

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УЛАВЛИВАНИЯ ПЫЛИ НАСЫПНЫМИ КЛИНКЕРНЫМИ СЛОЯМИ

v.s_bogdanov@mail.ru

Рассмотрены вопросы моделирования процессов улавливания пыли насыпными клинкерными слоями на основе аппроксимации результатов эксперимента.

Ключевые слова: эффективность осаждения, зерна клинкера, клинкерный слой, цементная пыль.

Используемые для пылеулавливания пористые перегородки – зернистые слои, ткани, волокнистые слои имеют высокую пористость, что обусловлено большими по сравнению с размерами частиц пыли расстояниями между зернами, нитями или волокнами.

В связи с этим одним из основных механизмов улавливания пыли является осаждение частиц при обтекании запыленным газом структурных элементов пористых перегородок.

Существуют три механизма осаждения пыли на зернах, нитях или волокнах: инерция, касание и диффузия частиц. Вклад каждого из них различен и зависит от режима обтекания препятствий, который определяется числом Рейнольдса $Re = u\delta\rho/\mu$. Выделяют два основных режима обтекания: первый – вязкое, ползучее обтекание ($Re \leq 1$), для которого определяющее значение имеет вязкость газа и второй – идеальное потенциальное обтекание ($Re \geq 1000$), в котором влияние вязкости пренебрежимо мало [1–3].

Установлено, что эффективность инерционного осаждения частиц определяется значением безразмерного критерия – числа Стокса Stk , которое характеризует отношение силы инерции к силе аэродинамического сопротивления газа:

$$Stk = \frac{\delta^2 \rho_{\text{ч}} u}{18 \mu d} K_c, \quad (1)$$

где u – скорость набегания потока запыленного газа, K_c – поправка Каннингема:

$$K_c = 1 + \frac{2\lambda}{\delta} \left(1,25 + 0,4 \exp\left(-0,55 \frac{\delta}{\lambda}\right) \right). \quad (2)$$

Здесь λ – длина свободного пробега молекул (при $t = 20$ °С, $P_0 = 1,01 \cdot 10^5$ Па, $\lambda = 6,5 \cdot 10^{-8}$ м).

Инерционное осаждение частиц начинает проявляться при $Stk > Stk_{\text{кр}}$, где $Stk_{\text{кр}}$ – критическое значение числа Стокса. Для вязкого обтекания $Stk_{\text{кр}} = 0,6 \dots 4,3$, для потенциального $Stk_{\text{кр}} = 0,04 \dots 0,125$. Установлено, что эффективность инерционного осаждения частиц возрастает с увеличением Stk , которое может быть вызвано увеличением размера частиц, их плотности, скорости фильтрования, а также уменьшением размеров зерен насыпного слоя. Инерционное осаждение характерно для частиц с размерами $\delta > 1$ мкм.

Если достаточно мелкая частица не сталкивается с препятствием, но проходит достаточно близко от него, то ее осаждение возможно за счет касания (зацепления) (рис. 1).

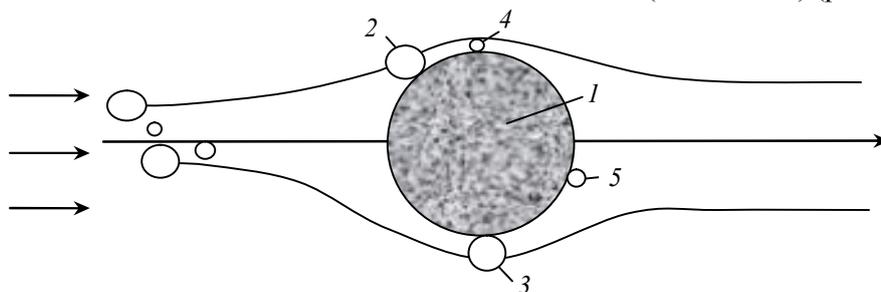


Рисунок 1. Схема осаждения частиц пыли в зернистой среде:

1 – зерно насыпного слоя; 2 – частица, осаждающаяся за счет инерции; 3 – частица, осаждающаяся в результате касания; 4 – частица, осаждающаяся в результате седиментации; 5 – частица, осаждающаяся из-за диффузии

Эффективность осаждения частиц за счет касания η зависит от отношения $R_k = \delta/d$ и возрастает при вязком режиме обтекания. В этом случае

$$\eta_k = R_k^2 \text{Re}^{0,0625}. \quad (3)$$

Гравитационное осаждение (седиментация) частиц пыли в зернистом слое заметно проявляется лишь при малых скоростях фильтрации ($w \leq 0,02$ м/с). Его эффективность, возрастает с увеличением параметра

$$G = \text{Stk}/\text{Fr},$$

где $\text{Fr} = u^2/2gd$ – число Фруда.

Экспериментально установлено, что эффективность гравитационного осаждения в зернистых насыпных фильтрах значительно возрастает, если поток запыленного газа направлен вертикально вниз, т.е. по направлению сил тяжести.

Частицы субмикронных размеров ($\delta \ll 1$ мкм) вовлекаются в броуновское движение и мигрируют к поверхности зерен насыпного слоя за счет молекулярной диффузии.

Эффективность диффузионного захвата частиц возрастает при уменьшении безразмерного критерия Пекле

$$\text{Pe} = du/D, \quad (4)$$

где D – коэффициент молекулярной диффузии частиц пыли, который определяется формулой Эйнштейна

$$D = \frac{k\text{TK}_c}{3\pi\mu\delta}. \quad (5)$$

Здесь $k = 1,38 \cdot 10^{-22}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Заметное влияние на процесс улавливания пыли в зернистых слоях могут оказать электрические силы. Зерна фильтрующего слоя могут электризоваться за счет трения, или быть поляризованными под действием внешнего электрического поля. Частицы пыли могут быть предварительно заряжены с помощью коронных ионизаторов [4].

Таким образом, в зернистых фильтрах осаждение частиц происходит в результате действия инерции, зацепления, гравитации, диффузии, электрических сил, поэтому относительный проскок пыли через зернистый фильтр

$$K = Z_k/Z_m, \quad (6)$$

а также связанная с ним эффективность очистки запыленных газов являются функциями критериев, определяющих рассмотренные выше основные механизмы улавливания пыли, и некоторых других безразмерных величин [5].

$$\eta = 1 - K. \quad (7)$$

В частности, экспериментально установлено, что степень пылеочистки зависит от критерия гомохронности $Ho = w\tau/d_k$, отношения Z_n/ρ , а также геометрических факторов δ_{50}/δ_k и δ_k/H . Здесь Z_n, Z_k – начальная и конечная концентрация пыли, кг/м³; w, τ – скорость фильтрования и его продолжительность, H – высота (толщина) зернистого слоя.

Таким образом

$$K = f(\text{Re}, \text{Stk}, Ho, \delta_{50}/d_k, \delta_{50}/H, \dots) \quad (8)$$

При установлении вида зависимости (8) необходимо учитывать то, что общая эффективность зернистого фильтра должна быть больше эффективности любого отдельно взятого механизма улавливания пыли, но меньше их суммы (суммирование эффективностей имело бы место при параллельном и независимом друг от друга действии всех механизмов улавливания пыли, чего в действительности нет).

Нужно также иметь в виду, что в реальных условиях действие всех механизмов улавливания пыли сопровождается рядом побочных малоизученных явлений, таких как адгезия, отскок крупных частиц от зерен, вторичный унос осажденных частиц и др.

Кроме этого, рассмотренные выше закономерности осаждения частиц пыли относятся лишь к начальному периоду работы зернистого фильтра, т.е. к чистому зернистому слою, поскольку с течением времени на его лобовой поверхности образуется слой уловленных частиц – автослой, а поровые каналы между зернами фильтра постепенно зарастают пылевыми отложениями, что приводит к снижению проскока пыли и повышению гидравлического сопротивления слоя.

Эти обстоятельства крайне затрудняют теоретический вывод зависимости (8) и выдвигают на первый план экспериментальные методы исследования процессов очистки запыленных газов зернистыми слоями.

Применяются различные подходы к выводу эмпирических зависимостей проскока пыли от свойств фильтрующей насадки, свойств запыленного газа и режима фильтрации.

Так, путем обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов для гравийного насыпного фильтра получено соотношение [6]:

$$K = \exp(-c(a + b\tau)), \quad (9)$$

где $a = 0,877 \cdot 10^{-7}$, $b = 2,57 \cdot 10^{-11}$ – эмпирические константы, K – коэффициент захвата частиц:

$$c = \frac{H^{0,25} \delta_{50} \rho_{\text{ч}}}{w^{0,5} d_3^{1,5} \mu}. \quad (10)$$

Формула (10) получена для следующей области изменения параметров: $d_3 = 1,5 \dots 5$ мм, скорость фильтрования $w = 0,1 \dots 0,3$ м/с;

$$\delta_{50} = 5 \dots 30 \text{ мкм}; \quad \rho_{\text{ч}} = 2600 \dots 3000 \text{ кг/м}^3, \\ \mu = (1,8 \dots 2,5) \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

Для условий улавливания цементной пыли ($\delta_{50} = 30$ мкм; $\rho_{\text{ч}} = 2600$ кг/м³, $\mu = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с) насыпным слоем клинкера ($H = 0,15$ м, $d = 0,005$ м; $w = 0,15$ м/с, $c \cong 1,97 \cdot 10^7$) формула (9) принимает вид:

$$K = \exp(-1,97(0,877 + 2,57 \cdot 10^{-4} \tau)). \quad (11)$$

Согласно формуле (11) проскок цементной пыли через насыпной клинкерный фильтр снижается с 17,8 % при чистом слое ($\tau=0$) до 2,9 % через 1 час (3600 с) после начала фильтрации (рис. 2), что существенно выше наблюдаемых значений.

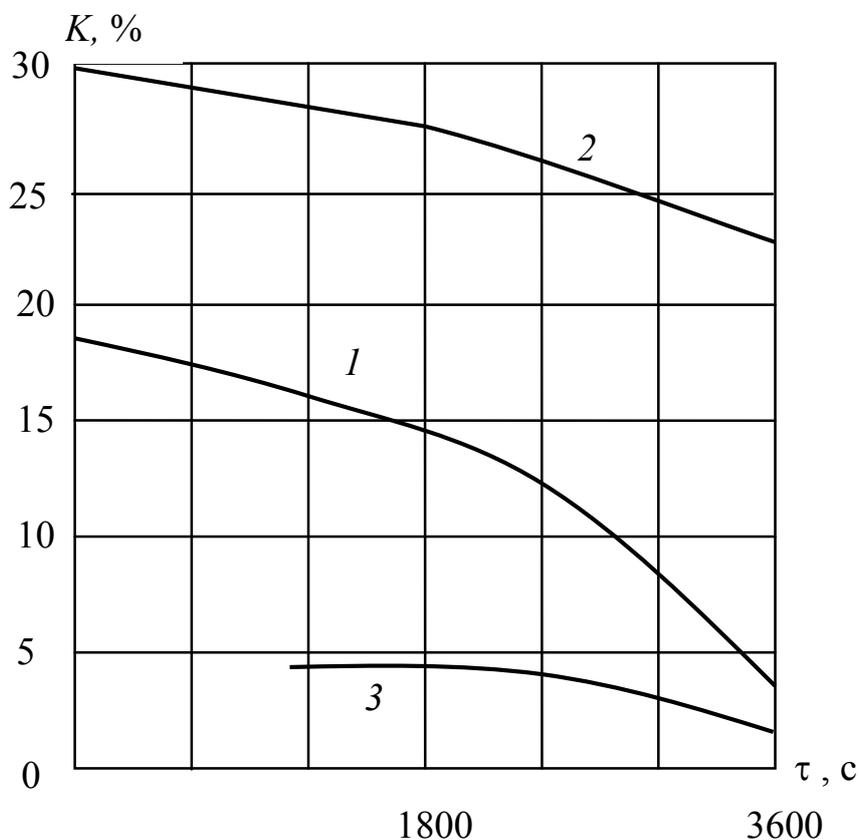


Рисунок 2. Зависимости проскока пыли от времени, рассчитанные по формулам: (11) – кривая 1; (12) – кривая 2; (13) – кривая 3

Особенностью формулы (11) является ее некритериальный характер: коэффициент захвата частиц пыли C является размерной величиной, не имеющей определенного физического смысла.

Структуру, аналогичную (2.9), имеет формула, входящая в методику расчета насыпных зернистых фильтров Н.М. Самохвалова [7]:

$$K = \exp \left(-2,3K_3 \frac{H^{0,8}}{w} \left(1 + K_y \left(\frac{\tau}{\tau_{\text{ип}}} \right)^{0,16} \right) \right),$$

где $K_3 = 34500 \mu \delta_{50}^{0,25} (1 - \varepsilon) / (\rho_{\text{н.п}} d_3^{2,05})$ – коэффициент эффективности захвата частиц пыли, $K_y = 0,00132 P_a^n / (\delta_{50} \rho_{\text{н.п}} g t g \alpha_0)$ – коэффициент уноса пыли из зернистого слоя,

$\tau_{пр} \geq 4,3 \cdot 10^{-6} \rho_{н.п} / \delta_{50}$ – время пребывания запыленного потока в зернистом слое. Здесь $\rho_{н.п}$ – насыпная плотность пыли, кг/м^3 (для цементной пыли $\rho_{н.п} = 1300 \text{ кг/м}^3$), P_a – аутгезионная прочность пылевого слоя, Па; n – показатель степени, зависящий от величины P_a (для цементной пыли $P_a = 600 \text{ Па}$, $n = 0,7$); g – ускорение силы тяжести; α_0 – угол естественного откоса пыли, град. (для цементной пыли $\alpha_0 = 40^\circ$). Для условий улавливания цементной пыли насыпным слоем клинкера $\delta_{50} = 30 \text{ мкм}$; $H = 0,15 \text{ м}$, $w =$

$0,15 \text{ м/с}$, $\tau_{пр} = 372,6 \text{ с}$, $K_y = 0,35$, $K_x = 0,36$ за время фильтрации $\tau = 3600 \text{ с}$ проскок пыли снижается с 31 % (для чистого слоя) до 17 %, что не соответствует экспериментальным данным (см. рис. 2, кривая 2).

Экспериментальным данным по улавливанию цементной пыли лучше соответствует эмпирическая зависимость, полученная Ю.В. Красовицким для пылей огнеупорного производства [8]:

$$K = \exp \left(-5,693 + 1,7 \cdot 10^5 / Ho + 1,2 \cdot 10^2 \left(\frac{d_k}{H} \right) + 5,8 \cdot 10^5 \left(\frac{d_k}{H} \right) / Ho - 3,9 \cdot 10^9 / Ho^2 - 1,65 \cdot 10^3 \left(\frac{d_k}{H} \right)^2 \right), \quad (13)$$

где $Ho = w\tau/d_k$ – критерий гомохронности.

Формула (13) получена для условий $10^5 \leq Ho \leq 3 \cdot 10^6$, $7,35 \cdot 10^{-3} \leq \frac{d_k}{H} \leq 4,3 \cdot 10^{-2}$.

Зависимость проскока цементной пыли от времени, рассчитанная формуле (13) для приведенных выше условий, показана на рис. 2.

Приведенный выше анализ показывает, что эмпирические формулы, полученные для определенных видов пыли и определенных фильтрующих сред, малопригодны для описания процессов улавливания других пылей другими зернистыми фильтрами.

Для изучения закономерностей улавливания пылей цементного производства насыпными клинкерными слоями применялось статистиче-

ское планирование экспериментальных исследований. Предварительный поиск влияющих факторов показал, что основными факторами, определяющими процессы пылеулавливания, являются $d_3, w, \delta_{50}, H, Z_H$ и τ . На основе этих факторов были выявлены доминирующие критерии – $Re, Stk, Ho, d_k/H, Z_H/\rho$.

В результате обработки данных экспериментов, поставленных по специальному плану, получена зависимость величины проскока пыли через слой от основных факторов:

$$K = 0,0246 \left(\frac{d_3}{d_{3_0}} \right)^{0,245} \left(\frac{w}{w_0} \right)^{0,292} \left(\frac{\delta_{50}}{\delta_0} \right)^{-0,223} \left(\frac{Z_H}{Z_{H_0}} \right)^{-0,451} \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^{-0,372}, \quad (14)$$

где $d_{3_0} = 0,01 \text{ м}$; $w_0 = 0,3 \text{ м/с}$; $\delta_0 = 15 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; $Z_{H_0} = 0,01 \text{ кг/м}^3$; $\tau_0 = 1800 \text{ с}$.

Уравнение (14) установлено для следующей области факторного пространства: $0,005 \leq d_3 \leq 0,02 \text{ м}$; $0,15 \leq w \leq 0,6 \text{ м/с}$;

$7,5 \cdot 10^{-6} \leq \delta_{50} \leq 30 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; $0,005 \leq Z_H \leq 0,02 \text{ кг/м}^3$; $900 \leq \tau \leq 3600 \text{ с}$.

Критериальная зависимость проскока цементной пыли, аппроксимирующая результаты эксперимента имеет вид:

$$K = 1,43 \cdot 10^{-4} Re^{0,775} Stk^{-0,112} Ho^{-0,372} \left(\frac{d_k}{H} \right)^{-1,014} \left(\frac{Z_H}{\rho} \right)^{-0,451}. \quad (15)$$

Влияние основных факторов на величину проскока пыли через насыпной клинкерный фильтр показано на рис. 3.

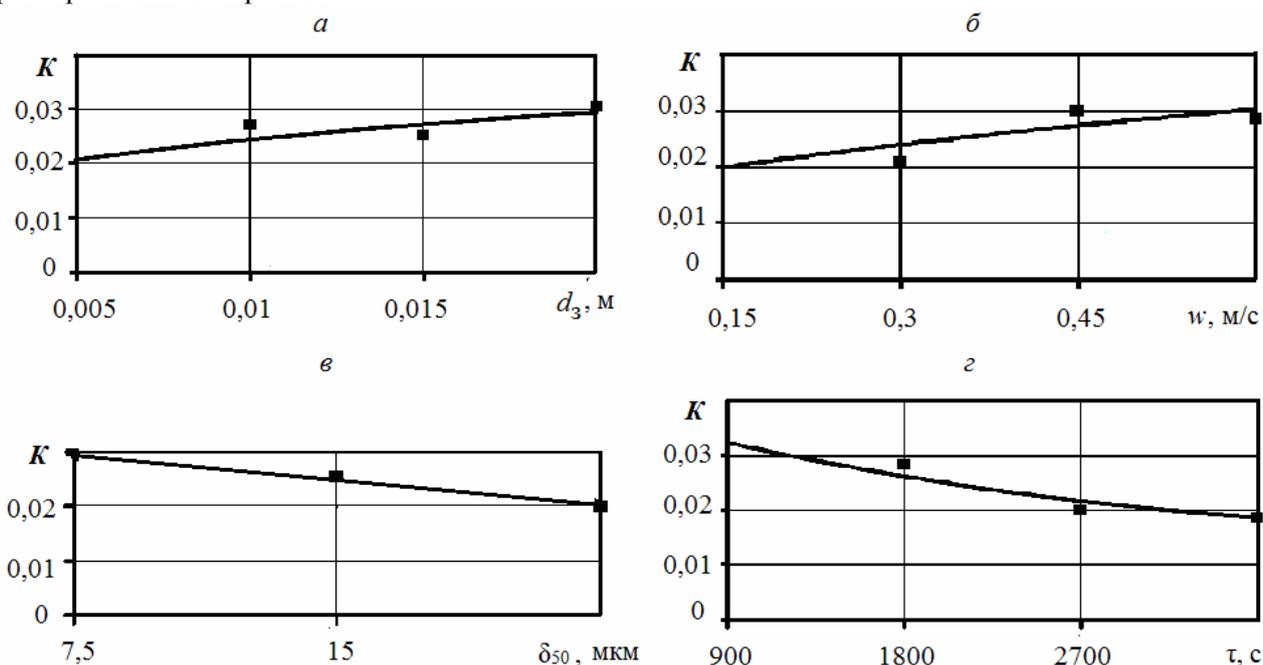


Рисунок 3. Зависимость величины проскока пыли через клинкерный зернистый слой от основных влияющих факторов:

$a - w = 0,3$ м/с; $\delta_{50} = 15$ мкм; $\tau = 1800$ с;
 $б - d_3 = 0,01$; $\delta_{50} = 15$ мкм; $\tau = 1800$ с; $в - d_3 = 0,01$; $w = 0,3$ м/с; $\tau = 1800$ с;
 $г - d_3 = 0,01$; $\delta_{50} = 15$ мкм; $w = 0,3$ м/с;
 — — — — — расчет; ■ — эксперимент

Анализ формулы (15), а также кривых на рис. 3 позволяет спроектировать любой зернистый фильтр в зависимости от требований реального производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 351 с.
2. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. – М.: Мир, 1987. – 280 с.
3. Белоусов В.В. Теоретические основы газоочистки. – М.: Металлургия, 1988. – 256 с.
4. Ужов В.Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами. – М.: Химия, 1967. – 344 с.

5. Красовицкий Ю.В., Дуров В.В. Обеспыливание газов зернистыми слоями. – М.: Химия, 1991. – 192 с.

6. Мазус М.Г., Мальгин А.Д., Маргулис Л.М. Фильтры для улавливания промышленных пылей. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.

7. Самохвалов, Н.М. Методика расчета насыпных зернистых фильтров при улавливании пыли / Н.М. Самохвалов, Е.В.Скачков // Экология и промышленность России. – 2009. – №4. – С. 33–35.

8. Красовицкий Ю.В., Балтрешас П.Б., Энтин В.И. Обеспыливание промышленных газов в огнеупорном производстве. – Вильнюс: Техника, 1996. – 364 с.