

УДК 621.928.93

DOI: 10.15587/2706-5448.2021.225328

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ В АППАРАТЕ ЦИКЛОННО-ВИХРЕВОГО ДЕЙСТВИЯ

Торский А. О., Волненко А. А., Пляцук Л. Д., Гурец Л. Л., Жумадуллаев Д. К., Абжапбаров А. А.

Объектом исследования является эффективность пылеулавливания мелкодисперсной пыли в аппарате с интенсивным турбулентным режимом взаимодействия фаз. Одним из самых проблемных мест существующего пылегазоочистного оборудования является низкая эффективность улавливания мелкодисперсной пыли. Эффективная очистка отходящих газов от пыли предусматривает использование многоступенчатых систем очистки, включающих мокрые и сухие пылеочистные аппараты, что влечет большие капитальные и эксплуатационные затраты. Эти недостатки устранены в разработанной конструкции пылеуловителя циклонно-вихревого действия с двумя зонами контакта. В аппарате реализуются одновременно сухой и мокрый механизмы пылеулавливания, что позволяет обеспечить высокую эффективность очистки от пыли при большой производительности.

Проведенные исследования общей и фракционной эффективности пылеулавливания при изменении режимных параметров работы разработанного аппарата показали, что эффективность улавливания мелкодисперсной пыли составляет 98–99 %. Рост эффективности пылеулавливания в сухой ступени аппарата обусловлен увеличением центробежной силы. В мокрой ступени контакта эффективность достигает максимальных значений за счет вихревого дробления жидкости в насадочной зоне аппарата. Исследования фракционной эффективности аппарата показывают, что с увеличением диаметра улавливаемых частиц эффективность процесса пылеулавливания сухой и мокрой ступеней, а также общей эффективности, возрастает. С увеличением плотности орошения происходит рост общей эффективности пылеулавливания в аппарате. Установлено, что повышение эффективности улавливания высокодисперсных частиц происходит за счет турбулентной диффузии, величина которой определяется частотой турбулентных пульсаций и степенью увлечения частиц при пульсационном движении насадочных тел. Для описания полученных результатов предложена центробежно-инерционная модель для сухой ступени контакта и турбулентно-диффузионная модель осаждения твердых частиц для мокрой ступени контакта, позволяющие рассчитать эффективность пылеулавливания ступеней контакта, а также общую эффективность циклонно-вихревого аппарата.

Полученные результаты показывают перспективность использования аппаратов данной конструкции на предприятиях теплоэнергетики и других отраслей промышленности.

Ключевые слова: пылегазовые выбросы, комплексная очистка, центробежная сила, регулярная насадка, вихревое взаимодействие, эффективность пылеулавливания.

1. Введение

Рост масштабов хозяйственной деятельности приводит к усилению антропогенного воздействия и нарушению равновесия в окружающей среде. Наряду с исчерпанием запасов природных ресурсов возрастает загрязнение окружающей среды, особенно водных ресурсов и атмосферного воздуха. Это существенно подрывает природно-ресурсный потенциал развития государства, негативно влияет на благосостояние и здоровье населения, а также создает угрозу экологической безопасности [1, 2].

Растущий спрос на электроэнергию и тепло приводит к повышению объемов их производства, что негативно воздействует на окружающую среду и способствует повышению риска заболевания для населения, проживающего в зоне влияния теплоэлектростанций (ТЭС) [3–5]. Потребляя природные ресурсы предприятия теплоэнергетики являются источниками комплексного загрязнения окружающей среды. Деятельность ТЭС негативно отражается на состоянии экосистем прилегающих к ним территорий [6–8]. Осаждение загрязняющих веществ из газовых выбросов приводит к загрязнению почвы и миграции тяжелых металлов в подземные и поверхностные воды [9–11]. Это ставит задачу разработки природоохранных мероприятий по охране атмосферного воздуха от выбросов теплогенерирующих предприятий [12, 13]. Одним из путей снижения количества пылегазовых выбросов ТЭС является повышение эффективности газоочистного оборудования.

Выбор газоочистного оборудования должен учитывать целый ряд факторов: физико-химические характеристики газа-носителя, характеристики химических и твердых загрязняющих веществ [14–16]. Комплексное загрязнение отходящих газов ТЭС от газообразных веществ и твердых частиц требует применения многоступенчатых систем очистки, включающих аппараты сухой и мокрой очистки, что увеличивает капитальные и эксплуатационные затраты [17, 18]. Перспективным для решения этого вопроса являются аппараты для комплексной очистки отходящих газов, работающие в режиме развитой турбулентности.

Анализ механизмов осаждения пыли показывает, что в тех случаях, когда используется энергия сплошного (газового) потока для интенсификации процесса пылеулавливания в системах газ-жидкость, наиболее эффективными являются центробежное и вихревое взаимодействие потоков [19]. В этом случае создается высокоразвитая межфазная поверхность, а на частицы пыли воздействуют сила инерции и центробежная сила, значительно превосходящие силу тяжести. Для реализации указанных механизмов осаждения разработано большое количество аппаратов. Так, для проведения процесса пылеулавливания, основанного на центробежном взаимодействии потоков, основана работа различного типа циклонов, позволяющих улавливать пыль в

сухом виде, а при наличии орошения – центробежных пылеуловителей с центральным и периферийным орошением [20, 21].

Аппараты с регулярной подвижной насадкой являются примером вихревого взаимодействия потоков. В них насадочные тела насажены на гибкие струны с фиксированными шагами в вертикальном и радиальном направлениях в объеме контактной зоны. В аппаратах с регулярной подвижной насадкой заложен принцип создания синфазного режима взаимодействующих фаз. Такое конструктивно-режимное решение, как показали предварительные исследования, приводит к существенной интенсификации проводимых процессов [21]. Применительно к пылеулавливаю регулярное размещение насадочных тел различной геометрической формы позволяет реализовать инерционное и диффузионное осаждение твердых частиц на пленках, находящихся на поверхности насадочных тел и каплях, заполняющих все рабочее пространство контактной зоны. Гидравлическое сопротивление аппаратов с регулярной подвижной насадкой на порядок ниже, чем аппаратов ударного или центробежного действия, тогда как эффективность очистки частиц пыли более 5 мкм составляет свыше 99 % [22].

Конструктивные решения по реализации центробежного и вихревого взаимодействия потоков в одном аппарате привели к разработке новой конструкции пылеуловителя.

Авторами данной работы разработана конструкция пылеуловителя с двумя зонами контакта, способного реализовать одновременно два механизма пылеулавливания – центробежный в нижней зоне и вихревой в верхней зоне контакта. При этом пыль в нижней ступени контакта улавливается в сухом виде, а ее доулавливание происходит в мокрой степени контакта. Мокрая ступень представляет собой насадочную зону, в которой насадочные тела насажены на гибкие струны с фиксированными шагами в вертикальном и радиальном направлениях. Регулярное расположение насадочных элементов в объеме контактной зоны позволяет достигать синфазный режим взаимодействующих фаз [22, 23], приводящий к существенной интенсификации протекающих процессов. Однако результаты исследований и расчета такого пылеуловителя отсутствуют, что и подтверждает актуальность данной работы.

Таким образом, *объектом исследования* является эффективность пылеулавливания мелкодисперсной пыли в аппарате с интенсивным турбулентным режимом взаимодействия фаз. *Целью работы* является получение теоретических и экспериментальных данных общей и фракционной эффективности пылеулавливания в зависимости от режимных параметров работы оборудования.

2. Методика проведения исследования

Экспериментальная установка для проведения исследований эффективности пылеулавливания включала:

- пылеуловитель циклонно-вихревого действия;
- вентилятор;
- насос;

- циркуляционную и напорную емкости жидкости для орошения верхней ступени контакта;
- емкость для сбора сухой пыли из нижней ступени контакта;
- компрессор для распыления пыли на входе в пылеуловитель.

Во всех экспериментах концентрация пыли на входе в аппарат поддерживалась около 2 г/м^3 . В качестве стандартной пыли использовали пылевидный кварц КП-3, дополнительно размолотый на вибромельнице [24].

При определении общей эффективности процесса пылеулавливания использовали метод внутренней фильтрации [24]. Для заполнения аллонжей применяли стекловату. Расход газа через аллонжи устанавливали исходя из условия изокINETического отбора. Для измерения дисперсного состава пыли в потоке газа вместо аллонжей использовали импактор.

Исследуемым объектом явился пылеуловитель циклонно-вихревого действия (рис. 1).

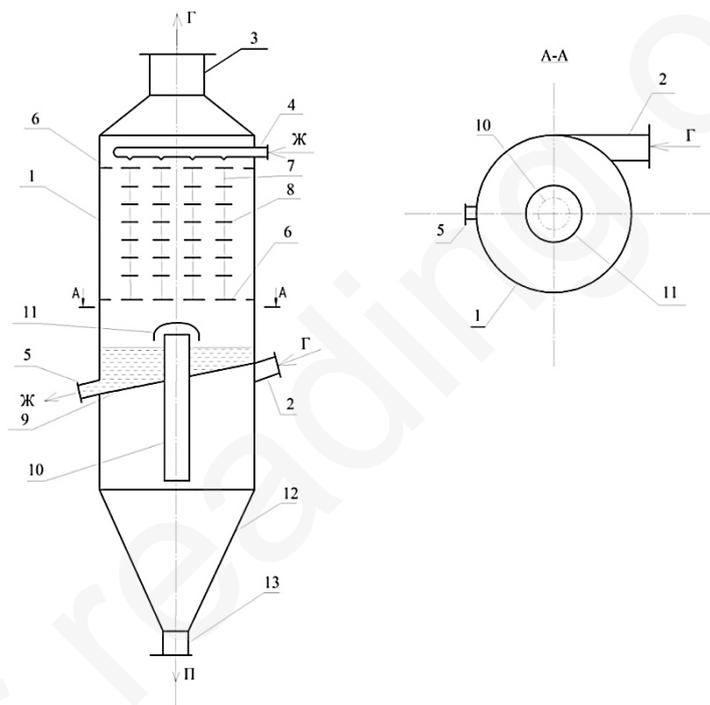


Рис. 1. Пылеуловитель циклонно-вихревого действия: 1 – корпус; 2 – патрубок ввода газа; 3 – патрубок вывода газа; 4 – ороситель; 5 – штуцер для слива отработанного поглотителя; 6 – опорно-распределительная решетка; 7 – струны; 8 – насадочные тела; 9 – наклонная перегородка; 10 – центральная труба; 11 – колпак; 12 – коническое днище; 13 – патрубок для вывода уловленной пыли

Аппарат включает корпус 1, патрубки 2 и 3, соответственно для ввода и вывода газа. В рабочей зоне аппарата находятся опорно-распределительные решетки 6, струны 7 с закрепленными на них насадочными телами 8. Ввод орошающей жидкости в верхнюю ступень происходит через ороситель 4, слив отработанного поглотителя – через штуцер 5. Верхняя и нижняя ступени контакта разделены наклонной перегородкой 9 с вмонтированной в нее

центральной трубой 10, расположенной соосно с корпусом нижней ступени контакта. Верхний срез центральной трубы снабжен колпаком 11. Нижняя ступень контакта имеет коническое днище 12 с патрубком для вывода уловленной пыли 13.

Газовый поток, поступающий на очистку, подается через штуцер 2, установленный тангенциально в нижней части аппарата.

При тангенциальном подводе газового потока возникает центробежная сила, которая воздействует на твердые частицы пыли, прижимая их к внутренней стенке аппарата 1. Под действием силы тяжести твердые частицы пыли сползают в коническое днище 12 нижней ступени контакта и выводятся из аппарата через патрубок 13. Очищенный от пыли газовый поток через верхний срез центральной трубы 10 поступает в верхнюю ступень контакта. При входе в нее центральная труба 10 снабжена колпаком 11 для исключения попадания стекающей орошающей жидкости. Нижняя и верхняя ступени контакта разделены наклонной перегородкой 9, вследствие чего работа их происходит автономно.

Работа верхней ступени контакта происходит в противоточном режиме. В этом случае поступающий снизу газовый поток взаимодействует с орошающей жидкостью, подаваемой через ороситель 4 в объеме насадочной зоны. Расположение насадочных элементов 8 на струнах 7 выполнено с шагом в вертикальном направлении, обеспечивающим достижение режима одновременного вихреобразования (синфазного режима). Очищенный газовый поток выводится из аппарата через патрубок 3, а отработанная в верхней ступени жидкость удаляется через патрубок 5.

3. Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 2–4 представлены результаты исследований в виде графиков зависимостей эффективности пылеулавливания сухой ступени и мокрой ступеней, а также общей эффективности пылеулавливания циклонно-вихревого аппарата от скорости газа, плотности орошения мокрой ступени и дисперсного состава пыли.

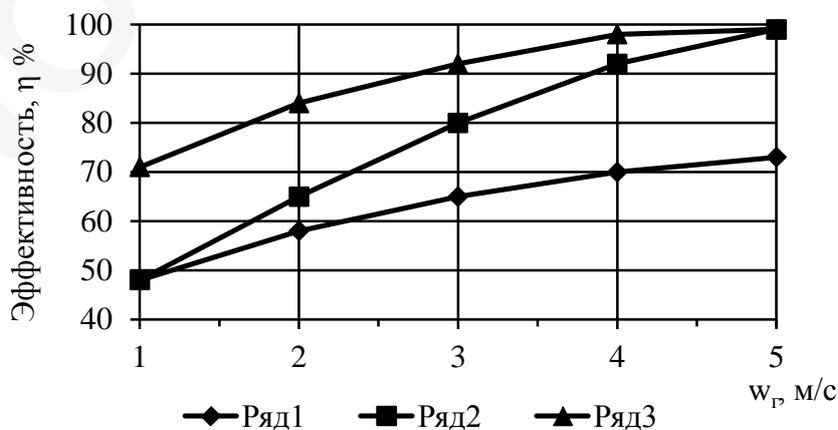


Рис. 2. Зависимость эффективности пылеулавливания от скорости газа в верхней ступени контакта: $t_0/b=2$; $t_p/b=2$; $b=0,04$ м; $L=25$ м³/м²ч;
Ряд 1 — η_c ; Ряд 2 — η_m ; Ряд 3 — $\eta_{общ}$

Как видно из рис. 2, с увеличением скорости газового потока эффективность пылеулавливания сухой и мокрой ступеней, а также общей эффективности возрастает. Рост эффективности сухой ступени обусловлен увеличением центробежной силы. В мокрой ступени контакта эффективность достигает максимальных значений в капельном режиме, после чего дальнейшее увеличение скорости газа приводит к уносу жидкости из аппарата и эффективность процесса несколько снижается.

Высокие значения степени пылеулавливания достигаются за счет вихревого дробления жидкости в насадочной зоне аппарата. Частота срыва вихрей с элементов насадки, а также интенсивность и частота пульсаций увеличиваются пропорционально скорости газа. Пульсационное движение насадки приводит к интенсификации процесса срыва пленки жидкости и последующего ее дробления на более мелкие капли. При этом увеличивается поверхность контакта фаз, а, в конечном счете, и общая эффективность пылеулавливания.

С увеличением плотности орошения мокрой ступени контакта (рис. 3) рост эффективности насадочной (кривая 1) зоны и общей эффективности пылеулавливания (кривая 2) происходит пропорционально количеству подаваемой в насадочную зону жидкости. При этом количество удерживаемой насадкой жидкости возрастает, увеличивается общее число дробимых капель, что способствует росту межфазной поверхности и степени пылеулавливания.

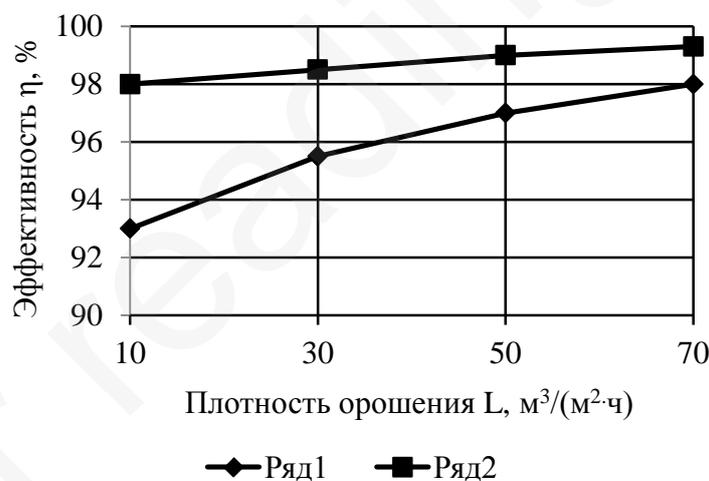


Рис. 3. Зависимость эффективности пылеулавливания от плотности орошения в верхней ступени контакта: $t_{\theta}/b=2$; $t_p/b=2$; $b=0,04$ м; $L=25$ м³/м²ч; $w_2=4$ м/с;
Ряд 1 – η_m ; Ряд 2 – $\eta_{\text{общ}}$

Исследования фракционной эффективности аппарата циклонно-вихревого действия приведено на рис. 4. Результаты показывают, что с увеличением диаметра улавливаемых частиц эффективность процесса пылеулавливания сухой и мокрой ступеней, а также общей эффективности возрастает.

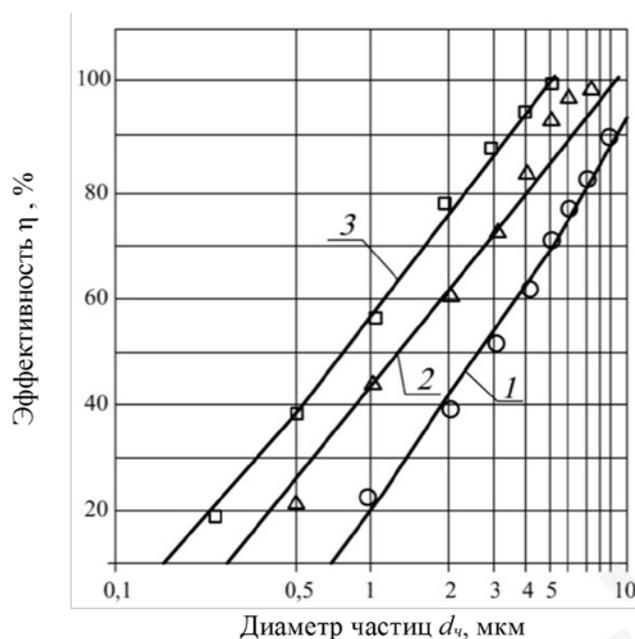


Рис. 4. Зависимость эффективности пылеулавливания от дисперсного состава частиц пыли: 1 – η_c ; 2 – η_m ; 3 – $\eta_{общ}$

Увеличение скорости газа или количества жидкости в мокрой ступени также способствуют росту фракционной эффективности.

Указанная закономерность наблюдается для любых фракций пыли. Естественно, что абсолютное значение коэффициента пылеулавливания крупных частиц больше, чем мелких, но степень улавливания последних с повышением скорости газа увеличивается значительно. Объяснением этому служит анализ механизма улавливания частиц [25, 26]. Для частиц диаметром $d_{ч} > 5$ мкм преобладающее влияние оказывают силы инерции, а для $d_{ч} < 2$ мкм – силы диффузии. Очевидно, что повышение эффективности улавливания высокодисперсных частиц происходит за счет турбулентной диффузии, величина которой определяется частотой турбулентных пульсаций и степенью увеличения частиц. Основную долю вклада в частоту пульсаций вносит процесс вихревого движения газожидкостного слоя, приводящего к многократному срыву пленки жидкости с насадочных элементов и дроблению ее на мелкие капли. При этом поверхность контакта фаз и эффективность пылеулавливания растут.

Для получения расчетной зависимости эффективности пылеулавливания сухой ступени использована центробежно-инерционная модель. Осаждение частиц в сухой ступени циклонно-вихревого аппарата происходит за счет суммарного действия двух механизмов: центробежного, перемещающего частицы к стенкам аппарата и инерционного, способствующего осаждению частиц под действием силы тяжести. Для вывода уравнения, описывающего центробежное осаждение частиц пыли в сухой ступени применим метод, предложенный Лайтом и Лифом [27]. Эффективность пылеулавливания может быть определена по формуле:

$$\eta_C = 1 - \exp\left[-2(C_k \cdot \psi)^{1/(2n+2)}\right], \quad (1)$$

где C_k – коэффициент, зависящий от конструктивных соотношений сухой ступени аппарата.

Для сухой ступени коэффициент C_k рассчитывается по уравнению:

$$C_k = \frac{\pi \cdot D_{\text{ц}}^2}{a \cdot B_1} \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D_{\text{ц}}}\right)^2\right] \cdot \left(\frac{2 \cdot h_T}{D_{\text{ц}}} - \frac{h_B}{D_{\text{ц}}}\right) + \left[\left(\frac{d}{D_{\text{ц}}}\right)^2 - \left(\frac{d_1}{D_{\text{ц}}}\right)^2\right] \cdot \left(\frac{4 \cdot H_{\text{н}}}{D_{\text{ц}}} + \frac{4 \cdot H_{\text{к}}}{D_{\text{ц}}}\right). \quad (2)$$

Значения конструктивных соотношений в уравнении (2):

- высота входного патрубка $a = 0,66 \cdot D_{\text{ц}}$;
- ширина входного патрубка $B_1 = 0,26 \cdot D_{\text{ц}}$;
- внутренний диаметр центральной выхлопной трубы $d = 0,59 \cdot D_{\text{ц}}$;
- внутренний диаметр пылевыпускного отверстия $d_1 = 0,4 \cdot D_{\text{ц}}$;
- высота центральной трубы $h_T = 1,74 \cdot D_{\text{ц}}$;
- высота внешней части центральной трубы $h_B = 0,3 \cdot D_{\text{ц}}$;
- высота цилиндрической части нижней ступени $H_{\text{н}} = 2,26 \cdot D_{\text{ц}}$;
- высота конической части нижней ступени $H_{\text{к}} = 2 \cdot D_{\text{ц}}$.

Величина ψ в уравнении (1) представляет собой модифицированный инерционный параметр, характеризующий состояние пылегазовой смеси:

$$\psi = \frac{d_q^2 \cdot \rho_q \cdot W_{\text{вх}}}{18\mu_{\text{г}} \cdot D_{\text{ц}}} (n+1), \quad (3)$$

где $W_{\text{вх}}$ – скорость газа на входе в сухую ступень, м/с; d_q – диаметр твердой частицы, м; ρ_q – плотность частицы, кг/м³; $\mu_{\text{г}}$ – вязкость газа, Па·с; $D_{\text{ц}}$ – диаметр цилиндрической части аппарата, м.

Величина n в уравнениях (1) и (3) согласно [28], составляет:

$$n = 1 - (1 - 0,0165 \cdot D_{\text{ц}}^{0,14}) \cdot \left(\frac{T_{\text{г}}}{283}\right)^{0,3}, \quad (4)$$

где $T_{\text{г}}$ – абсолютная температура газов, °К.

Для получения расчетной зависимости эффективности пылеулавливания мокрой ступени использована турбулентно-диффузионная модель осаждения твердых частиц.

В насадочной зоне аппаратов с регулярной структурой насадки реализуется турбулентный режим, характеризующийся вихреобразованием. При проведении процесса пылеулавливания газовый поток содержит твердые частицы различных размеров. Как известно, улавливание твердых частиц размером менее 0,1 мкм происходит вследствие молекулярной диффузии.

Твердые частицы пыли имеют размер значительно меньше масштаба турбулентных пульсаций и поэтому вовлекаются в пульсационное движение газового потока. Причем, степень увлечения также зависит от диаметра и плотности частиц, т.е. от ее инерционности. Следовательно, при расчете эффективности осаждения в интенсивных режимах течения газа необходимо учитывать наряду с инерционным механизмом осаждения и молекулярной диффузией также турбулентную диффузию, которая вносит существенный вклад в эффективность улавливания частиц с размером 1–2 мкм и более.

Для вывода уравнения коэффициента турбулентной диффузии использован диссипативный подход:

Для вывода уравнения коэффициента турбулентной диффузии использован диссипативный подход:

$$D_T = B_T \cdot (\xi_L)^{\frac{1}{3}} \cdot (1 - \varepsilon_0)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{H}{t_B}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_{ж}}\right)^{\frac{1}{3}} \times \left(\frac{1}{h_0}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot d_k^{\frac{4}{3}} \cdot u_g \cdot Stk, \quad (5)$$

где $B_T = 8,38 \cdot (1 - \varphi)$ – корректирующий коэффициент; ξ_L – коэффициент сопротивления жидкой фазы; ε_0 – порозность слоя насадочных тел; H – высота насадочной зоны аппарата, м; t_B – расстояние между рядами насадки по вертикали; ρ_g – плотность газа, кг/м³; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; h_0 – высота центральной трубы в насадочной зоне, м; d_k – диаметр капли, м; u_g – скорость газа в насадочной зоне, м/с; $Stk = \frac{\rho_g \cdot d_k^2 \cdot u_g}{18\mu_r \cdot d_k}$ – критерий Стокса.

Эффективность пылеулавливания определяется по формуле:

$$\eta^M = 2,97 \cdot \left(\frac{W_g \cdot d_k}{D_T}\right)^{-1/4}, \quad (6)$$

где W_g – скорость газа, м/с; D_T – коэффициент турбулентной диффузии, м²/с.

Общая эффективность циклонно-вихревого аппарата с учетом эффективности сухой и мокрой ступеней может быть рассчитана по формуле:

$$\eta_{общ} = 1 - (1 - \eta_c)(1 - \eta_m). \quad (7)$$

Результаты расчетов по формуле (7) в исследуемом диапазоне изменения режимных параметров расходятся с экспериментальными данными не более чем на $\pm 15\%$.

4. Выводы

В результате анализа наиболее эффективных механизмов улавливания пыли разработана конструкция пылеуловителя циклонно-вихревого действия, позволяющего реализовать центробежный и вихревой механизмы улавливания пыли. Проведенные исследования общей и фракционной эффективности пылеулавливания при изменении режимных параметров работы разработанного аппарата показали, что эффективность улавливания мелкодисперсной пыли составляет 98–99 %. Установлено, что повышение эффективности улавливания высокодисперсных частиц происходит за счет турбулентной диффузии, величина которой определяется частотой турбулентных пульсаций и степенью увлечения частиц при пульсационном движении насадочных тел. Для описания полученных результатов предложена центробежно-инерционная модель для сухой ступени контакта и турбулентно-диффузионная модель осаждения твердых частиц для мокрой ступени контакта, позволяющие рассчитать эффективность пылеулавливания ступеней контакта, а также общую эффективность циклонно-вихревого аппарата.

Полученные результаты показывают перспективность использования аппаратов данной конструкции на предприятиях теплоэнергетики и других отраслей промышленности.

Литература

1. Matus, K., Nam, K.-M., Selin, N. E., Lamsal, L. N., Reilly, J. M., Paltsev, S. (2012). Health damages from air pollution in China. *Global Environmental Change*, 22 (1), 55–66. doi: <http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.08.006>
2. Neira, M. (2016). *Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease*. Geneva: WHO Document Production Services, 132.
3. Gedik, K., Imamoglu, I. (2011). A preliminary investigation of the environmental impact of a thermal power plant in relation to PCB contamination. *Environmental Science and Pollution Research*, 18 (6), 968–977. doi: <http://doi.org/10.1007/s11356-010-0430-z>
4. Mishra, U. (2004). Environmental impact of coal industry and thermal power plants in India. *Journal of Environmental Radioactivity*, 72 (1-2), 35–40. doi: [http://doi.org/10.1016/s0265-931x\(03\)00183-8](http://doi.org/10.1016/s0265-931x(03)00183-8)
5. George, J., Masto, R. E., Ram, L. C., Das, T. B., Rout, T. K., Mohan, M. (2014). Human Exposure Risks for Metals in Soil Near a Coal-Fired Power-Generating Plant. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 68 (3), 451–461. doi: <http://doi.org/10.1007/s00244-014-0111-x>
6. Demirak, A., Balci, A., Dalman, Ö., Tüfekçi, M. (2005). Chemical Investigation of Water Resources Around the Yatagan Thermal Power Plant of Turkey. *Water, Air, & Soil Pollution*, 162 (1-4), 171–181. doi: <http://doi.org/10.1007/s11270-005-5999-3>

7. Raptis, C. E., Pfister, S. (2016). Global freshwater thermal emissions from steam-electric power plants with once-through cooling systems. *Energy*, 97, 46–57. doi: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.107>
8. Hurets, L. L., Kozii, I. S., Miakaieva, H. M. (2017). Directions of the environmental protection processes optimization at heat power engineering enterprises. *Journal of Engineering Sciences*, 4 (2), g12–g16. doi: [http://doi.org/10.21272/jes.2017.4\(2\).g12](http://doi.org/10.21272/jes.2017.4(2).g12)
9. Abdul-Wahab, S. A., Jupp, B. P. (2009). Levels of heavy metals in subtidal sediments in the vicinity of thermal power/desalination plants: a case study. *Desalination*, 244 (1), 261–282. doi: <http://doi.org/10.1016/j.desal.2008.06.007>
10. Raja, R., Nayak, A. K., Shukla, A. K., Rao, K. S., Gautam, P., Lal, B. (2015). Impairment of soil health due to fly ash-fugitive dust deposition from coal-fired thermal power plants. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187 (11), 679. doi: <http://doi.org/10.1007/s10661-015-4902-y>
11. Wang, X., Du, L. (2016). Study on carbon capture and storage (CCS) investment decision-making based on real options for China's coal-fired power plants. *Journal of Cleaner Production*, 112 (5), 4123–4131. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.112>
12. Tock, L., Maréchal, F. (2015). Environomic optimal design of power plants with CO₂ capture – Environomic optimal design of power plants with CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 39, 245–255. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.05.022>
13. Miller, B. G. (2011). Anatomy of a Coal-Fired Power Plant. *Clean Coal Engineering Technology*. Butterworth-Heinemann, 219–250. doi: <http://doi.org/10.1016/b978-1-85617-710-8.00006-6>
14. Phillips, H. W. (2000). Select the proper gas cleaning equipment. *Chemical Engineering Progress*, 96 (9), 19–38.
15. Hession, M. (1997). Incinerator and gas cleaning equipment overview. *Health estate journal*, 51 (8), 6–7.
16. Sutherland, K. (2007). Choosing equipment: Cleaning air and gas. *Filtration & Separation*, 44 (1), 16–19. doi: [http://doi.org/10.1016/s0015-1882\(07\)70020-4](http://doi.org/10.1016/s0015-1882(07)70020-4)
17. Страус, В. (1981). *Промышленная очистка газов*. Москва: Химия, 616.
18. Wu, X., Wu, K., Zhang, Y., Hong, Q., Zheng, C., Gao, X., Cen, K. (2017). Comparative life cycle assessment and economic analysis of typical flue-gas cleaning processes of coal-fired power plants in China. *Journal of Cleaner Production*, 142 (4), 3236–3242. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.146>
19. Омаркулов, П. К. (2003). Механизм взаимодействия потоков в газожидкостной системе. *Хімічна промисловість України*, 2, 31–32.
20. Биргер, М. И., Вальдберг, А. Ю., Мягков, Б. И. и др.; Русанов, А. А. (Ред.) (1983). *Справочник по пыли – и золоулавливанию*. Москва: Энергоатомиздат, 312.
21. Gimbut, J., Choong, T. S. Y., Fakhru'l-Razi, A., Chuah, T. G. (2012). Prediction of the Effect of Dimension, Particle Density, Temperature, and Inlet Velocity on Cyclone Collection Efficiency. *Jurnal Teknologi*, 40, 37–50. doi: <http://doi.org/10.11113/jt.v40.421>
22. Балабеков, О. С., Волненко, А. А. (2015). *Расчет и конструирование теплообменных и пылеулавливающих аппаратов с подвижной и регулярной насадкой*. Шымкент, 184.

23. Балабеков, О. С., Петин, В. Ф. (2000). *Закономерность взаимодействия вихрей, возникающих при отрывном обтекании потоком газа или жидкости дискретно расположенных вдоль него тел*. Свидетельство о научном открытии № 144. Москва: Международная ассоциация авторов научных открытий.

24. Коузов, П. А., Скрыбина, Л. Я. (1983). *Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей*. Ленинград: Химия, 143.

25. Шарьгин, М. П. (1992). *Разработка и расчет устройств для разрушения отложений и пылеулавливания с управляемым вихревым потоком*. Москва: 480.

26. Волненко, А. А. (1999). *Научные основы разработки и расчета вихревых массообменных и пылеулавливающих аппаратов*. Шымкент, 300.

27. Leith, D., Licht, W. (1972). The Collection Efficiency of Cyclone-Type Particle Collectore – A New Theoretical Approach. *AICh, Symposium Series, 68 (126)*, 196–206.

28. Ужов, В. Н., Вальдберг, А. Ю., Мягков, Б. И., Решидов, И. К. (1981). *Очистка промышленных газов от пыли*. Москва: Химия, 390.