

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗОЛОУЛАВЛИВАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, Р.С. Доровских,
В.А. Нестеров

В статье представлены результаты исследований, направленных на поиск путей повышения эффективности работы золоулавливающей установки (ЗУУ) на основе трубы Вентури за счет воздействия ультразвуковыми (УЗ) колебаниями. Проведенный теоретический анализ работы ЗУУ позволил установить возможность повышения эффективности и снижение запыленности газа на выходе установки при использовании УЗ воздействия.

Ключевые слова: золоулавливающая установка, труба Вентури, ультразвуковое воздействие, коагуляция, дисперсные частицы.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в составе газоочистных установок широко используются аппараты мокрого пылеулавливания, среди которых наиболее эффективными являются турбулентные аппараты (скрубберы) Вентури [1, 2]. Они обеспечивают эффективность улавливания дисперсных частиц золы до 94–96%. Такая эффективность является недостаточной по современным экологическим требованиям. При этом, дальнейшее увеличение эффективности пылеуловителей такого типа за счет изменения конструкции и режимов движения газодисперсной и жидкой фаз не приносит желаемых результатов. Причина заключается в невозможности повышения вероятности столкновения дисперсных частиц с частицами распыляемой воды.

Повысить вероятность столкновения улавливаемых дисперсных частиц с распыленными каплями воды можно за счет придания дисперсным частицам колебательного движения относительно более тяжелых частиц воды. Наиболее эффективно это можно реализовать при помощи акустического воздействия на газодисперсный поток – т.е. путем обеспечения ультразвуковой (УЗ) коагуляции дисперсных частиц [3].

Для повышения эффективности коагуляции дисперсных частиц в трубе Вентури при использовании дополнительного воздействия УЗ колебаниями высокой интенсивности возникла необходимость изучить механизмы коагуляции в анализируемом устрой-

стве и выявить оптимальные режимы и условия, при которых УЗ воздействие способно обеспечить максимальное повышение эффективности.

Поскольку существующие методики расчета газоочистного оборудования не учитывают возможностей УЗ воздействия для снижения остаточной запыленности дымовых газов в золоулавливающей установке (ЗУУ) были использованы универсальные способы математического моделирования течения и взаимодействия многофазных потоков, реализуемые применением специализированных программных комплексов. Они позволяют учесть большое количество определяющих факторов, свести к минимуму допущения и выполнить численные расчёты с высокой степенью точности и за достаточно короткое время. Предпочтение при расчетах было отдано многофункциональному программному комплексу ANSYS, базирующемуся на методе конечных элементов.

МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ПОСТРОЕНИИ МОДЕЛИ ЗОЛУЛАВЛИВАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ

Проведенный анализ моделей многофазных потоков, реализованных в ANSYS показал, что моделью, наиболее полно учитывающей основные факторы, влияющие на эффективность процесса улавливания дисперсных частиц в ЗУУ (как при наличии, так и при отсутствии УЗ воздействия), является

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗОЛОУЛАВЛИВАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Discrete Phase Model (метод Лагранжа), реализованная в рамках модуля ANSYS FLUENT.

Согласно модели дискретных фаз, реализованной в ANSYS FLUENT, в полидисперсном потоке, содержащем частицы разного размера, эффект коагуляции происходит за счет разности скоростей частиц (ортокинетическая коагуляция), которая оказывает наибольшее влияние на интенсивность столкновения частиц.

При отсутствии УЗ воздействия под влиянием сил инерции крупные частицы движутся медленнее мелких, и тем самым увеличивается вероятность столкновения тех и других. А при наличии УЗ воздействия крупные капли воды практически не вовлекаются в колебательное движение, сохраняя первоначальную траекторию, а мелкие частицы золы (не более 10 мкм) – колеблются с размахом (т.е. с удвоенной амплитудой) до 100 мкм, тем самым увеличивая пространство эффективного взаимодействия с каплями воды [4].

ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

При построении расчетной модели скруббера Вентури был принят ряд допущений:

- ламинарное течение потока, т.е. газ перемещается слоями без перемешивания и пульсаций (беспорядочных и быстрых изменений скорости и давления);

- не учитывается трение и прилипание частиц на стенки трубы Вентури, при этом принимается допущение о неупругом отражении частицы (золы или капли воды) от стенки трубы Вентури;

- оседание частиц золы и капель на стенки каплеуловителя;

- отсутствие теплообмена между фазами и, как следствие, отсутствие испарения капель воды;

- одностороннее взаимодействие сплошной и дисперсных фаз (не учитывается влияние со стороны дисперсных частиц на поток газа).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЗОЛОУЛАВЛИВАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ

Для расчета эффективности установки были приняты следующие исходные (соответствуют параметрам работы большинства эксплуатирующихся на сегодняшний день ЗУУ):

1. Температура дымовых газов перед установкой – 170°C, что соответствует плотности газового потока 0,78 кг/м³;

2. Средний размер капель орошающей воды – 150–250 мкм;

3. Объем уходящих дымовых газов – 100 тыс. м³/ч, что соответствует скорости газового потока, равной 17,4 м/с на входе трубы Вентури;

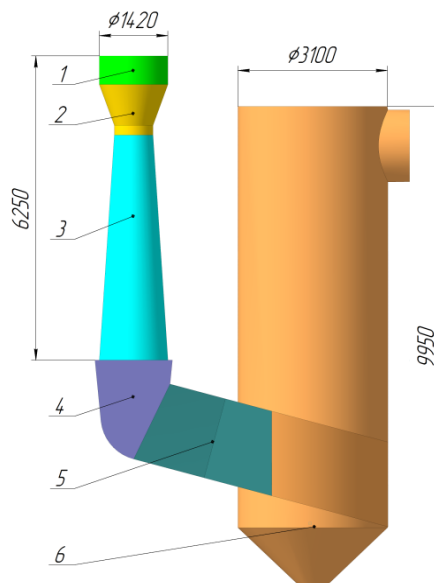
4. Запыленность газов перед установкой – 17,0 г/м³, что соответствует массовому расходу золы 0,35 кг/с;

5. Скорость дымовых газов в конфузоре трубы Вентури – 50-70 м/с;

6. Расход воды на орошение трубы Вентури – 10 т/ч;

7. Размер частиц золы, образующейся при сгорании угля, определялся на основании научно-технических источников [5, 6] и составляет от 2 до 90 мкм.

Для моделирования движения газового потока была создана трёхмерная геометрическая модель золоулавливающей установки (рисунок 1). Геометрия и типоразмеры модели соответствуют существующим конструкциям ЗУУ, применяющимся в промышленности [2].



1 – входной патрубок; 2 – конфузор; 3 – диффузор; 4 – изогнутая часть воздуховода (колена); 5 – соединительный патрубок; 6 – каплеуловитель

Рисунок 1 – Трёхмерная модель золоулавливающей установки на основе трубы Вентури

Результаты моделирования движения газового потока приведены на рисунке 2.

Как следует из полученных результатов, скорость газового потока в горловине трубы Вентури достигает 57,1 м/с. В свою очередь, в литературе [1, 2] приводится диапазон значений 50-70 м/с. Это свидетельствует об адекватности использованной модели движения газового потока.

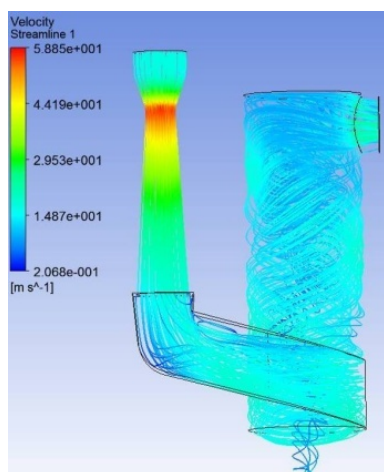


Рисунок 2 – Моделирование движения газового потока в золоулавливающей установке

Наличие ультразвуковых колебаний в трубе Вентури учитывается в виде дополнительной силы, действующей, на индивидуальную частицу, находящуюся в УЗ поле, которая определяется возмущением скорости газовой среды, возникающим при распространении УЗ колебаний.

При расчёте добавки к силе был произведен учет отклонения формы частиц золы от сферической. Возмущение газового потока в УЗ поле складывается из двух составляющих [5]:

$$\Delta F = 3\pi d\mu(k_B \cos^2 \theta + k_N \sin^2 \theta)(U_1 + U_2) \sin(2\pi ft), \quad (1)$$

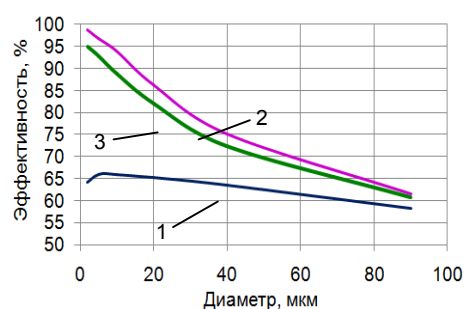
где d – наибольший диаметр эллипсоидальной частицы, м; μ – вязкость газового потока, Па·с; θ – угол между меньшей полуосью частицы и направлением УЗ поля, рад; k_B – коэффициент обтекания частицы при движении газового потока вдоль меньшей полуоси; k_N – коэффициент обтекания частицы при движении газового потока вдоль большей полуоси; f – частота УЗ колебаний, принятая равной 22 кГц;

U_1 – амплитуда возмущений скорости газового потока со стороны первичного УЗ поля, м/с; U_2 – амплитуда возмущений скорости га-

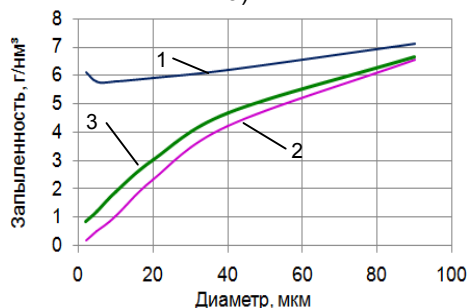
зового потока со стороны частиц воды, м/с; t – время, с.

Добавка к силе со стороны газового потока при проведении расчетов учитывалась только при нахождении частицы в объеме трубы Вентури с помощью режима программирования функций User Defined Functions (UDF), встроенного в модуль ANSYS FLUENT.

По результатам проведенных расчетов были построены зависимости эффективности и остаточной запыленности газового потока трубы Вентури от размера частиц золы (рисунок 3).



1 - Без УЗ; 2 - С УЗ 150 дБ; 3 - С УЗ 145 дБ
а)



1 - Без УЗ; 2 - С УЗ 150 дБ; 3 - С УЗ 145 дБ
б)

Рисунок 3 – Зависимость эффективности (а) и остаточной запыленности (б) трубы Вентури от размера частиц золы при различных уровнях звукового давления

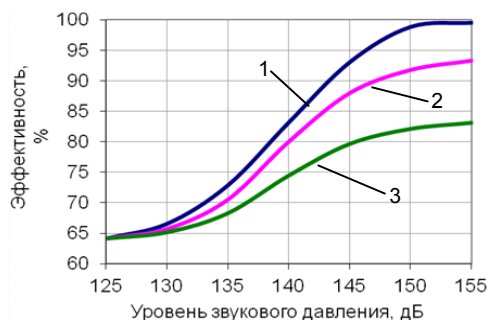
Из представленных результатов (рисунок 3) следует, что применение УЗ колебаний с уровнем звукового давления в 150 дБ обеспечивает не менее чем двукратное снижение запыленности на выходе трубы Вентури для частиц размером до 20 мкм включительно и до 1,5 раз для частиц размером более 20 мкм.

Это позволяет сделать вывод о высокой эффективности применения УЗ колебаний для коагуляции взвешенных частиц и прежде всего тонкодисперсных (2–5 мкм), на которых обеспечивается 6-ти кратное снижение запыленности.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗОЛОУЛАВЛИВАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Далее были проведены расчеты по определению оптимальной зоны УЗ воздействия при различных уровнях звукового давления (рисунок 4).

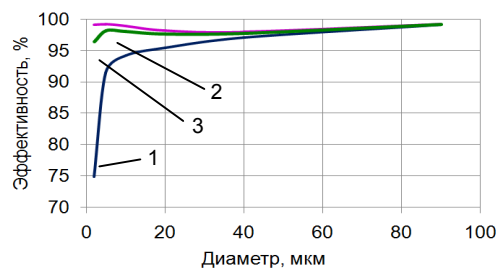
Из полученных результатов, можно сделать вывод, что для обеспечения максимальной эффективности процесса коагуляции необходимо обеспечить равномерное УЗ поле во всем объеме трубы Вентури (УЗ воздействие одновременно на конфузор и диффузор).



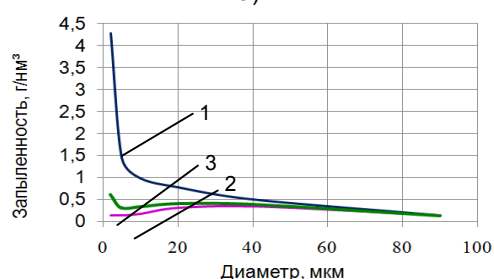
1 - Конфузор+диффузор; 2 - Диффузор; 3 - Конфузор

Рисунок 4 – Зависимость эффективности трубы Вентури от уровня звукового давления при различных зонах УЗ воздействия

На рисунке 5 представлены зависимости эффективности и остаточной запыленности газового потока всей ЗУУ от размера частиц золы (рисунок 5).



1 - Без УЗ; 2 - С УЗ 150 дБ; 3 - С УЗ 145 дБ



1 - Без УЗ; 2 - С УЗ 150 дБ; 3 - С УЗ 145 дБ

Рисунок 5 – Зависимость эффективности (а) и остаточной запыленности (б) ЗУУ от размера частиц золы при различных уровнях звукового давления

Из представленных на рисунке 5 зависимостей следует, что применение УЗ воздействия обеспечивает значительное увеличение эффективности работы ЗУУ, особенно в области высокодисперсных частиц. Так для частиц размером 2 мкм эффективность установки повышается с 75 % до 99,2 %.

Таким образом, применение УЗ воздействия, с частотой 22 кГц наиболее эффективно для частиц размером менее 20 мкм. Более крупные частицы в меньшей степени увлекаются УЗ колебаниями, однако, и для частиц размером от 20 мкм до 40 мкм эффективность ЗУУ увеличивается с 95,4 % до 98,2 %.

Снижение эффекта от применения УЗ воздействия для крупных частиц нивелируется высокой исходной (без УЗ воздействия) эффективностью улавливания таких частиц.

Поэтому можно сделать вывод, что применение УЗ воздействия для повышения эффективности ЗУУ на основе трубы Вентури целесообразно для снижения содержания высокодисперсной золы в дымовых газах, выходящих в атмосферу после очистки.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ЗОЛЫ УНОСА НА ВЫХОДЕ ЗУУ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ УЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ С РАЗЛИЧНЫМ УРОВНЕМ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ

На заключительном этапе анализа была определена теоретически достижимая запыленность газа на выходе ЗУУ при известном дисперсном составе золы на входе.

Остаточная запыленность газа рассчитывалась на основании полученных данных о фракционной эффективности ЗУУ (рисунок 5) с помощью следующего выражения:

$$\eta_p = \frac{\sum_{i=1}^N \eta(d_i) W_i}{\sum_{i=1}^N W_i}, \quad (2)$$

где η_p – эффективность улавливания полидисперсной золы, %; $\eta(d_i)$ – зависимость эффективности улавливания монодисперсной золы от диаметра d_i , %; i – количество групп размеров частиц золы; d_i – размер частиц i -й группы, м; W_i – массовая доля частиц золы i -й группы.

Для объективной оценки эффективности применения УЗ воздействия были использованы данные о дисперсном составе летучей

зола, полученные из достоверных открытых источников [6].

Ниже (рисунок 5) представлены результаты расчетов для зола, полученной от сжигания бурого угля Харанорского месторождения размола мельницей МВ 50–160 в котле БКЗ 210–240 Владивостокской ТЭЦ–2.

Из полученных данных следует, что на выходе ЗУУ с применением УЗ воздействия с уровнем звука 150 дБ фракций с размерами частиц 2 – 5 мкм практически не наблюдается (менее 0,05 г/м³). Суммарная запыленность на выходе ЗУУ при этом составляет: без УЗ воздействия – 0,802 г/м³ (эффективность 95,2535 %); при уровне звукового давления 145 дБ – 0,329 г/м³ (эффективность 98,065 %); при уровне звукового давления 150 дБ – 0,237 г/м³ (эффективность 98,611 %).

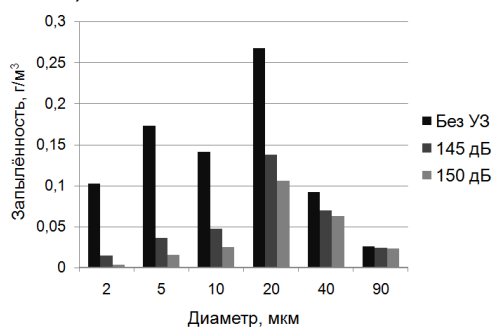


Рисунок 5 – Фракционный состав зола на выходе ЗУУ

Таким образом, полученные результаты доказывают эффективность и перспективность применения УЗ колебаний для повышения эффективности ЗУУ на основе труб Вентури.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных работ получены следующие результаты:

- определено, что применение УЗ воздействия обеспечивает значительное увеличение эффективности работы ЗУУ, особенно в области высокодисперсных частиц. Так для частиц размером 2 мкм эффективность установки повышается с 75 % до 99,1 %;

- показано, что применение УЗ воздействия, с частотой 22 кГц наиболее эффективно для частиц размером менее 20 мкм. Более крупные частицы в меньшей степени увлекаются УЗ колебаниями, однако, и для частиц размером от 20 мкм до 40 мкм прирост эф-

фективности ЗУУ составляет до 3% (с 95,4 % до 98,2 %). При этом, снижение эффекта от применения УЗ воздействия на крупных частицах нивелируется высокой исходной (без УЗ воздействия) эффективностью ЗУУ при улавливании таких частиц;

- установлено, что для зола, полученной от сжигания бурого угля Харанорского месторождения суммарная запыленность на выходе ЗУУ составляет: без УЗ воздействия – 0,802 г/м³ (эффективность 95,2535 %); при уровне звукового давления 145 дБ – 0,329 г/м³ (эффективность 98,065 %); при уровне звукового давления 150 дБ – 0,237 г/м³ (эффективность 98,611 %).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №13-08-98092 р_сибирь_a и гранта Президента РФ № МК-957.2014.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ужов, В.Н. Очистка промышленных газов от пыли [Текст] / А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков, И.К. Решидов. – М.: Химия, 1981. – 392 с.
2. Кропп, Л.И. Золоуловители с трубами Вентури на тепловых электростанциях [Текст] / Л.И. Кропп, А.И. Акбрут. – М.: Энергия. – 1977. – 160 с.
3. Хмелев, В.Н. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей: монография [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков, А.Н. Сливин; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 241 с.
4. Хмелёв, В.Н. Акустическая коагуляция аэрозолей [Текст] / В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, Д.С. Абраменко // Ползуновский вестник. – 2008. – №1-2. – С.66-74.
5. Чернов, Н.Н. Акустические способы и средства осаждения взвешенных частиц промышленных дымов: дис. д-ра техн. наук: 01.04.06 / Чернов Николай Николаевич. – Таганрог, 2004. – 317 с.
6. Скрыбина, Л.Я. Промышленная и санитарная очистка газов. Атлас промышленных пылей. Ч. I. Летучая зола тепловых электростанций [Текст] / Центральный институт научно-технической информации и технико-экономических исследований по химическому и нефтяному машиностроению. – М., 1980. – 47 с.

Хмелёв В.Н. – д.т.н., профессор, Бийский технологический институт, (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru;

Шалунов А.В. – к.т.н., доцент, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: shalunov@bti.secna.ru;

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗОЛОУЛАВЛИВАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ С ПОМОЩЬЮ
ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Голых Р.Н. – аспирант, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ. тел. (3854) 432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.

Доровских Р.С. – аспирант, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ

ВПО АлтГТУ. тел. (3854) 432570, e-mail: dorovskih_roman@mail.ru;

Нестеров В.А. – инженер, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ. тел. (3854) 432570, e-mail: nva@bti.secna.ru.