

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦИКЛОННОГО ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ ПО ЕГО ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Энергетические затраты на очистку газа в циклонных пылеуловителях определяются их гидравлическим сопротивлением, которое в свою очередь зависит от коэффициента сопротивления ξ [1]. Этот коэффициент зависит от конструкции циклона и стандартно определяется опытным путем, причем его величина существенно различается для разных типов циклонов, варьируясь, например, для отечественных циклонов от десятков до нескольких тысяч [1]. Для оптимизации конструкции циклона и поиска путей снижения энергозатрат в нем на очистку газа требуется знание взаимосвязи размеров циклона и ξ . Был выполнен поиск в научной литературе и анализ таких зависимостей. Ниже приведены найденные соотношения [2–5] и оценка их точности (таблица 1) при сравнении с опытными значениями коэффициента сопротивления для ряда широко применяемых в промышленности циклонов.

Таблица 1 – Расчетные значения коэффициента гидравлического сопротивления ξ для разных типов циклонов, а также их отклонения от опытных значений (ξ_0) и среднее общее отклонение

N	ξ_0	ξ_1		ξ_2		ξ_3		ξ_4		ξ_5		ξ_6		ξ_7		ξ_8	
		ξ	%	ξ	%	ξ	%	ξ	%	ξ	%	ξ	%	ξ	%	ξ	%
1	5,99	5,69	5	5,62	6	3,39	43	6,19	3	13,3	121	10,1	69	11,2	87	6,04	1
2	4,66	3,39	27	4,38	6	1,14	76	3,43	26	7,9	69	5,08	9	7,2	55	3,59	23
3	4,38	3,39	23	3,94	10	1,07	76	3,24	26	7,9	80	5,08	16	5,94	36	3,59	18
4	3,66	2,46	33	3,36	8	0,52	86	2,31	37	5,7	57	3,78	3	4,34	19	2,61	29
5	16,8	14,3	15	15,2	10	17,7	5	10,4	38	20,3	21	20,4	22	26,2	56	12	29
6	20,7	10,6	49	13,8	33	9,95	52	8,47	59	15,3	26	12,6	39	24,5	19	9	57
7	6,59	1,64	75	6,21	6	0,95	86	2,29	65	6,08	8	3,96	40	5,81	12	3,58	46
Σ			32		11		60		36		55		28		40		29

Примечание. В столбце N циклоны: 1 – ЦН-24; 2 – ЦН-15у; 3 – ЦН-15; 4 – ЦН-11; 5 – СДК-ЦН-33; 6 – СК-ЦН-34; 7 – СЦН-40. Σ – среднее отклонение расчетных и опытных значений.

Соотношения для расчета ξ_1 – Александра, ξ_2 – Стейрманда, Иозии и Лейта, ξ_3 – Барта, ξ_4 – Мушельнауца и Камрока, ξ_5 – Шеперда и Лапла, ξ_6 – Казала, Мартинеса-Бенета и Валенсии, ξ_7 – Кукера, ξ_8 – Дирго; ξ_0 – опытные значения [1].

Предложенные различными исследователями зависимости можно разделить на две группы: теоретические зависимости, полученные на основе анализа движения газового потока в циклоне и связанных с этим гидравлических потерь, и чисто эмпирические, полученные путем обработки экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению различных циклонов. К первой группе можно отнести модели Александра, Стейрманда, Барта, Мушелькнауца и Камрока. Ко второй группе: уравнения Шеперда и Лапла, Казала, Мартинеса-Бенета и Валенсии, Кукера, Дирго.

Модель Александра [2,4] предполагает следующую зависимость ξ от размеров циклона:

$$\xi=4,62 \cdot \left(\frac{b_f \cdot a}{D \cdot D_E}\right) \cdot \left[\left(\left(\frac{D}{D_E}\right)^{2\pi} - 1\right) \cdot \left(\frac{1-n}{n}\right) + f_g \cdot \left(\frac{D}{D_E}\right)^{2 \cdot n}\right], \quad (1)$$

где a – высота входного патрубка, м; b_f – ширина входного патрубка (в расчетах принята ширина на входе в него газа), м; D – диаметр циклона, м; D_E – внутренний диаметр выхлопной трубы, м;

$$n=1-(0,067 \cdot D^{0,14}) \cdot \left(\frac{T}{283}\right)^{0,8}, \quad (2)$$

где T – температура, К.

$$f_g=0,8 \left[\frac{1}{n \cdot (1-n)} \cdot \left(\frac{4-2^{2 \cdot n}}{3}\right) - \left(\frac{1-n}{n}\right) \right] + 0,2 \cdot \left[(2^{2 \cdot n} - 1) \cdot \left(\frac{1-n}{n}\right) + 1,5 \cdot (2^{2 \cdot n}) \right] \quad (3)$$

Согласно модели Стейрманда, доработанной в компактной форме Иозией и Лейтом [2]:

$$\xi=1+2 \cdot q^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot (D-b_f)}{D_E} - 1\right) + 2 \cdot \left(\frac{4 \cdot a \cdot b_f}{\pi \cdot D_E^2}\right)^2 \quad (4)$$

Величина q :

$$q = \frac{-\left(\frac{D_E}{2 \cdot (D-b_f)}\right)^{0,5} + \left(\frac{D_E}{2 \cdot (D-b_f)} + \frac{4 \cdot A_R \cdot G}{S}\right)^{0,5}}{\frac{2 \cdot A_R \cdot G}{S}}, \quad (5)$$

где A_R – общая внутренняя площадь стенок циклона, включая стенки крышки, цилиндрической, конической частей и выхлопной трубы [3]; $G = \lambda/2$ (λ – коэффициент трения, принимаемый обычно равным 0,005) [2,3].

$$A_R = \frac{\pi \cdot (D^2 - D_E^2)}{4} + \pi \cdot D \cdot H_{CYL} + \pi \cdot D_E \cdot a + \frac{\pi \cdot (D + D_O)}{2} \cdot \left((H - H_{CYL})^2 + \left(\frac{D - D_O}{2} \right)^2 \right)^{0,5} \quad (6)$$

где H – общая высота циклона, м; H_{CYL} – высота цилиндрической части, м; D_O – внутренний диаметр пылевыпускного отверстия, м;

Согласно Барту [2,3,4] потери давления в циклоне имеют место, в первую очередь, в результате трения со стенками циклона и необратимых потерь внутри приосевого вихревого потока, причем последние обычно доминируют:

$$\xi = \left(\frac{b_f \cdot a}{\pi \cdot D_E^2 / 4} \right)^2 \cdot (\xi_b + \xi_e), \quad (7)$$

где ξ_b – потери в корпусе циклона; ξ_e – потери в выхлопной трубе.

$$\xi_b = \frac{D_E}{D} \cdot \left(\frac{1}{\left((v_{ze}/v_{te}) - ((H - H_E)/0,5 \cdot D_E) \cdot \lambda \right)^2} - \left(\frac{v_{te}}{v_{ze}} \right)^2 \right), \quad (8)$$

где H_E – высота выхлопной трубы, м; v_{ze} – осевая скорость газа в выхлопной трубе, м/с; v_{te} – тангенциальная скорость газа на радиусе, равном радиусу выхлопной трубы, м/с; λ – коэффициент трения.

$$\xi_e = K \cdot \left(\frac{v_{te}}{v_{ze}} \right)^{3/4} + \left(\frac{v_{te}}{v_{ze}} \right)^2, \quad (9)$$

где K – эмпирическая константа, принимает значения 3,41÷4,4.

Схожий подход использовали Мушелькнауц с Камроком [2–4]:

$$\xi = \frac{b_f \cdot a}{\pi \cdot D_E^2 / 4} \cdot (\xi_b + \xi_e) \quad (10)$$

Потери в корпусе циклона [3,4]:

$$\xi_b = \lambda \cdot \frac{S}{0,9 \cdot Q} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot (v_{tw} \cdot v_{te})^{1,5}, \quad (11)$$

где Q – расход газа, м³/с; ρ – плотность газа, кг/м³; v_{tw} – скорость вблизи стенки, м/с.

Потери в выхлопной трубе:

$$\xi_e = 2 + 3 \cdot \left(\frac{v_{te}}{v_{ze}} \right)^{3/4} + \left(\frac{v_{te}}{v_{ze}} \right)^2 \quad (12)$$

Чисто эмпирические модели, основанные на обработке экспериментальных данных:

– Шеперда и Лапла [2–4]:

$$\xi = 16 \frac{b_f \cdot a}{D_E^2} \quad (13)$$

– Казала, Мартинеса-Бенета, Валенсии [2–4]:

$$\xi = 11,3 \cdot \left(\frac{b_f \cdot a}{D_E^2} \right)^2 + 2,3 \quad (14)$$

– Кукера [5]:

$$\xi = 9,47 \cdot \left(\frac{S}{D_E^2} \right) \quad (15)$$

– Дирго [3,5]:

$$\xi = 20 \cdot \left(\frac{S}{D_E^2} \right) \cdot \left(\frac{H_E/D}{(H/D) \cdot (H_{CYL}/D) \cdot (D_O/D)} \right)^{1/3} \quad (16)$$

Общим для выражений (13)–(15) является то, что они содержат только соотношение площадей входного патрубка и выхлопной трубы. Это, очевидно, свидетельствует о превалирующем влиянии именно их размеров на сопротивление циклона. В отличие от моделей первой группы эти соотношения, однако, не включают коэффициент трения, а значит могут дать большую погрешность для циклонов с повышенной шероховатостью стенки, например из-за огнеупорной футеровки.

Значительно лучшую по сравнению с другими моделями точность со средним отклонением от опытных значений около 11% показал метод Стейрманда, Иозии и Лейта. Совместно с имеющимися в научной литературе уравнениями, связывающими эффективность очистки (или диаметр частиц пыли, улавливаемых на 50%) с геометрическими параметрами циклона, дынные зависимости могут использоваться при проектировании новых, более энергоэффективных конструкций циклонов.

Литература

1. Лазарев, В.А. Циклоны и вихревые пылеуловители: Справочник. – 2е изд., перераб. и доп. – Нижний Новгород, 2006. – 320 с.
2. A. C. Hoffmann and L. E. Stein. Gas cyclones and swirl tubes: Principle, Design and Operation. Springer, 2nd edition, 2008.
3. Analysis and Optimization of Cyclone Separators Geometry Using RANS and LES Methodologies, Khairy Elsayed 2011.

4. CFB cyclones at high temperature: Operational results and design assessment Raf Dewil, Jan Baeyens, Bart Caerts, 2008.

5. Effect of cyclone inlet velocity and vortex finder height on coarse wheat bran dust separation Abdel-Hadi, M. A. Misr J. Ag. Eng., July 2014–24.

УДК 621.357.7

**Кузнецов Я.Г., Карзан С.Н.,
Зиневич Д.В., Жилинский В.В.**
(БГТУ)
Кузей А.М.
(ФТИ НАН Беларуси)

ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИКОРРОЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО СПЛАВА ЦИНК-НИКЕЛЬ

В настоящее время электрохимическое цинковое с пассивацией покрытие является наиболее используемым для защиты стали от коррозии. Цинк имеет более электроотрицательный потенциал в коррозионной среде, чем железо, поэтому при небольшом повреждении цинкового покрытия сталь не будет подвергаться коррозионному разрушению из-за протекторного эффекта. Однако сами цинковые покрытия подвержены быстрому разрушению в коррозионной среде и требуют пассивации в хроматных электролитах, что создает экологические проблемы при массовом производстве. Более того, на нанесение цинковых покрытий ежегодно расходуется до 50% всего добываемого цинка. Цинковые покрытия также значительно уступают в защитном действии кадмиевым покрытиям в условиях тропического климата.

Одна из основных задач современного гальванического производства – разработка технологий получения антикоррозионных покрытий на основе сплавов цинка с защитными свойствами кадмия. Для улучшения эксплуатационных свойств цинковые покрытия легируют никелем, железом, кобальтом, хромом, молибденом и оловом. Электролитические покрытия из цинковых сплавов обладают повышенной коррозионной стойкостью, чем чистые цинковые покрытия [1].

Цинк-никелевое покрытие применяется как альтернатива кадмиевым покрытиям. Сплав цинк-никель более термо- и коррозионностоек, чем гальванический цинк. Он обладает высокой твердостью и приятным матовым или полублестящим внешним видом. В зависимости от процентного содержания никеля в сплаве меняются и свойства