

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА
МОКРОЙ ГАЗООЧИСТКИ В ТРУБЕ ВЕНТУРИ
НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ**

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

*Кафедра «Методы и средства измерений и автоматизации»,
Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский
государственный технический университет им И. И. Ползунова»,
shalunov@bti.secna.ru; г. Бийск, Россия*

Ключевые слова: излучатель; коагуляция; труба Вентури; ультразвук.

Аннотация: Представлены результаты экспериментальных исследований, подтвердившие эффективность применения ультразвукового (УЗ) воздействия для интенсификации процесса мокрой газоочистки на примере трубы Вентури с каплеуловителем. Результаты испытаний показали, что при работе золоулавливающей установки с нагрузкой котла 180 т/ч обеспечивается эффективность очистки без УЗ-воздействия 95,07 %, с УЗ-воздействием – 98,53 %. При нагрузке котла 220 т/ч эффективность без УЗ-воздействия – 94,87 %, с УЗ-воздействием – 98,42 %. Установка УЗ-излучателей позволила снизить удельные значения суммарных выбросов твердых частиц в атмосферу до значений менее 0,25 г/нм³ (без применения УЗ-воздействия запыленность составляет около 0,8 г/нм³), что соответствует существующим экологическим нормам.

Введение

В настоящее время один из наиболее актуальных вопросов охраны окружающей среды – проблема защиты воздушного бассейна от загрязнения дисперсными частицами, которые оказывают отрицательное воздействие на здоровье людей и животных, состояние растений и экосистем. Особенно остро стоит проблема очистки дымовых газов от летучей золы на предприятиях ТЭЦ и ТЭС, работающих на твердом топливе. Доля выбросов тепловых электростанций составляет до 30 % суммарных выбросов твердых веществ от стационарных источников загрязнения воздуха [1 – 5].

Наиболее перспективным способом повышения улавливания дисперсных частиц в инерционных аппаратах мокрой газоочистки на основе труб Вентури является ультразвуковое (УЗ) воздействие на газодисперсный поток. При этом основная задача повышения эффективности труб Вентури, решаемая за счет воздействия высокоинтенсивными УЗ-колебаниями, состоит в интенсификации процесса УЗ-коагуляции, принцип которой заключается в увеличении вероятности

столкновении высокодисперсных твердых частиц с более крупными каплями распыляемой жидкости за счет придания твердым частицам дополнительного колебательного движения [6 – 8]. Это обеспечивает увеличение степени поглощения твердых высокодисперсных частиц каплями, которые эффективно отделяются от газового потока в каплеуловителе [9].

Для создания УЗ-колебаний сконструировано специализированное УЗ-оборудование (рис. 1) для работы в газовых (газодисперсных) средах с источниками УЗ-воздействия, имеющими диаметр излучающей поверхности 418 мм (площадь излучения 0,14 м²). Технические характеристики разработанного УЗ-оборудования представлены в табл. 1.

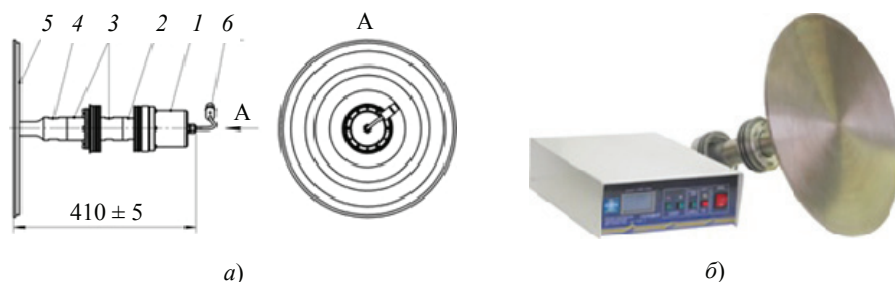


Рис. 1. Конструкция ультразвукового дискового излучателя (а) и внешний вид УЗ-оборудования (б) для воздействия на газодисперсные среды:
 1 – пьезопреобразователь; 2 – бустерное звено для охлаждения; 3 – волновод;
 4 – концентратор; 5 – дисковый излучатель; 6 – кабель питания

Таблица 1

Технические характеристики ультразвукового аппарата

Наименование параметра	Значение
Напряжение в сети переменного тока, В	220 ± 22
Максимальная потребляемая мощность, ВА, не более	600
Диапазон регулирования мощности, %	40...100
Частота механических колебаний излучателя, кГц	22 ± 1,65
Максимальный уровень звукового давления (в пределах 1 м), дБ, не менее	150
Габаритные размеры электронного блока управления, мм	300×280×100
Масса электронного блока, кг, не более	8,0
Диаметр излучателя ультразвуковой колебательной системы, мм	∅ 418
Диаметр излучающей поверхности, мм	418
Масса ультразвуковой колебательной системы, кг, не более	15,0
Условия эксплуатации	
Электронный блок управления:	
– температура окружающего воздуха, °С	+5...+40
– относительная влажность, не более %	60
Ультразвуковой дисковый излучатель:	
– максимальная температура рабочей среды, °С	+ 200
– относительная влажность, %	до 100
Система охлаждения	Жидкостная

Перед проведением исследований на реально работающей золоулавливающей установке (ЗУУ) необходимо определить место, число и угол установки УЗ-излучателей. Наиболее целесообразное место установки ультразвуковых дисковых излучателей – цилиндрический оголовок трубы Вентури, где обеспечивается максимальная концентрация твердых частиц золы и капель орошающей жидкости [10, 11].

Интенсивность абразивного износа в основном зависит от материала излучателя, места его установки в трубе Вентури, скорости газового потока, массовой концентрации и материала дисперсных частиц. Так как стойкость к абразивному износу материала дискового излучателя (титановый сплав ВТ1-0 [12]) невысока, то при продолжительном воздействии частиц с большой скоростью на излучатель, возможно его абразивное разрушение и изменение формы. Это вызовет изменение резонансной частоты излучателя и рассогласование резонансных частот элементов ультразвуковой колебательной системы, а также рассогласование ее резонансной частоты и электрического резонанса высокочастотного генератора. В итоге абразивный износ может привести к полному механическому уничтожению излучателя. Дополнительным фактором, снижающим эффективность улавливания твердых частиц, является образование турбулентных пульсаций из-за высоких скоростей газа, что приводит к неравномерному движению частиц, снижению относительных скоростей между частицами и каплями и их выбросу.

Таким образом, можно сделать вывод, что ультразвуковые дисковые излучатели должны устанавливаться в специальных металлических отводах под определенным углом к оси трубы Вентури (рис. 2), чтобы исключить непосредственный контакт золовых частиц с поверхностью излучателя и, как следствие, обеспечить защиту излучателя от абразивного износа и повысить срок его эксплуатации. Кроме того, излучатели необходимо располагать симметрично для обеспечения равномерного распределения ультразвукового поля в трубе Вентури.

Установка УЗ-излучателей под оптимальным углом позволит обеспечить наиболее равномерное распределение энергии УЗ-воздействия во всем объеме трубы Вентури за счет многократных переотражений колебаний от стенок и проникновения УЗ-волн по всей высоте трубы, что приведет к повышению эффективности коагуляции частиц на каплях орошающей жидкости. Поскольку ультразвуковые дисковые излучатели формируют неоднородное УЗ-поле, был проведен эксперимент по исследованию распределения уровня звукового давления на макете трубы Вентури в натуральную величину (рис. 3).

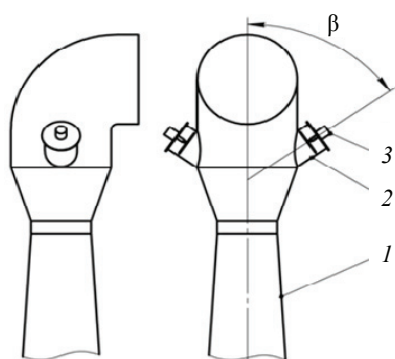


Рис. 2. Схема установки двух УЗ-излучателей в трубу Вентури:

1 – труба Вентури; 2 – отвод для установки УЗ-излучателя; 3 – ультразвуковой дисковый излучатель; β – угол между осью трубы Вентури и УЗ-излучателем

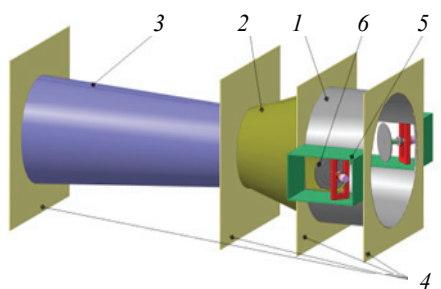


Рис. 3. Трехмерная модель макетного образца трубы Вентури:

1 – оголовок трубы Вентури; 2 – конфузор; 3 – диффузор; 4 – каркас; 5 – поворотное устройство; 6 – ультразвуковой дисковый излучатель

Измерения проводились в реперных точках в различных сечениях трубы Вентури. В оголовке трубы Вентури размещены два встречно направленных поворотных устройства, в каждом из которых закреплен УЗ-дисковый излучатель. Поворотное устройство предназначено для установки дискового излучателя под разными углами к оси трубы Вентури в целях определения оптимального излучателя, обеспечивающего максимальный уровень звукового давления и лучшую равномерность распределения УЗ-колебаний в объеме трубы Вентури. Фото созданного макета трубы Вентури приведено на рис. 4.



Рис. 4. Фото созданного макета трубы Вентури

В результате проведенных экспериментов выявлено, что применение двух разработанных ультразвуковых дисковых излучателей диаметром 418 мм позволяет обеспечить УЗ-воздействие в объеме трубы Вентури, достаточное для коагуляции дисперсных частиц (уровень звукового давления 145...150 дБ, частота 22 кГц) [13]. Излучатели должны располагаться в оголовке трубы Вентури под углом 45° к направлению газового потока, поскольку в этом случае обеспечивается максимальная равномерность УЗ-поля внутри трубы Вентури.

Натурные испытания проведены на котельном агрегате (работающем на угле Харанорского месторождения), где установлены по четыре параллельно включенных золоуловителя типа МВ УО ОРГРЭС (труба Вентури с каплеуловителем). Требуемая запыленность на выходе ЗУУ, согласно экологическим нормативам удельных выбросов твердых частиц в атмосферу, не должна превышать 0,25 г/нм³ (эффективность не менее 98 %) [10, 14].

Для реализации УЗ-воздействия в оголовки труб Вентури установлены по два встречно-направленных УЗ-излучателя диаметром 418 мм с использованием специальных отводов, расположенных под углом 45° относительно вертикальной оси трубы Вентури (рис. 5) для обеспечения наиболее однородного УЗ-поля. Монтаж УЗ-излучателей к отводам выполнен с помощью крепежных фланцев с охлаждающим объемом и отражателем (рис. 6). Для охлаждения УЗ-излучателей в процессе работы использовалась вода из системы орошения труб Вентури. Общее число установленных в ЗУУ (для четырех труб Вентури) излучателей – 8.

Исследования эффективности ЗУУ при УЗ-воздействии и без него проводились в соответствии с РД 153-34.1-27.301-2001 [15] при различной нагрузке (паропроизводительности) котельного агрегата. Результаты проведенных испытаний, представленные в табл. 2, показали, что при работе ЗУУ с нагрузкой котла 180 т/ч обеспечивается эффективность очистки без УЗ-воздействия 95,07 %, с УЗ-воздействием – 98,53 %; при нагрузке 220 т/ч эффективность без УЗ-воздействия – 94,87 %, с УЗ-воздействием – 98,42 %.



Рис. 5. Фото установленных УЗ-излучателей в трубы Вентури золоулавливающей установки

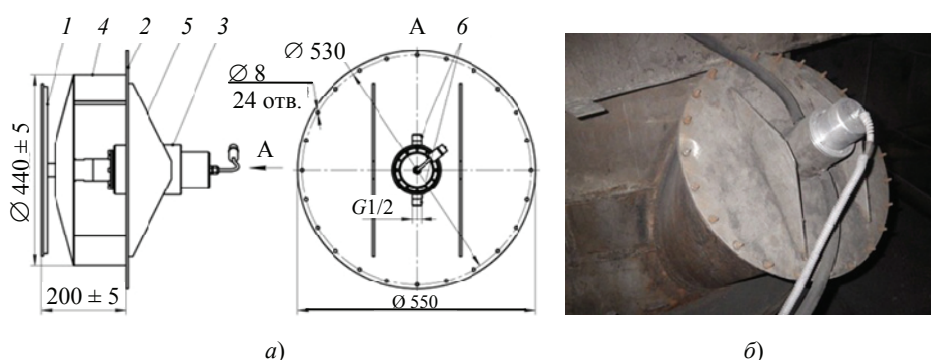


Рис. 6. Эскиз конструкции (а) и фотография установленного УЗ-излучателя (б) с крепежным фланцем в трубу Вентури:

1 – колебательная система с дисковым излучателем; 2 – крепежный фланец; 3 – охлаждающий объем; 4 – отражатель; 5 – усилитель; 6 – патрубки для подачи и отвода охлаждающей жидкости

Таблица 2

Основные параметры золоулавливающей установки

Измеряемый параметр	Труба Вентури и измерение на входе и выходе ЗУУ							
	№ 1		№ 2		№ 3		№ 4	
	ВХОД	ВЫХОД	ВХОД	ВЫХОД	ВХОД	ВЫХОД	ВХОД	ВЫХОД
<i>Нагрузка котла 180 т/ч</i>								
Объем газа, м ³ /ч	104816		104995		103475		103734	
Температура газа, °С	167	76	177	77	179	77	178	76
Скорость газа, м/с	15,8	14,3	16,3	14,4	16,1	14,2	16,2	14,3
Плотность газа, кг/м ³	0,78	0,97	0,75	0,97	0,74	0,96	0,76	0,96
Зачиленность, г/нм ³ :								
без УЗ	15,219	0,680	15,168	0,759	16,131	0,807	15,638	0,819
с УЗ		0,232		0,245		0,212		0,227
Эффективность, %:								
без УЗ					95,07			
с УЗ					98,53			
<i>Нагрузка котла 220 т/ч</i>								
Объем газа, м ³ /ч	186657		190382		186715		185794	
Температура газа, °С	194	76	177	77	179	77	178	76
Скорость газа, м/с	28,3	25,5	28,6	26,1	28,8	25,7	28,6	25,5
Плотность газа, кг/м ³	0,71	0,91	0,70	0,91	0,71	0,90	0,70	0,91
Зачиленность, г/нм ³ :								
без УЗ	15,586	0,695	14,518	0,774	15,373	0,809	14,979	0,821
с УЗ		0,236		0,242		0,225		0,243
Эффективность, %:								
без УЗ					94,87			
с УЗ					98,42			

Из представленных данных следует, что удельные выбросы на выходе ЗУУ без УЗ-воздействия составляли приблизительно $0,8 \text{ г/нм}^3$, что практически в 4 раза превышает требования экологических стандартов. Применение ультразвукового воздействия позволило, в свою очередь, снизить удельные выбросы до значений $0,22 \dots 0,24 \text{ г/нм}^3$, что соответствует требованиям экологических стандартов.

Заключение

В результате проведения экспериментальных исследований показана возможность повышения эффективности процесса мокрой газоочистки в ЗУУ с трубами Вентури за счет УЗ-коагуляции дисперсных частиц с каплями воды. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что УЗ-воздействие обеспечивает сокращение выбросов дисперсных частиц в 4 раза (с $0,8 \text{ г/нм}^3$ без УЗ-воздействия до $0,22 \dots 0,24 \text{ г/нм}^3$ при наличии УЗ-колебаний). Это делает перспективным применение УЗ-воздействия и разработанных авторами УЗ-излучателей для использования в составе ЗУУ на основе труб Вентури в целях обеспечения соответствия их характеристик по удельным выбросам дисперсных частиц требованиям экологических стандартов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Алтайского края Российской Федерации в рамках научного проекта № 19-48-220001.

Список литературы

1. Ветошкин, А. Г. Процессы и аппараты пылеочистки : учеб. пособие / А. Г. Ветошкин. – Пенза : Изд-во Пензенского гос. ун-та, 2005. – 210 с.
2. Оборудование для очистки газов промышленных печей : электрон. курс лекций [Электронный ресурс] / С. А. Козлова [и др.]. – Красноярск : СФУ, 2007. – 156 с. – Режим доступа: <http://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/53121> (дата обращения: 10.10.2019)
3. Очистка промышленных газов от пыли / В. Н. Ужов [и др.]. – М. : Химия, 1981. – 392 с.
4. Ладыгичев, М. Г. Зарубежное и отечественное оборудование для очистки газов : справ. изд. / М. Г. Ладыгичев, Г. Я. Бернер. – М. : Теплотехник, 2004. – 696 с.
5. Страус, В. Промышленная очистка газов / В. Страус ; пер. с англ. Ю. Я. Косого. – М. : Химия, 1981. – 616 с.
6. Ультразвук. Газоочистка / В. Н. Хмелев [и др.]. – Бийск : Изд-во Алтайского гос. техн. ун-та, 2018. – 534 с.
7. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей : монография / В. Н. Хмелев [и др.]. – Бийск : Изд-во Алтайского гос. техн. ун-та, 2010. – 241 с.
8. Gallego-Juarez, J. A. Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity UltraSound / J. A. Gallego-Juarez, K. F. Graff. – Woodhead Publishing, 2015. – 1166 p.
9. Повышение эффективности процесса коагуляции субмикронных частиц ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности / В. Н. Хмелев [и др.] // Вестник алтайской науки. – 2015. – № 1 (23). – С. 298 – 307.
10. Кропп, Л. И. Золоуловители с трубами Вентури на тепловых электростанциях / Л. И. Кропп, А. И. Акбрут. – М. : Энергия, 1977. – 160 с.
11. Палатник, И. Б. Пылеуловители с трубами-коагуляторами Вентури: (основы теории и методы расчета) / И. Б. Палатник. – Алма-Ата : Наука, 1981. – 208 с.
12. Ультразвук. Аппараты и технологии : монография / В. Н. Хмелев [и др.]. – Бийск : Изд-во Алтайского гос. техн. ун-та, 2015. – 688 с.

13. Development of Two-Step Centrifugal Acoustic Gas-Purifying Equipment / V. N. Khmelev [et al.] // Proceedings the 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2016), 30 июня – 04 июля 2016 г., Eragol, Алтай. – Новосибирск, 2016. – С. 264 – 268. doi: 10.1109/EDM.2016.7538738

14. ГОСТ Р 50831–95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. – Введ. 1997-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1996. – 27 с.

15. РД 153-34.1-27.301–2001. Методика испытаний золоулавливающих установок тепловых электростанций и котельных. – Взамен РД 34.27.301-91. – М. : ОАО «ВТИ», 2003. – 82 с.

Improving the Efficiency of the Wet Gas Cleaning Process in a Venturi Tube by Superposition of Ultrasonic Fields

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

*Department of Methods and Means of Measurement and Automation,
Biysk Technological Institute (Branch) of Polzunov Altai State Technical University,
shalunov@bti.secna.ru; Biysk, Russia*

Keywords: emitter; coagulation; Venturi tube; ultrasound.

Abstract: The paper presents the findings of experimental studies, confirming the effectiveness of the use of ultrasonic exposure to intensify the process of wet gas purification using the example of a Venturi pipe with a retractor. The test results showed that when the storage unit is operated with a boiler load of 180 t/h, cleaning efficiency without ultrasonic treatment is 95.07 %, and with ultrasonic treatment it is 98.53 %. With a boiler load of 220 t/h, the efficiency without ultrasonic treatment is 94.87 %, and with ultrasonic treatment it is 98.42 %. The installation of ultrasonic emitters made it possible to reduce the specific values of the total emissions of solid particles into the atmosphere to values less than 0.25 g/nm³ (without the use of ultrasonic exposure, dust content was about 0.8 g/nm³), which corresponds to existing environmental standards.

References

1. Vetoshkin A.G. *Protsessy i apparaty pyleochistki: uchebnoye posobiye* [Processes and apparatuses for dust cleaning: a training manual], Penza: Izdatel'stvo Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta, 2005, 210 p. (In Russ.)

2. Kozlova S.A., Shalayev I.M., Rayeva O.V., Kiselev A.V. *Oborudovaniye dlya ochistki gazov promyshlennykh pechey: elektronnyy kurs lektsiy* [Gas purification equipment for industrial furnaces: electronic course of lectures], Krasnoyarsk: SFU, 2007, 156 p. (In Russ.)

3. Uzhov V.N., Val'berg A.Yu., Myagkov B.I., Reshidov I.K. *Ochistka promyshlennykh gazov ot pyli* [Purification of industrial gases from dust], Moscow: Khimiya, 1981, 392 p. (In Russ.)

4. Ladygichev M.G., Berner G.Ya. *Zarubezhnoye i otechestvennoye oborudovaniye dlya ochistki gazov: spravochnoye izdaniye* [Foreign and domestic equipment for gas purification: a reference publication], Moscow: Teplotekhnika, 2004, 696 p. (In Russ.)

5. Straus V. *Promyshlennaya ochistka gazov* [Industrial gas cleaning], Moscow: Khimiya, 1981, 616 p. (In Russ.)

6. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Nesterov V.A. *Ul'trazvuk. Gazoочистка* [Ultrasound. Gas purification], Biysk: Izdatel'stvo Altayskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2018, 534 p. (In Russ.)
7. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Shalunova K.V., Tsyganok S.N., Barsukov R.V., Slivin A.N. *Ul'trazvukovaya koagulyatsiya aerorozley: monografiya* [Ultrasonic coagulation of aerosols: monograph], Biysk: Izdatel'stvo Altayskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2010, 241 p. (In Russ.)
8. Gallego-Juarez J.A., Graff K.F. Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultra-Sound, *Woodhead Publishing*, 2015, 1166 p.
9. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Shalunova K.V., Nesterov V.A., Shalunova A.V., Abramov A.D. [Improving the efficiency of the process of coagulation of submicron particles by high-intensity ultrasonic vibrations], *Vestnik altayskoy nauki* [Bulletin of Altai Science], 2015, no. 1(23), pp. 298-307. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Kropp L.I., Akbrut A.I. *Zolouloviteli s trubami Venturi na teplovykh elektrostantsiyakh* [Ash collectors with venturi pipes at thermal power plants], Moscow: Energiya, 1977, 160 p. (In Russ.)
11. Palatnik, I. B. *Pyleuloviteli s trubami-koagulyatorami Venturi: (osnovy teorii i metody rascheta)* [Dust collectors with venturi tubes-coagulators: (basics of theory and calculation methods)], Alma-Ata: Nauka, 1981, 208 p. (In Russ.)
12. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Khmelev S.S., Tsyganok S.N. *Ul'trazvuk. Apparaty i tekhnologii: monografiya* [Ultrasound. Equipment and technologies: monograph], Biysk: Izdatel'stvo Altayskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2015, 688 p. (In Russ.)
13. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Dorovskikh R.S., Kozhevnikov I.S. Development of Two-Step Centrifugal Acoustic Gas-Purifying Equipment, *Proceedings the 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2016)*, 30 June - 04 July, 2016, Erlagol, Altay, Novosibirsk, 2016, pp. 264-268, doi: 10.1109/EDM.2016.7538738
14. GOST R 50831-95. *Ustanovki kotel'nyye. Teplomekhanicheskoye oborudovaniye. Obshchiye tekhnicheskkiye trebovaniya* [GOST R 50831-95. Boiler plants. Thermomechanical equipment. General technical requirements], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1996, 27 p. (In Russ.)
15. RD 153-34.1-27.301-2001. *Metodika ispytaniy zoloulavlivayushchikh ustanovok teplovykh elektrostantsiy i kotel'nykh* [RD 153-34.1-27.301-2001. Testing procedure for ash collecting plants of thermal power plants and boiler houses], Moscow: OAO «VTI», 2003, 82 p. (In Russ.)

Erhöhung der Effizienz des Prozesses der nassen Gasreinigung im Venturi-Rohr durch Überlagerung von Ultraschallfeldern

Zusammenfassung: Die Ergebnisse experimenteller Studien bestätigen die Wirksamkeit der Anwendung von Ultraschall zur Intensivierung des Prozesses der Nassgasreinigung am Beispiel eines Venturi-Rohrs mit Tropfenfänger. Die Testergebnisse zeigten, dass bei Betrieb des Speichers mit einer Kessellast von 180 t/h eine Reinigungseffizienz ohne Ultraschalleinwirkung 95,07 % gewährleistet wird und mit Ultraschalleinwirkung - 98,53 %. Bei einer Kessellast von 220 t/h liegt der Wirkungsgrad ohne Ultraschallbehandlung bei 94,87% und mit Ultraschallbehandlung bei 98,42 %. Die Installation von Ultraschallstrahlern ermöglichte es, die spezifischen Werte der Gesamtemissionen fester Partikeln in die Atmosphäre auf Werte von weniger als 0,25 g/nm³ zu reduzieren (ohne Anwendung von Ultraschall lag der Staubgehalt bei etwa 0,8 g/nm³), was den bestehenden Umweltstandards entspricht.

Augmentation de l'efficacité du traitement humide de gaz dans le tube de Venturi par l'imposition des champs ultrasonores

Résumé: Sont présentés les résultats des études expérimentales qui ont confirmé l'efficacité de l'utilisation de l'action ultrasonore pour intensifier le processus du traitement humide de gaz à l'exemple d'un tube de Venturi avec un collecteur de gouttelettes. Les résultats des tests ont montré que le chargement de la chaudière de 180 t/h assure l'efficacité du traitement. L'installation des émetteurs à ultrasons a permis de réduire les valeurs spécifiques des émissions totales des particules solides dans l'atmosphère jusqu'à la valeur inférieure à $0,25 \text{ g/nm}^3$ (sans application de l'effet ultrasonique, la poussière était d'environ de $0,8 \text{ g/nm}^3$), ce qui est conforme aux normes écologiques existantes.

Авторы: *Хмельёв Владимир Николаевич* – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе; *Шалунов Андрей Викторович* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Методы и средства измерений и автоматизации»; *Нестеров Виктор Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Методы и средства измерений и автоматизации»; *Боченков Александр Сергеевич* – магистрант, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», г. Бийск, Россия.

Рецензент: *Абанин Виктор Алексеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Методы и средства измерений и автоматизации», Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», г. Бийск, Россия.