

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич  
Должность: ректор  
Дата подписания: 03.02.2021 15:23:18  
Уникальный программный ключ:  
9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781957bc730df237Ad16f7c0ce57c605c6

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«Юго-Западный государственный университет»**  
(ЮЗГУ)

**Кафедра охраны труда и окружающей среды**



**Расчет одиночных циклонов**

Методические указания к проведению практического занятия  
по дисциплинам «Экология», «Экология Курского края»,  
«Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности»,  
«Системы защиты воздушной среды» для студентов всех специальностей и направлений

Курск 2017

УДК 62 : 784.433

Составители: В.В. Юшин, А.В. Гнездилова, А.А. Иорданов

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент Г.П.Тимофеев

**Расчет одиночных циклонов:** методические указания к проведению практического занятия по дисциплинам «Экология», «Экология Курского края», «Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности», «Системы защиты воздушной среды» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.В. Юшин, А.В. Гнездилова, А.А. Иорданов Курск, 2017. 12 с.: табл. 9. Библиогр.: с. 12.

Излагается порядок определения эффективности пылеулавливания в одиночных циклонах расчетным и графическим методами.

Предназначены студентам всех специальностей.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать                      Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л.                      . Уч.-изд.л.                      . Тираж 30 экз. Заказ                      . Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

### ***Цель занятия:***

- изучить основные виды устройств для очистки выбросов от взвешенных веществ (одиночный циклон);
- научиться выполнять расчет основных технологических параметров систем защиты воздушной среды (эффективность пылеулавливания и гидравлическое сопротивление одиночного циклона).

### ***Общие положения***

Наибольшее распространение для очистки газов в промышленности получили циклоны. Это обусловлено относительно простой их конструкцией, малым гидравлическим сопротивлением, малыми габаритными размерами и относительно высокой эффективностью.

Выделение пыли в циклонах происходит под действием центробежных сил, возникающих в результате вращения газового потока в корпусе аппарата. Несмотря на большое многообразие конструкций циклонов, его классический вариант содержит следующие составные части: цилиндрическую обечайку 3 с крышкой и тангенциальным патрубком для ввода запыленного газа 1, конус 4 с патрубком для отвода пыли, центральную трубку с патрубком 2 для отвода очищенного газа, пылесборник 5 (рис.1). Запыленный газ поступает в циклон по тангенциально расположенному патрубку 1, в результате чего он приобретает вращательное движение. Совершив 2-3 оборота в кольцевом зазоре между корпусом и центральной трубой, газ винтообразно опускается вниз, причем в конусной части аппарата вследствие уменьшения диаметра скорость вращения потока увеличивается. Под действием центробежной силы частицы пыли отбрасываются к стенкам циклона, благодаря чему основная масса пылевых частиц сосредотачивается в потоке газа, движущегося непосредственной близости от стенок аппарата. Этот поток направляется в нижнюю часть конуса 4, частицы пыли при этом попадают в пылесборник 5, а газ, совершив крутой поворот, по центральной трубе 2 выводится из аппарата.

Расчет циклонов заключается в определении потери давления и эффективности очистки. Расчет эффективности осуществляют по методу с использованием интеграла вероятности  $\Phi(x)$ . При этом исходят из того, что кривая фракционной эффективности циклонов  $\eta_{\phi} = f(d_{\phi})$  при построении в вероятностно - логарифмической системе координат приобретает вид прямой линии, что свидетельствует о нормальном законе распределения, и распределение подлежащих улавлива-

нию частиц пыли на входе в аппарат также является нормально-логарифмическим.

Для расчета циклонов необходимы следующие данные: объемный расход газов, подлежащих обеспыливанию,  $Q$ , м<sup>3</sup>/с; динамическая вязкость газа при рабочей температуре  $\mu$ , Па·с; плотность газа при рабочих условиях  $\rho_2$ , кг/м<sup>3</sup>; дисперсный состав пыли, задаваемый медианным диаметром  $d_m$ , мкм, и среднее квадратическое отклонение в функции данного распределения частиц  $lg \sigma_g$ ; концентрация пыли в газах  $C_{вх}$ , г/м<sup>3</sup>; плотность частиц пыли  $\rho_ч$ , кг/м<sup>3</sup>.

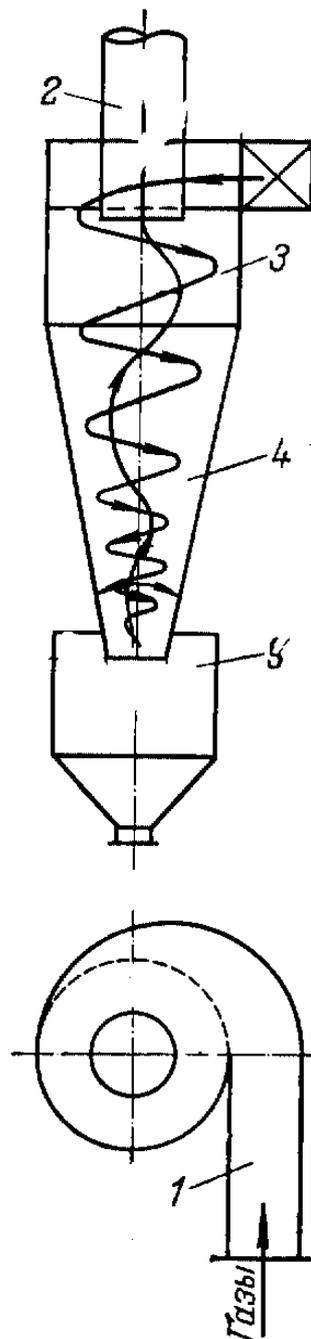


Рисунок 1 - Схема работы циклона: 1 – входной патрубок; 2 – выхлопная труба; 3 – цилиндрическая часть; 4 – коническая часть; 5 – бункер

Последовательность расчета циклонов:

1. Задавшись типом циклона, по табл. 1 или 2 определяют оптимальную скорость газа в аппарате  $v_{onm}$  и дисперсию распределения значений фракционной эффективности пылеуловителя  $lg \sigma_{\eta}$ .

Таблица 1 – Параметры, определяющие эффективность работы циклонов конструкции НИИОГаза

Параметры	ЦН-24	ЦН-15У	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34
$d_{50}^T$ , мкм	8,50	6,00	4,50	3,65	2,31	1,95
$lg \sigma_{\eta}$	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,308
$v_{onm}$ , м/с	4,5	3,5	3,5	3,5	2,0	1,7

Таблица 2

Параметр	Циклон конструкции		
	СИОТа	ВЦНИИОТа	Гипродревпрома (тип Ц)
$d_{50}^T$ , мкм	2.6	8.6	4.12
$lg \sigma_{\eta}$	0.28	0.32	0.34
$v_{onm}$ , м/с	1.00	4.00	3.3
$\xi$	1400	75	210

Примечание: Значения  $d_{50}^T$  (диаметр частиц, улавливаемых в аппарате на 50%) приведенных в таблице, соответствуют следующим условиям работы циклонов: средняя скорость газа в циклоне  $v_T = 3,5$  м/с; диаметр циклона  $D_T = 0,6$  м; плотность частиц  $\rho_{чТ} = 1930$  кг/м<sup>3</sup>; динамическая вязкость газа  $\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6}$  (Н·с)/м<sup>2</sup>.

2. Рассчитывают необходимую площадь сечения циклонов, м<sup>2</sup>:

$$F = \frac{Q}{v_{onm}}, \quad (1)$$

где  $Q$  – объемная скорость газа, м<sup>3</sup>/с.

3. Определяют диаметр циклона, м, задаваясь количеством циклонов  $N$ :

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,785 \cdot N}}. \quad (2)$$

Диаметр циклона округляют до величины из стандартного ряда диаметров (табл. 3).

Таблица 3 – Стандартный ряд диаметра циклонов

ЦН, СК, СДК	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
ВЦНИИОТ	0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,37; 0,455; 0,525; 0,585; 0,645; 0,695
СИОТ	0,703; 1,015; 1,242; 1,428; 1,593; 1,698; 1,943

4. Вычисляют действительную скорость газа в циклоне:

$$v = \frac{Q}{0,785 \cdot N \cdot D^2} \cdot (3)$$

Скорость в циклоне не должна отклоняться более чем на 15% от оптимальной.

5. Рассчитывают коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона или группы циклонов:

$$\zeta = k_1 \cdot k_2 \cdot \zeta_{ц500}^{c(п)} + k_3, (4)$$

где  $\zeta_{ц500}^{c(п)}$  (дзета)- коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона диаметром 500 мм, выбираемой по табл.4. Индекс “с” означает, что циклон работает в гидравлической сети, а индекс “п” - без сети, т.е. работает прямо на выхлоп в атмосферу;  $k_1$  - поправочный коэффициент на диаметр циклона, определяемый по табл. 5.;  $k_2$  - поправочный коэффициент на запыленность газа, определяемый по табл.6.  $k_3$  - коэффициент, учитывающий дополнительные потери давления, связанные с компоновкой циклонов в группу, определяемый по табл.7. Для одиночных циклонов  $k_3 = 0$ .

Таблица 4 – Значения коэффициентов сопротивления циклонов

Тип циклона	d/D	Без дополнительных устройств		С кольцевым диффузором		С выходящей улиткой	С отводом 90° R/d=1,5	
		$\zeta_{ц500}^c$	$\zeta_{ц500}^п$	$\zeta_{ц500}^c$	$\zeta_{ц500}^п$		$\zeta_{ц500}^c$	$\zeta_{ц500}^c$
ЦН-11	0.59	245	250	207	215	235	$l/d=0-12$ $\zeta_{ц500}^c$	$l/d>12$ $\zeta_{ц500}^c$
ЦН-15	-	155	163	132	140	150	155	160
ЦН-15У	-	165	170	140	148	158	165	170
ЦН-24	-	75	80	64	70	73	75	80
СДК-ЦН-33	0.33	520	600	-	-	500	-	560
СК-ЦН-34	0.34	1050	1150	-	-	-	-	-

Таблица 5 – Поправочный коэффициент  $k_1$  на диаметр циклона

Диаметр	ЦН-11	ЦН-15; ЦН-24	СДК-ЦН-33; СК-ЦН-34
---------	-------	--------------	---------------------

циклона, мм			
200	0.95	0.90	1.0
300	0.96	0.93	1.0
400	0.99	1.0	1.0
500	1.0	1.0	1.0

Таблица 6 – Поправочный коэффициент  $k_2$  на запыленность газов

Тип циклона	Начальная концентрация пыли, г/м <sup>3</sup>						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0.96	0.94	0.92	0.9	0.87	0.5
ЦН-15	1	0.93	0.92	0.91	0.9	0.87	0.86
ЦН-15У	1	0.93	0.92	0.91	0.89	0.88	0.87
ЦН-24	1	0.95	0.93	0.92	0.9	0.87	0.86
СДК-ЦН-33	1	0.81	0.785	0.78	0.77	0.76	0.745
СК-ЦН-34	1	0.98	0.947	0.93	0.915	0.91	0.9
СК-ЦН-34М	1	0.99	0.97	0.95	-	-	-

Таблица 7 – Коэффициент  $k_3$ , учитывающий дополнительные потери давления, связанные с групповой компоновкой

Характеристика группового циклона	Значения коэффициента
Круговая компоновка, нижний организованный подвод	60
Прямоугольная компоновка, организованный подвод, циклонные элементы расположены в одной плоскости	35
То же, но улиточный отвод из циклонных элементов	28
Прямоугольная компоновка. Свободный подвод потока в общую камеру	60

6. Определяют потери давления в циклоне, Па, по формуле

$$\Delta P = \zeta \cdot \frac{\rho_2 \cdot v^2}{2} \quad (5)$$

где  $\rho_2$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>

Если потери давления  $\Delta P$  оказались приемлемыми, переходят к расчету эффективности очистки газа в циклоне.

7. Взяв в табл.1 или 2 параметр  $d_{50}^T$ , характеризующего парциальную эффективность выбранного типа циклона при указанных в таблице условиях (диаметре циклона, скорости потока, плотности пыли, динамической вязкости газа) определяют диаметр частиц, улавливаемых в аппарате на 50% при рабочих условиях:

$$d_{50} = d_{50}^T \cdot \sqrt{\left(\frac{D}{D_T}\right) \cdot \left(\frac{\rho_{чТ}}{\rho_ч}\right) \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_T}\right) \cdot \left(\frac{v_T}{v}\right)}. \quad (6)$$

Динамическую вязкость газа  $\mu$ , Па·с, определяют в зависимости от температуры газа по таблице 8.

Таблица 8 – Зависимость вязкости воздуха от температуры

Температура воздуха, °С	Вязкость воздуха, $10^{-6}$ Па·с	Температура воздуха, °С	Вязкость воздуха, $10^{-6}$ Па·с
50	19,6	300	29,7
100	21,9	350	31,4
150	24,1	400	33
200	26	450	34,6
250	27,4	500	36,2

8. Определяют параметр  $X$  по формуле

$$X = \frac{\lg(d_m/d_{50})}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_\nu}}$$

9. По табл.9 определяют значения  $\Phi(x)$  представляющее собой полный коэффициент очистки газа, выраженных в долях.

Для расчета приближенной степени очистки газов можно воспользоваться графическим методом. Номограмма для определения степени очистки газов в циклоне представлена в приложении 1. Исходными данными в данном случае являются: температура  $t$ , °С; гидравлическое сопротивление  $\Delta p$ , Па; медианный размер пыли,  $d_m$ , мкм; ее плотности  $\rho_n$ , кг/м<sup>3</sup>, и диаметра циклона  $D$ , м.

Для определения степени очистки циклона по номограмме, на верхней шкале сопротивления циклона находим точку, соответствующую рассчитанному сопротивлению циклона. Через эту точку и точку, соответствующую выбранному циклону, проводим прямую линию до пересечения с горизонтальной шкалой в середине номограммы, на которой нанесена степень улавливания пыли в выбранном циклоне. Через эту точку проводим вертикаль до линии, соответствующей заданной температуре газа, далее горизонталь до линии, соответствующей диаметру циклона. Затем вертикаль до линии, соответствующей плотности пыли, и горизонталь до линии, соответ-

вующей среднему медианному размеру пыли. Далее проводим вертикаль до шкалы, по которой и определяем степень улавливания пыли.

*Задание:* Рассчитать одиночный циклон, работающий прямо на выхлоп в атмосферу, расчетным и графическим (с помощью номограммы) методами. Сравнить полученные значения и сделать вывод. Плотность газа  $\rho_2 = 1,28 \text{ кг/м}^3$ . Среднее квадратическое отклонение в функции данного распределения частиц  $lg \sigma_y = 0,5$ .

№ варианта	Тип циклона	Расход очищаемого воздуха $Q$ , $\text{м}^3/\text{ч}$	Способ установки циклонов	Температура газа $t$ , $^{\circ}\text{C}$	Плотность пыли $\rho_y$ , $\text{кг/м}^3$	Начальная концентрация пыли $C_{\text{вх}}$ , $\text{г/м}^3$	Размер пыли $d_m$ , $\mu\text{м}$
1	ЦН-11	1000	С кольцевым диффузором	100	2000	10	20
2	ЦН-15	3000			2200	20	22
3	ЦН-24	5000			2400	80	28
4	ЦН-15	6000			2500	10	20
5	ЦН-24	3000	Без дополнительных устройств	200	2600	40	30
6	СДК-ЦН-33	5000			2700	80	15
7	ЦН-15	4000			2800	40	25
8	СИОТ	6000			2900	20	20
9	СК-ЦН-34	3000			2000	40	9
10	СИОТ	2500			2400	80	25
11	СК-ЦН-34	5000			2250	120	7
12	ЦН-11	1000	С выходной улиткой	300	2200	40	22
13	ЦН-24	3000			2000	20	18
14	СДК-ЦН-33	1500			2500	10	15
15	ЦН-11	2500			2100	20	15

## Значения нормальной функции распределения

x	$\Phi(x)$	x	$\phi(x)$	x	$\phi(x)$	x	$\phi(x)$
-2,70	0,0035	-1,06	0,1446	0,00	0,5000	1,08	0,8599
-2,60	0,0047	-1,04	0,1492	0,02	0,5080	1,10	0,8643
-2,50	0,0062	-1,02	0,1539	0,04	0,5160	1,12	0,8686
-2,40	0,0082	-1,00	0,1587	0,06	0,5239	1,14	0,8729
-2,30	0,0107	-0,98	0,1635	0,08	0,5319	1,16	0,8770
-2,20	0,0139	-0,96	0,1685	0,10	0,5398	1,18	0,8810
-2,10	0,0179	-0,94	0,1736	0,12	0,5478	1,20	0,8849
-2,00	0,0228	-0,92	0,1788	0,14	0,5557	1,22	0,8888
-1,98	0,0239	-0,90	0,1841	0,16	0,5636	1,24	0,8925
-1,96	0,0250	-0,88	0,1894	0,18	0,5714	1,26	0,8962
-1,94	0,0262	-0,86	0,1949	0,20	0,5793	1,28	0,8997
-1,92	0,0274	-0,84	0,2005	0,22	0,5871	1,30	0,9032
-1,90	0,0288	-0,82	0,2061	0,24	0,5948	1,32	0,9066
-1,88	0,0301	-0,80	0,2119	0,26	0,6026	1,34	0,9099
-1,86	0,0314	-0,78	0,2177	0,28	0,6103	1,36	0,9131
-1,84	0,0329	-0,76	0,2236	0,30	0,6179	1,38	0,9162
-1,82	0,0344	-0,74	0,2297	0,32	0,6255	1,40	0,9192
-1,80	0,0359	-0,72	0,2358	0,34	0,6331	1,42	0,9222
-1,78	0,0375	-0,70	0,2420	0,36	0,6406	1,44	0,9251
-1,76	0,0392	-0,68	0,2483	0,38	0,6480	1,46	0,9279
-1,74	0,0409	-0,66	0,2546	0,40	0,6554	1,48	0,9306
-1,72	0,0427	-0,64	0,2611	0,42	0,6628	1,50	0,9332
-1,70	0,0446	-0,62	0,2676	0,44	0,6700	1,52	0,9357
-1,68	0,0465	-0,60	0,2743	0,46	0,6772	1,54	0,9382
-1,66	0,0485	-0,58	0,2810	0,48	0,6844	1,56	0,9406
-1,64	0,0505	-0,56	0,2877	0,50	0,6915	1,58	0,9429
-1,62	0,0526	-0,54	0,2946	0,52	0,6985	1,60	0,9452
-1,60	0,0548	-0,52	0,3015	0,54	0,7054	1,62	0,9474
-1,58	0,0571	-0,50	0,3085	0,56	0,7123	1,64	0,9495
-1,56	0,0594	-0,48	0,3156	0,58	0,7190	1,66	0,9515
-1,54	0,0618	-0,46	0,3228	0,60	0,7257	1,68	0,9535
-1,52	0,0643	-0,44	0,3300	0,62	0,7324	1,70	0,9554
-1,50	0,0668	-0,42	0,3372	0,64	0,7389	1,72	0,9573
-1,48	0,0694	-0,40	0,3446	0,66	0,7454	1,74	0,9591
-1,46	0,0721	-0,38	0,3520	0,68	0,7517	1,76	0,9608
-1,44	0,0749	-0,36	0,3594	0,70	0,7580	1,78	0,9625
-1,42	0,0778	-0,34	0,3669	0,72	0,7642	1,80	0,9641
-1,40	0,0808	-0,32	0,3745	0,74	0,7703	1,82	0,9656
-1,38	0,0838	-0,30	0,3821	0,76	0,7764	1,84	0,9671
-1,36	0,0869	-0,28	0,3897	0,78	0,7823	1,86	0,9686
-1,34	0,0901	-0,26	0,3974	0,80	0,7881	1,88	0,9699
-1,32	0,0934	-0,24	0,4052	0,82	0,7939	1,90	0,9713
-1,30	0,0968	-0,22	0,4129	0,84	0,7995	1,92	0,9726
-1,28	0,1003	-0,20	0,4207	0,86	0,8051	1,94	0,9738
-1,26	0,1038	-0,18	0,4286	0,88	0,8106	1,96	0,9750
-1,24	0,1075	-0,16	0,4364	0,90	0,8159	1,98	0,9761
-1,22	0,1112	-0,14	0,4443	0,92	0,8212	2,00	0,9772
-1,20	0,1151	-0,12	0,4522	0,94	0,8264	2,10	0,9821
-1,18	0,1190	-0,10	0,4602	0,96	0,8315	2,20	0,9861
-1,16	0,1230	-0,08	0,4681	0,98	0,8365	2,30	0,9893
-1,14	0,1271	-0,06	0,4761	1,00	0,8413	2,40	0,9918
-1,12	0,1314	-0,04	0,4840	1,02	0,8461	2,50	0,9938
-1,10	0,1357	-0,02	0,4920	1,04	0,8508	2,60	0,9953
-1,08	0,1401	0,00	0,5000	1,06	0,8554	2,70	0,9965



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Схема работы циклона.
2. Порядок расчета гидравлического сопротивления циклонов.
3. Расчет эффективности циклона по методу с использованием интеграла вероятности.
4. Расчет приближенной степени очистки газов в циклоне графическим методом?

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алиев Г.М.А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: справочник. – М.: Металлургия, 1986.
2. Справочник по пыле- и золоулавливанию / Под ред. А.А. Русанова. – М.: Химия, 1983.
3. Физико-химические свойства пылей: методические указания к проведению практического занятия / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.В. Юшин, Курск, 2012.
4. Юшин В.В. и др. Техника и технология защиты воздушной среды (учебное пособие) М.: Высшая школа, 2008.
5. ГОСТ Р 51708-2001 Пылеуловители центробежные. Требования безопасности и методы испытаний.