

**ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЁТА  
ДИАМЕТРА ЧАСТИЦ ПЫЛИ, УЛАВЛИВАЕМЫХ В ЦИКЛОНАХ НА 50%**

Основным параметром, определяющим эффективность циклонов и используемым для ее расчета является параметр  $d_{50}$  – диаметр частиц пыли, улавливаемых на 50% [1]. Находят его обычно опытным путем. Однако при проектировании новых циклонов, тем более повышенной эффективности, необходимо учитывать влияние различных конструктивных параметров на  $d_{50}$ .

Разными исследователями предложен ряд зависимостей, связывающих  $d_{50}$  и размеры циклона [2–5]. В табл. 1 представлены результаты расчета  $d_{50}$  по найденным методикам для циклонов НИИОГаз (ЦН-24, ЦН-15у, ЦН-15, ЦН-11, СЦН-40, СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34), в том числе наиболее распространенным в отечественной промышленности, а также отклонение их (в процентах) от опытных значений  $d_{50}$  [1] для данных циклонов.

**Таблица 1 – Опытные и расчетные значения  $d_{50}$ , а также их отклонение друг от друга**

N	Опыт	Барт		Лаппл		Иозия и Лейт		Риетема		ММ	
		$d_{50}$ , мкм	d50, мкм	%	d50, мкм	%	d50, мкм	%	d50, мкм	%	d50, мкм
1	8,50	10,21	20,1	7,71	9,2	7,08	16,8	3,27	61,5	9,97	17,3
2	6,00	6,75	12,5	5,27	12,2	5,82	3,1	2,50	58,4	6,29	4,8
3	4,50	5,42	20,4	4,39	2,5	4,99	11,0	2,17	51,9	5,03	11,7
4	3,65	4,07	11,6	3,28	10,2	4,35	19,2	1,76	51,8	3,62	0,8
5	2,31	2,83	22,5	5,94	157,3	2,57	11,2	1,30	43,8	2,75	19,0
6	1,95	2,77	41,8	5,27	170,3	2,77	42,2	1,06	45,6	2,66	36,2
7	1	1,76	76,3	2,35	134,9	1,64	64,2	0,92	7,6	1,60	60,2
$\Sigma$			29,3		70,9		24,0		45,8		21,4

*Примечание. Столбец N: 1 – ЦН-24, 2 – ЦН-15у, 3 – ЦН-15, 4 – ЦН-11, 5 – СДК-ЦН-33, 6 – СК-ЦН-34, 7 – СЦН-40;  $\Sigma$  – среднее по всем циклонам отклонение*

Согласно модели, предложенной Бартом [2, 3, 5], величина  $d_{50}$  определяется на основании равенства действующих на частицу пыли

центробежной силы, направленной к периферии, и силы воздействия со стороны газа, стремящейся увлечь частицу в очищенный приосевой поток. Данный баланс сил составляется для воображаемой цилиндрической контрольной поверхности, образуемой продолжением стенки выхлопной трубы вниз до стенки конуса циклона.

Полученное в результате выражение имеет вид:

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9\mu V_{rCS} D_0}{V_{\theta CS}^2 \rho_p}}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – вязкость газа, Па·с;  $V_{rCS}$  – радиальная скорость газа через контрольную поверхность, м/с;  $D_0$  – диаметр выхлопной трубы циклона, м;  $\rho_p$  – плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{\theta CS}$  – тангенциальная скорость газа на контрольной поверхности, м/с.

$$V_{\theta CS} = \frac{\pi R_{in} R_x V_x}{aba + \pi f R_{in} H_{CS}}$$

где  $R_{in}$  – радиус положения центра входного патрубка, м;  $R_x$  – радиус выхлопной трубы, м;  $V_x$  – средняя осевая скорость, м/с;  $H_{CS}$  – длина контрольной поверхности, м;  $a$  – отношение момента количества движения газа в центре входе и газа, движущегося вдоль стенки;  $a$  – высота входного патрубка, м;  $b$  – ширина входного патрубка, м;  $f$  – общий коэффициент трения.

Величина  $V_{rCS}$  определяется делением объёмного расхода газа через циклон на площадь контрольной поверхности.

Модель Иозии и Лейта [2], как и модель Барта основана на теории т.н. равновесной орбиты, где достигается баланс действующих на частицу пыли сил:

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9\mu Q}{\pi V_{\theta max}^2 Z_0 \rho_p}} \quad (2)$$

где  $V_{\theta max}$  – максимальная тангенциальная скорость газа в циклоне, м/с;  $Z_0$  – высота контрольной поверхности, м;  $Q$  – расход воздуха через циклон, м<sup>3</sup>/с.

В этой модели тангенциальная скорость  $V_{\theta max}$  на контрольной поверхности соответствует максимальной и рассчитывается по эмпирическому уравнению:

$$V_{\theta max} = 6.1 V_{in} \{ (A/D^2)^{-0.61} (D_0/D)^{-0.74} (H/D)^{-0.33} \}$$

где  $A$  – площадь поперечного сечения входа потока в циклон, м<sup>2</sup>;  $V_{in}$  – скорость газа на входе, м/с;  $D$  – диаметр корпуса циклона, м;  $H$  – общая высота циклона, м.

Метод Мушелькнауца (ММ) [4, 5] также основан на модели равновесной орбиты:

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9\mu(0.9Q)}{\pi V_{\theta CS}^2 (\rho_p - \rho)(H-S)}} \quad (3)$$

где  $H$  – общая высота циклона, м;  $\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $S$  – высота внутренней части выхлопной трубы, м.

Величина  $V_{\theta CS}$  в данном случае рассчитывается так:

$$V_{\theta CS} = \frac{\left(\frac{R}{R_x}\right)}{1 + \frac{f A_R \sqrt{\frac{R}{R_x}}}{2Q}}$$

где  $R$  – радиус циклона, м;  $A_R$  – общая внутренняя площадь стенок циклона, создающая сопротивление трения;  $f$  – общий коэффициент трения (рассчитывается в этой модели по зависимостям, также отличным от предложенных Бартом).

Согласно Лапплу [3] пыль, попадающая в циклон, равномерно распределается по входному отверстию, а частицы, которые успеют переместиться к стенке на расстояние, равное половине ширины входного отверстия, улавливаются с эффективностью 50%. Время пребывания частиц определяется числом оборотов  $N$ , которые газовый поток совершает в циклоне. Исходя из этого, Лаппл получил следующее выражение для расчета  $d_{50}$ :

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9\mu b}{2\pi N V_{in}(\rho_p - \rho)}} \quad (4)$$

где  $b$  – ширина входного патрубка, м.

Хотя Лаппл рекомендовал экспериментальное определение  $N$ , для различных конструкций циклонов часто используется следующее выражение:

$$N = \frac{1}{a} \left[ L_c + \frac{Z_c}{2} \right]$$

где  $a$  – высота входного патрубка циклона, м;  $L_c$  – высота цилиндрической части корпуса циклона, м;  $Z_c$  – высота конической части корпуса циклона, м.

Ритема [4] предположил, что профиль тангенциальной скорости газа не изменяется с осевым положением при неизменном радиусе, а  $d_{50}$

также представляет собой размер частицы, которая улавливается из исходного положения в середине отверстия для входа газа.

Однако модель Ритемы связывает величину  $d_{50}$  с гидравлическим сопротивлением циклона  $\Delta P$ :

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9\mu\rho Q}{\pi Z_0(\rho_p - \rho)\Delta P}} \quad (5)$$

Следовательно, для использования модели необходимо спрогнозировать и гидравлические потери в циклоне. Расчет  $d_{50}$  по ней (таблица 1) был выполнен с использованием опытного значения коэффициента гидравлического сопротивления [1].

В целом лучшую сходимость с опытными данными (около 19% – таблица 1) показал метод Мушелькнауца. При этом наибольшая погрешность, как и при использовании других моделей, наблюдается для высокоэффективных циклонов СЦН-40, СДК-ЦН-33 и СК-ЦН-34, отличительной особенностью которых является относительно малый диаметр выхлопной трубы (0,4; 0,33 и 0,34 диаметра циклона соответственно). У циклонов серии ЦН относительный диаметр выхлопной трубы составляет 0,59. Отличием циклонов СЦН-40, СДК-ЦН-33 и СК-ЦН-34 является также спиральный входной патрубок. Метод Мушелькнауца может быть использован для анализа влияния различных факторов на эффективность при проектировании новых, более эффективных циклонов, но, как и другие модели, не гарантирует высокой точности аналитического определения величины  $d_{50}$ .

### Литература

1. Лазарев, В.А. Циклоны и вихревые пылеуловители: Справочник. – 2е изд., перераб. и доп. – Нижний Новгород, 2006. – 320 с.
2. Elsayed, K. Analysis and Optimization of Cyclone Separators Geometry Using RANS and LES Methodologies / K. Elsayed, // 2011 Department of Mechanical Engineering, Vrije Universiteit Brussel Pleinlaan 2, B-1050 Brussels, Belgium
3. John Dirgo & David Leith (1985) Cyclone Collection Efficiency: Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions, *Aerosol Science and Technology*, 4:4, 401–415.
4. Hoffmann A. C. and Stein L. E. Gas cyclones and swirl tubes: Principle, Design and Operation. Springer, 2nd edition, 2008.
5. Funk, P. A., and Baker, K. D., "Dust Cyclone Technology – A Literature Review," *The Journal of Cotton Science*, Vol. 17, pp. 40–51, (2013).