

## **РАСЧЕТ НАСЫПНЫХ ПОРИСТЫХ ПЕРЕГОРОДОК ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ ИЗВЕСТКОВОЙ ПЫЛИ**

*Рассмотрена методика расчета насыпных пористых перегородок со стационарным и динамическим слоем для улавливания пылевидного материала из газового потока на основе математических зависимостей, определяющих пылеулавливающие и аэродинамические характеристики слоев мелкозернистого известняка при улавливании известковой пыли.*

### **Введение**

За циклонной печью количество высокообоженной и высокоактивной извести в дымовых газах может достигать 10 ÷ 20 % от всей произведенной извести. Ее улавливание и возврат в производство представляет собой важную ресурсосберегающую, экологическую и экономическую задачу.

В качестве пылеулавливающего аппарата за циклонной печью для обжига мелкодисперсного известняка предложено использовать насыпную пористую перегородку [1]. При этом насадкой пористой перегородки является технологический материал – относительно крупные фракции обрабатываемого известняка.

Определение конструктивных и режимных параметров насыпной пористой перегородки является важной задачей, обеспечивающей эффективную работу перегородки.

### **Постановка задачи**

Ранее на основе разработанной физической модели в результате обработки экспериментального материала были получены математические зависимости для определения пылеулавливающих и аэродинамических характеристик стационарных и динамических слоев мелкозернистого известняка при улавливании известковой пыли [2, 3]. Согласно этим данным количество уловленной пыли из единицы объема очищаемого газа стационарным слоем равно

$$Z_{1ст} = Z_0 \left[ 1 - 1,4 \cdot 10^{-3} \varepsilon Re^{1,2} St^{-1,0} \left( \frac{d_{п}}{d_3} \right)^{1,2} \left( \frac{Z_0}{\rho_{п}} \right)^{0,1} \left( \frac{H}{d_3} \right)^{-2,0} No^{1,2} \right], \text{ кг/м}^3, \quad (1)$$

а динамическим слоем (стабилизированная величина уловленной пыли) –

$$Z_{1д} = Z_0 \left[ 1 - 1,35 \varepsilon Re^{3,4} St^{-1} \left( \frac{d_{п}}{d_3} \right)^{1,2} \left( \frac{Z_0}{\rho_{п}} \right)^{0,1} \left( \frac{H}{d_3} \right)^{1,2} \left( \frac{H}{h} \right)^{-2,6} No_{д}^{-1,3} \right], \text{ кг/м}^3, \quad (2)$$

где  $Z_0$  – запыленность газа перед слоем, кг/м<sup>3</sup>;  $Re = \frac{w d_3 \rho_{г}}{\mu}$  – число Рейнольдса;

$St = \frac{d_{п}^2 w \rho_{п}}{\mu d_3}$  – число Стокса;  $No = \frac{w \tau}{d_3}$  – число гомохронности для стационарного слоя;

$No_{д} = \frac{w \tau_{д}}{d_3}$  – число гомохронности для динамического слоя;  $\tau$  – время работы пористой насадки, с;  $\tau_{д} = \frac{h}{w_{сл}}$  –

время полной замены насадки в зоне улавливания пыли (время стабилизации пылеулавливающих и аэродинамических характеристик динамического слоя [1]), с;  $\varepsilon$  – порозность слоя;  $d_3, d_{п}$  – средний размер частиц засыпки слоя и частиц пыли, м;  $\rho_{п}, \rho_{г}$  – соответственно, плотность частиц пыли и плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $w$  – скорость газа, м/с;  $w_{сл}$  – скорость движения слоя насадки, м/с;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости газа, кг/м·с;  $H, h$  – соответственно, толщина и высота слоя, м.

Уравнения (1) – (2) позволяют определить и другие пылеулавливающие характеристики пористых перегородок – степень очистки газов, величину проскока пыли, остаточную запыленность газа, а также перенос массы пыли по толщине слоя в виде функции  $Z_1 = f(H)$ .

Полное аэродинамическое сопротивление насыпных слоев при улавливании известковой пыли характеризуется уравнениями:

- для стационарного слоя

$$Eu_{ст} = 21,51 \frac{H}{d_3} \frac{(1-\varepsilon)\Phi}{\varepsilon^3} Re_{сл}^{-0,53} + 0,21 \frac{St}{Re} \left( \frac{d_{п}}{d_3} \right)^{-1,8} \left( \frac{Z_0}{\rho_{п}} \right)^{1,1} \left( \frac{H}{d_3} \right)^{0,5} No^{1,2}; \quad (3)$$

- для динамического слоя (стабилизированная величина)

$$Eu_{д} = 21,51 \frac{H}{d_3} \frac{(1-\varepsilon)\Phi}{\varepsilon^3} Re_{сл}^{-0,53} + 7,8 \cdot 10^{-3} \frac{St}{Re} \left( \frac{d_{п}}{d_3} \right)^{-1,8} \left( \frac{Z_0}{\rho_{п}} \right)^{1,1} \left( \frac{H}{d_3} \right)^{0,8} \left( \frac{H}{h} \right)^{-0,3} No_{д}^{1,3}, \quad (4)$$

где  $Eu = \frac{\Delta p}{w^2 \rho_r}$  – число Эйлера для запыленного слоя насадки,  $Re_{сл}$  – модифицированное число Рейнольдса [1];  $\Phi$  – коэффициент формы частиц перегородки (для известняка  $\Phi = 1,37$ ).

При расчете насыпной пористой перегородки для улавливания известковой пыли, в частности, за циклонной печью для обжига мелкодисперсного известняка, зависимости (1) – (4) необходимо использовать в качестве базовых.

### Расчет насыпных пористых перегородок

Параметры, определяющие пылеулавливающие и аэродинамические характеристики насыпных пористых перегородок, в общем случае можно условно разделить на режимные, параметры слоя и параметры, характеризующие дисперсный поток перед пористой перегородкой.

К параметрам дисперсного потока относятся плотность  $\rho_r$  и вязкость  $\mu$  газа, начальная концентрация пыли в газовом потоке  $Z_0$ , размер  $d_p$  и плотность  $\rho_p$  частиц пыли, расход  $V_{дг}$  и температура  $t_{дг}$  газа.

Режимные параметры определяют время улавливания  $\tau$ , характеризуют газовую нагрузку на слой перегородки и расход зернистого материала, к ним относятся скорость газового потока  $w$  и скорость движения слоя  $w_{сл}$ .

Параметры слоя оцениваются порозностью  $\varepsilon$ , толщиной  $H$  и высотой  $h$  слоя, а также размером частиц засыпки  $d_3$ .

Для определения размеров пористой перегородки, а именно ее площади, необходимо предварительно задаться скоростью газового потока, величину которой следует выбирать равной  $w = 0,1 \div 0,5$  м/с. Тогда площадь пористой перегородки будет равна

$$S_{\Phi} = \frac{V_{дг}}{w}, \text{ м}^2. \quad (5)$$

Эксплуатационные показатели работы пористой перегородки (конечную концентрацию пыли в газовом потоке и сопротивление) рассчитывают после определения параметров слоя для конкретного материала засыпки. При этом расчет пористых перегородок со стационарным и динамическим слоем имеет свои особенности.

Пылеулавливающие характеристики пористых перегородок со стационарным слоем в процессе эксплуатации ухудшаются [3], одновременно с этим увеличивается их аэродинамическое сопротивление. При достижении определенной величины сопротивления возникает необходимость в регенерации слоя или его замене новым материалом.

Это обусловлено технологическими условиями, в частности, возможностями применяемых тягодутьевых средств. Обычно сопротивление насыпных пористых перегородок находится в пределах  $500 \div 3000$  Па [4].

При полной замене слоя материала с уловленной пылью характер изменения его пылеулавливающей способности и аэродинамического сопротивления повторяется в каждом цикле. Цикл определяется продолжительностью непрерывной работы пористой перегородки при изменении ее сопротивления от начального до максимального значения.

Продолжительность цикла улавливания пыли пористой перегородкой со стационарным слоем определяется из преобразованного уравнения (3) и составляет

$$\tau' = 3,671 \frac{d_3}{w} (Eu_{ст} - Eu)^{0,833} \left( \frac{Re}{St} \right)^{0,833} \left( \frac{d_{п}}{d_3} \right)^{1,5} \left( \frac{Z_0}{\rho_{п}} \right)^{-0,917} \left( \frac{H}{d_3} \right)^{-0,417}, \text{ с.} \quad (6)$$

В этом случае величиной максимального сопротивления слоя  $\Delta p_{ст}$  задаются. Количество уловленной пыли определяется выражением (1) при подстановке в него численного значения  $\tau'$ , а максимальное значение остаточной концентрации пыли в газовом потоке в конце каждого цикла определяется зависимостью

$$Z_k = Z_0 - Z_{лст}, \text{ кг/м}^3. \quad (7)$$

Сопротивление пористой перегородки растет в основном за счет слоев с повышенным пылесодержанием. Их толщина при улавливании известковой пыли составляет  $20 \div 25$  % всей толщины слоя. В связи с этим целесообразно производить замену части слоя пористой перегородки с наибольшим количеством уловленной пыли.

При замене части слоя общее сопротивление перегородки в начале каждого цикла выше первоначального значения. При частичной замене слоя остаточное сопротивление незаменимой части слоя с каждым циклом увеличивается. Это является причиной сокращения продолжительности циклов. В конечном итоге требуется полная замена слоя пористой перегородки. Следует отметить, что при частичной замене слоя материала увеличивается остаточная концентрация пыли в газовом потоке, которая с каждым циклом возрастает.

В рассмотренных случаях параметром, лимитирующим процесс улавливания пыли, является сопротивление стационарного слоя перегородки. Однако, часто к качеству улавливания пыли предъявляются вполне определенные требования, обуславливающие максимальную концентрацию пыли в выбрасываемом в атмосферу газе. В этом случае лимитирующим параметром является максимальная конечная

концентрация пыли, и продолжительность цикла улавливания найдем из преобразованной зависимости (1)

$$\tau' = 238,9 \frac{d_3}{w} \varepsilon^{-0,833} \left( \frac{Z_K}{Z_0} \right)^{0,833} Re^{-1,0} St^{0,833} \left( \frac{d_{II}}{d_3} \right)^{-1,0} \left( \frac{Z_0}{\rho_{II}} \right)^{-0,083} \left( \frac{H}{d_3} \right)^{1,667}. \quad (8)$$

При этом значение сопротивления пористой перегородки определяется уравнением (3), количество уловленной пыли – уравнением (1) после подстановки в них найденной величины продолжительности цикла  $\tau'$ .

Расчет стабилизированных величин пылеулавливающих и аэродинамических характеристик пористой перегородки с динамическим слоем насадки выполняется с помощью уравнений (2) и (4), при этом кроме прочих параметров следует предварительно задаваться высотой слоя  $h$ .

Улавливание пыли из газового потока пористыми перегородками с динамическим слоем имеет свои особенности, заключающиеся в изменении газовой нагрузки по высоте динамического слоя в связи с изменением пыленасыщенности насадки и, следовательно, ее газопроницаемости. Под газопроницаемостью слоя понимается величина, обратная его аэродинамическому сопротивлению при одинаковой газовой нагрузке. Газопроницаемость верхней части динамического слоя, как наименее пыленасыщенной, имеет максимальное значение и скорость газа здесь максимальная.

Скорость газового потока в динамическом слое уменьшается сверху вниз по мере насыщения слоя пылью. В верхней части динамического слоя локальная скорость значительно превосходит ее среднее значение и, как оказалось, при определенных условиях может зажимать движущийся слой материала, что является причиной его зависания и разрыва.

Величина пылесодержания изменяется по высоте движущегося слоя. Пылесодержание движущегося слоя – это количество пыли, уловленной единицей объема зернистого материала

$$m = m_{ул} = \frac{M_{ул}}{V_M} = \frac{Z_{1д} w \tau_D}{H}, \text{ кг/м}^3, \quad (9)$$

где  $M_{ул}$  – абсолютное количество пыли, уловленное слоем высотой  $h$ , кг;  $V_M$  – объем зернистого материала,  $\text{м}^3$ , которые равны

$$M_{ул} = Z_{ул} w S_{\Phi} \tau_D, \text{ кг}, \quad (10)$$

$$V_M = w_{сл} \frac{S_{\Phi} H}{h} \tau_D = S_{\Phi} H, \text{ м}^3. \quad (11)$$

При выборе значений скорости газового потока и скорости движения слоя необходимо соблюдать условие устойчивой работы дина-

мического слоя без риска его зависания при насыщении уловленной пылью

$$P = \frac{Z_0 W}{\rho_{\Pi} W_{\text{сл}}} < 4 * 10^{-2}. \quad (12)$$

Уравнения (2) и (4) позволяют определять пылеулавливающие и аэродинамические характеристики многослойных пористых перегородок с динамическими слоями насадки, а дополнительное использование выражений (1) и (3) дает возможность выполнять расчеты комбинированных пористых перегородок с динамическим и стационарным слоем.

Полученные результаты были использованы при расчете насыпной пористой перегородки для улавливания известковой пыли за промышленной известково-обжиговой циклонной печью. Циклонная печь представляет собой агрегат непрерывного действия, поэтому для улавливания пыли за печью целесообразно использовать пористую перегородку с динамическим слоем, имеющую стабильные аэродинамические характеристики, не оказывающие влияния на работу печи.

При проектировании аппарата с насыпной пористой перегородкой необходимо, прежде всего, стремиться к его минимальным габаритам при минимальном расходе зернистого материала, кроме этого должны соблюдаться условия максимального улавливания технологического продукта из дымовых газов и сопротивление аппарата не должно превышать допустимый уровень.

Совместное решение уравнений (2) и (4) позволяет получить зависимость для определения высоты слоя

$$h = H \left[ \frac{Z_k (Eu_D - Eu)}{10,53 \cdot 10^{-3} \varepsilon Z_0 Re^{2,4} \left( \frac{d_{\Pi}}{d_3} \right)^{-0,6} \left( \frac{Z_0}{\rho_{\Pi}} \right)^{1,2} \left( \frac{H}{d_3} \right)^{2,0}} \right]^{\frac{1}{2,9}}, \text{ м.} \quad (13)$$

В этом случае предварительно необходимо определиться с конечной концентрацией пыли в газовом потоке (или с количеством улавливаемой пыли), со стабилизированной величиной аэродинамического сопротивления пористой перегородки, скоростью газового потока и толщиной слоя.

После определения высоты слоя  $h$  пористой перегородки нетрудно определить скорость движения слоя из преобразованных зависимостей (2) или (4)

$$w_{\text{сл}} = \frac{hw}{d_3} \left[ \frac{Z_K}{1,35\varepsilon Z_0 \text{Re}^{3,4} \text{St}^{-1} \left(\frac{d_{\text{п}}}{d_3}\right)^{1,2} \left(\frac{Z_0}{\rho_{\text{п}}}\right)^{0,1} \left(\frac{H}{d_3}\right)^{1,2} \left(\frac{H}{h}\right)^{-2,6}} \right]^{1,3}, \text{ м/с}, \quad (14)$$

$$w_{\text{сл}} = \frac{hw}{d_3} \left[ \frac{7,8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{St}}{\text{Re}} \left(\frac{d_{\text{п}}}{d_3}\right)^{-1,8} \left(\frac{Z_0}{\rho_{\text{п}}}\right)^{1,1} \left(\frac{H}{d_3}\right)^{0,8} \left(\frac{H}{h}\right)^{-0,3}}{\text{Eu}_d - \text{Eu}} \right]^{1,3}, \text{ м/с}. \quad (15)$$

В результате выполненных расчетов были определены значения основных технологических параметров насыпной пористой перегородки с динамическим слоем для улавливания пылевидной извести за промышленной циклонной печью. Оснащение циклонной печи пористой перегородкой позволит улавливать до 1440 кг/ч высококачественной извести, при этом сопротивление пористой перегородки не превышает 2500 Па при толщине слоя 0,12 м, расход материала засыпки 1613 кг/ч, скорость газа через перегородку 0,35 м/с.

### Выводы

Предложена методика расчета насыпных пористых перегородок со стационарным и динамическим слоем для улавливания пылевидного материала из газового потока на основе математических зависимостей, определяющих пылеулавливающие и аэродинамические характеристик слоев мелкозернистого известняка при улавливании известковой пыли.

Методика была использована при разработке технологического задания и проектировании промышленного образца насыпной пористой перегородки с динамическим слоем за циклонной печью для улавливания мелкодисперсной извести.

Предложенная методика может быть использована при расчете насыпных пористых перегородок для улавливания известковой пыли за другими обжиговыми агрегатами, а также для улавливания любых других пылей. Однако в последнем случае необходима корректировка базовых уравнений на основе экспериментальных данных.

### Список литературы

1. Розенгарт Ю.И., Федоров О.Г., Бойко В.Н. и др. Фильтрование запыленных газов движущимся слоем зернистого материала // *Металлургия и коксохимия*. – Киев: Техніка. – 1975. – № 45. – С. 71 – 73.
2. Бойко В.Н. Исследование аэродинамических характеристик зернистых слоев при однофазной фильтрации // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2001. – № 3. – С. 75 – 77.
3. Бойко В.Н. Моделирование осаждения пыли в насыпных пористых перегородках при фильтровании запыленных газов // *Металлургическая теплотехника: Сб. научн. тр. НМетАУ*. – Т. 9. – Днепропетровск: НМетАУ. – 2003. – С. 78 – 86.
4. Ужов В.Н., Мягков Б.И. Очистка промышленных газов фильтрами. – М.: Химия, 1970. – 320 с.

*Рукопись поступила 10.03.2008 г.*