocities of particles;  $d_k$  – diameter of the drop;  $F_1, F_2$  – the force of attraction of particles

Физико-математическая модель коагуляции основана на анализе движения газовой и дисперсных фаз. Макроскопический уровень (это движение газовой среды) описывался с помощью системы уравнений Навье–Стокса, теплопроводности и состояния газовой среды. Решение на макроскопическом уровне было получено при помощи метода конечных элементов, используя САЕ-систему OpenFOAM. Имеющиеся стандартные решатели, реализующие уравнения Навье–Стокса, позволили рассчитать движение фаз в скруббере Вентури.

Микроскопический уровень (это движение отдельных частиц и их взаимодействие) описывался с помощью второго закона Ньютона (в импульсной форме): частица изменяет свою скорость за счёт совокупного действия сил (1).

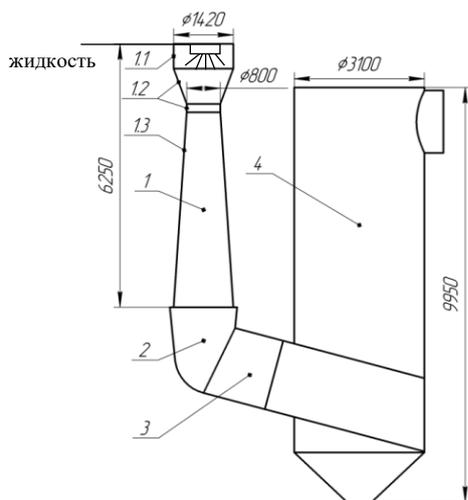
$$m_p \frac{d\bar{v}_p}{dt} = 3\pi\mu d C_{cor} (\bar{v}_f - \bar{v}_p) + \frac{\pi d^3 \rho_f}{6} \frac{d\bar{v}_f}{dt} + \frac{\pi d^3 \rho_f}{12} \left( \frac{d\bar{v}_f}{dt} - \frac{d\bar{v}_p}{dt} \right) - \frac{\pi d^3}{6} (\rho_p - \rho_f) \bar{\omega} \times (\bar{\omega} \times \bar{r}) - \frac{\pi d^3}{6} \rho_p (\bar{\omega} \times \bar{v}_p) + \bar{F}_e, \quad (1)$$

где  $m_p = \pi d^3 \rho_p / 6$  – масса частицы, кг;  $m$ ;  $\rho_p$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_f$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – эквивалентный диаметр частицы;  $\bar{v}_p$  – скорость частицы, м/с;  $t$  – время, с;  $\bar{\omega}$  – угловая скорость вращения частицы, рад/с;  $\bar{v}_f$  – скорости газа, м/с;  $C_{cor}$  – коэффициент вязкого сопротивления (газовая среда);  $\mu$  – динамическая вязкость (газовая среда), Па·с;  $\bar{r}$  – радиус-вектор;  $\bar{F}_e$  – дополнительная внешняя сила (возмущающее воздействие ультразвукового поля), действующая на частицу.

Численное решение на микроскопическом уровне было также получено при помощи CAE-системы OpenFOAM, которая кроме стандартных приложений – решателей, позволяет применять и пользовательские разработки. В качестве входных данных для расчета движения и взаимодействия частиц использовалось поле скоростей газа. Первоначально дополнительная внешняя сила, приведенная в выражении (1), не учитывалась, т. е. решение было получено без ультразвукового воздействия. Определение эффективности трубы и скруббера Вентури было основано на расчете массового расхода дисперсных частиц:

$$\eta = \frac{\rho_p \cdot \sum_{k=1}^{N(\Delta t)} H_{d_{min}}(d_k) \cdot \frac{\pi d_k^3}{6}}{\alpha_{вх} \cdot G \cdot \Delta t} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

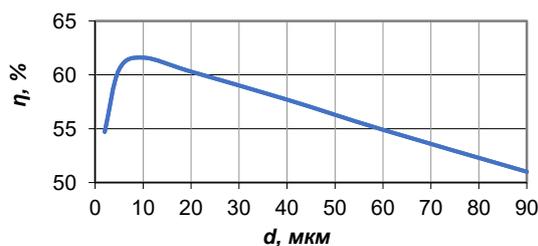
где  $\rho_p$  – плотность золы частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $d_k$  – диаметр золы частицы, м;  $\alpha_{вх}$  – начальная запыленность газового потока, кг/м<sup>3</sup>;  $N(\Delta t)$  – удельное число золы частиц (через выходное сечение за время  $\Delta t$ );  $G$  – расход газа, м<sup>3</sup>/с;  $H_{d_{min}}(d_k)$  – функция-индикатор типа частицы, равная 1 при  $d_k < d_{min}$  и 0 при  $d_k > d_{min}$ ;  $d_{min}$  – минимальный диаметр капель воды, м.



Добавить распылитель

**Рис. 2.** Эскиз скруббера Вентури: 1 – труба Вентури; 1.1 – оголовок; 1.2 – конфузур; 1.3 – диффузор; 2 – колено; 3 – патрубок соединительный; 4 – каплеуловитель

**Fig. 2.** Sketch of the Venturi scrubber: 1 – Venturi tube; 1.1 – tip; 1.2 – confuser with a neck; 1.3 – diffuser; 2 – knee; 3 – connecting pipe; 4 – drip catcher



а) труба Вентури

На рис. 2 показан эскиз скруббера Вентури (расчетная область). В табл. 1 представлены исходные данные.

Подача жидкости осуществлялась путем ее гидравлического распыления в оголовке трубы Вентури. При этом дополнительного диспергирования капель жидкости под действием ультразвуковых колебаний не происходило.

Остаточная запыленность (на выходе) газа рассчитывалась по выражению:

$$\alpha_{ввых} = \frac{(100 - \eta)}{100} \cdot \alpha_{вх}. \quad (3)$$

**Таблица 1.** Исходные расчетные данные

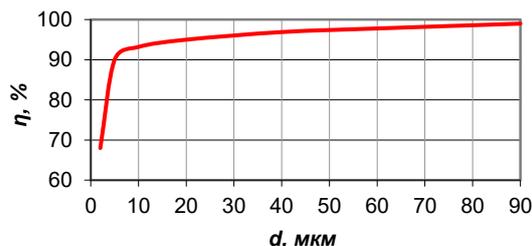
**Table 1.** Baseline data

Параметр/Parameter	Значение/Value
Несущая среда/Carrier medium	Воздух/Air
Входная температура /Input temperature	170, °C
Расход/Consumption	100 · 10 <sup>3</sup> , м <sup>3</sup> /ч
Плотность/Density	0,78, кг/м <sup>3</sup>
Скорость/Velocity	60 м/с
Твердая фаза/Solid phase	Зола/Ash
Плотность/Density	1000, кг/м <sup>3</sup>
Диаметр частиц/Particle diameter	2–90, мкм
Входная концентрация, г/м <sup>3</sup>	17
Жидкая фаза/Liquid phase	Вода/Water
Плотность/Density	1000, кг/м <sup>3</sup>
Расход/Consumption	20, т/ч
Удельный расход/ Specific consumption	0,2 л/м <sup>3</sup>
Размер капель/Droplet size	150, мкм

Применяя выражения (2), (3) были получены зависимости эффективности улавливания золы частиц в трубе и скруббере Вентури (рис. 3).

Этот и последующие расчеты эффективности и остаточной запыленности как трубы Вентури, так и скруббера, выполнялись с учетом исходных данных, приведенных в табл. 1. Было принято допущение, что поток золы частиц монодисперсный. Расчеты выполнялись для каждого размера золы частиц в диапазоне от 2 до 90 мкм с начальной входной концентрацией 17 г/м<sup>3</sup>.

Анализ графика на рис. 3, а, показал, что с увеличением диаметра золы частиц эффективность трубы Вентури снижается: максимум эффективности (62 %) для частиц диаметром 10 мкм. Это возникает из-за малых относительных скоростей частиц золы и капель воды. Эффективность скруббера (рис. 3, б) при увеличении диаметра частиц золы повышается от 68 % (для частиц диаметром 2 мкм) до 99 % (для частиц диаметром 90 мкм).



б) скруббер в целом

**Рис. 3.** Зависимости эффективности улавливания частиц золы

**Fig. 3.** Dependences of ash particles trapping efficiency

Полученные расчетные результаты хорошо согласуются с данными исследований подобных промышленных скрубберов, проведенных И.Б. Палатником [2], Л.И. Кропфом [1] и др. В работах показана небольшая эффективность улавливания высокодисперсных золыхых частиц (диаметром менее 5 мкм) в трубе Вентури (не более 65 %) и в скруббере (не более 85 %). Совпадение расчетных результатов с данными исследований доказало адекватность предложенной физико-математической модели.

Как было отмечено ранее, при ультразвуковом воздействии происходит повышение вероятности столкновения капель воды и золыхых частиц. Расчет процесса ультразвуковой коагуляции частиц основан на учете дополнительной силы  $\bar{F}_e$  (1). Эта сила возникает как из-за периодических возмущений газовой среды, так и из-за вторичных отражений акустических колебаний от соседних золыхых частиц. Наибольшая концентрация дисперсных частиц и основной эффект от их коагуляции обеспечивается именно в трубе Вентури. Поэтому дополнительная сила учитывалась только в момент нахождения золотой частицы именно в этой области. Сила  $F_e$  была рассчитана при помощи выражений, приведенных в работе Н.Н. Чернова [16]. В расчете было учтено, что форма золотой частицы отклоняется от сферической и представляет собой эллипсоид вращения:

$$F_e = \frac{4\pi d\mu(W^2 - 1)^{\frac{3}{2}}}{W} \times \left( \frac{\cos^2 \theta}{(W^2 - 2) \arctg \sqrt{W^2 - 1} - \sqrt{W^2 - 1}} + \frac{\sin^2 \theta}{(3W^2 - 2) \arctg \sqrt{W^2 - 1} - \sqrt{W^2 - 1}} \right) \times \bar{U}(r, t), \quad (4)$$

где  $d$  – наибольший диаметр, м;  $W$  – отношение полуосей эллипса;  $\mu$  – динамическая вязкость газового потока, Па·с;  $\theta$  – угол между меньшей полуосью эллипса и направлением акустического поля, рад;  $\bar{U}$  – возмущение скорости газового потока, м/с, (рассчитывается с учетом ортокинетического и гидромеханического механизмов с использованием выражений, описанных в работах G.X. Zhang, J.Zh. Liu [17]).

Численная реализация выражения (4) была получена также при помощи САЕ-системы OpenFOAM. Дополнительно в расчете учитывалось текущее движение отдельных групп реальных дисперсных частиц в зависимости от возмущающих сил (со стороны газового потока). Такой учет осуществлялся при помощи стохастической модели столкновения, описанной в работе M. Sommerfeld [18]. Согласно модели рассчитывается только траектория одной частицы (расчетной). При этом определяется вероятность ее столкновения с другой (виртуальной) частицей, которая генерируется на каждом временном шаге:

$$P_{col}(\Delta t) = \frac{\pi}{4} (d_{pr} + d_{pf})^2 \cdot |\bar{v}_{pr} - \bar{v}_{pf}| \cdot n_p \cdot \Delta t, \quad (5)$$

где  $d_{pr}$ ,  $d_{pf}$  – диаметры частиц, м;  $\bar{v}_{pr}$ ,  $\bar{v}_{pf}$  – скорости частиц, м/с;  $n_p$  – счетная концентрация частиц (для ячейки расчетной области), м<sup>-3</sup>;  $\Delta t$  – временной шаг, с.

Численное значение вероятности столкновения в формуле (5) произвольно взятых частиц на каждом временном шаге в одну секунду составляет от  $5 \cdot 10^{-16}$  до  $50 \cdot 10^{-16}$ . При концентрации золыхых частиц  $17 \text{ г/м}^3$  их количество будет составлять порядка  $1,6 \cdot 10^{10}$ . При этом количество возможных пар золыхых частиц, которые могут столкнуться, будет составлять около  $1,25 \cdot 10^{20}$ . Поэтому, несмотря на очень малое численное значение вероятности в каждый интервал времени, будет происходить столкновение как минимум одной пары частиц. Расчет ее эквивалентного диаметра и скорости движения приведен в формулах (6), (7):

$$d_{pr} = \sqrt[3]{d_{pr}^3 + d_{pf}^3}, \quad (6)$$

$$|\bar{v}_{pr}| = \left| \bar{v}_{pr} - \bar{v}_{pf} \right| \cdot \frac{m_{pr}}{m_{pr} + m_{pf}}, \quad (7)$$

где  $m_{pr}$ ,  $m_{pf}$  – масса частиц до столкновения, кг.

Граничные условия для численной модели: начальная скорость  $v_{вх0}$  (м/с), плотность  $\rho_{вх0}$  (кг/м<sup>3</sup>) входного газового потока и его температура  $T_{вх0}$  (°С); исходный диаметр твердых (золыхых) частиц (м), их плотность  $\rho_{вх1}$  (кг/м<sup>3</sup>) и расход  $Q_{вх1}$  (кг/с); исходный диаметр капель воды  $d_{вх2}$  (м), их плотность  $\rho_{вх2}$  (кг/м<sup>3</sup>) и расход  $Q_{вх2}$  (кг/с).

Дополнительные граничные условия: скользящий газовый поток вдоль внутренних стенок скруббера; неупругое отражение дисперсных частиц в трубе Вентури; возможно прилипание дисперсных частиц в каплеуловителе; соударение частиц со стенкой исключаются; отражение акустических волн ультразвуковой частоты в трубе Вентури.

С учетом предложенных математических зависимостей, описывающих поведение частиц на микрокопическом уровне под действием ультразвуковых колебаний, а также используя выражения (2), (3) была рассчитана эффективность коагуляции частиц в трубе Вентури при разных частотах и на заданном уровне формируемого звукового давления (рис. 4).

Уровень звукового давления был принят равным 145 дБ. Расчеты были проведены при условии равномерного распределения ультразвуковых колебаний во всем объеме трубы Вентури.

Анализ графиков показал, что при увеличении частоты ультразвукового воздействия с 10 до 30 кГц эффективность трубы Вентури падает, но не более 5 %. Поэтому было принято решение осуществлять ультразвуковое воздействие на частотах около 22 кГц – начало ультразвукового диапазона. В слышимом диапазоне уровень звукового давления свыше 145 дБ опасен для обслуживающего персонала. А на более высоких частотах повышается затухание акустических колебаний в газодисперсной среде. Поэтому последующие численные расчеты проводились именно на частоте 22 кГц.

Анализ графиков расчетных зависимостей (эффективность улавливания золыхых частиц диаметром 2–90 мкм) в трубе Вентури при разных уровнях звукового давления (рис. 5) показал следующее. Для

существенного увеличения эффективности газоочистки (особенно с 65 до 85 % для частиц размером 2 мкм) требуется создать акустическое поле с уровнем звукового давления не менее 140 дБ. Дальнейшее повышение уровня звукового давления до 155 дБ не приводит к существенному росту эффективности трубы Вентури.

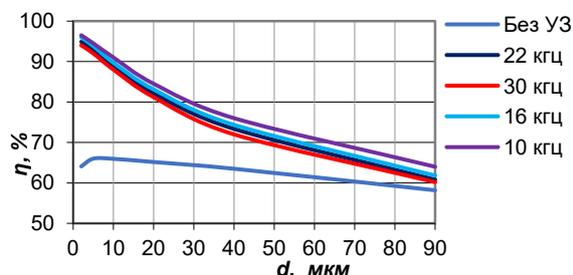


Рис. 4. Зависимость эффективности трубы Вентури от частоты

Fig. 4. Dependence of the Venturi tube efficiency on frequencies

Анализ графиков расчетных зависимостей (эффективность и остаточная запыленность) газового потока в трубе Вентури от диаметра золы частиц при двух значениях уровня звукового давления (рис. 6) показал следующее. Происходит снижение запыленности: примерно в два раза при улавливании золы частиц диаметром до 20 мкм и до полутора раз – для диаметра более 20 мкм.

Именно для высокодисперсных золы частиц (размером менее 5 мкм) достигается наибольший эффект от ультразвуковой коагуляции. Эффективность улавливания золы частиц диаметром 2 мкм при

уровне звукового давления в 150 дБ составляет около 99 %. Это значительно превышает степень газоочистки без применения ультразвуковой коагуляции (не более 65 %).

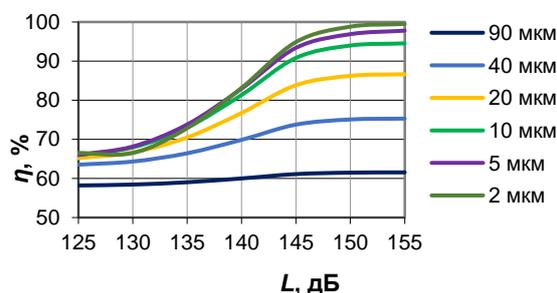
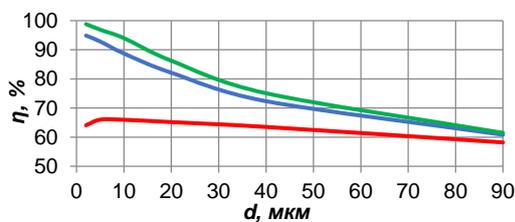


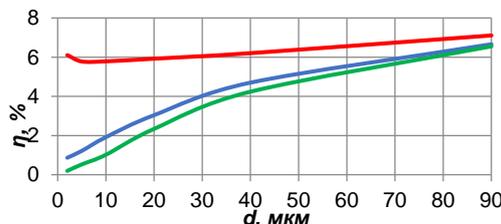
Рис. 5. Зависимость эффективности трубы Вентури от уровня звукового давления

Fig. 5. Dependence of the Venturi tube efficiency on the sound pressure level

Анализ графиков расчетных зависимостей (эффективность и остаточная запыленности газового потока) в скруббере от размера частиц золы при двух значениях уровня звукового давления (рис. 7) показал следующее. Ультразвуковое воздействие обеспечивает повышение эффективности скруббера для диаметров золы частиц в диапазоне 2–90 мкм свыше 96 %, особенно в области диаметров менее 5 мкм. Эффективность улавливания золы частиц в скруббере размером 2 мкм при уровне звукового давления 150 дБ составляет около 99 %. Это значительно превышает степень газоочистки без применения ультразвуковой коагуляции (не более 75 %).



а/а

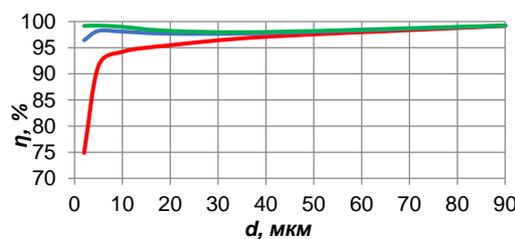


б/б

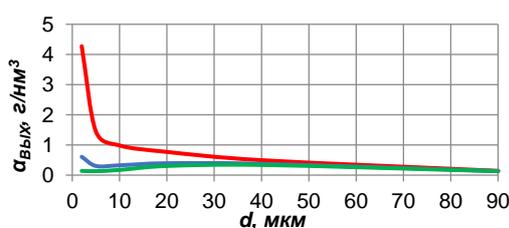
— Без УЗ — с УЗ 145 дБ — с УЗ 150 дБ

Рис. 6. Зависимость эффективности (а) и запыленности (б) газового потока на выходе трубы Вентури при различных уровнях звукового давления

Fig. 6. Dependence of efficiency (a) and dust content (b) at the outlet of the Venturi tube at various sound pressure levels



а/а



б/б

— Без УЗ — с УЗ 145 дБ — с УЗ 150 дБ

Рис. 7. Зависимость эффективности (а) и запыленности (б) выходного газового потока скруббера при различных уровнях звукового давления

Fig. 7. Dependence of efficiency (a) and dust content (b) at the output of the scrubber at various sound pressure levels

Полученные зависимости при разных уровнях ультразвукового воздействия в диапазоне диаметров частиц 2–40 мкм имеют экстремумы. Диаметру золотых частиц в 5 мм соответствует максимум эффективности (или минимум запыленности). Это обусловлено тем, что при меньших диаметрах снижается эффективность каплеуловителя, а при больших диаметрах уменьшается вероятность столкновения частиц дисперсной фазы внутри трубы Вентури вследствие снижения колебательной скорости золотых частиц в акустическом поле. Диаметрам золотых частиц 5–40 мкм соответствует минимум эффективности (или максимум запыленности).

Таким образом, анализ расчетных зависимостей показал, что ультразвуковое воздействие наиболее эффективно применять для уменьшения количества высокодисперсных золотых частиц (диаметром менее 5 мкм) в очищаемых газах.

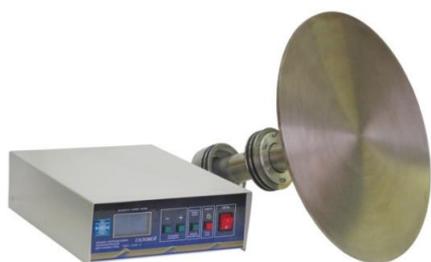
**Экспериментальное подтверждение эффективности применения ультразвукового воздействия для интенсификации процесса мокрой газоочистки**

Источниками для создания акустических колебаний ультразвуковой частоты в газодисперсных средах являлись ультразвуковые излучатели. Конструктивно они представляли собой пьезоэлектрические ультразвуковые колебательные системы с изгибно-колеблющимся диском специального ступенчато-переменного сечения. Для питания ультразвуковых излучателей применялись электронные генераторы [19]. Внешний вид ультразвукового дискового излучателя (УЗДИ) приведен на рис. 8, а основные технические характеристики – в табл. 2.

**Таблица 2.** Основные параметры УЗДИ

**Table 2.** Main parameters of ultrasonic disk radiator (UDR)

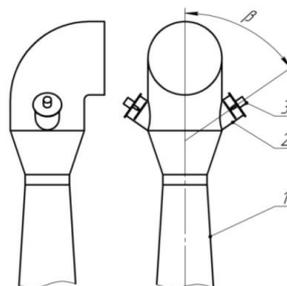
Наименование параметра Parameter name	$D_{изл.}$ , мм $D_{рад.}$ , mm		
	320	370	420
Площадь излучения $S_{изл.}$ , м <sup>2</sup> Radiation area, $S_{рад.}$ , m <sup>2</sup>	0,08	0,11	0,14
Максимальный уровень звукового давления, дБ, на расстоянии, м Maximum sound pressure level, dB, at a distance, m	0,20–0,25	151	158
	1,0	135	143
Частота воздействия, кГц Frequency impact, kHz	22±0,5		



**Рис. 8.** Ультразвуковой аппарат серии «Соловей», модель УЗАГС-0,6/22-0

**Fig. 8.** Ultrasonic device of the «Solovty» series, model UZAGS-0,6/22-0

Наиболее целесообразным местом установки УЗДИ является оголовок трубы Вентури (рис. 9), где обеспечивается максимальная концентрация частиц дисперсной фазы [2].



**Рис. 9.** Схема установки: 1 – труба Вентури; 2 – отвод для установки ультразвукового излучателя; 3 – ультразвуковой дисковый излучатель;  $\beta$  – угол между осью трубы Вентури и ультразвукового дискового излучателя

**Fig. 9.** Installation diagram: 1 – the Venturi tube; 2 – the tap for installation of an ultrasonic emitter; 3 – the ultrasonic disk radiator;  $\beta$  – the angle between the axis of the Venturi tube and the ultrasonic disk radiator

В качестве материала диска ступенчато-переменного сечения использовался титановый сплав ВТ1-0. Только такой материал или аналогичные сплавы способны работать при высокоамплитудной знакопеременной нагрузке на ультразвуковой частоте. Для исключения непосредственного контакта золотых частиц с поверхностью диска (наличие контакта приведет к абразивному износу поверхности и выходу из строя диска) УЗДИ должны устанавливаться не в самом газодисперсном потоке, а в металлических отводах под определенным углом к оси трубы Вентури. Кроме того, УЗДИ необходимо располагать симметрично для обеспечения равномерного распределения ультразвукового поля в трубе Вентури.

Величина оптимального угла установки УЗДИ была определена экспериментально в макетном образце трубы Вентури, в котором с помощью поворотного устройства перемещались два УЗДИ. При угле в 45 градусов обеспечивался наибольший уровень звукового давления в горловине.

Для определения оптимального количества УЗДИ (рис. 10) было проведено численное моделирование и определены зависимости эффективности и остаточной запыленности скруббера (рис. 11).

Из полученных результатов следует, что если происходит увеличение суммарной площади излучения, то повышается эффективность газоочистки (снижается запыленность) в скруббере.

На ТЭЦ и ТЭС в РФ широко применяется каменный уголь, который добывается в Харанорском месторождении и в месторождениях Экибастузского бассейна. Их дисперсный состав приведен на рис. 12. Выбор такого твердого топлива был обусловлен разнообразием дисперсного состава золы, получаемой при их сжигании. Для Харанорского угля модальный диаметр частиц составил 25 мкм, а для Экибастузского угля – 16 мкм.

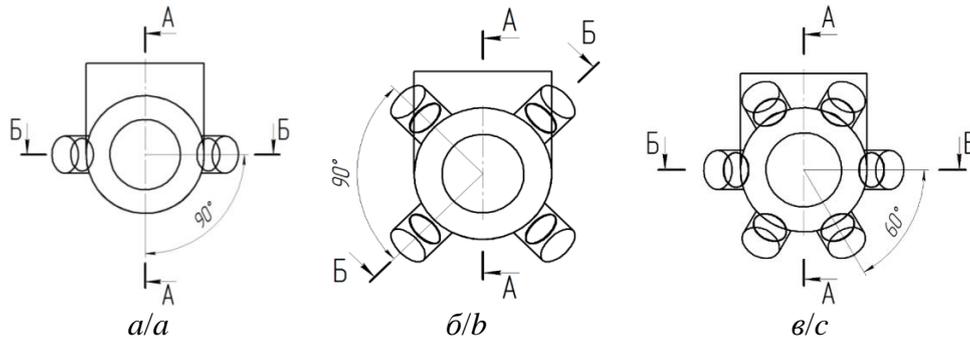


Рис. 10. Схема установки 2-х (а), 4-х (б), 6-ти (в) УЗДИ в трубу Вентури (вид сверху)

Fig. 10. Installation scheme of 2 (a), 4 (b), 6 (c) UDR in the Venturi tube (top view)

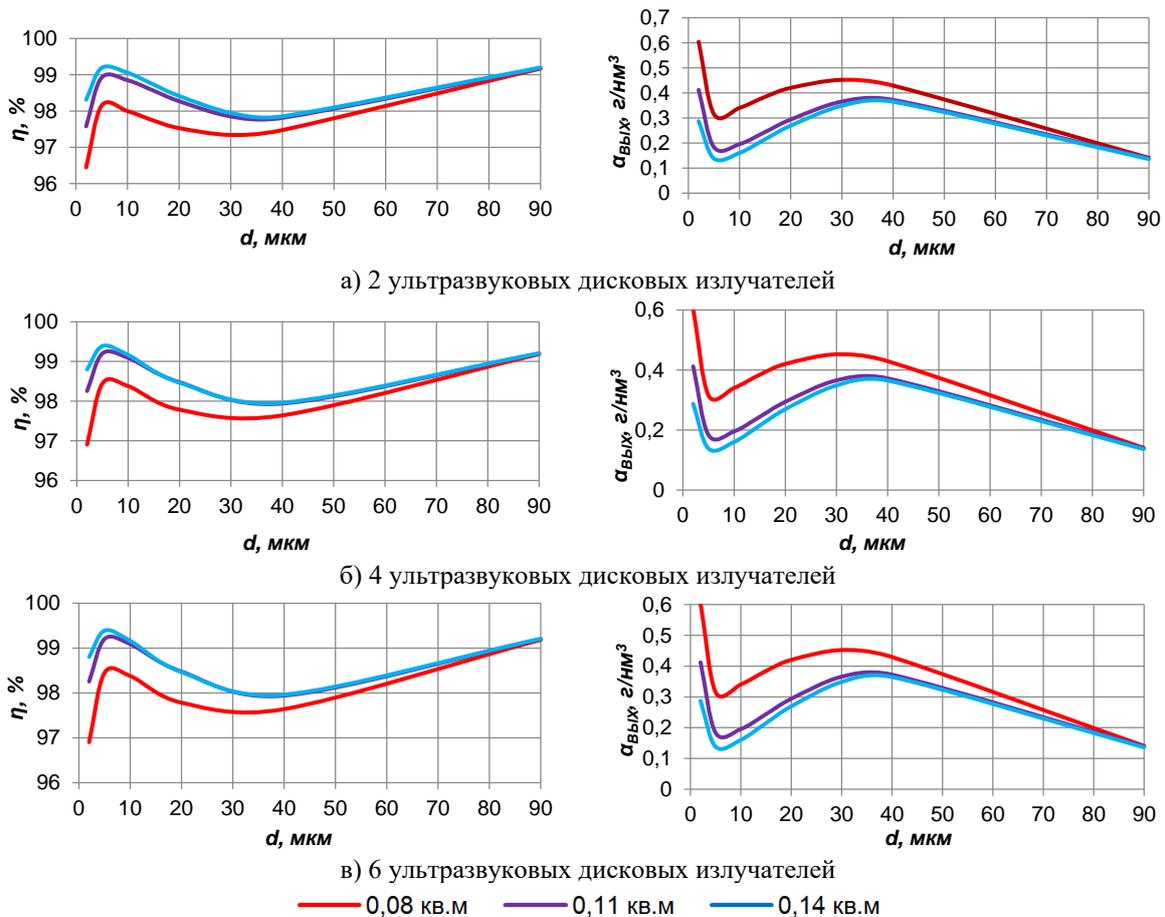


Рис. 11. Зависимости эффективности и остаточной запыленности скруббера от количества УЗДИ и площади излучения

Fig. 11. Dependences of the efficiency and residual dust content of a scrubber with different amounts and areas of UDR

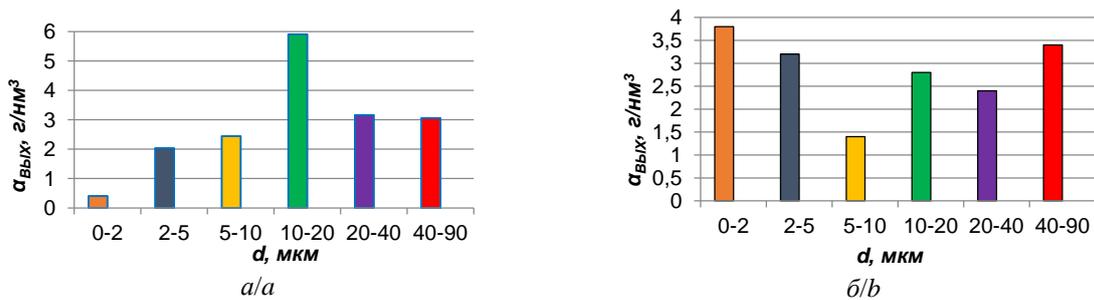


Рис. 12. Исходный дисперсный состав золы от Харанорского (а) и Экибастузского (б) углей

Fig. 12. Original dispersed composition of the ash formed during the combustion of Kharanor (a) and Ekibastuz (b) coals

Используя в качестве входных данных дисперсный состав золы, были рассчитаны зависимости остаточной запыленности выходного газового потока

скруббера при различном количестве УЗДИ и, следовательно, различной площади излучающей поверхности. Полученные результаты приведены на рис. 13.

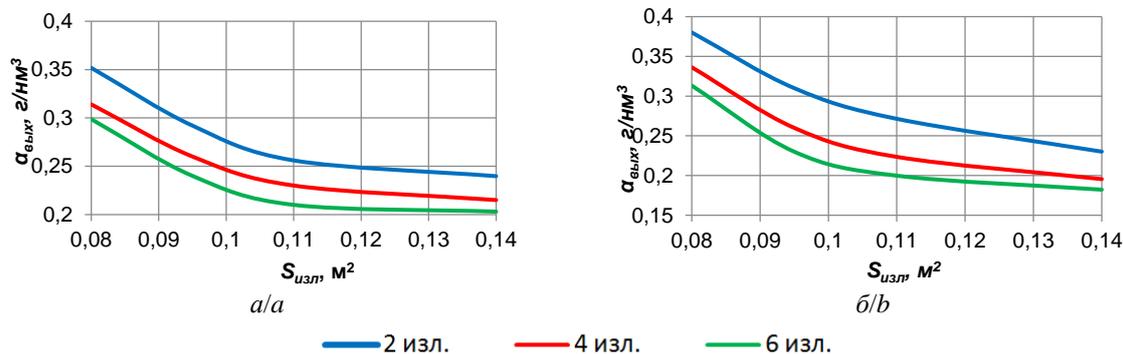


Рис. 13. Зависимости запылённости выходного газового потока в скруббере от площади УЗДИ при различном их количестве: зола Харанорского (а) и Экибастузского (б) углей

Fig. 13. Dependence of the dust content at the scrubber output on the area of UDR with their different amounts for the ash of Kharanor (a) and Ekibastuz (b) coals

Анализ полученных зависимостей показал, что современные экологические стандарты (норма удельных выбросов твердых частиц не должна превышать  $0,25 \text{ г/нм}^3$ ) могут быть обеспечены при использовании от четырех до шести УЗДИ площадью  $0,11 \text{ м}^2$  или двух и более площадью  $0,14 \text{ м}^2$ . При этом для шести УЗДИ, начиная с площади  $0,12 \text{ м}^2$ , остаточная запыленность практически не уменьшается.

Время ультразвукового воздействия на аэрозоль составляло от  $0,2-0,5 \text{ с}$  в зависимости от времени пребывания частицы в трубе Вентури. Время пребывания определялось скоростью частицы, которая обратно пропорциональна ее размеру.

Интенсивность ультразвукового воздействия для двух УЗДИ площадью  $0,14 \text{ м}^2$  достигала в горловине трубы Вентури за счет фокусировки ультразвуковых колебаний до  $500 \text{ Вт/м}^2$ . Из-за затухания акустического поля интенсивность ультразвукового воздействия уменьшалась: в диффузоре на расстоянии  $1 \text{ м}$  от горловины до  $100 \text{ Вт/м}^2$ ; в диффузоре на расстоянии  $3 \text{ м}$  от горловины до  $14 \text{ Вт/м}^2$ .

Сравнивая полученные данные с известными литературными источниками [20], можно сделать вывод о том, что время ультразвукового воздействия на аэрозоль в рассматриваемом процессе в 10 раз меньше, чем

при традиционной газоочистке. При этом полученная высокая эффективность воздействия достигается за счет значительно более высокой интенсивности ультразвукового воздействия (на порядок и выше).

Промышленные испытания были проведены на котлоагрегате БКЗ-220-100Ф ТЭЦ, работающем на угле Харанорского месторождения. На котлоагрегате установлено четыре золоуловителя типа МВ УО ОРГРЭС (труба Вентури), включенных параллельно [2]. Эффективность улавливания золовых частиц для обеспечения экологических норм должна быть не менее 98 %.

Для повышения эффективности газоочистки в оголовки труб Вентури были установлены по два УЗДИ диаметром  $420 \text{ мм}$  (площадь поверхности излучения каждого  $0,14 \text{ м}^2$ ), встречно направленные и под оптимальным углом  $45$  градусов относительно вертикальной оси трубы Вентури (рис. 14).

Общее количество установленных в золоулавливающую установку (ЗУУ) (для 4-х труб Вентури) УЗДИ – 8 шт. Результаты испытания, которые проводились в соответствии с РД 153-34.1-27.301-2001 «Методика испытаний золоулавливающих установок тепловых электростанций и котельных» [21] при различной нагрузке (паропроизводительности) котельного агрегата, представлены в табл. 3.



Рис. 14. Фото установленных УЗДИ в трубы Вентури золоулавливающей установки

Fig. 14. Photos of installed UDR in the Venturi tubes of the ash collection plant

Анализ результатов показал, что при работе ЗУУ с нагрузкой котла 180 т/ч без ультразвука обеспечивается эффективность очистки 95,07 %, а с ультразвуковым воздействием – 98,53 %. При нагрузке 220 т/ч эффективность без ультразвука – 94,87 %, а с ультразвуковым воздействием – 98,42 %.

Сравнение экспериментальных данных с расчетными данными показало, что эффективность газоочистки в реальной ЗУУ меньше расчетной. Это обусловлено тем, что в потоке исходного газа была малая

массовая доля высокодисперсных золовых частиц (диаметром менее 5 мкм), для которых ультразвуковое воздействие наиболее эффективно. Образование турбулентности потока из-за высоких скоростей газа привело к неравномерному движению дисперсных частиц, снижению их относительных скоростей и их уносу из зоны ультразвукового воздействия. Это явилось дополнительным фактором снижения эффективности реальной ЗУУ по сравнению с расчетными значениями.

**Таблица 3.** Основные параметры золоулавливающей установки (ЗУУ)

**Table 3.** Main parameters of the ash collecting unit (ACU)

Нагрузка котла, т/ч Boiler load, t/h	180								220							
	№ 1		№ 2		№ 3		№ 4		№ 1		№ 2		№ 3		№ 4	
Труба Вентури Venturi tube	№ 1		№ 2		№ 3		№ 4		№ 1		№ 2		№ 3		№ 4	
Место измерения Place of measurement	До ЗУУ Before ACU	После ЗУУ After ACU														
Объем газа, м <sup>3</sup> /ч·10 <sup>3</sup> Gas volume, m <sup>3</sup> /h·10 <sup>3</sup>	104,84		105,00		103,48		103,74		186,66		190,38		186,72		185,80	
Температура газа, °С Gas temperature, °C	167	76	177	77	179	77	178	76	194	97	198	96	196	96	197	96
Скорость газа, м/с Gas velocity, m/s	15,8	14,2	16,3	14,4	16,1	14,1	16,2	14,3	28,3	25,2	28,6	26,1	28,8	25,8	28,6	25,4
Плотность газа, кг/м <sup>3</sup> Gas density, kg/m <sup>3</sup>	0,78	0,97	0,74	0,97	0,74	0,96	0,75	0,96	0,71	0,91	0,70	0,90	0,71	0,91	0,70	0,90
Запыленность без УЗ, г/нм <sup>3</sup> Dustiness without ultrasound, g/nm <sup>3</sup>	15,22	0,68	15,17	0,76	16,13	0,81	15,64	0,82	15,59	0,70	14,52	0,78	15,37	0,81	14,98	0,82
Запыленность с УЗ, г/нм <sup>3</sup> Dustiness with ultrasound, g/nm <sup>3</sup>		0,23		0,25		0,21		0,23		0,246		0,24		0,23		0,25
Эффективность без УЗ, % Efficiency without ultrasound, %	95,07								94,87							
Эффективность с УЗ, % Efficiency with ultrasound, %	98,53								98,42							

Проведенные промышленные испытания подтвердили эффективность применения ультразвукового воздействия. Используя данные о дисперсном составе золы сжигаемого угля, теоретически доказано, что уменьшается суммарная доля золовых частиц на выходе ЗУУ в четыре и более раз. Уменьшение доли высокодисперсных частиц, которые практически не улавливаются без применения ультразвукового воздействия, достигает 15 раз.

#### Заключение

В результате выполнения работы показана возможность интенсификации процесса мокрой газоочистки в скрубберах Вентури, а именно повышение эффективности за счет ультразвуковой коагуляции высокодисперсных золовых частиц.

1. Разработана физико-математическая модель, описывающая движение газодисперсного потока в скруббере и взаимодействие дисперсных частиц между собой в акустическом поле. Предложенная

модель позволила рассчитать эффективность газоочистки при различных режимах и условиях воздействия.

2. Определены оптимальные режимы: уровень звукового давления не менее 145 дБ, частота 22 кГц, направление акустического поля под углом 45 градусов по отношению к потоку газа. Критерием оптимальности являлась максимальная эффективность коагуляции золовых частиц в трубе Вентури и максимальная степень очистки дымовых газов.
3. Определены требования к необходимому и достаточному количеству и местам установки ультразвуковых дисковых излучателей на скруббер Вентури для обеспечения эффективной коагуляции в ультразвуковом поле.
4. Проведены испытания созданного ультразвукового оборудования на котлоагрегате БКЗ-220-100Ф ТЭЦ в золоулавливающей установке: в акустическом поле уменьшается концентрация золовых частиц в отводящих газах до 4-х и более раз (эффе-

тивность не менее 98 %), процентное содержание золотых частиц (размером менее 5 мкм) снижает до 15 раз.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кропф Л.И., Акбрут Л.И. Золоуловители с трубами Вентури на тепловых электростанциях. – М.: Энергия, 1977. – 160 с.
2. Палатник И.Б. Пылеуловители с трубами-коагуляторами Вентури. – Алма-Ата: Наука, 1981. – 208 с.
3. Приемов С.И. Новый метод расчета эффективности улавливания пыли в скрубберах Вентури // Промышленная теплотехника. – 2011. – Т. 33. – № 1. – С. 82–87.
4. Аничков С.Н., Гиниятуллин С.Н., Зыков А.М. Повышение эффективности улавливания летучей золы в аппаратах мокрого золоулавливания // Электрические станции. – 2009. – № 8. – С. 59–62.
5. Ran W., Saylor J.R. A mechanistic explanation of the increase in particle scavenging in the ultrasonic scrubber // Journal of Aerosol Science. – 2015. – V. 87 – P. 88–101.
6. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей: монография / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков, А.Н. Сливин. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 241 с.
7. Повышение эффективности процесса коагуляции субмикронных частиц ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности / Р.С. Доровских, В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, К.В. Шалунова, В.А. Нестеров, А.В. Шалунова, А.Д. Абрамов // Вестник алтайской науки. – 2015. – № 1. – С. 298–307.
8. Gallego-Juarez J., Elvira-Segura L., Rodriguez G. A power ultrasonic technology for deliquoring // Ultrasonics. – 2013. – V. 41. – P. 255–259.
9. Ультразвук. Аппараты и технологии: монография / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.С. Хмелев, С.Н. Цыганок. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2015. – 688 с.
10. Theoretical study of acoustic coagulation of gas-dispersed systems / A.V. Shalunov, V.N. Khmelev, R.N. Golyh, K.V. Shalunova // International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices. EDM 2010: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P. 328–333.
11. Sheng C., Shen X. Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles // Aerosol Science and Technology. – 2007. – V. 41. – Iss. 1. – P. 1–13.
12. Hoffmann T.L. An extended kernel for acoustic agglomeration simulation based on the acoustic wake effect // Journal of Aerosol Science. – 1997. – V. 28. – Iss. 6. – P. 919–936.
13. Экспериментальное исследование коагуляции и осаждения газозвеси в закрытой трубе при переходе к ударно-волновому режиму / Л.П. Шайдуллин, Д.А. Губайдуллин, Р.Г. Зарипов, Л.А. Ткаченко // Теплофизика высоких температур. – 2017 – Т. 55. – № 3 – С. 484–486.
14. Modeling and experimental study on acoustic agglomeration for dust particle removal / K. Zua, Y. Yao, M. Caib, F. Zhaob, D.L. Cheng // Journal of Aerosol Science. – 2017. – V. 114. – P. 62–76.
15. Шайдуллин Л.П. Разработка способа акустической коагуляции и осаждения аэрозоля в закрытой трубе применительно к миниградиентам // Молодежь и инновации Татарстана: Конференция молодых ученых. – Казань, 2018. – С. 51–54.
16. Чернов Н.Н. Акустические способы и средства осаждения взвешенных частиц промышленных дымов: дисс. ... д-ра техн. наук. – Таганрог, 2004. – 317 с.
17. Numerical simulation of acoustic wake effect in acoustic agglomeration under Oseen flow condition / Z. Guang Xue, L. Jian Zhong, W. Jie, Z. Jun Hu, C. Ke Fa // Chinese Science Bulletin. – 2012. – V. 57. – Iss. 19. – С. 2404–2412.
18. Multiphase flows with droplets and particles / C.T. Crowe, J.D. Schwarzkopf, M. Sommerfeld, Y. Tsuji. – New-York: CRC Press, 2011. – 509 p.
19. Modal analysis and nonlinear characterization of an airborne power ultrasonic transducer with rectangular plate radiator / R.R. Andrés, V.M. Acosta, M. Lucas, E. Riera // Ultrasonics. – 2018. – V. 82. – P. 345–356.
20. Страус В. Промышленная очистка газов / Пер. с англ. – М.: Химия, 1981. – 616 с.
21. Методика испытаний золоулавливающих установок тепловых электростанций и котельных. СО 34.27.301-2001 (РД 153-34.1-27.301-2001). – М.: ОАО «ВТИ», 2003. – 82 с.

Поступила 27.08.2019 г.

#### Информация об авторах

**Хмелев В.Н.**, доктор технических наук, профессор кафедры методов и средств измерений и автоматизации, заместитель директора по науке Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета.

**Шалунов А.В.**, доктор технических наук, заведующий кафедрой методов и средств измерений и автоматизации Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета.

**Цыганок С.Н.**, кандидат технических наук, доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета.

**Нестеров В.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета.

UDC 534.29.66.084:534-18

## ULTRASOUND COAGULATION IN VENTURI SCRUBBERS: FEATURES OF IMPLEMENTATION AND EFFICIENCY OF APPLICATION

Vladimir N. Khmelev<sup>1</sup>,  
vnh@bti.secna.ru

Andrey V. Shalunov<sup>1</sup>,  
shalunov@bti.secna.ru

Sergey N. Tsyganok<sup>1</sup>,  
grey@bti.secna.ru

Viktor A. Nesterov<sup>1</sup>,  
nva@bti.secna.ru

<sup>1</sup> Altai State Technical University,  
27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russia.

**The relevance** of the research is caused by environmental requirements for flue gases from coal-fired TPPs and TPPs. Environmental requirements are ensured by ultrasonic coagulation of solid ash particles with liquid droplets, which is realized in devices for wet gas purification – in Venturi scrubbers.

**The main aim** of the research is to increase the efficiency of Venturi scrubbers for wet gas purification by improving the conditions for absorption of ash particles by liquid droplets in acoustic fields created by ultrasonic coagulation.

**Objects:** processes of ultrasonic coagulation of ash particles with drops of irrigated liquid in a Venturi scrubber.

**Methods.** Theoretical methods were based on the numerical solution of equations describing the motion of a gas-dispersed flow in a Venturi scrubber and the coagulation of ash particles in an acoustic field. Experimental results were obtained during industrial tests at the boiler unit BKZ-220-100F CHP, operating on the coal of the Kharanorsk deposit, according to the approved methodology RD 153-34.1-27.301-2001.

**Results.** The authors developed the physical and mathematical model that describes the gas-dispersed flow motion in a scrubber and the interaction of dispersed particles with each other in an acoustic field. The model made it possible to calculate the efficiency of gas purification under various conditions and determine the optimal modes of ultrasonic exposure: the sound pressure level is not less than 145 dB, the frequency is 22 kHz, the exposure zone in the entire volume of the Venturi pipe, the direction of the acoustic field is perpendicular to the gas flow. The maximum efficiency of ash particles coagulation in the Venturi scrubbers and the maximum degree of purification of flue gases were the criteria of optimality. The created ultrasonic equipment was tested at the BKZ-220-100F CHP unit in an ash collecting unit: the concentration of ash particles in the exhaust gases in the acoustic field decreases by four or more times (efficiency not less than 98 %), the percentage of ash particles (size less than 5 microns) is reduced to 15 times.

### Key words:

Ultrasonic coagulation, acoustic field, Venturi scrubber, sound pressure, gas purification, ash particle.

The research was financially supported by the RFBR and the Government of Altay region of the Russian Federation within the scientific project no. 19-48-220001.

### REFERENCES

- Kropp L.I., Akbrut L.I. *Zolouloviteli s trubami Venturi na teplovykh elektrostantsiyakh* [Ash collectors with Venturi tubes in thermal power plants]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 160 p.
- Palatnik I.B. *Pyleuloviteli s trubami-koagulyatorami Venturi* [Dust collectors with Venturi coagulator tubes]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1981. 208 p.
- Prienov S.I. A new method for calculating the efficiency of dust collection in Venturi scrubbers. *Industrial Heat Engineering*, 2011, vol. 33, no. 1, pp. 82–87. In Ukr.
- Anichkov S.N., Giniyatullin S.N., Zykov A.M. Improving the efficiency of fly ash capture in wet ash traps. *Electric stations*, 2009, vol. 8, pp. 59–62. In Rus.
- Ran W., Saylor J.R. A mechanistic explanation of the increase in particle scavenging in the ultrasonic scrubber. *Journal of Aerosol Science*, 2015, vol. 87, pp. 88–101.
- Khmelev V.N., Shalunov A.V., Shalunova K.V., Tsyganok S.N., Barsukov R.V., Slivin A.N. *Ultrazvukovaya koagulyatsiya aerozoley* [Ultrasonic coagulation of aerosols]. Biysk, Altai State Technical University Publ., 2010. 241 p.
- Dorovskikh R.S., Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golikh R.N., Shalunova K.V., Nesterov V.A., Shalunova A.V., Abramov A.D. Povyshenye effektivnosti protsesssa koagulyatsii submikronnykh chastits ultrazvukovymi kolebaniyami vysokoy intensivnosti [Improving the efficiency of the process of coagulation of submicron particles by high-intensity ultrasonic vibrations]. *Bulletin of Altay Science*, 2015, Iss. 1, pp. 298–307.
- Gallego-Juarez J., Elvira-Segura L., Rodriguez G. A power ultrasonic technology for deliquoring. *Ultrasonics*, 2013, vol. 41, pp. 255–259.
- Khmelev V.N., Shalunov A.V., Khmelev S.S., Tsyganok S.N. *Ultrazvuk. Apparaty i tekhnologii* [Ultrasonic. Devices and technologies]. Biysk, Altai State Technical University Publ., 2015. 688 p.
- Shalunov A.V., Khmelev V.N., Golyh 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. pp. 328–333.
- Sheng C., Shen X. Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles. *Aerosol Science and Technology*, 2007, vol. 41, Iss. 1, pp. 1–13.
- Hoffmann T.L. An extended kernel for acoustic agglomeration simulation based on the acoustic wake effect. *Journal of Aerosol Science*, 1997, vol. 28, Iss. 6, pp. 919–936.
- Shaidullin L.R., Gubaidullin D.A., Zaripov R.G., Tkachenko L.A. Experimental study of coagulation and sedimentation of gas-

- particle suspension in closed tube under transfer to the shock-wave regime. *Thermophysics of high temperatures*, 2017, vol. 55, no. 3, pp. 484–486. In Rus.
14. Zua K., Yao Y., Caib M., Zhaob F., Cheng D.L. Modeling and experimental study on acoustic agglomeration for dust particle removal. *Journal of Aerosol Science*, 2017, vol. 114, pp. 62–76.
  15. Shaydullin L.R. Razrabotka sposoba akusticheskoy koagulyatsii i osazhdeniya aerolya v zakrytoy trube primentelno k minigradirnyam [Development of a method for acoustic coagulation and sedimentation of an aerosol in a closed pipe as applied to mini cooling towers]. *Konferentsiya molodykh uchenykh. Molodezh i innovatsii Tatarstana* [Conference of young scientists. Youth and Innovation of Tatarstan]. Kazan, 2018. pp. 51–54.
  16. Chernov N.N. *Akusticheskie sposoby i sredstva osazhdeniya vzheshnykh chastits promyshlennykh dymov. Dis. Dokt. nauk* [Acoustic methods and means for deposition of suspended particles of industrial smoke. Dr. Diss]. Taganrog, 2004. 317 p.
  17. Guang Xue Z., Jian Zhong L., Jie W., Jun Hu Z., Ke Fa C. Numerical simulation of acoustic wake effect in acoustic agglomeration under Oseen flow condition. *Chinese Science Bulletin*, 2012, vol. 57, Iss. 19, pp. 2404–2412.
  18. Crowe C.T., Schwarzkopf J.D., Sommerfeld M., Tsuji Y. *Multiphase flows with droplets and particles*. New-York, CRC Press, 2011. 509 p.
  19. Andrés R.R., Acosta V.M., Lucas M., Riera E. Modal analysis and nonlinear characterization of an airborne power ultrasonic transducer with rectangular plate radiator. *Ultrasonics*, 2018, vol. 82, pp. 345–356.
  20. Strauss W. *Promyshlennaya ochistka gazov* [Industrial gas cleaning]. Translated from English. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 616 p.
  21. CO 34.27.301-2001 (RD 153-34.1-27.301-2001). *Metodika ispytaniy zoloulavlivayushchikh ustanovok teplovykh elektrostantsiy i kotelnykh* [Testing method for ash collecting installations of thermal power plants and boiler houses]. Moscow, 2003. 82 p.

Received: 27 August 2019.

#### Information about the authors

**Vladimir N. Khmelev**, Dr. Sc., professor, Deputy Director for Science, Altai State Technical University.

**Andrey V. Shalunov**, Dr. Sc., Head of the Department of Methods and Means of Measuring and Automation, Altai State Technical University.

**Sergey N. Tsyganok**, Cand. Sc., associate professor, Altai State Technical University.

**Viktor A. Nesterov**, Cand. Sc., associate professor, Altai State Technical University.