

Охрана окружающей среды

УДК 66.074.2

Вольчин И.А., докт. техн. наук, **Ращепкин В.А.**, канд. техн. наук
Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев
ул. Андреевская, 19, 04070 Киев, Украина, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Оценка затухания акустических волн в газодисперсных потоках в котлах тепловых электростанций

Представлен анализ физических механизмов затухания акустических волн в потоке запыленного газа. Сделаны сравнительные оценки возможной степени влияния различных механизмов затухания акустических волн в запыленном газовом потоке на эффективность звуковой очистки запыленных поверхностей оборудования в газоходах тепловых электростанций. Рассчитаны коэффициенты затухания волн в потоке дымовых газов и у твердых поверхностей в широком диапазоне частот акустических волн. Затухание волн в запыленном газовом потоке при относительно низких частотах заметно превышает затухание акустических волн в чистом газе. Расчетами подтверждено наличие аномального затухания волн на частицах в диапазоне размеров PM_{10} (< 10 мкм). Проведены вычисления с целью учета полидисперсности пылевых частиц на основе реального распределения частиц летучей золы по размерам за топками угольных котлов тепловых электростанций. Выполнены численные оценки изменения звукового давления акустических волн в инфразвуковом диапазоне в запыленном газовом потоке. *Библ. 33, рис. 4.*

Ключевые слова: звуковая очистка, акустические волны, летучая зола.

Эффективность теплообменных процессов в оборудовании котлов тепловых электростанций (ТЭС) влияет на КПД энергоблоков. В процессе эксплуатации ТЭС теплообменные поверхности (ширмовые и конвективные пароперегреватели, пакеты труб в водяном экономайзере, воздухоподогреватель и т.д.) подвержены запылению частицами летучей золы, что снижает коэффициент теплоотдачи от горячего газового потока.

Очистка от отложений пыли в котлах осуществляется различными способами: паровым обдувом, вибрационным способом, механиче-

ской очисткой [1]. Перспективной представляется технология очистки запыленных поверхностей с использованием акустических излучателей (АИ). Известен положительный опыт звуковой очистки, например, компаний Kokum Sonics, Infrafone и ВНА [2–6]. В отличие от периодического обдува, механической очистки и других методов, требующих остановки оборудования, акустический метод является непрерывным и позволяет поддерживать теплообменные поверхности чистыми; при этом повышается эффективность теплообмена, снижаются тепловые потери, связанные с необходимостью

остановки работы энергоблока. Системы акустической очистки являются типом вспомогательного оборудования очистки, позволяющим поддерживать чистоту поверхностей нагрева и коронирующих электродов электростатических фильтров без заметного повышения механического напряжения на конструкционные поверхности. В настоящей статье изучаются условия более эффективной очистки запыленных поверхностей с помощью звуковых волн, с учетом их затухания в запыленном газовом потоке.

Для акустической очистки поверхностей от отложений летучей золы устанавливаются акустические излучатели (резуны, акустические рупоры) в трактах дымовых газов ТЭС. Накопившийся на запыленной поверхности слой пыли при облучении акустическими волнами (АВ), генерируемыми излучателем, подвергается вибрационному воздействию и при достаточной мощности акустических излучателей разрушается. Длина рупоров АИ может составлять от 430 мм до 3 м и более, а звуковое давление — до 200 дБ. Типичные диапазоны частот акустических излучателей в зависимости от применения, составляют [7]:

- 230 Гц. Эта частота может использоваться для очистки от отложений в вытяжных вентиляторах, фильтрах, циклонах, сушилках и теплообменниках;

- 75 Гц и 60 Гц. Это, как правило, самые мощные акустические излучатели, они часто используются в крупных сосудах и в бункерах;

- меньше 20 Гц. Инфразвуковые акустические излучатели, используются для очистки теплообменных поверхностей в экономайзерах.

Более высокочастотные акустические излучатели могут быть точно направлены на участки очищаемых поверхностей, а низкочастотные охватывают более обширные области. Акустические излучатели обычно работают в режиме запуска на 5–10 с и перезапускаются через интервал времени около 10 мин. Такой режим их использования связан с тем, что, как показывает опыт [8], в зависимости от конкретных физических условий, дисперсности и аутогезионных свойств пыли [8, 11, 12] через 15–30 мин после осаждения порошковые слои проявляют слеживаемость, уплотняются, в результате чего для их удаления требуются более значительные механические усилия, чем для слабо связанных дисперсных образований.

Большое значение имеет мощность акустических излучателей. Мощность акустических волн должна быть достаточной для разрушения аутогезионных связей между частицами или слоями частиц в порошковом слое с тем, чтобы оторвавшиеся от слоя частицы или пласты пы-

ли могли быть далее удалены под действием сил гравитации или потоком дымовых газов.

Важно оценить степень затухания акустических волн в запыленном потоке дымовых газов, прежде чем они достигнут очищаемой поверхности, и определить их интенсивность, достаточно ли будет энергии акустических волн для разрушения отложений пыли на теплообменных поверхностях за топкой котлов тепловых станций в газоходах ТЭС.

В акустике уровень интенсивности (мощности) звука в газовой фазе (дБ) определяется по формуле [9]:

$$I_s = 10 \lg (I/I_r),$$

где I — интенсивность звука в данной точке, Вт/м²; I_r — номинальная интенсивность звука (порог слышимости), $I_r = 10^{-12}$ Вт/м².

Звуковое давление в акустической волне связано с интенсивностью звука соотношением

$$p_a = (2 I \rho_1 c_s)^{1/2} = (2 I_r \rho_1 c_s)^{1/2} \cdot 10^{I_s/20}, \quad (1)$$

где ρ_1 — плотность газовой фазы, кг/м³; c_s — скорость звука в газовой фазе, м/с.

Известно, что давление сил аутогезии в находящемся на твердой поверхности слое отложений летучей золы в зависимости от степени недожога и типа сжигаемого угля составляет от 300 до 600 Па [10]. Давление p_a акустической волны, пришедшей к порошковому слою из газовой фазы, для разрушения и последующего удаления слоя пыли должно превосходить давление сил аутогезии между частицами внутри слоя. В связи с этим большую актуальность имеет определение степени затухания акустической волны в потоке запыленных дымовых газов ТЭС. Очевидно, что с учетом затухания акустических волн формула (1) должна быть переписана в следующем виде:

$$p_a = (2 I_r \rho_1 c_s)^{1/2} \cdot 10^{I_s/20} e^{-\gamma x}, \quad (2)$$

где γ — коэффициент затухания, м⁻¹; x — путь акустической волны, м.

Далее в этой статье рассмотрены процессы и механизмы затухания акустических волн в потоке дымовых газов и даны оценки убыли звукового давления в зависимости от частоты и пути, пройденного акустической волной.

До середины XX века в основном рассматривалось три механизма затухания акустических волн в газовой среде. Стоксом была разработана первая удачная теория поглощения звука в жидкой среде по механизму вязкого трения [13], Кирхгоф исследовал теоретически совместное действие механизмов вязкого трения

и теплопроводности и их влияние на затухание звука в жидких средах, Кнесер [14] предложил учет еще одного механизма затухания звука в газах, связанный с возбуждением колебательных уровней молекул газа. Эти три механизма составляют сумму так называемого классического поглощения звука в газе. Релей оценил эффект рассеяния звука на малых сферических объектах в газе, Тиндал провел аналогичные оценки для аэрозолей, близких по характеристикам к свойствам туманов [13]. Кнудсен [15] в первой половине 1930-х гг. впервые провел измерения степени затухания звуковых волн в атмосферных условиях, экспериментально исследовав поглощение звуковых волн в холодном, слабо запыленном воздухе Арктики, и над горячими песками пустыни.

Бурный рост индустрии реактивного самолетостроения и ракетостроения после Второй мировой войны дал импульс исследованиям иных механизмов поглощения энергии звуковых волн в атмосферном воздухе, поэтому значительная часть публикаций по данной проблеме относится к периоду 1950–1970-х гг. Большой объем экспериментальных исследований был накоплен компанией Rolls Royce [16], крупного производителя реактивных авиационных двигателей; эти исследования в основном были направлены на изучение поглощения шума в атмосферных условиях. Теоретические и экспериментальные исследования 1950–1970-х гг. позволили определить дополнительные механизмы поглощения энергии акустических волн в газовых средах. В своей Технической записке [14] NASA констатирует, что в ряде исследований [17–20] отмечалось поглощение звука в атмосферном воздухе сверх классического механизма. Среди дополнительных механизмов поглощения звука перечисляются такие: преломление и рассеяние звука, взаимодействие с взвешенными частицами, туманом и грунтом Земли, влияние градиентов поля скоростей и температуры в слоях атмосферного воздуха, рассеяние на турбулентных пульсациях и в процессе аномальной колебательной релаксации газового потока [19].

Основным выводом, следующим из оценки [14] приведенных выше механизмов затухания акустических волн в неоднородных многофазных потоках, является то, что значение коэффициента избыточного поглощения звука соизмеримо (на 20–80 % [18]) с величиной затухания АВ, измеренного в лабораторных условиях в покоящемся незапыленном газе (классическое поглощение звука). Что касается влияния частиц пыли на затухание волн, то в большей час-

ти диапазона частот поглощение звука на частицах пыли маскируется одним или несколькими другими механизмами, но на более низких частотах поглощение звука на частицах пыли становится значительным. Величина коэффициента поглощения звука взвешенными в газовом потоке частицами пыли прямо пропорциональна концентрации частиц, а его зависимость от частоты изменяется в зависимости от распределения частиц по размерам [17].

Ниже показано, что в потоках дымовых газов ТЭС в условиях сильной запыленности газового потока частицами летучей золы классическое и дополнительное поглощение энергии акустических волн оказывается значительно меньшим коэффициента затухания при отражении АВ от стенок камер и газоходов. Вероятно, дополнительного внимания заслуживает изучение влияния градиентов скоростей дымовых газов (ДГ) и температуры в трактах ТЭС, а также турбулентных пульсаций потока. Однако эти вопросы выходят за рамки данной статьи.

В газоходах ДГ за котлами ТЭС проявляется действие всех выше перечисленных механизмов затухания акустических волн, однако ввиду высокой (на много порядков выше, чем в атмосферном воздухе) запыленности дымовых газов ТЭС следует предположить, что в их газоходах основным фактором избыточного поглощения АВ является взаимодействие звука с частицами летучей золы. Поэтому мы выделяем три, на наш взгляд, основных, механизма поглощения звука в газоходах ТЭС:

$$\gamma = \gamma_{ka} + \gamma_{ks} + \gamma_{kf},$$

где γ_{ka} — коэффициент затухания АВ при рассеянии на дисперсных частицах в газовом потоке, m^{-1} ; γ_{ks} — коэффициент поглощения звука у твердой поверхности, связанный с наличием вязкого и теплового пограничных слоев вблизи стенок, m^{-1} ; γ_{kf} — классическое поглощение звука, m^{-1} .

В свободном объеме классическое поглощение акустических волн вычисляется по формуле [9, 23]:

$$\gamma_{kf} = k^2 / (2 c_s) [4 \nu / 3 + (\gamma - 1) \chi], \quad (3)$$

где k — волновой вектор, m^{-1} ; ν — кинематическая вязкость, m^2/c , $\nu = \eta / \rho_1$ (здесь η — динамическая вязкость воздуха, $kg/(m \cdot s)$); χ — температуропроводность газа, m^2/c , $\chi = \lambda / (\rho_1 c_p)$ (здесь λ — теплопроводность воздуха, $Dж/(c \cdot K)$; c_p — теплоемкость газа при постоянном давлении, $Dж/(кг \cdot K)$); γ — показатель адиабаты, $\gamma = c_p / c_v$

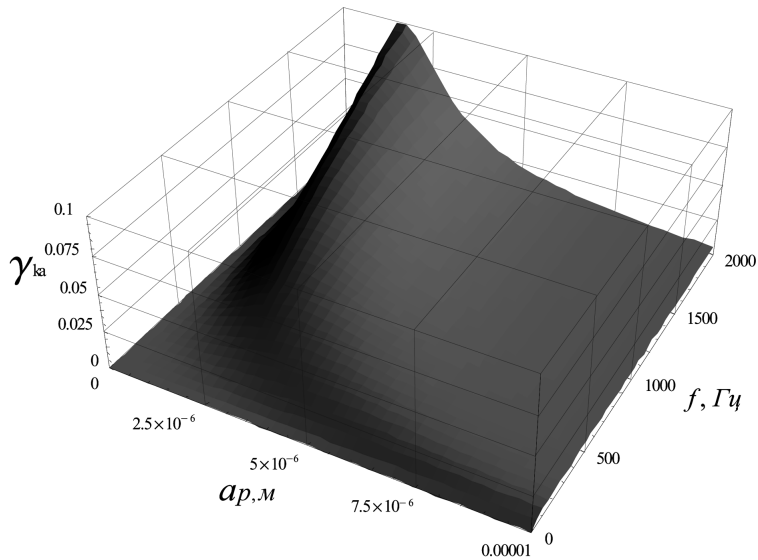


Рис.1. Аномальное затухание акустических волн в запыленном газовом потоке.

(здесь c_v — теплоемкость газа при постоянном объеме, Дж/(кг·К)).

Коэффициент поглощения акустических волн у твердой границы пропорционален квадратным корням динамической вязкости и температуропроводности [21, 22]:

$$\gamma_{ks} = 2^{-0,5} [k_r^2 d_v + (\gamma - 1) k^2 d_t], \quad (4)$$

где k_r — проекция волнового вектора на ось распространения акустической волны, d_v , d_t — ширина вязкого и теплового пограничных слоев соответственно, $d_v = (\eta / (\rho_1 \omega))^{1/2}$; $d_t = [\lambda / (\rho_1 c_p \omega)]^{1/2}$.

Коэффициент затухания акустических волн в аэрозолях с твердой фазой зависит от частоты звука и относительного массового содержания твердой фазы в газе \tilde{p}_2 , равно отношению приведенных плотностей (масса в единице объема смеси) твердых частиц ρ_2 и газа ρ_1 , и определяется временем скоростной $t^{(v)}$ и температурной $t^{(\tau)}$ релаксации между фазами [13, 24]:

$$\gamma_{ka} = k \tilde{p}_2 \left[\frac{\omega t^{(v)}}{1 + (\omega t^{(v)})^2} + (\gamma - 1) \frac{c_1}{c_2} \frac{\omega t^{(\tau)}}{1 + (\omega t^{(\tau)})^2} \right], \quad (5)$$

где k — проекция волнового вектора на ось распространения АВ, $k = \omega / c_s$ (здесь ω — циклическая частота звука, рад/с); $t^{(v)} = (2 \rho_2 a^2) / (9 \rho_1 v)$; $t^{(\tau)} = (2 a^2 c_2) / (3 \rho_1 c_1 \chi)$; a — радиус твердых частиц, м; c_1 , c_2 — теплоемкости газовой и твердой фазы, Дж/(кг·К).

Проведенные по формуле (5) расчеты при температуре дымовых газов 500 °С (характерной температуре за топкой угольного котла ТЭС) и при запыленности газового потока 25 г/нм³, результаты которых приведены на рис.1, подтверждают наличие аномального поглощения АВ частицами малого размера. Видно, что в диапазоне размеров частиц пыли РМ₁₀ (частиц диаметром менее 10 мкм) присутствует ярко выраженный максимум поглощения акустических волн. В остальном диапазоне поглощение звука слабо зависит от размеров частиц и частоты звука.

Наличие пика в спектре поглощения акустических волн в запыленном газовом потоке объясняется следующим [13]. При $\omega t^{(v)} < 1$ частицы очень быстро адаптируются к изменениям колебаний в газовой фазе в поле акустической волны, почти полностью повторяя движение газа.

Поскольку $t^{(v)} \sim a^2$, то ввиду малости a , согласно (5), в этом случае также $\gamma_{ka} \sim a^2$ и возрастает с размером частиц. В ином, крайнем случае $\omega t^{(v)} > 1$ линейный закон сопротивления Стокса, как отмечается в [25], не является строго применимым, и движение частиц едва нарушается колебаниями газа. При таких обстоятельствах частицы остаются практически фиксированными в пространстве, а газ совершает колебания вокруг частиц. В этом случае, согласно (5), коэффициент поглощения $\gamma_{ka} \sim a^{-2}$ и резко уменьшается с ростом размера частиц. Для конечного значения $\omega t^{(v)}$ при заданных свойствах газа и материала частиц существует максимум поглощения звука.

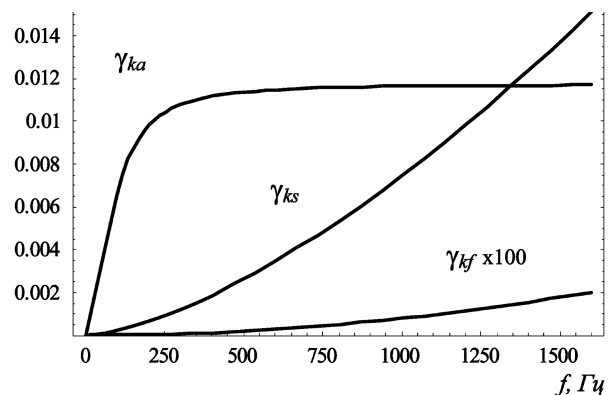


Рис.2. Зависимость от частоты затухания акустических волн в свободном объеме (классическое затухание), у твердой поверхности, в запыленном потоке.

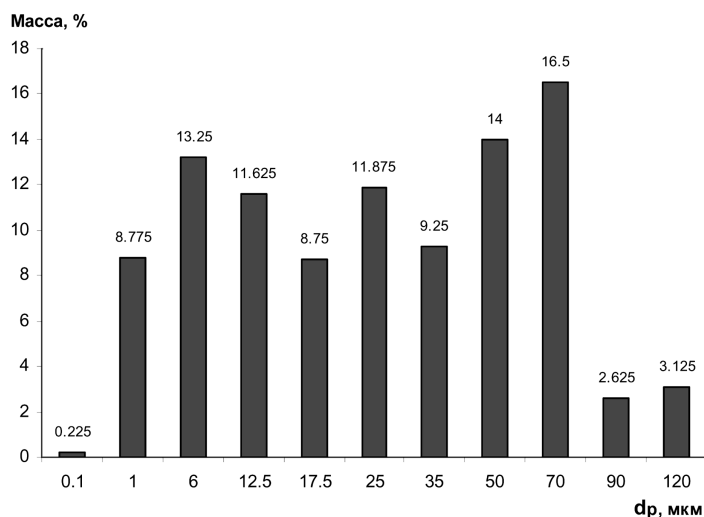


Рис.3. Распределение частиц летучей золы по диаметрам d_p при сжигании антрацитов и тощих углей украинскими ТЭС. Типичное распределение [29].

Аналогичные рассуждения верны и для второго слагаемого в равенстве (5) относительно времени тепловой релаксации $t(\tau)$ между фазами. Причем максимумы кривых поглощения, связанные с вязкой и тепловой релаксацией для соответствующего размера частиц, близки друг другу и практически совпадают с максимумом γ_{ka} [13]. Наличие пика поглощения акустических волн в аэрозоле было экспериментально подтверждено в работе [26]. Вопросы дисперсии акустических волн рассмотрены в [27].

Результаты расчетов по формулам (3)–(5) при температуре дымовых газов 500 °С и запыленности 25 г/м³ приведены на рис.2, где показана зависимость коэффициентов затухания акустических волн γ_{ka} , γ_{ks} , γ_{kf} от частоты для частиц летучей с радиусом $a = 25$ мкм. Видно, что коэффициент затухания АВ на частицах пыли γ_{ka} при низких частотах намного превышает коэффициент классического затухания звука γ_{kf} , а также значительно больше коэффициента поглощения звука у твердой поверхности γ_{ks} . Поэтому в сильно запыленных газовых потоках классическое и избыточное (равное по порядку величины классическому) затухание можно не учитывать.

Ход кривой γ_{ka} на рис.2 поясняет, почему при акустической очистке поверхностей стараются приблизить частоту акустических излучателей к инфразвуковому диапазону: чтобы минимизировать потери энергии АВ в запыленном потоке до их прихода к очищаемой поверхности из объема запыленного газового потока. К тому же длинные волны имеют более широкую направленность, большую площадь охвата очищаемых поверхностей и меньшую кратность отражения от стенок газоходов ТЭС.

При проведении расчетов коэффициента затухания γ_{ka} было принято, что вся масса пыли сосредоточена в единой монофракции пылевых частиц. В действительности распределение частиц пыли по размерам за котлоагрегатами ТЭС является полидисперсным, поэтому величина γ_{ka} , очевидно, будет меньшей.

Обычно для проведения математических расчетов полидисперсность пыли представляется логарифмически нормальным распределением частиц по размерам [28], суперпозицией логнормальных распределений [31], распределением Розена-Рамлера [30] и прочими распределениями. В данной статье для определения влияния полидисперсности твердых частиц на величину коэффициента затухания

акустических волн в запыленном потоке дымовых газов было принято типичное распределение частиц летучей золы за топками котлов угольных ТЭС, сжигающими антрацит [29], приведенное на рис.3.

Расчеты величины коэффициента затухания γ_{ka} проводились для трех вариантов:

- 1) гипотетический случай: относительное массовое содержание твердой фазы в газе полностью сосредоточено в монофракции частиц пыли размером $a_p = 8$ мкм (аномальное поглощение, см. рис.1);
- 2) относительное массовое содержание твердой фазы в газе полностью сосредоточено в монофракции частиц пыли размером $a_p = 35$ мкм (радиус Саутера (см. ниже));
- 3) массовое распределение частиц летучей золы (по данным рис.3).

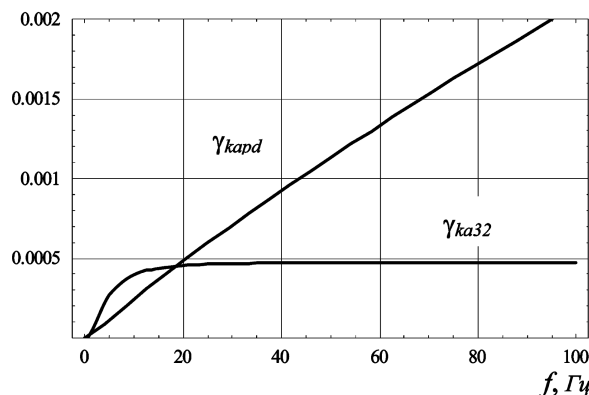


Рис.4. Коэффициенты затухания акустических волн: γ_{kapd} — коэффициент затухания при учете распределения частиц по размерам (см. рис.3); γ_{ka32} — коэффициент затухания при замене истинного распределения частиц по размерам на частицы с радиусом Саутера.

Первый вариант практически маловероятен, а результаты расчетов для второго и третьего представлены на рис.4.

В инженерных расчетах часто реальное распределение частиц по размерам заменяется определенным средним размером частиц. Однако при таком подходе не может быть учтено аномальное поглощение энергии акустических волн (см. рис.1) частицами малого размера, которые в массовом содержании летучей золы могут составлять заметную долю (см. рис.3). Такой подход может привести к неточным результатам степени затухания акустических волн в запыленном потоке.

Из рис.4 видно, что замена истинного распределения частиц по размерам на так называемый средний объемно-поверхностный радиус:

$$a_{32} = \langle a^3 \rangle / \langle a^2 \rangle,$$

или на радиус Саутера, который с учетом распределения частиц по размерам $f(a)$ определяется формулой [31]:

$$a_{pq} = \left[\int_0^{\infty} a^p f(a) da / \int_0^{\infty} a^q f(a) da \right]^{1/(p-q)} \quad (p=3, q=2),$$

дает завышенное значение γ_{ka} в области инфразвуковых частот и существенно заниженное значение коэффициента затухания звука с ростом частоты. Поэтому в инфразвуковом диапазоне $f < 20$ Гц и для частот $f > 20$ Гц замена в расчетах истинного распределения частиц по размерам средним радиусом не является корректной.

Как отмечено в [24], одной из наиболее актуальных работ, где имеются необходимые данные для сравнения с теорией, является статья Темкина и Доббинса по дисперсии и затуханию звука в газовых средах в полидисперсном потоке газа с каплями [25]. В статье [13] сделаны уточнения к теории поглощения звука в двухфазной полидисперсной среде в нелинейном приближении, подтверждаемые данными [26]. Полученные в этой статье результаты расчетов удовлетворительно согласуются с результатами [13, 24, 25].

В данной статье выполнены расчеты по изменению звукового давления акустических волн в инфразвуковом диапазоне при их затухании в запыленном потоке (2). Согласно результатам расчетов, при частоте $f = 20$ Гц длина акустической волны для характерных в водяном экономайзере температур около 500 °С составляет $\lambda_a = 28$ м. При распространении на расстояние $x = 120$ м в результате затухания акустических волн γ_{ka} при поглощении дисперсными частицами звуковое давление в волне p_a снижается от

578 Па ($Is_0 = 145$ дБ) до 511 Па ($Is = 144$ дБ). Выше указывалось, что давление сил аутогезии в находящемся на твердой поверхности порошковым слое летучей золы в зависимости от степени недожога и типа сжигаемого угля составляет от 300 до 600 Па [10]. Результаты расчетов коэффициента затухания акустических волн γ_{ka} в запыленной газовой фазе подтверждают, что акустические волны после как минимум четырехкратного прохождения водяного экономайзера теряют чуть более 10 % своей мощности, практически сохраняя возможность многократного воздействия на слой пыли для разрушения аутогезионных связей.

Выводы

Целесообразность использования акустического способа очистки запыленных поверхностей нагрева доказана практическим применением на котлах разной паропроизводительности.

Выбор мощности и частоты акустического излучателя определяется степенью поглощения акустических волн в газовой фазе потока дымовых газов. Результаты расчетов и анализ опубликованных данных показали, что из всех механизмов затухания АВ в потоке сильно запыленного газа наибольший вклад в коэффициент затухания звука вносит затухание при рассеянии акустических волн на частицах твердой фазы.

В низкочастотном (< 75 Гц) и в инфразвуковом диапазоне волн затухание АВ значительно ниже, чем в высокочастотном диапазоне. Поэтому использование длинных волн (включая инфразвуковые волны) позволяет при многократном отражении охватывать большие площади очищаемых поверхностей, включая труднодоступные места оборудования в газоходах.

Результаты расчетов коэффициента затухания АВ показывают, что не учет полидисперсности пыли при замене реального распределения частиц пыли по размерам частицами среднего радиуса дает неточное значение для коэффициента затухания акустических волн в запыленных потоках дымовых газов ТЭС.

Список литературы

1. Clyde Bergemann GmbH. Wesel (Germany). — [Electron resource]. — Access mode: <http://www.cbpg.com>
2. Wikipedia, the free encyclopedia. — [Electron resource]. — Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic_cleaning.
3. Клессмаа Ю. Об использовании акустической системы очистки поверхностей нагрева котлов тепловых электростанций // Энергетика и электрификация. — 2000. — № 9. — С. 40–43.

4. Тийкма Т. Акустическая очистка котлов // Эко-технологии и ресурсосбережение. — 2002. — № 1. — С. 71–74.
5. Kokum Sonics Intl. — [Electron resource]. — Access mode: <http://www.kokumsonics.com>.
6. Infracone. — [Electron resource]. — Access mode: <http://www.infracone.se>.
7. ВНА. Sonic Horn Monitoring // ORBIT. — 2005. — Vol. 25. — No.3. — pp. 44–40.
8. Зимон А.Д. Адгезия пыли. — М.: Химия, 1967. — 372 с.
9. Kinsler L.E., Frey A.P., Coppens A., Sanders J.V. Fundamentals of Acoustics. — N.Y.: John Willey & Sons, 1982. — 480 p.
10. Зимон А.Д., Андрианов Е.И. Аутогезия сыпучих материалов. — М.: Металлургия, 1978. — 288 с.
11. Schulze D. Measuring Powder Flowability: A Comparison of Test Methods. Part I // Powder Bulk Engineering. — 1996. — Vol. 10, № 4. — P. 45–61.
12. Lumay G., Boschini F., Traina K. et al. Measuring the flowing properties of powders and grains // Powder Technology. — 2012. — Vol. 224. — P. 19–27.
13. Kandula M., Lonergan M. Spectral Attenuation of Sound in Dilute Suspensions with Nonlinear Particle Relaxation // Conference paper. NASA Center for Aerospace Information (CASI). — Acoustics '08: 06/29. — 07/04/2008. — 7 p.
14. DeLoach R. On the excess attenuation of sound in the atmosphere // NASA Technical Note (NASA-TN-D-7823). Langley Research Center, NASA Administration, Washington D.C. — 1975. — 74 p.
15. Knudsen V.O. The absorption of sound in air, in oxygen, and in nitrogen. Effects of humidity and temperature // J. Acoust. Soc. Amer. — 1933. — Vol. 5, № 2. — P. 112–121.
16. Coles G.M. Atmospheric Absorption of Noise. Aerodynamic Noise // Univ. of Toronto Press. — 1989. — P. 209–227.
17. D.C., G.B. Attenuations and dispersion of acoustic energy by atmospheric dust // J. Acoust. Soc. Amer. — 1973. — № 54. — P. 437–445.
18. Delsasso L.P., Leonard R.W. The attenuation of sound in the atmosphere // Summary Report U.S. Air Force Contract W-28-099-AC-228. Univ. of California. — Feb. 25, 1953.
19. Burkhard M.D., Karplus H.B., Sabine H.J. Sound Propagation Near the Earth's Surface as Influenced by Weather Conditions // WADC Tech. Rep. 57-353, Part II, U.S. Air Force. — Dec. 1960.
20. Zink W., Delsasso L.P., Cox C.J. Attenuation and dispersion of sound by solid particles suspended in gas // Contract 51-0796, Dept. Phys., Univ. of California. — 1957.
21. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. — М.: Наука, 1986. — Т. 6. — 736 с.
22. Корчевой Ю.П., Ращепкин В.А. Усиление акустических волн при отражении от электродов в газовом разряде атмосферного давления // Технічна електродинаміка. — 2001. — № 2. — С. 6–10.
23. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. — М.: Наука, 1984. — 400 с.
24. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987. — Ч. I. — 464 с.
25. Temkin S., Dobbins R.A. Measurement of attenuation and dispersion of sound by aerosol // J. Acoust. Soc. Amer. — 1966. — Vol. 40, № 5. — P. 1016–1024.
26. Norum T.D. Reductions in multi-component jet noise by water injection // AIAA-2004-2976, 101/I AIAA/CEASAeroacoustics Conference, Manchester, Great Britain. — May 2004.
27. Langlois V., Xiaoping Jia. Sound Pulse Broadening In Stressed Granular Media // Physical Review. — 2015. — E 91. — P. 022205-1–022205-8.
28. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки. — М.: Металлургия, 1988. — 256 с.
29. Кропп А.И., Акбрут Л.И. Золоуловители с трубами Вентури на тепловых электростанциях. — М.: Энергия, 1977. — 460 с.
30. Perry R.H., Green D.W. Perry's Chemical Engineers' Handbook. — The Mac-Grow Hill Companies, Inc., 1999. — 2582 p.
31. Babinsky E., Sojka P.E. Modelling drop size distributions // Progress in Energy and Combustion Science. — Pergamon Press. — 2002. — Vol. 28. — P. 303–329.
32. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. — М.: Изд-во АН СССР, 1957. — 502 с.
33. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. — М.: Наука, 1987. — Том 7. — 246 с.

Поступила в редакцию 26.07.16

Вольчин І.А., докт. техн. наук, **Ращепкін В.А.,** канд. техн. наук
Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Київ
вул. Андріївська, 19, 04070 Київ, Україна, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Оцінка згасання акустичних хвиль у газодисперсних потоках у котлах теплових електростанцій

Наведено аналіз фізичних механізмів згасання акустичних хвиль у потоці запиленого газу. Зроблено порівняльні оцінки можливого ступеня впливу різних механізмів згасання акустичних хвиль у потоці запиленого газу на ефективність звукового очищення запиленних поверхонь обладнання в газоходах теплових електростанцій. Розраховано коефіцієнти згасання хвиль у потоці димових газів та у близькості до твердих поверхонь у широкому діапазоні частот акустичних хвиль. Згасання хвиль в запиленому газовому потоці при відносно низьких частотах помітно перевищує згасання акустичних хвиль у чистому газі. Розрахунками підтверджено наявність аномального загасання хвиль на частинках у діапазоні розмірів PM_{10} (< 10 мкм). Проведено обчислення ступеня згасання акустичних хвиль для полідисперсних пилових частинок на основі їх розподілу за розмірами за топками вугільних котлів теплових електростанцій. Проведено чисельні оцінки зміни звукового тиску акустичних хвиль в інфразвуковому діапазоні у запиленому газовому потоці. *Бібл. 33, рис. 4.*

Ключові слова: звукове очищення, акустичні хвилі, летка зола.

Volchyn I.A., Doctor of Technical Sciences,
Raschepkin V.A., Candidate of Technical Sciences

Coal Energy Technology Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
19, Andriivska Str., 04070 Kiev, Ukraine, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Assessment of Acoustic Waves Attenuation in the Dusted Flows in the Boilers of Thermal Power Plants

The analysis of the physical mechanisms of attenuation of acoustic waves in the dusted gas stream is presented. The comparative assessment of the impact of various possible mechanisms of attenuation of acoustic waves on the effectiveness of sound cleaning of dusted surfaces of equipment placed in the ducts of thermal power plants was made. Wave attenuation coefficients were calculated, in the flow of flue gases, and at vicinity of solid surfaces in the wide frequency band of acoustic waves. Attenuation of waves in a dusted gas flow at relatively low frequencies is significantly higher than attenuation of acoustic waves in the clean gas. Calculations confirmed presence of anomalous attenuation of acoustic waves by the dust particles suspended in a gas flow in a range of sizes PM_{10} (< 10 mm). Calculations were performed to account polydispersity of dust particles, based on of the actual distribution of fly ash particle size distribution downstream the boiler of coal-fired thermal power plants. Numerical evaluation was performed, on the changes of the sound pressure of acoustic waves in the infrasonic range in a dusted gas stream. *Bibl. 33, Fig. 4.*

Key words: sound cleaning, acoustic waves, fly ash.

References

1. Clyde Bergemann GmbH. Wesel, Germany. — Rezhim dostupa: [https:// www.cbpg.com](https://www.cbpg.com)
2. Wikipedia, the free encyclopedia. — Rezhim dostupa: https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic_cleaning.
3. Klessmaa Yu. [On the use of acoustic surface cleaning systems of heat boilers for thermal power], *Energetika i Elektrificaciya [Journal of Energy and Electrification]*, 2000, № 9, pp. 40–43. (Rus.)
4. Tikma T. Acoustic cleaning of boilers]. *Ecotechnologii i Resursosberezhenie [Ecotechnologies and Resource Saving]*, 2002, (1), pp. 71–74. (Rus.)
5. Kokum Sonics Intl. — Access mode: [http:// www.kockumsonics.com](http://www.kockumsonics.com).
6. Infracone. — Access mode: <http://www.infracone.se>.
7. BHA. Sonic Horn Monitoring. *ORBIT*, 2005, 25, (3), pp. 44–40.
8. Zimon A.D. [Adhesion of dust], Moscow : Chemistry, 1967, 372 p. (Rus.)
9. Kinsler L.E., Frey A.P., Coppens A., Sanders J.V. *Fundamentals of Acoustics*, N.Y. : John Willey & Sons, 1982, 480 p.
10. Zimon A.D., Andrianov E.I. [Autohesion of bulk materials], Moscow : Metallurgy, 1978m, 288 p. (Rus.)
11. Schulze D. Measuring Powder Flowability: A Comparison of Test Methods. Part I, *Powder Bulk Engineering*, 1996, 10 (4), pp. 45.
12. Lumay G., Boschini F., Traina K., Bontempi S., Remy J.-C., Cloots R., Vandewalle N. Measuring the flowing properties of powders and grains, *Powder Technology*, 2012, 224, pp. 19–27.
13. Kandula M., Lonergan M. Spectral Attenuation of Sound in Dilute Suspensions with Nonlinear Particle Relaxation, *Conference paper. NASA Center for Aerospace Information (CASI)*. — Acoustics '08: 06/29 - 07/04/2008, 7 p.
14. DeLoach R. On the excess attenuation of sound in the atmosphere, *NASA Technical Note (NASA-TN-D-7823)*. Langley Research Center, NASA Administration, Washington D.C., 1975, 74 p.
15. Knudsen V.O. The absorption of sound in air, in oxygen, and in nitrogen. — Effects of humidity and temperature, *J. Acoust. Soc. Amer*, Oct. 1933, V, (2), pp. 112–121.
16. Coles G.M. Atmospheric Absorption of Noise. Aerodynamic Noise, Univ. of Toronto Press, 1989, pp. 209–227.
17. Henley D.C., Hoidale G.B. Attenuations and dispersion of acoustic energy by atmospheric dust, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1973, (54), pp. 437–445.
18. Delsasso L.P., Leonard R.W. The attenuation of sound in the atmosphere, *Summary Report U.S. Air Force Contract W-28-099-AC-228*. Univ. of California, Feb. 25, 1953.
19. Burkhard M.D., Karplus H.B., Sabine H.J. Sound Propagation Near The Earth's Surface As Influenced By Weather Conditions, *WADC Tech. Rep. 57-353, Part II*, U.S. Air Force. — Dec. 1960.
20. Zink W., Delsasso L.P., Cox C.J. Attenuation and dispersion of sound by solid particles suspended in gas, *Contract 51-0796*, Dept. Phys., Univ. of California, 1957.
21. Landau L.D., Lifshitz E.M. [Hydrodynamics]. Vol. VI, Moscow : Nauka, 1986, 736 p. (Rus.)
22. Korchevoi Yu.P., Raschepkin V.A. [Amplification of the acoustic waves at reflection from the electrodes in the gas discharge in the atmospheric pressure], *Tekhnichna elektrodinamika [Technical Electrodynamics]*, 2001, (2), pp. 6–10. (Rus.)
23. Krasilnikov VA, Krylov V.V. [An introduction to physical acoustics], Moscow : Nauka, 1984, 400 p. (Rus.)
24. Nigmatulin R.I. [The dynamics of multiphase media]. Vol. 1, Moscow : Nauka, 1987, 464 p. (Rus.)
25. Temkin S., Dobbins R.A. Measurement of attenuation and dispersion of sound by aerosol, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1966, 40, (5), pp. 1016–1024.
26. Norum T.D. Reductions in multi-component jet noise by water injection, *AIAA-2004-2976, 101 / I AIAA / CEAS Aeroacoustics Conference*, Manchester, Great Britain, May 2004.
27. Langlois V., Xiaoping Jia. Sound Pulse Broadening In Stressed Granular Media, *Physical Review*, 2015, E 91, pp. 022205-1-022205-8.
28. Belousov V.V. [Theoretical basis of processes of gas purification], Moscow : Metallurgy, 1988, 256 p. (Rus.)
29. Kropp A.I., Akbrut L.I. [Ash collectors with Venturi tubes in thermal power plants], Moscow : Energia, 1977, 460 p. (Rus.)
30. Perry R.H., Green D.W. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, The Mac-Grow Hill Companies, Inc, 1999, 2582 p.
31. Babinsky E., Sojka P.E. Modelling drop size distributions, *Progress in Energy and Combustion Science*, Pergamon Press, 2002, 28, pp. 303–329.
32. Brekhovskikh L.M. [Waves in The Layered Media], Moscow : Publishing USSR Academy of Sciences, 1957, 502 p. (Rus.)
33. Landau L.D., Lifshitz E.M. [The theory of elasticity]. Vol. VII, Moscow : Nauka, 1987, 246 p. (Rus.)

Received July 26, 2016