

Е. В. Романюк¹, д. т. н. Ю. В. Красовицкий² (✉), к. т. н. А. А. Смирных², И. А. Чугунова²

¹ ФГБОУ ВПО «Воронежский институт ГПС МЧС России», г. Воронеж, Россия

² ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», г. Воронеж, Россия

УДК 66.067.3:666.76.001.8

КОМБИНИРОВАННЫЕ ФИЛЬТРОВАЛЬНЫЕ ПЕРЕГОРОДКИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПЫЛЕГАЗОВЫХ ПОТОКОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ОГНЕУПОРОВ

Предложено конструктивное решение процесса пылеулавливания комбинированными фильтровальными перегородками, определены технологические режимы их работы, разработаны и экспериментально проверены математические интерполяционные модели процесса пылеулавливания. Разработан экспериментальный многослойный фильтр с зернистым огнеупорным фильтрующим материалом, позволяющий осуществлять последовательную очистку полидисперсного потока.

Ключевые слова: конструкционные огнеупоры, многослойные фильтровальные элементы, насыпной комбинированный фильтр (НКФ).

В связи с интенсификацией производства, износом технологического оборудования и нерациональной организацией природоохранных мероприятий загрязненность окружающей среды постоянно растет. Серьезным источником пылевых выбросов в окружающую среду является производство строительных и огнеупорных материалов. Пылевые выбросы в атмосферу предприятий этого производства достигают нескольких миллионов тонн в год, поэтому в настоящее время чрезвычайную актуальность приобретают разработка новейших пылеулавливающих установок и создание безотходных технологий. Высокоэффективному обеспылеванию, анализу и контролю эффективности работы пылеулавливающих аппаратов посвящены исследования Е. П. Медникова, О. В. Клепникова, А. Ю. Вальдберга и других отечественных и зарубежных авторов, однако несмотря на обширный круг исследований проблема пылеулавливания до сих пор остается актуальной.

Наиболее распространенный способ удаления частиц пыли из запыленных газовых потоков — фильтрация, при этом особое значение приобретает фильтрация через зернистые слои. Зернистые слои позволяют не только обеспечить предельно допустимые выбросы, но и организовать в отдельных производствах утилизацию отходов [1, 2]. На рис. 1 показан

разработанный авторами настоящей статьи насыпной комбинированный фильтр (НКФ) с продувочными трубками. Конструкция фильтра позволяет оперативно менять сменную фильтровальную кассету, что обеспечивает мобильность и непрерывность работы технологического оборудования.

Фильтр функционирует следующим образом. Пылегазовый поток через входной штуцер 1 поступает в камеру запыленного воздуха 2 и проходит через сменную фильтровальную кассету 3, состоящую из трех последовательно расположенных по ходу газа слоев зернистого материала 4, фильтровальной металлической сетки 5 и слоя волокнистого материала 6. Фильтровальная кассета выполнена в виде цилиндра, внутри которого находятся зернистые слои в ячейках I, II, III. Ячейки содержат верхние и нижние ограничители толщины слоя 7 (плоские распределительные решетки). Первый и второй слои по ходу пылегазового потока заполнены дробленой крошкой огнеупорного материала фракций 3–6 и 1–3 мм, третий слой — зернистый пористый адсорбент — коксик. Пылегазовый поток поступает по газопроводу в зернистый фильтрующий элемент. Вначале запыленный воздух проходит через крупный наполнитель ячейки I, где задерживаются наиболее крупные частицы пыли размерами 7–10 мкм. При прохождении первично очищенного пылегазового потока через более мелкий наполнитель ячейки II происходит более тонкая очистка от частиц дисперсной фазы размерами 2–7 мкм. Далее поток попадает в ячейку III, заполненную зернистым адсорбционным материалом, в которой происходит удаление



Ю. В. Красовицкий
E-mail: scercso@mail.ru

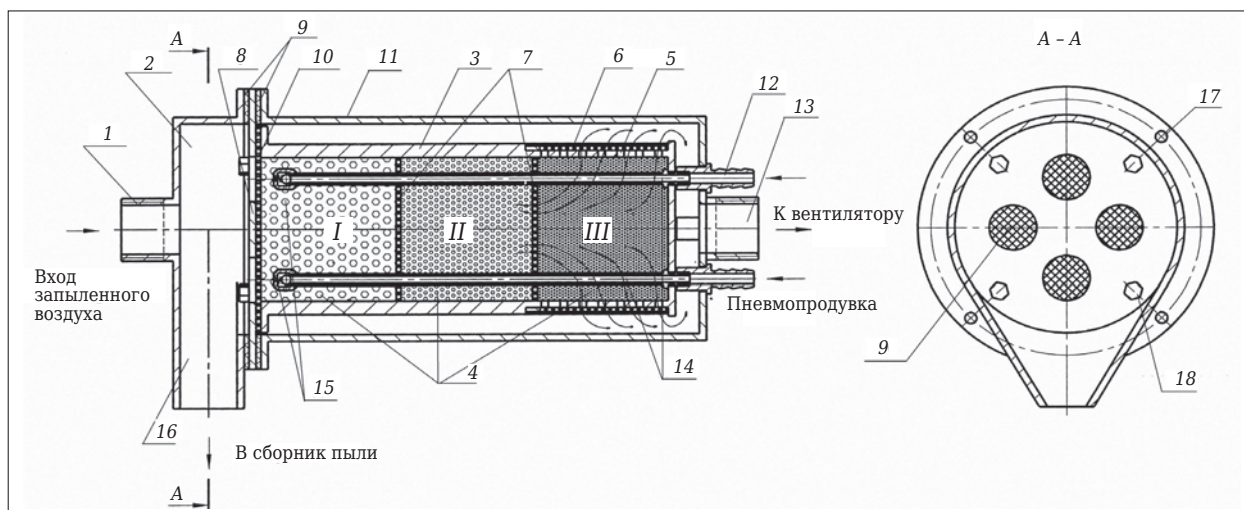


Рис. 1. Насыпной комбинированный фильтр: 8 — распределительное устройство; 9 — металлическая решетка; 10 — резиновая уплотнительная прокладка; 11 — корпус фильтра; 12 — штуцеры для регенирующего агента; 13 — коллектор очищенного воздуха; 14 — регенирующие патрубки (дополнительные передвижные коммуникации для импульсной регенерации зернистых слоев); 15 — пружинные клапаны; 16 — патрубок сбора уловленной пыли; 17, 18 — крепежные болты; остальные обозначения — в тексте

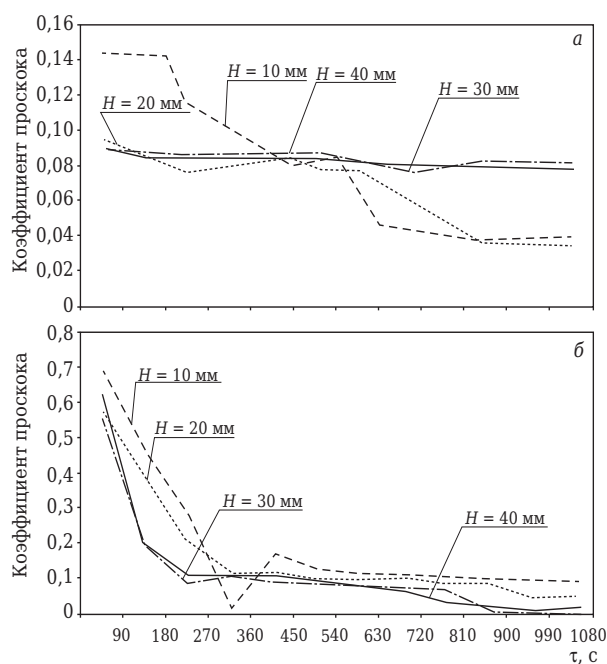


Рис. 2. Зависимости $K = f(\tau)$: а — периклазовая пыль ($Z_n = 23,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$, $d_{50} = 26 \text{ мкм}$, $\delta = 2,3$, $\lg \sigma = 0,34$); б — графито-периклазовая пыль ($Z_n = 16,123 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$, $d_{50} = 4 \text{ мкм}$)

токсичных компонентов из технологических газов. Одновременно происходит фильтрование через стенки волокнистого полотна б, которое позволяет очистить пылегазовый поток от частиц пыли размерами 1–4 мкм.

Фильтр прошел экспериментальную проверку на двух видах технологических пылегазовых потоков огнеупорного производства, содержащих твердый аэрозоль периклаза и

графито-периклаза. В ходе исследований меняли высоту зернистого слоя фильтра от 10 до 40 мм. Методом априорного ранжирования были определены доминирующие факторы, влияющие на процесс фильтрования: скорость пылегазового потока w , эквивалентный диаметр порового пространства фильтровального слоя d_z , высота фильтрующего слоя H , продолжительность процесса фильтрования τ , начальная концентрация дисперсной фазы Z_n . Для оценки эффективности работы НКФ экспериментальные параметры меняли в достаточно широких диапазонах: $1 \cdot 10^{-3} < d_z < 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $10 \cdot 10^{-3} < H < 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $90 < \tau < 1800 \text{ с}$; скорость потока поддерживали постоянной ($w = \text{const}$). В результате были получены данные, показанные на рис. 2.

Анализ полученных результатов свидетельствует о целесообразности наращивания высоты зернистого слоя лишь до $20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, так как при дальнейшем его увеличении коэффициент проскока практически не меняется, а гидравлическое сопротивление растет. Поэтому в дальнейшем в работе при определении оптимального размера зерен фильтровального слоя использовали высоту одиночного фильтровального слоя, равную $20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Результаты определения эффективности фильтрования при различных значениях диаметра зерна показаны на рис. 3.

Необходимая эффективность (коэффициент проскока) достигается при достаточно непродолжительном фильтровании, что связано с забиванием пор зернистого слоя и сужением каналов слоя. Поэтому целесообразно выполнить

первый по ходу слой с крупными гранулами ($7 \cdot 10^{-3}$ м), а второй — с минимальным размером зерна $3 \cdot 10^{-3}$ м. При фильтровании через насыпной комбинированный слой пылегазовый поток, переходя от слоя с большим размером зерна к слою с меньшим размером зерна, меняет концентрацию и дисперсный состав пыли. Изменяется режим течения газа в порах. Начинается фильтрование с преобладанием процесса накопления осадка на поверхности слоя и образования автофилтра и заканчивается фильтрованием с постепенным закупориванием пор. Для анализа перепада давлений на таком фильтре теоретически можно выделить преобладающий характер процесса фильтрования для каждого подслоя и, основываясь на таком подходе, получить данную характеристику для каждого из подслоев.

Общий перепад давлений ΔP будет равен [2]:

$$\Delta P = \Delta P' + \Delta P'' + \Delta P''', \quad (1)$$

где $\Delta P'$ — перепад давлений, возникающий на фильтре за счет возникновения автофилтра на первом по ходу пылегазового потока слое, Па; $\Delta P''$ — перепад давлений, возникающий за счет постепенного закупоривания пор первого по ходу потока зернистого слоя, Па; $\Delta P'''$ — перепад давлений, возникающий за счет постепенного закупоривания пор второго зернистого слоя, Па.

Аналитическое выражение перепада давлений $\Delta P'$, создаваемого первым по ходу пылегазового потока слоем НКФ при протекании процесса с образованием автофилтра, имеет вид

$$\Delta P' = \frac{Q^2 x_n r_{oc} \tau}{\pi^2 R^4}, \quad (2)$$

где Q — расход пылегазового потока, м³/с; x_n — начальная объемная концентрация дисперсной фазы в пылегазовом потоке; r_{oc} — радиус осадка пылевого слоя; R — радиус фильтровального слоя фильтра, м.

Зависимость, характеризующая перепад давлений $\Delta P''$ на первом слое зернистого фильтра при протекании процесса с постепенным закупориванием пор:

$$\Delta P''(\tau) = \frac{14\mu h_1 V}{\left(\pi (r'_3)^2 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) - \frac{(1 - K_n e^{-m\tau}) \tau}{h_1} \right) R^2}, \quad (3)$$

где μ — вязкость пылегазовой смеси, Па·с; h_1 — высота первого по ходу пылегазового потока зернистого слоя НКФ, м; r'_3 — средний радиус зерна наполнителя первого по ходу пылегазового потока слоя НКФ, м; K_n — начальный коэффициент проскока.

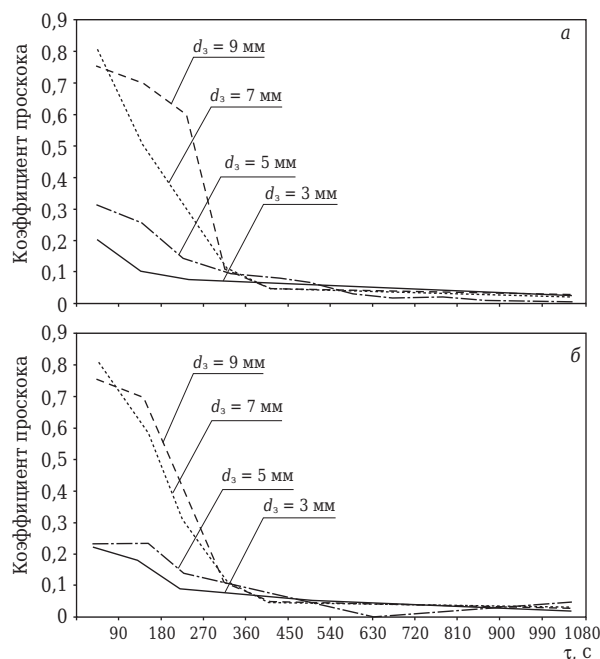


Рис. 3. Зависимости $K = f(\tau)$, полученные при следующих параметрах пылегазового потока: а — графито-периклазовая пыль — $Z_n = 16,123 \cdot 10^{-3}$ кг/м³, $d_{50} = 4$ мкм; б — периклазовая пыль — $Z_n = 23,3 \cdot 10^{-3}$ кг/м³, $d_{50} = 27$ мкм, $\delta = 2,3$, $\lg \sigma = 0,34$

Перепад давлений $\Delta P'''$, возникающий на втором зернистом слое по ходу пылегазового потока при протекании процесса с постепенным закупориванием пор:

$$\Delta P'''(\tau) = \frac{14\mu h_2 V}{\left(\pi (r'_3)^2 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) - \frac{(x_n K_n^2 e^{-2m\tau}) \tau}{h_2} \right) R^2}, \quad (4)$$

где h_2 — высота второго по ходу пылегазового потока зернистого слоя НКФ, м; r'_3 — средний радиус зерна наполнителя второго по ходу пылегазового потока зернистого слоя НКФ, м.

После ряда преобразований и математической обработки получаем уравнение

$$\Delta P(\tau) = \frac{Q^2 x_n r_{oc} \tau}{\pi^2 R^4} + \frac{14\mu h_1 Q}{\left(\pi (r'_3)^2 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) - \left(\frac{1 - K_n e^{-m\tau}}{h_1} \right) \right) R^2} + \frac{14\mu h_2 Q}{\left(\pi (r'_3)^2 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) - \frac{(x_n K_n^2 e^{-2m\tau}) \tau}{h_2} \right) R^2}. \quad (5)$$

Для математической оценки эффективности фильтрования (коэффициента проскока) в зависимости от различных факторов процесса получены уравнения регрессии

$$K = f(H, w, d_3, \tau). \quad (6)$$

Для получения уравнений регрессии, характеризующих общий и фракционные коэф-

Параметры регенерации НКФ

Фильтруемая пыль	Параметры пылегазового потока			$h_{oc}, 10^{-3} \text{ м}$	Параметры регенерации		
	$H, \text{ м}$	$Z_n, \text{ кг/м}^3$	средний медианный диаметр пыли d_m		продолжительность регенерации $\tau_{рег}, \text{ с}$		
Графито-периклазовая	0,02	$16,123 \cdot 10^{-3}$	4 мкм ($\lg \sigma = 0,30$)	7	74	45	2
Периклазовая	0,02	$26,123 \cdot 10^{-3}$	28 мкм ($\lg \sigma = 0,32$)	8	48	45	2

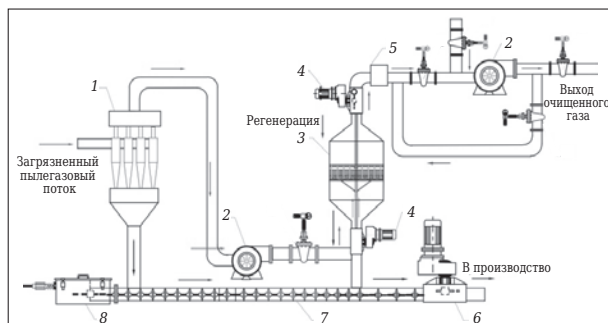


Рис. 4. Схема включения НКФ в технологическую линию Семилукского огнеупорного завода: 1 — первая ступень очистки — батарейный циклон; 2 — газодувка; 3 — НКФ; 4 — электродвигатель; 5 — буферная камера пневморегенерации; 6 — приводная станция конвейера; 7 — конвейерная цепь; 8 — натяжная станция конвейера

фициенты проскока, рационально планировать эксперимент по методу Бокса — Уилсона [3] с последовательной реализацией небольших серий опытов при варьировании значимых факторов [3, 4]. В результате математической обработки получено уравнение общего коэффициента проскока для графито-периклазовой пыли:

$$\ln K^{-1} = 1,28 - 0,09x_1 - 0,07x_2 - 0,038x_3 + 0,03x_4, (7)$$

где натуральные значения факторов H , w , d_3 , t обозначены соответственно через x_1 , x_2 , x_3 и x_4 .

Особый интерес представляет определение фракционных коэффициентов проскока дисперсной фазы. Эти коэффициенты наиболее представительны при оценке разделяющей способности фильтровальной перегородки. Они показывают, какие фракции дисперсной фазы и в какой степени задерживаются перегородкой. Серия опытов проведена для фракций 2–5 и 7–1 мкм. Получены следующие уравнения регрессии:

$$\ln K_{2-5 \text{ мкм}}^{-1} = 5,89 + 0,063x_1 + 0,063x_2 + 0,19x_3 - 0,11x_4, (8)$$

$$\ln K_{7-10 \text{ мкм}}^{-1} = 5,02 + 0,13x_1 - 0,061x_2 + 0,029x_3 - 0,7x_4. (9)$$

Эффективность применения зернистых фильтров зависит от способа регенерации. В

работе исследован метод регенерации обратной продувкой через перфорированные трубки и через продувочные трубки с буферной камерой. При регенерации таким методом скорость обратной продувки составляет 0,40–0,55 м/с. Проведен ряд экспериментов для определения цикла регенерации. Установлены время протекания процесса фильтрования, продолжительность обратной продувки, время продувки фильтров при условии сохранения оптимальной высоты автофильтра (см. таблицу).

Представленные результаты испытаний многослойного насыпного фильтра позволяют сделать заключение о возможности использования его для очистки пылегазовых потоков огнеупорного производства, однако необходимость замены фильтровального слоя должна предполагать автоматизированную замену фильтровальных слоев при необходимости. Эффективная система позволит создать замкнутую безотходную технологию, где отработанный фильтровальный материал может в дальнейшем служить сырьем в производстве огнеупоров.

Авторами предложены схема включения и конструкция НКФ для промышленного использования (рис. 4) с расширенной поверхностью фильтрования и возможностью оперативного удаления отработанных насыпных слоев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный авторами экспериментальный многослойный фильтр позволяет осуществлять последовательную очистку полидисперсного потока, достигая общей эффективности очистки 99,85 %. Получено уравнение, описывающее изменения общего перепада давлений на НКФ с двухслойной структурой, что подтверждено экспериментально. Предложен метод регенерации фильтра — обратная продувка с использованием перфорированных трубок с буферной камерой, что позволяет осуществить глубинную регенерацию зернистых слоев, уменьшая начальный перепад давлений при последующем цикле фильтрования. Это обеспечивает снижение энергозатрат при эксплуатации фильтра.

Библиографический список

1. **Красовицкий, Ю. В.** Обеспыливание промышленных газов в огнеупорном производстве / Ю. В. Красовицкий, П. Б. Балтренас, В. И. Энтин. — Вильнюс : Техника, 1996. — 264 с.
2. **Горемыкин, В. А.** Энергосберегающее пылеулавливание при производстве керамических пигментов по «сухому» способу / В. А. Горемыкин, Ю. В. Красовицкий, С. Ю. Панов, А. В. Логинов. — Воронеж : Воронеж. гос. ун-т, 2001. — 296 с.
3. **Романюк, Е. В.** Разработка математических моделей и программное обеспечение процесса фильтрации : труды XXI Междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях» / Е. В.

Романюк, Р. А. Вазинский, И. А. Чугунова. — Тамбов : ТГТУ, 2008. — С. 21–23.

4. **Романюк, Е. В.** Математические модели процесса фильтрации пылегазового потока для вращающегося зернистого слоя : труды XXI Междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях» / Е. В. Романюк, Р. А. Вазинский, И. А. Чугунова. — Тамбов : ТГТУ, 2008. — С. 20, 21. ■

Получено 28.03.14

© Е. В. Романюк, Ю. В. Красовицкий,
А. А. Смирных, И. А. Чугунова,
2014 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



ТЕРМООБРАБОТКА

Восьмая международная специализированная выставка

9 - 11 сентября 2014

Россия, Москва, ЦВК «Экспоцентр», павильон 5

9-10 сентября

Международная конференция
«ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ТЕРМООБРАБОТКИ»

Единственная в России
выставка термического
оборудования и технологий

Разделы выставки:

- ▶ новый раздел Вспечная местная и объёмная термообработка
- ▶ Промышленные печи: муфельные, вакуумные, плавильные, шахтные, камерные, электропечи
- ▶ Индукционный нагрев: генераторы индукционных токов, индукционные плавильные печи
- ▶ Оборудование для химико-термической обработки: азотирования, цементации и т.д.
- ▶ Размерная и поверхностная обработка: формообразование, напыление
- ▶ Лабораторные печи, сушильные шкафы
- ▶ Оснастка для термического оборудования
- ▶ Системы нагрева и газоснабжения, горелки, электронагревательные элементы

- ▶ Неразрушающий контроль, испытательное оборудование, измерительные системы
- ▶ Автоматизация термообработки, системы управления и регулирования
- ▶ Энергосберегающие технологии термических производств
- ▶ Диагностика, реконструкция и модернизация оборудования
- ▶ Закалочное оборудование, масла и среды

Информационная поддержка:



Организатор:
 Мир-Экспо

ООО «Выставочная компания «Мир-Экспо» | Россия, 115533, Москва, проспект Андропова, 22
Тел./факс: 8 499 618 05 65, 8 499 618 36 83
E-mail: info@htexporus.ru | Сайт: www.htexporus.ru | Твиттер: @htexpo_ru

