

Чалов В. А., аспирант,
Куцев Л. А., д-р техн., наук, проф.,
Шаптала В. Г., д-р техн., наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЦЕНТРОБЕЖНОГО ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ

chalov-v@mail.ru

Вероятностно-энергетический метод оценки эффективности циклонов широко используется в практике обеспыливания, однако в исходном виде для центробежных пылеуловителей с дополнительной закруткой газового потока он не применим из-за аэродинамических различий аппаратов. На основе проведенного исследования поля скоростей вихревых течений разработана математическая модель осаждения частиц в циклоне с дополнительной закруткой пылегазового потока, позволяющая получить соотношение для расчета δ_{50} .

Путем математического моделирования установлена возможность повышения эффективности улавливания пыли за счет увеличения интенсивности дополнительной закрутки при сохранении и даже определенном снижении расхода очищаемого газа.

Ключевые слова: циклон, эффективность улавливания пыли, гранулометрический состав, пылеулавливание, фракционная степень улавливания, вероятностно-энергетический метод.

Процесс центробежного осаждения частиц, как и другие процессы пылеулавливания, имеет двойственную стохастико-детерминированную природу: направленное к поверхностям осаждения, упорядоченное движение частиц под действием центробежных сил подвергается непрерывным случайным воздействиям со стороны турбулентных пульсаций несущей газовой среды [1].

Турбулентность газовой среды вызывает турбулентную диффузию частиц, направленную в сторону, противоположную их упорядоченному переносу. Взаимодействие этих двух процессов – упорядоченного переноса частиц и их турбулентной диффузии в основном и определяет эффективность пылеулавливания. Заметное влияние на осаждение частиц могут оказывать также во многом случайные процессы взаимодействия частиц с твердыми стенками аппаратов и между собой, процессы коагуляции частиц, их вторичного уноса и другие. Теория турбулентных двухфазных потоков в настоящее время находится в стадии развития [2]. Недостаточно изучены и другие, сопровождающие осаждение частиц, процессы, поэтому создание достаточно полной и точной модели пылеулавливания является очень сложной задачей. В связи с этим в настоящее время для учета стохастического характера процессов улавливания частиц используются приближенные методы, основанные на решении одномерного уравнения Фоккера-Планка [3], на исследовании уравнения конвективной диффузии частиц [4], также на подтверждаемых экспериментально предположениях о характере статистического распределения характеристик пылеуловителей [5].

Суть этих всех методов сводится к обоснованию предположению, что случайная величина фракционной степени улавливания частиц в пылеуловителе подчиняется логарифмически нормальному распределению (ЛНР), что позволяет использовать для прогнозирования фракционной $\eta_{\phi}(\delta)$ и общей η эффективности улавливания частиц, распределенных по логарифмически нормальному закону следующих вероятностных зависимостей:

$$\eta_{\phi}(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy = \varphi(x), \quad (1)$$

$$\text{где } x = \frac{\lg \delta - \lg \delta_{50}}{\lg \sigma_{\eta}}, \quad \sigma_{\eta} = \frac{\delta_{84}}{\delta_{50}} = \frac{\delta_{50}}{\delta_{16}}, \quad (2)$$

$$\eta = \varphi(x), \quad (3)$$

$$\text{где } x = \frac{\lg \delta_{0,5} - \lg \delta_{50}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta} + \lg^2 \sigma_r}}, \quad (4)$$

Здесь $\varphi(x)$ – интеграл вероятностей, значения которого приводятся в специальных таблицах, δ – размер частиц, σ_{η} – среднее квадратическое распределение фракционных коэффициентов очистки; δ_{50} , δ_{16} , δ_{84} – размеры частиц, улавливаемых аппаратом на 50, 16 и 84 процента; $\delta_{0,5}$ – медианный размер частиц, который делит массу пыли на две равные части; σ_r – среднее квадратическое отклонение распределения частиц по размерам. Если размеры частиц подчиняются ЛНР, то имеют место соотношения:

$$\sigma_r = \frac{\delta_{0,5}}{\delta_{0,16}} = \frac{\delta_{0,84}}{\delta_{0,5}} \quad (5)$$

где $\delta_{0,16}$, $\delta_{0,84}$ – размеры частиц для которых массовые доли частиц с меньшими размерами соответственно равны 0,16 и 0,84 (16% и 84%); $\delta_{15,9}$, $\delta_{84,1}$ – размеры частиц, улавливаемых на 15,9% и 84,1%.

Входящие в формулы (1 – 4) параметры σ_η и δ_{50} могут быть найдены экспериментально, но в этом случае результаты расчетов будут описывать работу лишь тех аппаратов для которых получены опытные данные или аналогичных.

Для решения задач рационального проектирования и оптимизации пылеуловителей величины σ_η и δ_{50} необходимо выразить через их конструктивно-технологические параметры. Решение этой задачи для σ_η затруднительно, поэтому для этой величины принимаются опытные значения.

Установлено, что для центробежных пылеуловителей $0,3 \leq \lg \sigma_\eta \leq 0,4$, поэтому в качестве средней принимается величина $\lg \sigma_\eta = 0,35$ [6]. Это же значение $\lg \sigma_\eta$ будем использовать при определении эффективности разработанного пылеуловителя с дополнительной закруткой пылегазового потока.

Для циклонов предлагается ряд формул, выражающих δ_{50} через их конструктивно-технологические параметры. Наиболее точной из них является формула, полученная А. Ю. Вальдбергом и Н. С. Кирсановой [6]:

$$\delta_{50} = 14,5 \cdot 10^5 \xi^{-0,51} \sqrt{\frac{D\mu}{\omega_\pi \rho_r}}, \text{ мкм} \quad (6)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления циклона $8,5 \leq \xi \leq 4420$, μ – динамическая вязкость газа, ρ_r – плотность частиц.

Вероятностно-энергетический метод оценки эффективности циклонов широко используется в практике обеспыливания, однако в исходном виде для центробежных пылеуловителей с дополнительной закруткой газового потока он не применим из-за аэродинамических различий аппаратов. Необходимо новое выражение для δ_{50} , учитывающее специфику разработанного пылеуловителя. На основе проведенного исследования поля скоростей вихревых течений раз-

работана математическая модель осаждения частиц в циклоне с дополнительной закруткой пылегазового потока, позволяющая получить соотношение для расчета δ_{50} .

При разработке модели были приняты следующие допущения:

1. Улавливание частиц пыли происходит лишь в кольцевом канале и периферийной зоне камеры пылеуловителя (осаждению частиц из центрального восходящего вихревого потока препятствует радиальный сток газа);

2. Поскольку скорость радиального стока газа в пристенной области камеры пылеуловителя убывает до нуля, его влиянием на осаждение частиц из нисходящего потока можно пренебречь;

3. Радиус поверхности осаждения частиц в конической части камеры пылеуловителя считаем равным радиусу его цилиндрической части (модельное ухудшение условий улавливания частиц в конической части камеры позволяет учесть его с определенным запасом)

4. Частицы пыли равномерно распределены во входном сечении кольцевого канала.

5. Инерционностью и гравитационным осаждением частиц с размером δ_{50} можно пренебречь и считать их скорость равной скорости газовой среды.

6. Частица считается уловленной, если за время ее пребывания в пылеуловителе она достигает поверхности осаждения.

Продолжительность пребывания частиц в пылеуловителе складывается из отрезков времени, необходимых для прохождения потоком газа кольцевого канала и камеры аппарата:

$$t_z = \frac{H_{\text{КК}}}{w_z} + \frac{H_{\text{КМ}}}{w_z^{\text{сп}}} = \frac{r_2}{w_z} \left(\frac{\tilde{H}_{\text{КК}}}{\tilde{w}_z} + \frac{\tilde{H}_{\text{КМ}}}{\tilde{w}_z^{\text{сп}}} \right) = \frac{r_2}{\tilde{w}_z} B. \quad (7)$$

где B – безразмерная величина, которая выражается через относительные размеры пылеуловителя:

$$B = \tilde{H}_{\text{КК}} (1 - \tilde{r}_1^2) + 2\tilde{H}_{\text{КМ}} \left(\left(1 - \frac{(\tilde{H}_{\text{К}} + \tilde{H}_{\text{КК}} - \tilde{H}_{\text{Ц}})(1 - \tilde{r}_1^2)}{2\tilde{H}_{\text{К}}} \right)^2 + \frac{(\tilde{r}_1 + \tilde{r}_2)}{4} \right), \quad (8)$$

\tilde{W}_z – осевая скорость газа, в кольцевом канале,
 \tilde{W}_z^{cp} – средняя осевая скорость газа в камере циклона.

Для рассматриваемого аппарата $B = 6,237$,
 $t_z = 6,237r/w_u$.

Радиальная скорость движения частиц (скорость осаждения) определяется из равенства действующей на них центробежной силы силе аэродинамического сопротивления, которую для частиц размера δ_{50} можно найти по формуле Стокса:

$$m \frac{v_r^2}{r} = 3\pi\mu\delta V_r, \quad (9)$$

где $m = \rho_r \delta^3/6$ – масса частицы, δ – ее эквивалентный размер, т.е диаметр шара равного с частицей объема, ρ_r – плотность частицы, $v_r = w_r$

$$t_r = \int_{r_0}^{r_2} \frac{dr}{v_r} = \frac{r_2}{\omega_{\Pi}} \int_{\tilde{r}_0}^1 \frac{d\tilde{r}}{\tilde{v}_r} = \frac{r_2}{\omega_{\Pi} k^2 Stk} \int_{\tilde{r}_0}^1 \tilde{r} d\tilde{r} = \frac{r_2(1-\tilde{r}_0^2)}{3\omega_{\Pi} k^2 Stk}. \quad (12)$$

Если частица с размером δ , имеющая во входном сечении кольцевого канала начальное положение $r=r_0$ за время своего пребывания в пылеуловителе достигнет поверхности осаждения $r=r_2$, т.е.:

$$t_z = t_r, \quad (13)$$

то будут улавливаться все частицы того же размера, находящиеся в кольцевой области $r_0 \leq r \leq r_2$. Отсюда следует оценка фракционной степени улавливания частиц:

$$\eta(\delta) = \frac{r_2^2 - r_0^2}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{1 - \tilde{r}_0^2}{1 - \tilde{r}_1^2} = 1,534(1 - \tilde{r}_0^2). \quad (14)$$

Для частиц, которые улавливаются с эффективностью 50% ($\eta=50$) из (14) получим:

$$\delta_{50} = \frac{1,157 \cdot 10^5}{k\sqrt{B}} \sqrt{\frac{D\mu}{\rho_r \omega_{\Pi}}} = \frac{5,89 \cdot 10^5 \tilde{\alpha} \tilde{\delta} (1 - \tilde{r}_0^2) \sqrt{D\mu/\rho_r \omega_{\Pi}}}{(2 - \tilde{\delta})(1 - \tilde{r}_1^2)(1 + \psi) \sqrt{\tilde{H}_{KK}(1 - \tilde{r}_1^2) + 2\tilde{H}_{KM} \left(\left(1 - \frac{(\tilde{H}_K + \tilde{H}_{KK} - \tilde{H}_{\Pi})(1 - \tilde{r}_1^2)}{2\tilde{H}_K} \right)^2 + \frac{(\tilde{r}_1 + \tilde{r}_{\Pi})}{4} \right)}} \quad (18)$$

Для разработанного пылеуловителя ($k = 3,76(1 + \psi)$, $B = 6,237$) получим, в мкм:

$$\delta_{50} = \frac{1,23 \cdot 10^5}{1 + \psi} \sqrt{\frac{D\mu}{\rho_r \omega_{\Pi}}}. \quad (19)$$

При $\psi=0$ формула (19) применима к циклону ЦН-15, на основе которого создан пылеуло-

Из уравнения (9) получим:

$$V_r = \frac{\omega_{\Pi}^2 \rho_r \delta^2}{18\mu r} = Stk \frac{\tilde{v}_r^2}{\tilde{r}}, \quad (10)$$

где $Stk = \frac{\omega_{\Pi} \rho_r \delta^2}{18\mu r}$ – число Стокса, $\tilde{v}_r^2 = k/\tilde{r}^{0,5}$, k – определяется по формуле

$$k = \frac{5\pi(2 - \tilde{\delta})(1 - \tilde{r}_1^2)(1 + \psi)}{\tilde{\alpha} \tilde{\delta} (1 - \tilde{r}_1^2)^5} \quad (11)$$

Найдем время, за которое частица с начальным положением $\frac{r}{r} = r_0$ достигнет поверхности осаждения:

$$r_0(\delta_{50}) = 0,821. \quad (15)$$

Для установления связи между размером частиц и их начальным положением, двигаясь с которого частицы успеют за время их пребывания в пылеуловителе достичь поверхности осаждения, запишем уравнение (13) в явном виде:

$$B \frac{r_2}{\omega_{\Pi}} = \frac{r_2(1 - \tilde{r}_0^2)}{3\omega_{\Pi} k^2 Stk} \quad \exists \quad (16)$$

Решив уравнение (16) относительно размера частиц δ , получим:

$$\delta = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{3(1 - \tilde{r}_0^2) D\mu}{B \rho_r \omega_{\Pi}}}. \quad (17)$$

Подставив в эту формулу $r_0=0,821$ получим соотношение для δ_{50} :

витель с дополнительной закруткой потока. Так для циклона $D = 0,4$ м и $\omega_{\Pi} = 3,5$ м/с при улавливании цементной пыли, с плотностью частицы $\rho = 3000$ кг/м³, $\mu = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с по формуле (19) получим: $\delta_{50} = 3,22$ мкм, что на 8,5% больше оптимального значения $\delta_{50} = 2,95$ мкм [11]. Соответствие расчетного значения δ_{50} опытному значению свидетельствует о допустимости предпо-

ложений, принятых при разработке математической модели осаждения частиц.

В отличие от формулы (6), соотношение для вычисления δ_{50} (19) не требует эмпирической интерпретации (кроме физико-механических свойств запыленного газа) и включает в себя все конструктивно-

технологические параметры пылеуловителя, что существенно расширяет возможности его оптимизации.

Формулы для вычисления фракционной и общей эффективности пылеуловителя (1 – 4) с учетом соотношения (19) принимают вид:

$$\eta_{\Phi}(\delta) = \Phi \left(2,857 \lg \left(8,13 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{\rho_r \omega_{II}}{D\mu}} (1 + \psi) \delta \right) \right). \quad (20)$$

$$\eta = \Phi \left(\frac{1}{\sqrt{0,1225 + \lg^2 \sigma_4}} \lg \left(8,13 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{\rho_r \omega_{II}}{D\mu}} (1 + \psi) \delta_{0,5} \right) \right). \quad (21)$$

В формулах (20) и (21) размер частиц следует задавать в мкм. При компьютерном вычислении значений интеграла вероятно-

стей использовалась приближенная формула:

$$\Phi(x) = 0,5(2 - (1 + 0,049867x + 0,021141x^2 + 0,032x^3 + 0,000038x^4)^{-16}), \quad (22)$$

Анализ графиков опытной и теоретической дифференциальной функции распределения говорит о том, что реальное распределение частиц цементной пыли отличается от логарифмической нормальной с теми же

числовыми характеристиками. Более значительное отклонение от ЛНР наблюдается для сырьевой пыли.

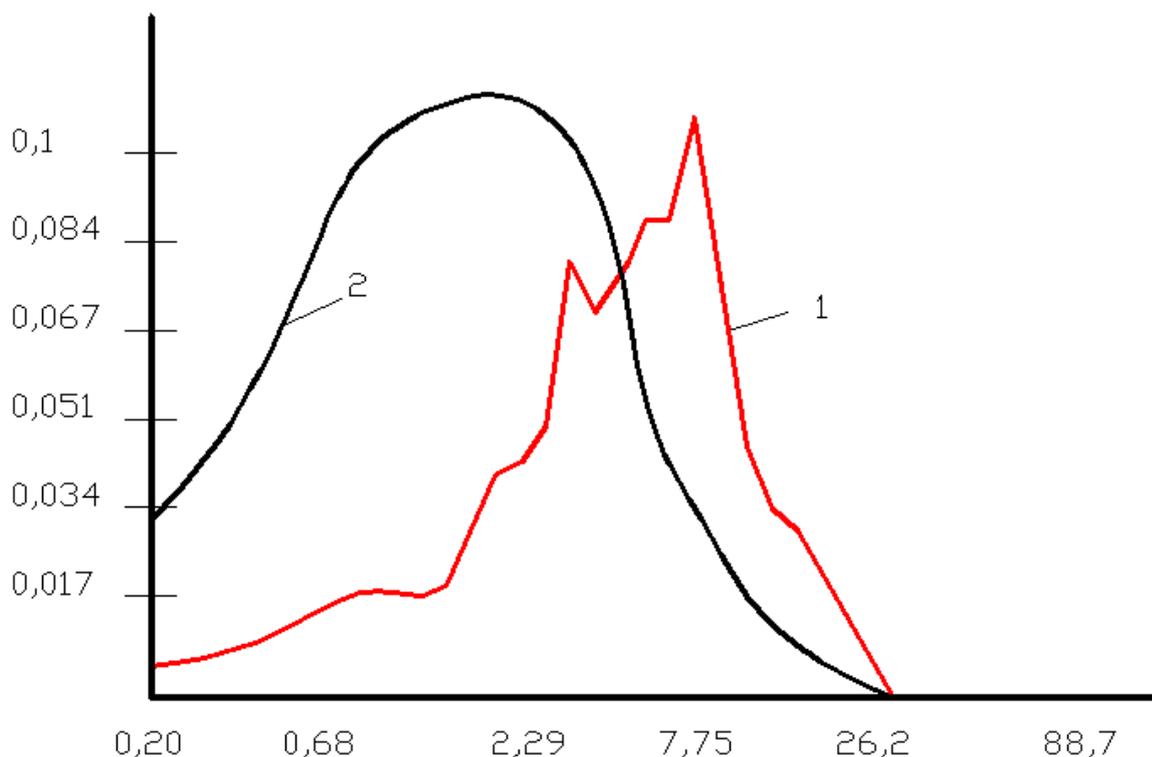


Рисунок 1. Графики дифференциальной функции распределения по размерам частиц цементной пыли (1 – данные гранулометрии; 2 - ЛНР)

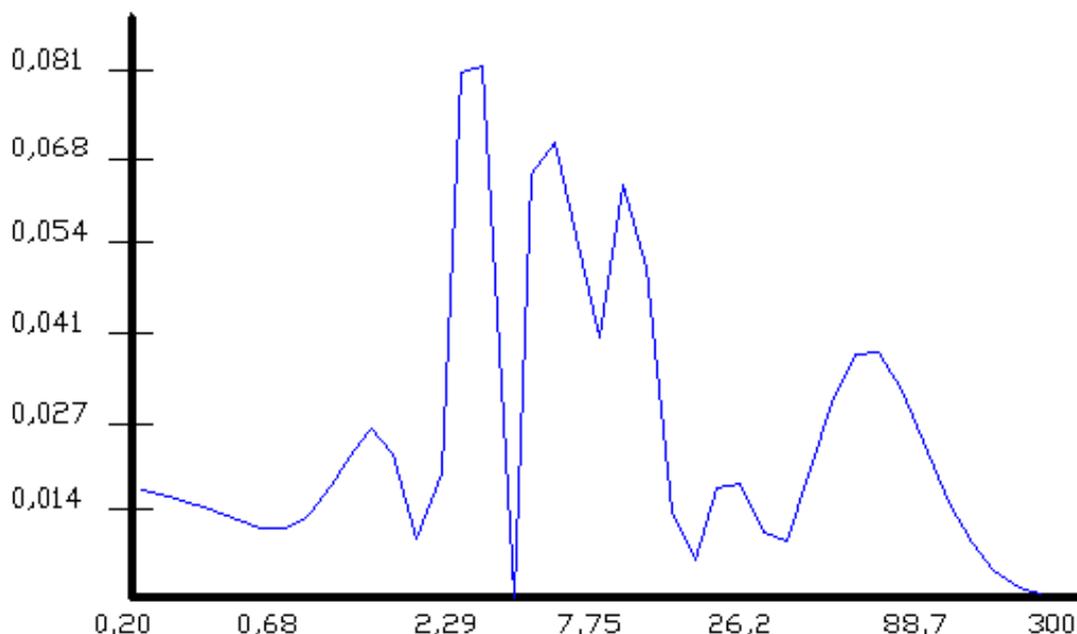


Рисунок 2. График дифференциальной функции распределения по размерам частиц сырьевой смеси

В связи с этим формула (21) должна использоваться для предварительной оценки общей степени очистки запыленного газа, а более точное значение эффективности пылеуловителя должно рассматриваться с учетом реального дисперсного состава и фракционных степеней улавливания частиц (20):

$$\eta = \sum_{i=1}^N \eta_{\phi} (\delta_i^{cp}) \Delta D_i \quad (23)$$

где N – количество рассматриваемых фракций пыли.

Для цементной пыли, общая эффективность опытного образца пылеуловителя ($D = 0,4$ м, $\omega_{\text{ц}} = 3,5$ м/с, $\rho = 3000$ кг/м³, $\mu = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с) при отсутствии закрутки (фактически это циклоны ЦН-15) найденная по формуле (20) равна $\eta = 67\%$, а по формуле (23) $\eta = 66\%$. Столь незначительное различие показателей эффективности, рассчитанных по формулам (21), (20) и (23) свидетельствует о том, что определяющее влияние на эффективность улавливания пыли при прочих равных условиях оказывают обобщенные характеристики дисперсности пыли $\delta_{0,5}$ и σ_r , а особенности распределения частиц по фракциям играют лишь второстепенную роль.

Из выражений (20, 21) следует возможность повышения эффективности улавливания пыли за счет увеличения интенсивности дополнительной закрутки при сохранении и даже

определенном снижении расхода очищаемого газа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кафаров, В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств [Текст] / В.В. Кафаров – М.: Высшая школа. – 1991. – 400 с.
2. Медников, Е.П. Теория турбулентного переноса взвешенных частиц в проточных аэро-и-гидродисперсных системах [Текст] / Е.П. Медников // ТОХТ. – 1968. – т.20. №3 – С.366 – 374.
3. Пеньков, Н.В. К теории разделительных процессов [Текст] / Н.В. Пеньков, В.Б. Ведерников // Труды УНИХИМ. – Свердловск: изд-во УНИХИМ, 1976. вып. 41, С. 5-10.
4. Падва, В.Ю. Оптимальные условия улавливания пыли циклонами [Текст] / В.Ю. Падва // Водоснабжение и санитарная техника. – 1968. – №4. – С.6-10
5. Коузов, П.А. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности [Текст] / П.А. Коузов, Г.М. Скрыбин, А.Д. Мальгин – Л.: Химия, - 1982. – 256 с.
6. Вальдберг, А.Ю. Практическая реализация вероятностно-энергетического метода расчета центробежных пылеуловителей [Текст] / А.Ю. Вальдберг, Н.С. Кирсанова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1994. – №9. С.26 – 29.

