

УДК 697.98

ПРИЕМОВ С.И.¹, ЗАБОЛОТНЫЙ В.Н.²¹Институт технической теплофизики НАН Украины²Глуховецкий горно-обогатительный каолиновый комбинат

К РАСЧЕТУ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕ- И ЗОЛОУЛАВЛИВАНИЯ ЗЕРНИСТЫМИ ФИЛЬТРАМИ

Визначено числові значення коефіцієнтів, необхідних для використання „енергетичного методу” розрахунку загальної ефективності пило- і золоуловлювання у зернистих фільтрах, та одержано залежність для оцінки величини оптимальної швидкості фільтрації. Метод дозволяє (без традиційно застосовуваних спеціальних таблиць, графіків, транспортирів) з високою точністю виконувати розрахунки ще на стадії проектування і підбору пиловловлюючого устаткування.

Определены численные значения коэффициентов, необходимых для использования „энергетического метода” расчета общей эффективности пыле- и золоулавливания в зернистых фильтрах, и получена зависимость для оценки величины оптимальной скорости фильтрации. Метод позволяет (без традиционно используемых специальных таблиц, графиков, транспортиров) с высокой точностью выполнять расчеты еще на стадии проектирования и подбора пылеулавливающего оборудования.

In the articles numerical values of factors for use of “energy method” of the calculation of the efficiency of dust and ash catchment by granular filters are determined and the dependence for the value assessment of optimal speed of filtration is received. The method allows (without traditionally used special tables, graphs, and protractors) to execute the calculations on the stage of design and dust-collection equipment selection with high accuracy.

 d_3 — диаметр зерен фильтра; d_{50} — медианный диаметр пыли; $d_{\eta 50}$ — диаметр частиц, улавливаемых в пылеуловителе с эффективностью 50%; $H_{\text{сл}}$ — высота слоя зернистого заполнителя; K_r — удельная энергия, затрачиваемая на пылеулавливания; K_n, K_k — начальная и конечная концентрация пыли; L_r — расход очищаемого газа; $N_{\text{ч}}$ — число единиц переноса; ΔP — гидравлическое сопротивление пылеуловителя; q — удельная газовая нагрузка; t_r — температура газа; V — скорость; η — общая степень очистки; ρ_p — плотность пыли; σ_p, σ_{η} — дисперсия распределения частиц пыли по размерам и распределения фракционных эффективностей очистки пылеуловителя; ξ — коэффициент гидравлического сопротивления пылеуловителя;

ПДВ — предельно-допустимые выбросы из пылеуловителя.

Индексы:

опт — оптимальный;

кр — критический;

г — газ;

зф — зернистые фильтры;

св — скруббер Вентури.

В последнее время наметилась тенденция создания пыле- и золоулавливающих аппаратов с фильтрующей насадкой из зернистых материалов для использования в различных отраслях промышленности (в том числе и в малых котельных). Причиной этого является как ряд их преимуществ, в сравнении с другими пылеуловителями, так и тенденция роста цен на энергоносители и др. Этим можно объяснить повышенный интерес к разработке новых

конструкций зернистых фильтров и методов расчета основных характеристик их работы — эффективности пыле- и золоулавливания и др.

Для расчета эффективности улавливания пыли сухих и мокрых пылеуловителей (циклонного типа, скрубберов Вентури и др.) существует два основных метода — фракционный и энергетический [1, 2].

Фракционный метод базируется на знании двух параметров дисперсности пыли на входе в

аппарат (d_{50}, σ_{η}) и двух параметров пофракционной степени очистки ($d_{\eta 50}, \sigma_{\eta}$).

Степень очистки потока от пыли оценивается по зависимости

$$\eta_{\text{общ}} = \Phi(t) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^t (\exp)^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (1)$$

$$\text{где } t = \frac{\lg d_{50} - \lg d_{\eta 50}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_n + \lg^2 \sigma_{\eta}}}. \quad (2)$$

Для основных пылеулавливающих аппаратов получены зависимости для оценки величин ($d_{\eta 50}, \sigma_{\eta}$).

Например, для наиболее распространенных пылеуловителей – циклонов и скрубберов Вентури величины $d_{\eta 50}$ рассчитываются по зависимостям [3, 4]:

$$d_{\eta 50} = 64,35(\xi_{\sigma_0})^{-0,51} \quad \text{– для циклонов,} \quad (3)$$

$$d_{\eta 50} = 188,32K_T^{-0,645} \quad \text{– для скрубберов Вентури.} \quad (4)$$

Однако наиболее точно эффективность пылеулавливания может быть рассчитана с помощью так называемого “энергетического метода”, при котором эффективность рассматривается как функция затрат энергии [2].

Эффективность пылеулавливания является экспоненциальной функцией и может быть записана в виде

$$\eta = 1 - \exp(-AK_T^B), \quad (5)$$

где A и B – экспериментально определяемые коэффициенты.

В интервале высоких значений коэффициентов очистки (0,98...0,99) изменения величины η малоощутимы, поэтому здесь часто используется понятие числа единиц переноса, аналогичное применяемому в процессах с тепло- и массообменом.

Число единиц переноса находят по формуле [2]

$$N_{\text{ч}} = \ln \frac{1}{1-\eta}. \quad (6)$$

Из (5) и (6) следует, что

$$N_{\text{ч}} = AK_T^B. \quad (7)$$

Для пылей ряда производств найдены значения коэффициентов A и B .

Например, при улавливании в скрубберах Вентури каолиновой пыли $A = 2,34 \cdot 10^{-4}$; $B = 1,115$ [2].

Значение K_T , найденное из (7), позволяет определить гидравлическое сопротивление пылеуловителя и выбрать необходимые тягодутьевые устройства.

В настоящей работе сделана попытка использования “энергетического метода” расчета общей эффективности очистки зернистыми фильтрами по зависимостям, аналогичным (5 – 7).

Авторами проведены исследования по фильтрации запыленных газов с каолиновой пылью после сушильных барабанов в зернистых фильтрах в диапазоне скоростей, принимаемых при очистке промышленных газов (0,15...0,6 м/с). В качестве наполнителя использовался кварцевый песок (с эквивалентным диаметром зерна 2,5 мм) высотой – 0,15...0,2 м. Установлено, что оптимальная скорость газов в зернистом слое удовлетворительно описывается зависимостью вида

$$V_{\text{опт}} = 0,044d_3^{-0,3}. \quad (8)$$

Расчеты по (8) удовлетворительно совпадают и с экспериментальными данными работы [5], в которой сделан вывод о том, что для улавливания мелкодисперсных пылей с размером частиц $1 \leq d_{50} \leq 5$ мкм пригодны слои толщиной 0,15...0,18 м с размерами зерен в пределах 1,5... 3 мм (эквивалентный диаметр 2...2,5 мм), при скоростях фильтрации от 0,18 до 0,25 м/с.

В табл. 1 приведены данные по исследованию эффективности пылеулавливания различных пылей зернистыми фильтрами [6–13].

В графе 11 табл.1 приведены расчетные значения оптимальных скоростей, рассчитанные по зависимости (8), в графе 12 – значения критических скоростей газа, (при которых $\eta = \eta_{\text{min}}$) рассчитанные по зависимости [5]

$$V_{\text{кр}} \cong 6,3\sqrt{d_3}.$$

Как видно из данных табл. 1, основные параметры работы зернистых фильтров ($d_3, V_T, H_{\text{сл}}$) во

Табл. 1. Данные по эффективности пылеулавливания зернистыми фильтрами

Характеристика улавливаемой пыли	Параметры																Литература	
	Газового потока						Зернистого слоя						Эффективности очистки					
	d_{90} $\times 10^3$, м	$\sigma_{п}$	$\rho_{п1}$, кг/м ³	$K_{гп}$, г/м ³	$t_{гп}$, °C	$V_{гп}$, м/с	q , м ³ /м ² ч	$d_3 \times 10^3$, м	$H_{сгп}$, м	$V_{гп}$, м/с	$V_{гп}^{опт}$, м/с	$V_{гп}^{кр}$, м/с	$\Delta P_{гп}$, Па	$K_{гп}$, кДж/ 1000м ³	$N_{гп}^э$	$\eta^э$, %		$\eta^р$, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0,45	-	2235	0,08-1	400-550	0,333 0,25	1200 900	-	0,15 0,15	0,333 0,25	-	-	1100 900	1100 900	3,44 3,0	96,8 95,0	96,52 94,0	3,36 2,81	[6]
7,2 9,2	3,1 3,4	2270 2590	-	-	0,28	1000	1-2	-	0,28 0,31	0,31	0,245	1220 1600	1220 1600	3,5 4,605	97,0 99,0	97,48 99,08	3,685 4,69	[7]
8-9	-	-	13-24	100-150	0,344 0,25	124 0	0,5- 3,0	-	0,344 0,25	0,296	0,265	1960 1440	1960 1440	5,0 3,91	99,5 98,0	99,63 98,6	5,62 4,27	[8]
1-2	-	-	0,3-6	200-280	0,21	-	2,7	-	0,21	0,26	0,388	1000 1440 1960	1000 1440 1960	3,21 4,6 5,0	96,0 99,0 99,5	95,44 98,6 99,5	3,09 4,27 5,62	[9]
15,0	-	-	-	-	0,277	1000	3-6 1,5- 6	0,15	0,277	0,222 0,235	0,425 0,387	900 630 900 630	900 630 900 630	2,52 1,61 3,21 1,97	92,0 80,0 96,0 86,0	94,0 87,0 94,0 87,0	2,81 2,05 2,81 2,05	[10]
3,0	3,0	-	0,22-1	-	0,222	800- 1100	2-4	0,1	0,222	0,25	0,346	1500 1000	1500 1000	3,91 2,73	98,0 93,5	98,8 95,44	4,43 3,09	[11]
5,0	1,5	3120	0,9-1,1	50-240	0,25- 0,33	900- 1200	0,5- 2,8	-	0,25- 0,33	0,3	0,274	1300 1400 1500 2000	1300 1400 1500 2000	2,81 3,21 3,91 4,605	94,0 96,0 98,0 99,0	98,00 98,4 98,8 99,67	3,9 4,16 4,43 5,72	[12]
3,0	-	2600	-	-	0,25	900	1,5- 3,0	0,15	0,25	0,274	0,3	500 750 1000	500 750 1000	1,61 2,3 3,0	80,0 90,0 95,0	81,1 90,83 95,44	1,67 2,39 3,09	[13]
после ЦИКЛО- НОВ $d_{90} \sim 2\text{м}$ КМ	-	2600	2,0	150- 200	0,2- 0,25	720- 900	-	0,15- 0,25	0,2- 0,25	-	-	500 750 1000 1500 2000	500 750 1000 1500 2000	1,65 2,43 13,3 4,4 5,3	80,85 91,22 96,3 98,75 99,47	81,1 90,83 95,44 98,81 99,67	1,665 2,389 3,087 4,428 5,72	Опыты авторов с пылью каолина

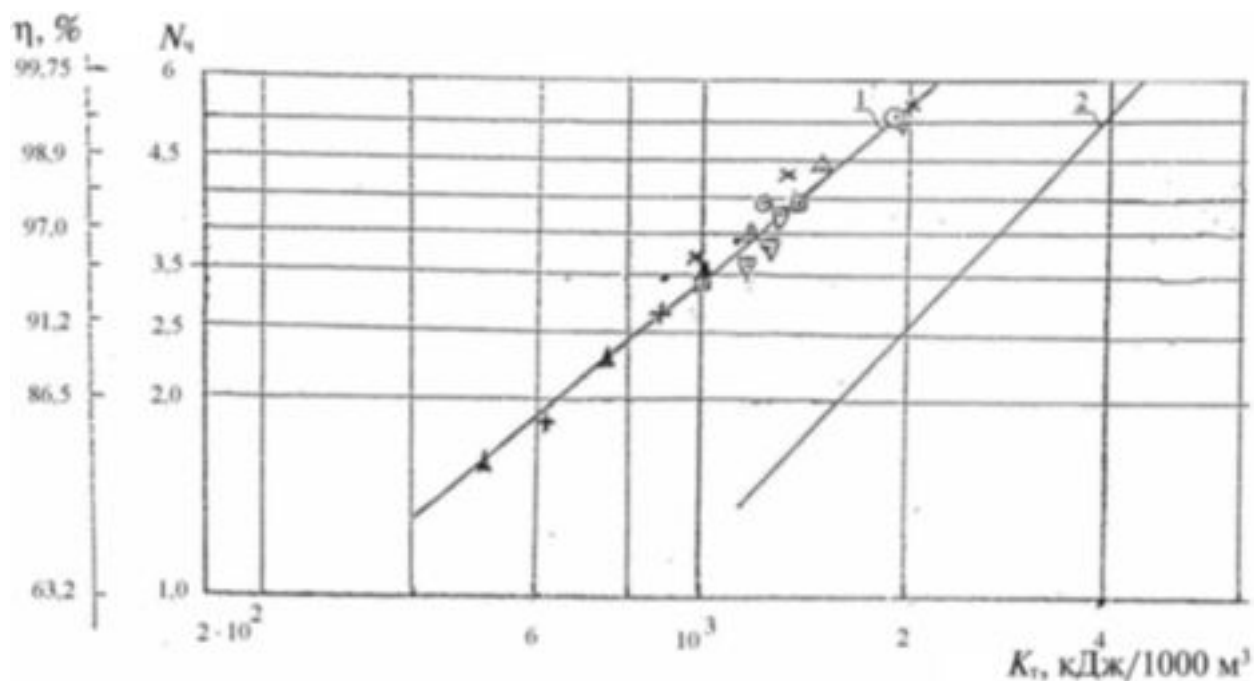


Рис. Зависимость эффективности пылеулавливания от энергетических затрат:
1 — в зернистых фильтрах; 2 — каолиновой пыли в скруббере Вентури.

всех рассматриваемых работах были практически оптимизированы, т.е. соответствовали условиям достижения максимальной эффективности пылеулавливания.

На рис. приведены данные по зернистым фильтрам (линия 1) в логарифмических координатах, а для сравнения (линия 2) и данные, характеризующие очистку газов от каолиновой пыли в скрубберах Вентури [14].

В таких координатах формула (7) представляет собой прямую линию, тангенсом угла наклона которой к оси абсцисс является B . Величину A находят при пересечении прямой с линией, соответствующей значению $K_T = 1$.

Для очистки газов в зернистых фильтрах нами определены следующие значения величин A и B в формулах (5) и (7):

$$A = 6,6 \cdot 10^{-3}; B = 0,89.$$

Таким образом, эффективность очистки от пыли в зернистых фильтрах может быть определена по зависимостям:

$$\eta = 1 - \exp(-6,6 \cdot 10^{-3} K_T^{0,89}); \quad (9)$$

$$N_q = 6,6 \cdot 10^{-3} K_T^{0,89}. \quad (10)$$

В табл. 2 приведены некоторые результаты расчетов по (9) и (10) для разных величин K_T для зернистых фильтров и экспериментальные данные испытаний труб Вентури при очистке от каолиновой пыли [14].

Как видно из табл. 2, в зернистых фильтрах, например, при улавливании высокодисперсной каолиновой пыли ($d_{50} \sim 2$ мкм) можно в 2,0...3 раза иметь меньшие величины удельной энергии, затрачиваемой на пылеулавливание (K_T), чем в наиболее универсальном из скрубберов — в скруббере Вентури.

Например, для условий очистки газов от пыли каолина после сушильных барабанов Глуховецкого ГОКК (ПДВ = 0,5 г/с, $L_r = 25,7$ тыс.м³/ч, $K_H = 2$ г/м³, $K_K = 0,07$ г/м³)

$$\eta = \left(\frac{K_H - K_K}{K_H} \right) 100 = 96,5 \%;$$

$$N_q = 3,352,$$

откуда $K_T = 1097$ кДж/1000 м³.

Табл. 2. Расчетная эффективность очистки от пыли в зернистых фильтрах и от каолиновой пыли в скруббере Вентури

η	96,0	96,5	97,0	97,5	98,0	98,5	99,0	99,25	99,5
N_q	3,219	3,352	3,506	3,688	3,912	4,2	4,605	4,893	5,3
$(K_T)_{3Ф}$	1048	1097	1154	1221	1267	1413	1567	1678	1835
$(K_T)_{СВ}$									
одноступенчатый	3900	4045	4211	4407	4647	4953	5379	5680	6101
двухступенчатый	2600	2697	2807	2940	3100	3302	3586	3787	4067

Из табл. 2 видно, что при $\eta = 96,5\%$ и $N_q = 3,352$ потребуется величина удельных энергозатрат $K_T = 1100$ кДж/1000 м³, что соответствует необходимому напору 1100 Па.

При анализе данных, полученных путем расчетов эффективности пылеулавливания в зернистых фильтрах, и данных исследований разных авторов (табл. 1) (при оптимальных условиях) обращает на себя внимание важный факт практического отсутствия влияния дисперсности улавливаемой пыли ($d_{50} \approx 0,45...15$ мкм) на эффективность очистки, т.е. на величины d_{50} и σ_p .

Такой вывод удовлетворительно коррелирует с данными Красовицкого Ю.В. [15].

Это свидетельствует о том, что использование, например, фракционного метода для расчета эффективности пылеулавливания по (1) и (2) в зернистых фильтрах может привести к неадекватному описанию процесса очистки.

В графах 16 и 17 табл. 1 приведены данные сопоставления экспериментальных и расчетных эффективностей очистки в зернистых фильтрах. Среднее отклонение расчетных и экспериментальных данных по эффективности пылеулавливания составляет не более 1,2 %. Это свидетельствует о высокой точности расчетов эффективности улавливания пылей различной дисперсности в зернистых фильтрах по предлагаемому – “энергетическому методу”. Таким образом, использование предложенных зависимостей (8 – 10) позволяет более точно рассчитывать пыле- и золоуловители с зернистыми наполнителями еще на стадии проектирования или при изменившихся требованиях в условиях произ-

водства, а также резко сократить затраты времени и объем экспериментальных работ при разработке новых видов зернистых пыле- и золоуловителей для решения различных технологических задач энергетики и других отраслей промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов Н.К. Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, – 1981. – 392 с.
2. Справочник по пыле- и золоулавливанию. Под общ. Ред. А.А. Русанова. – М.: Энергоатомиздат, 1975. – 312 с.
3. Вальдберг А.Ю. К расчету эффективности мокрых пылеуловителей //Теор.основы хим.технологии. –1987. – № 3. – С. 407 – 411.
4. Вальдберг А.Ю., Кирсанова Н.С. К расчету эффективности циклонных пылеуловителей //Теор.основы хим.технологии. –1989. – Т. 23, №4. – С. 555–556.
5. Волобуев В.Е., Куркин В.П. Выбор рациональных скоростей фильтрации в зернистых слоях // Промышленная и санитарная очистка газов. – 1982. – № 3. – С. 10–11.
6. Сидоренко Н.А., Багдасарова В.А., Башкардин В.Я. Зернистые фильтры для очистки газов регенерации шарикового катализатора с установок каталитического крекинга //Химия и технология топлив и масел. –1979. – № 8. – С. 16 – 17.
7. Башкардин В.Я., Красовицкий Ю.В., Сергачева В.Н. Регенерация зернистых фильтров мето-

дом импульсного псевдооживления слоя // Промышленная и санитарная очистка газов. — 1981. — № 2. — С. 2—3.

8. Чумарный В.И., Алексеев Н.И., Волобуев В.Е. и др. Очистка газов сушильного барабана от магнетитовой пыли зернистым фильтром с движущимся слоем // Промышленная и санитарная очистка газов. — 1976. — № 3. — С. 1—3.

9. Чумарный В.И., Акимова Н.А., Суханов В.М. Очистка газов руднотермических печей в зернистых фильтрах // Цветные металлы. — 1978. — № 7. — С. 69—70.

10. Волобуев В.Е., Гончаренко В.К., Куркин В.П. Влияние проницаемости зернистых слоев на процесс фильтрации запыленного газа // Промышленная и санитарная очистка газов. — 1979. — № 1. — С. 10—11.

11. Степанец Л.Г., Вавилов В.А., Измоденов Ю.А. и др. Очистка газов электросталеплавильных печей в аппаратах со стационарной зернистой насадкой // Сталь. — 1987. — № 3. — С. 100—103.

12. Башкардин В.Я., Сагалевиц Ю.Д., Басаргин Б.Н. и др. Очистка газов в зернистых фильтрах при производстве огнеупоров // Огнеупоры. — 1992. — № 10. — С. 38—42

13. Гончаренко В.К., Куркин В.П. Расчет эффективности зернистых фильтров // Промышленная и санитарная очистка газов. — 1983. — № 3. — С. 6—7.

14. Брыляков В.Е., Ещенко Л.И. Результаты производственных исследований по обеспыливанию тонкодисперсных каолиновых аэрозолей в турбулентных промывателях // Тр. НИПИОСТРОМ. — 1973. — вып. VII. — С. 39—44.

15. Красовицкий Ю.В., Ермолаев М.И., Красовицкая К.А., Лыгина В.Я. Некоторые особенности планирования эксперимента при разработке эффективных способов тонкой очистки газов в производстве полупроводниковых приборов. Планирование и автоматизация в научных исследованиях. — М.: Сов. Радио, 1974. — С. 304—308.

Получено 01.10.2007 г.