

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ

Б. Р. Романенко ассистент; С. М. Орлов к.т.н, доцент; А. Я. Орлова старший преподаватель.
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

Аннотация. Защита атмосферы – социальная и экономическая проблема, неразрывно связанная с задачей создания комфортных условий для жизни и работы человека. Значительное влияние на окружающую среду и атмосферу в целом оказывают пылегазовые выбросы промышленности. Производство строительных материалов вносит значительный негативный вклад в общий экологический показатель региона, так как большинство технологических процессов неразрывно связано с образованием пылей и последующим выбросом их в атмосферу. Такие промышленные выбросы могут содержать ценные полупродукты, которые безвозвратно теряются. Поэтому очистка и обезвреживание промышленных выбросов имеют санитарное и экономическое значение.

В данной статье рассматриваются вопросы очистки пылегазовых выбросов промышленности. Наиболее распространенными аппаратами очистки являются циклоны. За все время их применения возникло много различных конструкций и типов циклонов в зависимости от места их применения. Рассмотрены методики расчета параметров, характеризующих работу циклонов, таких как величина центробежной силы F_c , минимального размера частиц улавливаемых циклонами d_{min} , потерь давления в циклоне ΔP , эффективности улавливания пыли η .

Ключевые слова: циклон, пылеуловитель, центробежная сила, потери давления, эффективность пылеулавливания.



**Романенко
Борис Романович**



**Орлов Станислав
Михайлович**



**Орлова
Алла Яковлевна**

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Обострение экологической ситуации на Земле является следствием стремительного развития научно-технического прогресса. Охрана окружающей среды, создание благоприятных, комфортных условий для жизни и труда человека являются важнейшей задачей. Защита воздушного бассейна от загрязнений вентиляционными выбросами промышленных предприятий становится все более насущной проблемой. В связи с увеличением объемов строительства увеличилась потребность в материалах для него, и, следовательно, потребность в их производстве. Производство строительных материалов сопровождается значительными выбросами аэрозолей в атмосферу. По всей отрасли объем технологических и вентиляционных выбросов оказывает значительное негативное влияние на экологическую обстановку в регионе. Особую опасность для здоровья человека составляет часто содержащиеся в этих выбросах мелкодисперсные частицы диаметром до 5 мкм.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ

Циклонные пылеуловители применяются в промышленности уже более ста лет. Сам термин «циклон» обозначает круговой ветер. Данный термин был введен в литературу ученым Пиддингтоном в 1842 г., латинизировавшим первую букву в греческом слове «kyklon». Первенство изобретения центробежного аппарата – циклона принадлежит Соединенным Штатам Америки: первый патент № 325521 на циклонный пылеуловитель был оформлен компанией «Кникер-бокер Компани» в г. Джексон (штат Мичиган) в 1885 г. [1]. В Европе же первая конструкция инерционного пылеулови-

теля была предложена О. М. Морзе и запатентована в Германии (№ 39219) 25 июля 1886 г. Масштабное серийное производство пылеулавливающих циклонов, начатое в США, привело к их широкому распространению в промышленности и, в первую очередь, на деревообрабатывающих предприятиях для сбора опилок и стружки, а спустя десятилетие – на цементных заводах с целью улавливания пыли из обжиговых печей. В Европе первые циклоны были введены в эксплуатацию на германских королевских заводах Фридриха-Августа в Потшаппеле близ Дрездена [1]. С тех пор, непрерывно совершенствуясь, они распространились по всему миру, получая все новые и новые сферы применения.

Циклонные пылеуловители или циклоны являются наиболее характерными представителями инерционных пылеуловителей. Они получили широкое распространение на различных производствах благодаря следующим положительным качествам [2]:

- 1) относительная простота технического исполнения (конструкции);
- 2) сравнительно небольшая стоимость изготовления;
- 3) широкий температурный диапазон функционирования;
- 4) возможность улавливания абразивных частиц при применении специального защитного покрытия внутренней части циклона;
- 5) высокая эффективность очистки;
- 6) низкое гидравлическое сопротивление, которое не изменяется в зависимости от продолжительности функционирования.

Существует большое количество вариантов конструктивного исполнения циклонов. Проанализировав все варианты исполнения, можно выделить три основные группы [3]:

- 1) возвратно-поточные или противоточные циклоны;
- 2) прямоточные циклоны;
- 3) вихревые пылеуловители или пылеуловители со встречными закрученными потоками.

Противоточные циклоны являются самыми распространенными сухими механическими пылеуловителями [4,5]. Схема противоточного циклона приведена на рисунке 1.

Несмотря на то, что циклон имеет довольно простое конструктивное исполнение [6,7], в нем происходят сложные аэродинамические процессы, которые еще недостаточно изучены. Теоретические методы расчета не дают полного ответа на вопросы, связанные с проектированием циклонов, и не позволяют определить оптимальные параметры. Поэтому в различных отраслях промышленности распространены разнообразные конструкции одиночных, групповых и батарейных циклонов, разработанных на основе экспериментальных исследований [6,7,8].

Работу циклона можно охарактеризовать такими основными параметрами [9,10] как эффективность очистки и гидравлическое сопротивление, которые зависят от конструктивных особенностей пылеуловителя и скорости движения газового потока.

Противоточные циклоны отличаются между собой геометрическими размерами, соотношением конической и цилиндрической частей, а также относитель-

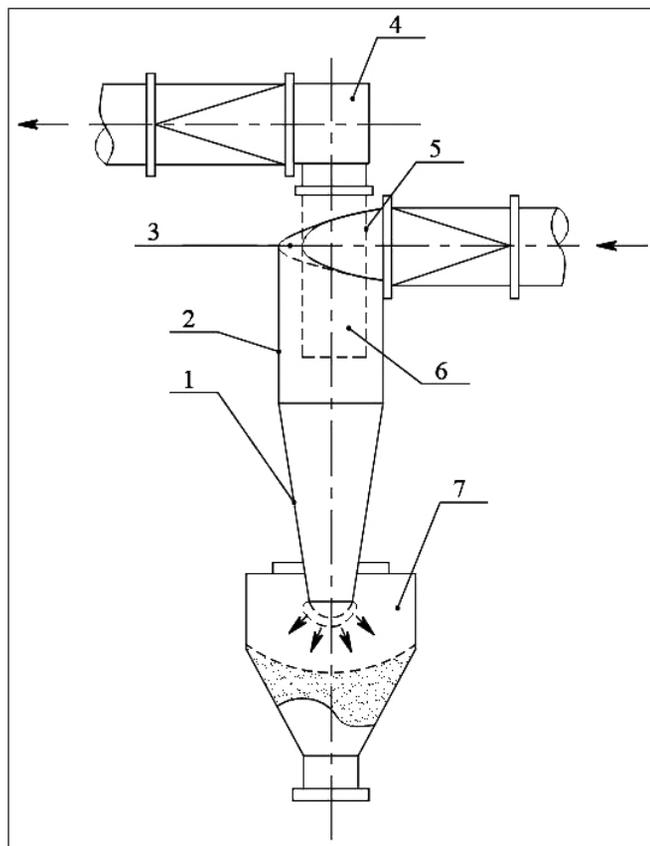


Рис. 1. Схема противоточного циклона.

- 1 – коническая часть корпуса;
- 2 – цилиндрическая часть корпуса;
- 3 – винтообразная крышка;
- 4 – камера очищенного газа;
- 5 – патрубок входа запыленного газа;
- 6 – выхлопная труба;
- 7 – бункер циклона

ной высотой – отношением общей высоты аппарата к диаметру его цилиндрической части [11]. Чем больше данное соотношение, тем меньше коэффициент гидравлического сопротивления и разрежение в бункере, а значит и меньше вероятность подсоса пыли в аппарат, но меньше степень очистки. Оптимальной является относительная высота 1,6, что соответствует принципу «золотое сечение» [9].

Эффективность циклонов различных марок приведена на рисунке 2.

Эффективность улавливания пыли в циклонах зависит от дисперсного состава пыли. Чем больше размер улавливаемых частиц, тем выше его эффективность [6]. Для циклонов ЦН эффективность очистки может достигать следующих значений:

- 1) для частиц с диаметром 20 мкм – 99%;
- 2) для частиц с диаметром 10 мкм – 95%;
- 3) для частиц с диаметром 5 мкм – 83%.

Определить величину центробежной силы, воздействующей на частицу, можно из следующего выражения [12]

$$F_{\delta}^{\mu} = \frac{mv_T^2}{R}, \text{ Н}, \quad (1)$$

где v_T – тангенциальная скорость частицы пыли, принимается равной по значению скорости газового потока на входе в циклон, м/с;

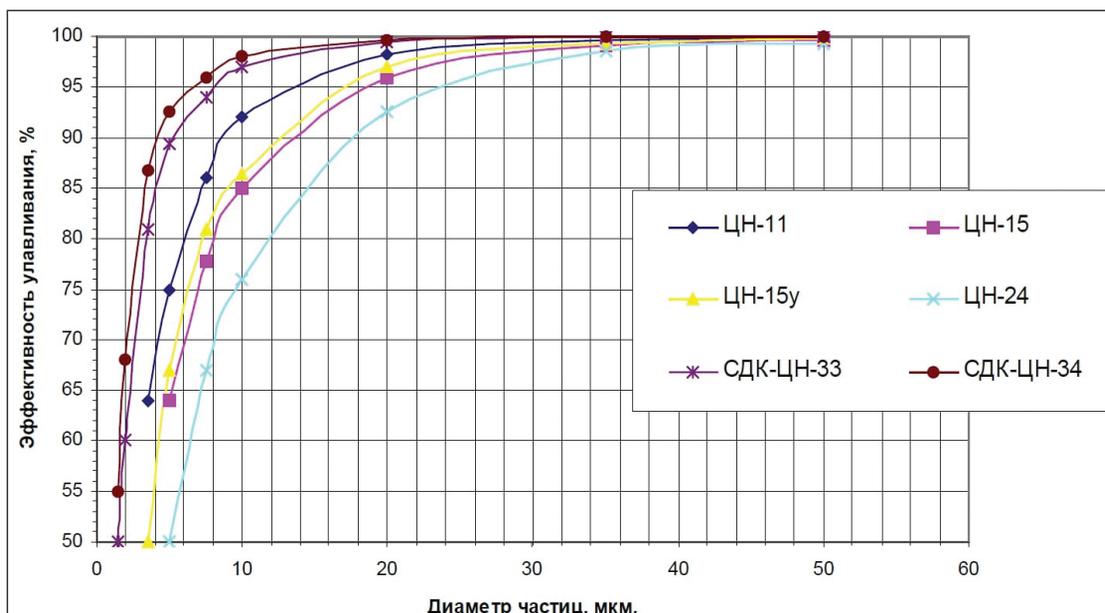


Рис. 2. График зависимости эффективности улавливания % от диаметра частиц мкм

R – расстояние от оси циклона (центра вращения газового потока) до частицы, м;

m – масса частицы пыли, которую можно определить по выражению, приняв допущение, что частица имеет сферическую форму:

$$m = V\rho = \frac{\pi d^3}{6} \rho, \text{ кг}, \quad (2)$$

где d – диаметр частицы пыли, м;
 ρ – плотность частицы пыли, кг/м³;

Силу сопротивления среды можно определить из выражения [13]:

$$F = 3\pi v_p^o d \mu, \text{ Н}, \quad (3)$$

где v_p – скорость движения частицы в радиальном направлении, м/с;
 μ – вязкость газа, Нс/м².

После того, как запыленный газовый поток входит в циклон, силы F_u и F уравниваются, то есть:

$$\frac{mv_T^2}{R} = 3\pi v_p^o d \mu \quad (4)$$

и частицы движутся в радиальном направлении с постоянной скоростью, которую можно определить из приведенного выше равенства:

$$v_p^o = \frac{mv_T}{3R\pi d \mu} = \frac{d^2 v_T^2 \rho}{18R\mu}, \text{ рад/с}, \quad (5)$$

Из всех частиц, которые движутся в потоке, наибольший путь пройдет та частица, которая при входе будет находится вблизи выхлопной трубы циклона [14]. Ее путь будет равен:

$$R_2 - R_1, \text{ м}, \quad (6)$$

где R_1 – радиус выхлопной трубы циклона, м;
 R_2 – радиус цилиндрической части циклона, м.

Время, которое частица пыли затратит на прохождение этого пути, можно определить из выражения:

$$\tau = \frac{R_2 - R_1}{v_p}, \text{ с}, \quad (7)$$

В формуле (5) определения скорости движения частицы в радиальном направлении v_p величина R – переменная. Она изменяется в пределах $R_1 < R < R_2$, и ее среднее значение можно определить как [14]:

$$R = \frac{R_1 + R_2}{2}, \text{ м}, \quad (8)$$

Подставив это выражение в формулу (5), получим:

$$v_p = \frac{d^2 v_T^2 \rho}{18 \frac{R_1 + R_2}{2} \mu}, \text{ рад/с}, \quad (9)$$

Или

$$\tau = \frac{R_2 - R_1}{v_p} = \frac{18(R_2 - R_1)(R_2 + R_1)\mu}{2v_T^2 d^2 \rho} = \frac{9\mu(R_1^2 - R_2^2)}{v_T^2 d^2 \rho}, \text{ с}, \quad (10)$$

Из данной формулы можно вычислить минимальный размер частиц пыли, которые будут улавливаться с помощью данного циклона. Допустим, что можно уловить все частицы, которые осели на стенках циклона [15, 16], то есть успевшие пройти путь $R_2 - R_1$ за время прохождения циклона запыленным газовым потоком, то есть за время нахождения частицы в циклоне:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{\rho v_T^2 \tau}} = \sqrt{\frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{2\pi\rho v_T^2 R n}} = \sqrt{\frac{9\mu(R_2 - R_1)}{\pi\rho v_T n}}, \text{ мкм}, \quad (11)$$

где n – число оборотов, которые совершает газовый поток в циклоне. Обычно принимают $n=2$.

Расчетные данные, полученные по данным формулам, могут отличаться от результатов, полученных в ходе проведения экспериментальных исследований [17]. Результаты исследований показывают, что количество частиц с диаметром меньше d_{min} фактически может быть уловлено значительно больше, чем по расчету. Например, при испытании циклона на саже с размером частиц менее 10 мкм, эффективность оказалась выше расчетной. Такой же эффект наблюдается при проведении испытаний с древесной пылью [18]. Данное явление можно объяснить тем, что в расчете не учитывается возможная коагуляция частиц внутри циклона.

Общие потери давления в циклоне можно определить из выражения:

$$\Delta P_u = \zeta_{ex} \frac{v_{ex}^2 \rho}{2}, \text{ Па}, \quad (12)$$

где ζ_{ex} – коэффициент гидравлического сопротивления циклона;

v_{ex} – скорость во входном патрубке циклона, м/с.

В некоторых случаях общие потери давления в циклоне так же определяют по условной скорости запыленного газового потока в циклоне, отнесенной к площади живого сечения цилиндрической части циклона.

$$\Delta P_u = \zeta_0 \frac{v_0^2 \rho}{2}, \text{ Па}, \quad (13)$$

где ζ_0 – коэффициент гидравлического сопротивления циклона, отнесенный к скорости в сечении аппарата;

v_0 – условная скорость газа в циклоне (или вертикальная составляющая скорости газового потока в циклоне), м/с.

Обычно v_0 находится в пределах от 3 до 3,5 м/с.

Для большинства видов циклонов коэффициенты $\zeta_{ex} = const$ и $\zeta_0 = const$ не будут зависеть от числа Рейнольдса. Значения данных коэффициентов для наиболее встречающихся конструкций циклонов приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Значения коэффициентов гидравлического сопротивления циклонов

Тип циклона	Диаметр корпуса, м.	ζ_{ex}	ζ_0
СИОТ		6,0	
ЛИОТ	0,700	4,2	460
ВЦНИИОТ	0,370	9,3	
ЦКК		5,2	
РЦ		5,0	
ЦВР		9,6	
ЦН-11	0,450	6,1	250
ЦН-15	0,450	7,6	160
ЦН-15у	0,450	8,2	170
ЦН-24	0,450	10,3	80

Для того чтобы учитывать запыленность газовой смеси на входе в циклон и диаметр циклона необходимо вносить поправки в значение коэффициента гидравлического сопротивления циклонов

$$\zeta = K_1 K_2 \zeta_{табл}, \quad (14)$$

где K_1 – значение поправочного коэффициента на запыленность, принимается по таблице 2;

K_2 – значение поправочного коэффициента на диаметр циклона, принимается по таблице 3;

$\zeta_{табл}$ – коэффициент местного сопротивления циклона, определённый по таблице 1.

Таблица 2.

Значения поправочного коэффициента K_1

Тип циклона	Поправочный коэффициент K_1 при запыленности, г/м ³						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1,00	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,85
ЦН-15	1,00	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-15у	1,00	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
ЦН-24	1,00	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СДК-ЦН-33	1,00	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СДК-ЦН-34	1,00	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90

Таблица 3.

Значения поправочного коэффициента K_2

Диаметр циклона, м	ЦН-11	ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24	СДК-ЦН-33, СДК-ЦН-34
0,150	0,94	0,85	1,00
0,200	0,95	0,90	1,00
0,300	0,96	0,93	1,00
0,450	0,99	1,00	1,00
0,500	1,00	1,00	1,00

Эффективность очистки в циклоне можно определить по следующей формуле:

$$\eta = \frac{C_{ex} - C_{вых}}{C_{ex}} \cdot 100\%, \quad (15)$$

где C_{ex} – концентрация пыли в пылегазовом потоке на входе в циклон, г/м³;

$C_{вых}$ – концентрация пыли в пылегазовом потоке на выходе из циклона, г/м³.

На основании приведенных выше данных, можно сделать вывод, что циклоны имеют высокую эффективность улавливания частиц пыли диаметром более 10 мкм. При этом, циклоны имеют довольно посредственную эффективность при улавливании частиц пыли диаметром до 5 мкм. Данные частицы принято относить к мелкодисперсным [4].

Ежегодно промышленность развивается и растет пропорционально росту промышленности, увеличивается количество пылегазовых выбросов в окружающую среду. Большую часть таких выбросов составляют мелкодисперсные частицы диаметром до 5 мкм. По данным Всемирной организации здравоохранения, такие частицы являются причиной ухудшения здоровья человека, так как оказывают крайне негативное воздействие на дыхательную систему человека и организм в целом. Улавливание мелкодисперсных частиц тесно связано с созданием комфортных условий для проживания человека.

Улавливание частиц диаметром до 5 мкм зачастую связано со значительными экономическими затратами, так как данные очистительные установки требуют второй ступени очистки, более тонкой, в которой и будут оседать данные частицы. Данную проблему можно решить с помощью аппаратов комбинированного действия.

Существуют аппараты, которые сочетают в себе два и более механизмов осаждения. Они позволяют добиться высокой эффективности улавливания пыли, в том числе, мелкодисперсной. Ярким представителем таких аппаратов являются центробежные электрофильтры. Они сочетают в себе два механизма осаждения пыли – центробежный и электростатический. В таком случае общую эффективность очистки можно будет определить по формуле:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2), \quad (16)$$

где η_1 – эффективность центробежного осаждения;

η_2 – эффективность электростатического осаждения.

Эффективность улавливания пыли в таком устройстве будет значительно выше, чем в циклоне.

ВЫВОД

Выполнен анализ существующих конструкций центробежных пылеуловителей. Были определены их основные преимущества и недостатки. Приведена методика определения величины центробежной силы, действующей внутри циклона, определения минимального размера частиц, улавливаемых циклонами, определения его гидравлического сопротивления и эффективности улавливания. Проанализированы варианты повышения эффективности улавливания в циклонах для дальнейшей работы.

Список литературы

1. Асламова, В. С. Прямоточные циклоны. Теория, расчет, практика / В. С. Асламова. – Ангарск: Ангарская гос. техн. акад., 2008. – 233 с.
2. Карпов, С. В. Высокоэффективные циклонные устройства для очистки и теплового использования газовых выбросов / С. В. Карпов, Э. Н. Сабуров, Э. Н. Сабурова. – Архангельск: Изд-во Архангельского гос. техн. ун-та, 2002. – 504 с.
3. Васильченко, Н. М. Газоочистное оборудование: каталог / сост.: Н. М. Васильченко. – М.: ЦИНТИ-химнефтемаш, 1988. – 120 с.
4. Коузов, П. А. Очистка газов и воздуха от пыли в химической промышленности / П. А. Коузов, А. Д. Мальгин, Г. М. Скрябин. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Химия, 1993. – 320 с.
5. Ватин, Н. И. Очистка воздуха при помощи аппаратов типа циклон / Н. И. Ватин, К. И. Стрелец. – СПб.: Химия, 2003. – С. 19–22
6. Пирумов, А. И. Обеспыливание воздуха / А. И. Пирумов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.
7. Ужов, В. Н. Подготовка промышленных газов к очистке / В. Н. Ужов, А. Ю. Вальдберг. – М.: Химия, 1975. – 216 с.
8. Ужов, В. Н. Циклоны НИИОГАЗ. Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации / В. Н. Ужов. – Ярославль: Верх.-Волж. книж. изд-во, 1970. – 95 с.
9. Greenfield, R. R. High efficiency cyclone dust collector / R. R. Greenfield // Filtration and separation. – 1989. – Vol. 26, № 4. – P. 272–274.
10. Старк, С. Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве: учеб. для вузов / С. Б. Старк. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. – 400 с.
11. Jackson, R. Mechanical equipment for removing grit and dust from gases / R. Jackson. – Leatherhead: The British Coal Research Association, 1963. – 281 p.
12. Ter Linden A. I. Proc. Inst. Mechan. Eng., 1949, v.160, p. 15-39.
13. Stairmand C., Kesley R. The role of the cyclones in reducing atmospheric pollution. Chem. a. Ind. 1955, p. 110.
14. Первов, А. А. Экспериментальное исследование аэродинамики циклонов и разработка устройств для снижения их гидравлического сопротивления: дис. канд. техн. наук: 05.04.01 / А. А. Первов. – М., 1973. – 175 с.
15. Zyklonabscheider: pat. 3624086 DE, IPC4 B 04 C 5/103 / H. D. Maury, W. Buslowski, O. Kleffmann, B. Kraft; anmelder Orenstein & Koppel AG. – P 3624086.9; anmeldetag 17.07.1986; offenlegungstag 21.01.1988.
16. Centrifugal separator: pat. 2010128 US, cl. 209–144 / G.D. Arnold; applicant – № 53341; filed 17.09.1931; pub. 06.08.1935.
17. Shepherd, C. B. Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors / C. B. Shepherd, C. E. Lapple // Ind. Eng. Chem. – 1939. – Vol. 31, No. 8. – P. 972–984.
18. Dip pipe for facilities for the separation of substance mixtures: pat. 5275730 US, IPC5 B 65 G 53/60 / J. Keuschnigg; patentinhaber Voest-Alpine Krems Finaltechnik GmbH, J. Keuschnigg. – № 838798; filed 18.03.1992; pub. 04.01.1994.