

Федеральное агентство по образованию  
Нижегородский Государственный Технический Университет  
Кафедра "Инженерная экология и охрана труда"

## **ВЫБОР И РАСЧЕТ СРЕДСТВ ОЧИСТКИ ГАЗОВ**

Методические указания по выполнению практических работ по курсу  
"Экология"

г. Н. Новгород, 2005 год

УДК: 502.7:621.311.1 Составители: А.Б. Елькин, О.В.Маслеева

Выбор и расчет средств очистки газов: Методические указания для практических работ по дисциплине "Экология" /НГТУ; Сост. А.Б. Елькин, О.В. Маслеева. Н.Новгород, 2005, 11с.

## 1. Цель работы

- Ознакомиться с принципом работы циклона - аппарата сухой очистки от пыли.
- выбрать и рассчитать циклон для заданного источника образования пыли.

## 2. Краткие сведения из теории

Основными источниками загрязнения атмосферного воздуха являются автомобили, промышленные предприятия и тепловые электростанции. Ежегодно в воздух предприятиями черной и цветной металлургии, промышленности строительных материалов выбрасывается более 250 млн т мелкодисперсной пыли. Загрязнение атмосферы оказывает неблагоприятное воздействие на человека, флору и фауну, различные сооружения и транспортные средства и др. Очистка промышленных выбросов осуществляется в аппаратах сухой и мокрой очистки. Одним из аппаратов сухой очистки является циклон.

### Принцип работы циклона

Широкое применение для сухой очистки газов от пыли получили циклоны различных типов. В настоящее время применяется около двадцати типов циклонов. Сравнительные испытания циклонов различного типа показали, что для промышленного применения они могут быть ограничены в большинстве случаев цилиндрическими и коническими циклонами НИИОГАЗ (научно-исследовательский институт по промышленной и санитарной очистке газов). Наиболее часто применяются цилиндрические циклоны марок ЦН-11, ЦН-15, ЦН-24, конические СК ЦН-34, СК ЦН-34М, СДК ЦН-33, конструктивные схемы которых представлены на рис.1(1). Геометрические размеры цилиндрических и конических циклонов указываются в долях от внутреннего диаметра.

Газовый поток вводится в циклон через патрубок по касательной к внутренней поверхности корпуса и совершает вращательно-поступательное движение вдоль корпуса к бункеру. На частицу пыли действуют - сила тяжести, сила сопротивления среды, центробежная сила. Центробежная сила направлена по радиусу к стенкам циклона и определяется по формуле:

$$F_{цб} = \frac{\rho d_4^3}{6} \frac{W_{тг}^2}{R} (r_4 - r_r)$$

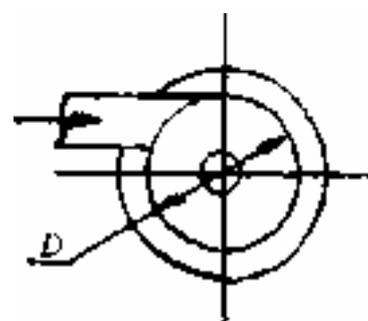
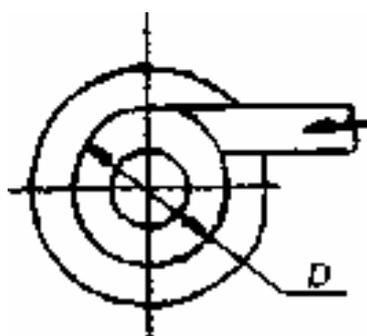
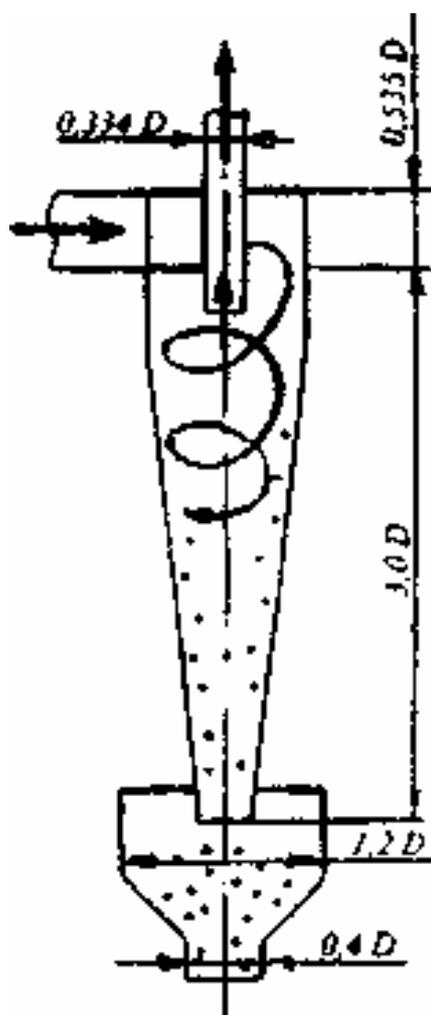
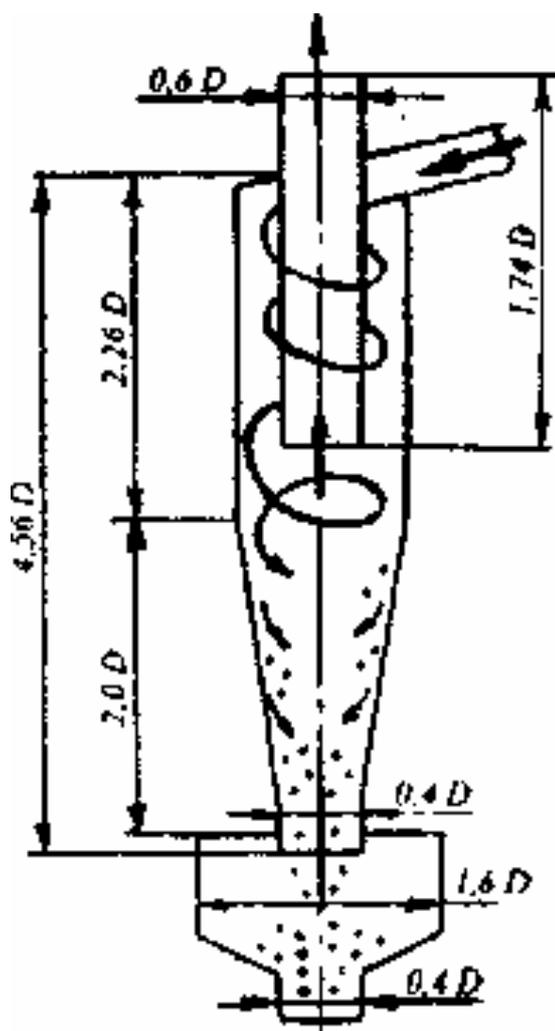
где  $d_4$  - диаметр частиц,

$W_{тг}$  - тангенциальная составляющая скорости газа.

$R$  - радиус циклона,

$r_4$  - плотность частиц пыли,

$r_r$  - плотность газа.



Циклон цилиндрический

Циклон конический

рис. 1

Эффективность циклона выше, чем больше диаметр частиц пыли, её удельный вес, скорость вращения газового потока и чем меньше диаметр циклона. Под действием центробежной силы частицы пыли образуют на стенках циклона пылевой слой, который постепенно опускается в бункер. Отделение частиц пыли от газа, попавшего в бункер, происходит при повороте газового потока в бункере на 180°. Освободившись от пыли, газовый поток образует вихрь и выходит через выходную трубу. Циклоны не применяются для очистки влажных газов и взрывоопасных сред.

Циклоны НИИОГАЗ подразделяются на высокоэффективные и высокопроизводительные. Циклоны СДК ЦН-33, СК ЦН 34, ЦН-11 относятся к высокоэффективным циклонам. При диаметрах менее 1 м они обеспечивают степень очистки  $\eta = 0.85 - 0.95$  при улавливании частиц диаметром более 5 мкм. Циклоны типа ЦН-24 относятся к высокопроизводительным, они могут надежно и без забивания работать при высокой входной запыленности. Циклоны типа ЦН-15 занимают среднее положение и обеспечивают несколько меньшую степень очистки, чем циклоны ЦН-11, но обладают большей надежностью при работе в условиях повышенной запыленности.

При выборе и расчете циклонов необходимо учитывать свойства пыли - абразивность и слипаемость. Для уменьшения абразивного износа следует выбирать циклоны, исходя из наименьших значений скорости газа. При улавливании сильно слипающейся пыли не рекомендуется применять циклоны малого диаметра (менее 0,8 м), которые склонны к залипанию. Так для очистки газов от сажи применяются конические циклоны серии СК, которые обладают высокой эффективностью за счет более высоко гидравлического сопротивления

### Расчет циклонов

Расчет циклонов ведут методом последовательных приближений.

Таблица 1 - Параметры, определяющие эффективность циклонов

Параметры	Тип циклона						
	ЦН-24	ЦН-15У	ЦН-15	ЦН-11	СДК ЦН-33	СКЦН- 34	СК ЦН 34М
$\omega_{оп}, \text{м/с}$	4,5	3,5	3,5	3,5	2,0	1,7	2,0
$d_{оп}^T, \text{мкм}$	8,50	6,00	4,50	3,65	2,31	1,95	1,13
$\lg d_h^T$	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,308	0,340

$\omega_{оп}$  - скорость движения газа в циклоне, м/с,

$d_{оп}^T$  - диаметр частиц освящаемых с эффективностью 50%, мкм,

$\lg d_h^T$  - стандартное отклонение функции распределения порционных коэффициентов очистки.

Расчет начинают с циклона, для которого диаметр частиц пыли должен быть ориентировочно  $d_m > 2d_{50}^T$ .  $d_m$  - медианный размер частиц, который представляет такой размер, при котором количество частиц крупнее  $d_m$ , равно количеству частиц мельче  $d_m$ .

Диаметр циклона вычисляется по формуле :

$$D = \sqrt{\frac{4 * Q}{\rho * w_{оп}}} \quad (1)$$

где Q - количество очищаемого газа, м<sup>3</sup>/с.

Полученное значение диаметра D округляется до ближайшего типового значения внутреннего диаметра циклона D<sub>ц</sub> (табл.2).

Таблица 2 - Типовые значения внутреннего диаметра циклона

D <sub>ц</sub> , м	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0
--------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

По выбранному диаметру циклона находится действительная скорость движения газа в циклоне :

$$w_p = \frac{4 * Q}{\rho * D_{ц}^2}, \text{ м/с} \quad (2)$$

Действительная скорость в циклоне не должна отклоняться от оптимальной более, чем на 15%

$$100 * \left| \frac{w_p - w_{оп}}{w_{оп}} \right| \leq 15\%$$

-При отклонении более чем 15% выбирают другой тип циклона.

Параметр  $d_{50}$  определяют следующим образом.  $d_{50}$  - диаметр частиц реально осаждаемых с эффективностью 50% при рабочих условиях. Величина  $d_{50}$  определяется по формуле :

$$d_{50} = d_{50}^T * \sqrt{\frac{D_{ц} * r_{ч} * m * w_T}{D_T * r_{чм} * m_T * w_p}} \quad (3)$$

Значение  $d_{50}^T$  соответствует следующим параметрам работы циклона:

$$w_T = 3,5 \text{ м/с}$$

$$D_T = 0,6 \text{ м}$$

$$r_{чм} = 1930 \frac{\text{кг}^2}{\text{м}^3}$$

$$m_T = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

С учетом этих значений формула (3) принимает вид :

$$d_{50} = d_{50}^T * \sqrt{\frac{D_{ц} * 1930}{0,6} * \frac{m}{r_{\psi}} * \frac{22,2 \cdot 10^{-6}}{w_p} * \frac{3,5}{w_p}} \quad (4)$$

Полученное значение  $d_{50}$  должно быть меньше  $d_m$  (заданного). Если это не выполняется, то необходимо выбрать другой циклон с меньшим значением  $d_{50}^T$ .

Расчет параметра  $X$  ведут по формуле :

$$X = \frac{\lg(d_m/d_{50})}{\sqrt{\lg^2 d_h^T + \lg^2 d_{\psi}}} \quad (5)$$

По величине параметра  $X$  определяют значение нормальной функции распределения  $\Phi(X)$ .  $\Phi(X)$  - это полный коэффициент очистки газа, выраженный в долях.

$$\Phi(X) = \begin{cases} 0,3762 \cdot X + 0,5 & 0 \leq X \leq 0,6 \\ 1 - \frac{1}{5,8 \cdot X + 0,5} & X > 0,6 \end{cases}$$

Эффективность очистки газа в циклоне ( $\eta$ ) определяется :

$$h = \frac{1 + \Phi(X)}{2} \quad (6)$$

Полученное значение сопоставляют с требуемым. Если  $\eta$  окажется меньше требуемого, то необходимо выбрать другой тип циклона с меньшим значением  $\omega_{оп}$  и  $d_{50}^T$ .

Определение коэффициента гидравлического сопротивления циклона :

$$x = K_1 * K_2 * x_{500} \quad (7)$$

где  $K_1$  - поправочный коэффициент на диаметр циклона (табл. 3),

$K_2$  - поправочный коэффициент на запыленность газа (табл. 4),

$x_{500}$  - коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона диаметром 500 мм (табл. 5).

Таблица 3 - Поправочный коэффициент  $K_1$  (3)

$D_{ц}, м$	ЦН-11	ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24	СДК ЦН-3, СДК ЦН-34, СДК ЦН-34М
0,2	0,95	0,90	1,00
0,3	0,96	0,93	1,00
0,4	0,99	1,00	1,00
$\geq 0,5$	1,00	1,00	1,00

Таблица 4 - Поправочный коэффициент  $K_2$  (3)

Тип циклона	Запыленность на входе, г/м <sup>3</sup> ( $C_{вх}$ )						
	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
СК ЦН-34	1,00	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90
СК ЦН-34М	1,00	0,99	0,97	0,95	-	-	-

Таблица 5 - Коэффициент гидравлического сопротивления  $x_{500}$  (2)

Тип циклона	ЦН-24	ЦН-15, ЦН-15У	ЦН-11	СДК ЦН-33	СК ЦН-34 СК ЦН-34М
$x_{500}$	75	155	245	520	1050

Вычисление гидравлического сопротивления циклона производят по формуле

$$\Delta P = x \frac{r w_p^2}{2}, \text{ Па}$$

где  $r$  - плотность газа, кг/м<sup>3</sup>

$w_p$  - скорость газа в циклоне, м/с.

Расчет мощности привода подачи газа. Величина гидравлического сопротивления и объемный расход ( $Q$ ) очищаемого газа определяют мощность ( $N$ ) привода устройства для подачи газа к циклону:

$$N = \frac{K_3 \Delta P Q}{h_M h_B} \quad (9)$$

$K_3$  - коэффициент запаса мощности, ( $K_3 = 1,2$ )

$h_M$  - КПД передачи мощности от электродвигателя к вентилятору ( $h_M = 0,8$ ).

$h_B$  - КПД вентилятора ( $h_B = 0,8$ ).

Определение концентрации пыли на выходе из циклона :

$$C_{вых} = C_{вх} (1 - h), \text{ г/м}^3 \quad (10)$$

### 3. Задание к работе

По своему варианту рассчитать циклон для заданного источника выделения пыли. Начертить циклон с указанием размеров.

## 4. Пример расчета

Исходные данные :

оборудование - вращающаяся цементная печь,

$$Q = 12 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$r = 1,29 \text{ кг}/\text{м}^3$$

$$d_M = 18 \text{ мкм}$$

$$\lg d_4 = 0,652 \quad C_{\text{вх}} = 20 \text{ г}/\text{м}^3$$

$$r_ч = 2000 \text{ кг}/\text{м}^3 \quad h = 0,8$$

Исходя из заданного размера частиц пыли ( $d_M = 18 \text{ мкм}$ ), выбираем циклон, который очищает от частиц пыли размером  $d_{50}^T = 8,5 \text{ мкм}$ .

Циклон: ЦН - 24

$$w_{\text{оп}} = 4,5 \text{ м}/\text{с} \quad d_{50}^T = 8,5 \text{ мкм} \quad \lg d_h^T = 0,308$$

Определяем диаметр циклона

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 12}{p \cdot 4,5}} = 1,84 \text{ м}$$

По таблице 2 выбираем ближайшее значение типового диаметра  $D_{Ц} = 1,8 \text{ м}$

$$w_p = \frac{4 \cdot 12}{p \cdot 1,8^2} = 4,72 \text{ м}/\text{с}$$

$$100 \left| \frac{4,72 - 4,5}{4,5} \right| = 4,8\% < 15\%$$

$$d_{50} = 8,5 * \sqrt{\frac{1,8}{0,6} * \frac{1930}{2000} * \frac{17,3 \cdot 10^{-6}}{22,2 \cdot 10^{-6}} * \frac{3,5}{4,72}} = 9,7 \text{ мкм}$$

$$d_{50} = 9,7 < d_M = 18 \text{ мкм}$$

$$X = \frac{\lg\left(\frac{18}{9,7}\right)}{\sqrt{0,308^2 + 0,652^2}} = 0,372$$

$$\Phi(X) = 0,3762 * 0,372 + 0,5 = 0,64$$

$$h = \frac{1 + 0,64}{2} = 0,82 \quad h > 0,8$$

$$x = 1 \cdot 0,93 * 75 = 69,75$$

$$\Delta z = 69,75 * \frac{1,29 * 4,72^2}{2} = 1002 \text{ Па}$$

$$N = \frac{1,2 * 1002 * 12}{0,8 * 0,8} = 22551 \text{ Вт}$$

$$C_{\text{вых}} = 20 * (1 - 0,812) = 3,76 \text{ г}/\text{м}^3$$

## **Выводы :**

циклон ЦН - 24 ;

$$D_u = 1,8\text{м} ;$$

$$\eta = 0,82;$$

$$N = 22551 \text{ Вт};$$

$$C_{\text{ВЫХ}} = 3,76 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$$

## **5. Варианты заданий**

Согласно заданию преподавателя ( табл. 6 ) выбрать и рассчитать циклон, обеспечивающий требуемую эффективность очистки газа. Обозначения принятые в табл. 6. :

$Q, \text{м}^3/\text{с}$  - объем очищаемого газа,

$r, \text{кг}/\text{м}^3$  - плотность газа при рабочих условиях,

$m, \text{Па}\cdot\text{с}$  - вязкость газа при рабочей температуре,

$d_M, \text{мкм}$  - медианный размер частиц пыли,

$\lg d_4$  - стандартное отклонение размеров частиц пыли,

$C_{\text{ВХ}}, \text{г}/\text{м}^3$  - входная концентрация пыли,

$r_4, \text{кг}/\text{м}^3$  - плотность частиц пыли,

$h$  - требуемая эффективность очистки газа.

## **6. Рекомендуемая литература**

1. Очистка и рекуперация промышленных выбросов: Учебное пособие для вузов / В. Максимов, И.В. Вольф, Л.Н. Григорьев и др. - М.: Лесная промышленность, 1981, 640 с.
2. Охрана окружающей среды: Учебник для технических вузов / С.В. Белов, Ф.А. Барбинов, АЛ. Зозьяков и др.- М.: Высшая школа, 1991, 319 с.
3. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И.Мягков и др: Под ред. А.А. Русанова. - М.: Энергоатомиздат, 1983, 312 с.

Таблица 6. Исходные данные для расчета циклона

№	Наименование оборудования	$Q$	$r$	$m$	$d_M$	$\lg d_4$	$c_{BX}$	$r_4$	$h$
1	Клинкерно-обжиговая печь	20	1,29	17,3	23	0,501	30	2000	0,85
2		26	1,29	17,3	20	0,602	10	2000	0,80
3		10	1,29	17,3	14	0,535	25	2000	0,80
4		16	1,29	17,3	9	0,497	20	2000	0,80
5	Шахтная мельница	0.1	1,29	17,3	56	0,97	100	2240	0,80
6	Крекинг установка	2	1,29	17,3	16	0,250	10	2600	0,85
7		10	1,29	17,3	14	0,250	20	2600	0,85
8	Крекинг установка	10	1,29	17,3	7	0,301	15	2600	0,85
9	Углесушильный барабан	5	1,29	17,3	15	0,334	50	1350	0,80
10	Шаровая мельница	1	1,29	17,3	6	0,468	20	2900	0,80
11	Вращающаяся цементная печь	10	1,29	17,3	7	0,345	40	2000	0,80
12	Вращающаяся цементная печь	10	1,29	17,3	18	0,652	20	2000	0,85
13	Электролизер алюминия	5	1,29	17,3	10	0,352	1	2700	0,85
14	Вращающаяся печь обжига	2	1,29	17,3	13	0,215	100	2900	0,85
15	Вращающаяся печь обжига	3	1,29	17,3	8	0,506	40	2650	0,80
16	Распылительная сушилка	10	1,29	17,3	8	0,210	4	1800	0,80
17	Барабанная сушилка	10	1,29	17,3	15	0,360	10	1800	0,80
18		12	1,29	17,3	11	0,360	20	1800	0,80
19	Барабанная сушилка	8	1,29	17,3	20	0,352	10	2700	0,85
20	Цементная мельница	5	1,29	17,3	12	0,468	60	2900	0,85
21	Наждачный станок	0,5	1,29	17,3	38	0,214	10	2500	0,85
22	Шаровая мельница	3	1,29	17,3	9	0,385	10	2900	0,80
23	Электролизер алюминия	8	1,29	17,3	10	0,468	2	2700	0,85
24	Наждачный станок	0,6	1,29	17,3	30	0,312	15	2500	0,85
25	Шаровая мельница	2	1,29	17,3	6	0,268	10	2900	0,80
26	Наждачный станок	0,8	1,29	17,3	30	0,314	8	2500	0,85
27	Наждачный станок	10	1,29	17,3	6	0,468	10	2000	0,80
28	Шаровая мельница	12	1,29	17,3	7	0,214	2	2000	0,80
29	Наждачный станок	8	1,29	17,3	18	0,385	15	2240	0,80
30	Барабанная сушилка	5	1,29	17,3	10	0,468	10	2600	0,85

