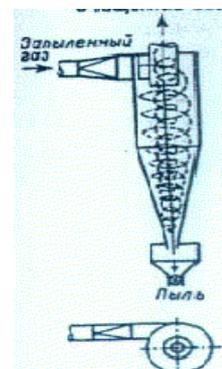


Циклоны

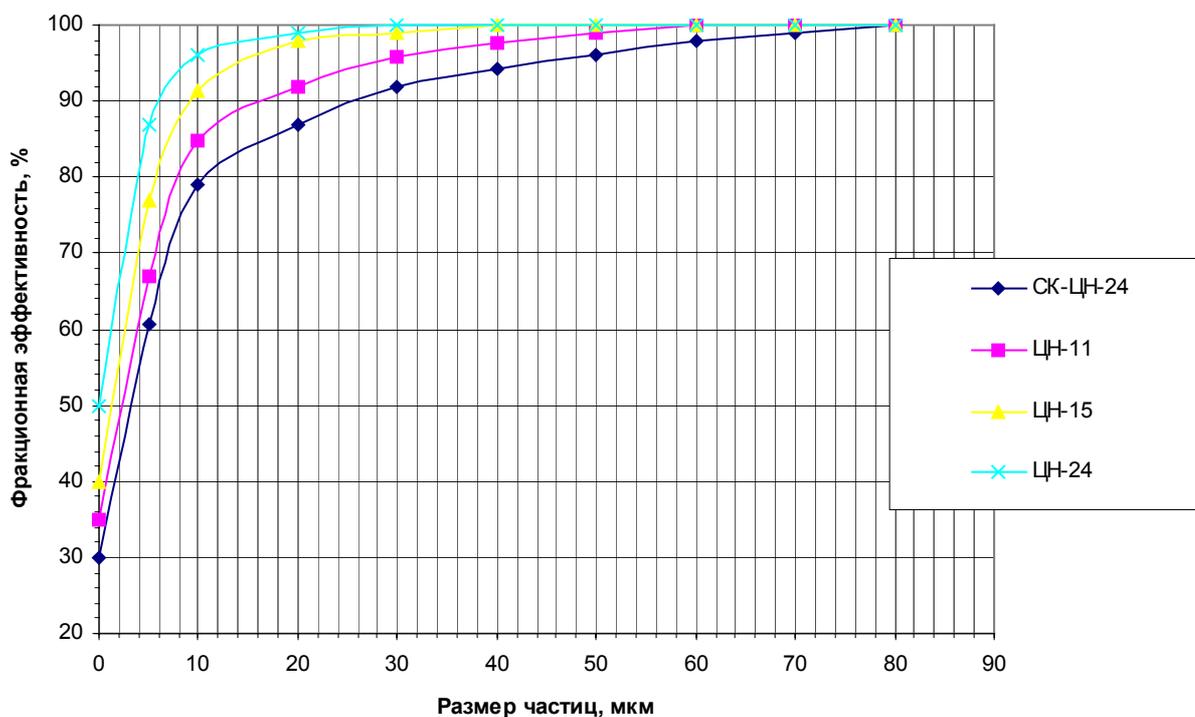
Циклоны – устройства для очистки воздуха от аэрозольных частиц на основе использования центробежной силы.

Общая характеристика циклонов

Циклоны широко применяются для очистки от пыли вентиляционных и технологических выбросов во всех отраслях промышленности. Их широкое распространение обусловлено простотой устройства циклона, надежностью в эксплуатации, и небольшими капитальными и эксплуатационными затратах. К недостаткам циклонов следует отнести сравнительно небольшую фракционную эффективность в области фракций пыли размером 5 – 10 мкм. Поэтому циклоны, в основном, используют для грубой и средней очистки воздуха от сухой, неслипающейся пыли.



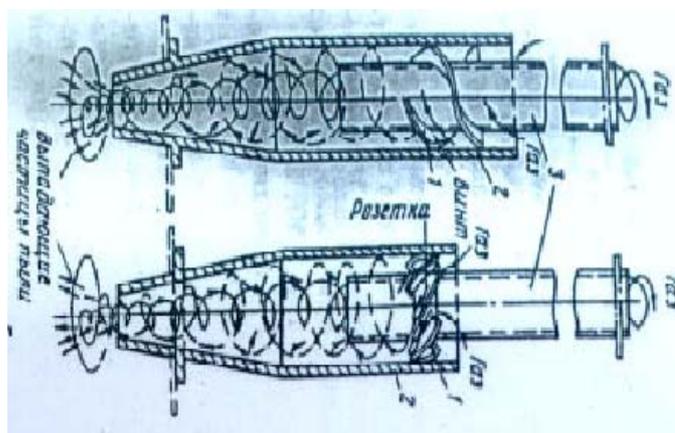
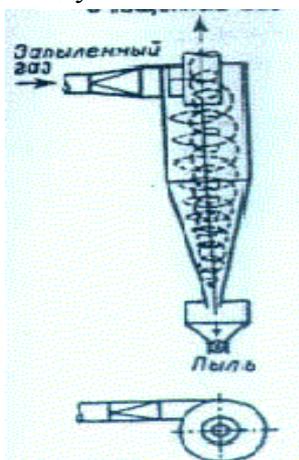
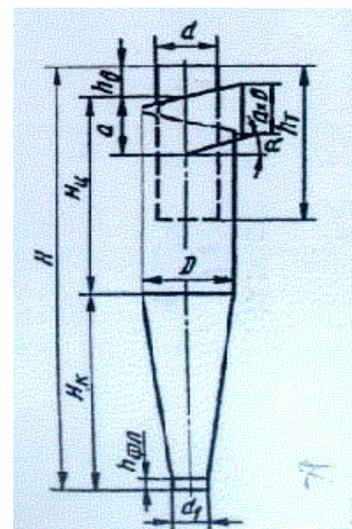
Эффективности циклонов различных марок представлены на следующем графике:
График 1. Эффективность циклонов различных марок:



Циклоны обычно делят на циклоны большой производительности и высокой эффективности. Первые имеют, обычно, большой диаметр обеспечивают очистку больших количеств воздуха, вторые же имеют небольшой диаметр (до 600 мм.). Часто применяют параллельную групповую установку этих циклонов.

Корпус циклона состоит из конической и цилиндрической частей. По форме циклоны разделяют на цилиндрические ($H_{ц} > H_{к}$) и конические ($H_{ц} < H_{к}$). $H_{ц}$ и $H_{к}$ – высота цилиндрической и конической части циклона соответственно. Запыленный воздух подается в циклон через патрубок, а очищенный – удаляется через выхлопную трубу. Применяют правые (направление потока воздуха – по часовой стрелке если смотреть сверху) и левые (направление потока воздуха – против часовой стрелки если смотреть сверху) циклоны.

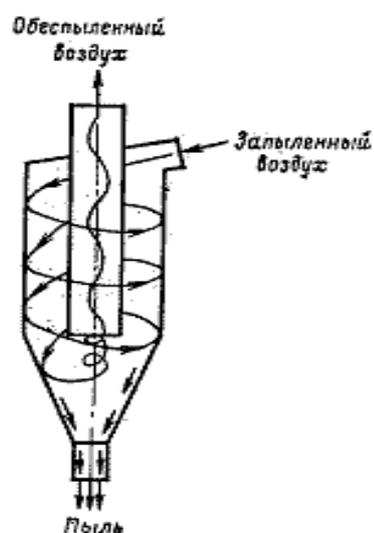
В зависимости от способа подведения очищаемого воздуха к циклону различают циклоны с тангенциальным и винтовым подводом воздуха. При прочих равных условиях циклоны с винтовым подводом обладают более высокой эффективностью очистки, нежели, чем циклоны с тангенциальным способом подвода воздуха.



Циклон с тангенциальным подводом воздуха Циклон с винтовым подводом воздуха

Теоретические основы циклонного процесса

Улавливание пыли в циклонных аппаратах основано на использовании центробежных сил. Пылегазовый поток с большой скоростью по касательной поступает в цилиндрическую часть корпуса циклона, и совершает движение по нисходящей спирали. Под действием центробежной силы, возникающей при вращательном движении потока, пылевидные частицы перемещаются к стенкам циклона. Пыль отделяется от воздуха при переходе воздушного потока из нисходящего в восходящий, и, по конической части корпуса циклона попадают через пылевыводное отверстие в бункер для сбора пыли.



Процессы, происходящие в циклонах, весьма сложны и зависят от многих факторов. Поэтому для теоретических расчетов приходится делать ряд допущений:

1. Пылевидные частицы, поступающие с воздушным потоком в циклон, имеют сферическую форму.

2. При входе в циклон частицы равномерно распределены по сечению.
3. Частицы, достигшие стенок циклона, осаждаются (в действительности часть этих осажденных частиц будет выброшена вследствие турбулизации потока газа).
4. Не учитывается коагуляция пылевидных частиц в циклоне.

При разработке конструкций циклонов приходится в значительной мере учитывать экспериментальные данные и опыт эксплуатации циклонов в производственных условиях. Теоретические обоснования процесса очистки пыли в циклонах пока еще не полностью изучены, и не могут удовлетворять современным требованиям.

Центробежная сила, действующая на частицу, может быть определена из выражения:

$$F_{ц} = \frac{mv_T^2}{R}$$

А сила сопротивления среды

$$F = 3\pi v_p d \mu$$

где

v_T - тангенциальная скорость пылевой частицы, принимаемая равной скорости газового потока при входе в циклон, м/с.

v_p - скорость движения частицы в радиальном направлении, м/с.

R - расстояние от центра вращения газового потока (оси циклона) до частицы, м.

m - масса шаровой частицы, равная $m = V\rho = \frac{\pi d^3}{6} \rho$, кг.

d - диаметр частицы, м.

ρ - плотность частицы, кг/м³.

μ - вязкость газа, Нс/м².

После входа газового потока запыленного газа в циклон силы $F_{ц}$ и F уравниваются, то есть

$$\frac{mv_T^2}{R} = 3\pi v_p d \mu,$$

и частица движется в радиальном направлении с постоянной скоростью, которую можно определить из написанного выше равенства:

$$v_p = \frac{mv_T}{3R\pi d \mu} = \frac{d^2 v_T^2 \rho}{18R\mu}$$

Из всех, движущихся в потоке, частиц наибольший путь пройдет частица, находившаяся при входе в циклон вблизи выхлопной трубы. Ее путь будет равен $R_2 - R_1$.

Здесь

R_1 - радиус выхлопной трубы циклона, м.

R_2 - радиус цилиндрической части циклона, м.

Время, затрачиваемое частицей на прохождение этого пути:

$$\tau = \frac{R_2 - R_1}{v_p}$$

В формуле, выражающей v_p , величина R - переменная. Она изменяется в пределах $R_1 < R < R_2$, и ее среднее значение можно принять как $R = \frac{R_1 + R_2}{2}$.

Подставляем это значение R в написанную формулу:

$$v_p = \frac{d^2 v_T^2 \rho}{18 \frac{R_1 + R_2}{2} \mu}$$

Или

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

Из этой формулы можно найти минимальный размер частиц, улавливаемых данным циклоном. Согласно допущению улавливаются все частицы, осевшие на стенках циклона, то есть успевшие пройти путь $R_2 - R_1$ за время прохождения циклона газовым потоком, то есть за время нахождения частицы в циклоне

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

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

Данные, полученные по формулам, обычно отличаются от результатов экспериментальных исследований. Результаты экспериментов показывают, что частицы с размером большим d_{\min} улавливаются в циклоне не полностью. В то же время имеет место улавливание частиц, с диаметром меньше, чем d_{\min} . К примеру, при испытаниях циклона на древесной пыли, образующейся после шлифовки с размером частиц менее 12 микрон, эффективность оказалась выше расчетной в несколько раз, то же самое происходит при улавливании отдельных видов сажи. Это объясняется тем, что при расчете не учитывалась коагуляция частиц внутри циклона.

Конструкции циклонов

Конструкциями циклонов у нас в стране занимается ряд научных организаций: институт НИИОГаз (Москва), Свердловский институт охраны труда (Екатеринбург), Ростовский Государственный строительный университет (Ростов – на – Дону) и другие.

В институте НИИОГаз разработан ряд конструкций цилиндрических и конических циклонов. Широкое распространение в промышленности получили циклоны ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24. Цифровое обозначение циклона соответствует углу α наклона крышки аппарата и патрубка, подводящего запыленный поток. Эти циклоны можно устанавливать одиночно или компоновать в группы по два, четыре, шесть, восемь циклонов.

Так же институтом НИИОГаз проектировались циклоны типа ЦДК-ЦН-33 и ЦДК-ЦН-34, которые имеют высокую эффективность очистки и предназначены для улавливания сажи.

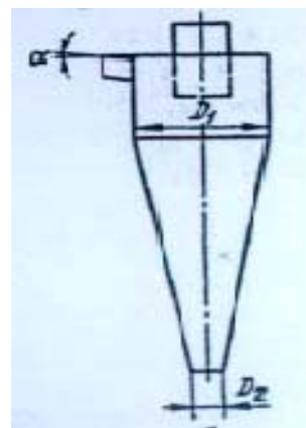
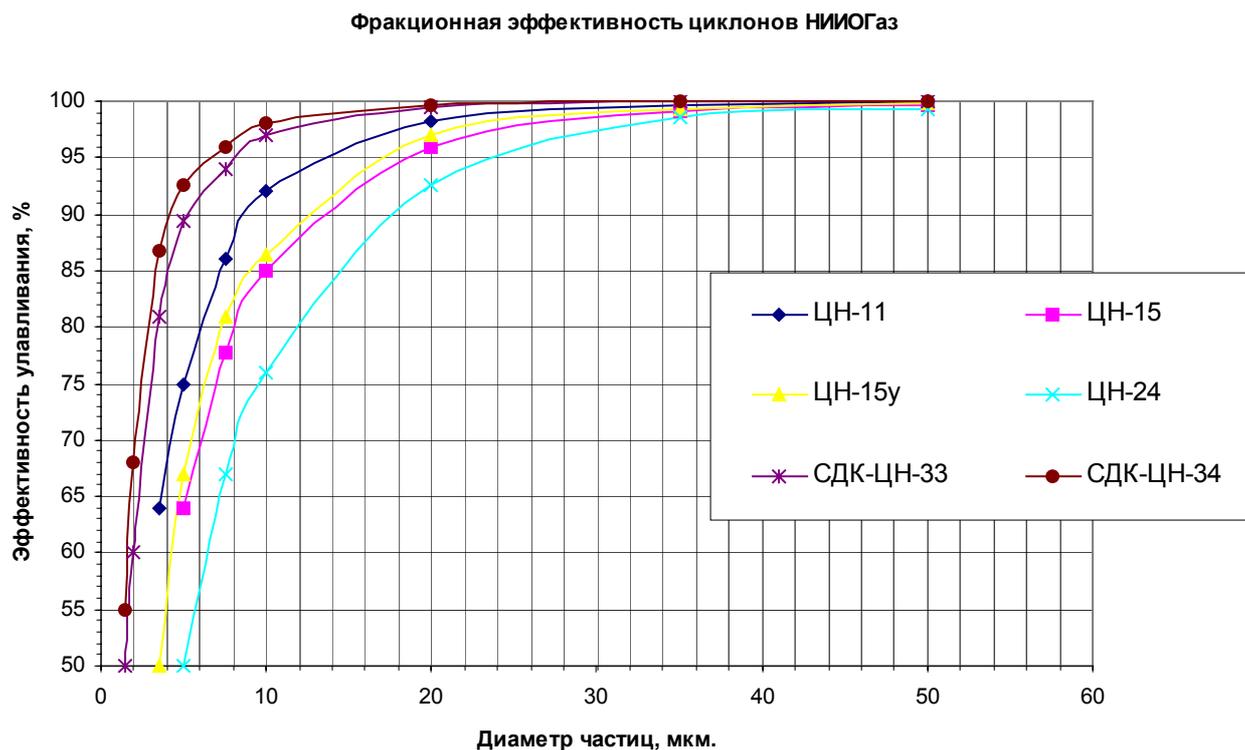


График 2. Эффективность циклонов ЦН различных марок:



Циклоны СИОТ (Свердловский институт охраны труда) предназначены для очистки газов от сухой, неволокнистой, неслипающейся пыли. Циклоны СИОТ несколько уступают по эффективности очистки циклонам НИИОГаз, но имеют определенные преимущества в виде уменьшения размеров.

Циклоны ВЦНИООТ – циклоны с обратным конусом. Применяются для улавливания сухой, неслипающейся, абразивной пыли, а так же для малослипающейся пыли (сажа, тальк).

Циклоны с нижним выводом воздуха. Циклоны НВГ разработаны на базе циклонов ЦН-15 и СДК-ЦН-33, и применяются в производстве моющих средств, а так же для улавливания пыли кокса в литейном производстве. При улавливании коксовой пыли с медианным диаметром 120 мкм эффективность циклонов данного вида достигала 97-98%.

Циклон с конусом коагулятором (ЦКК) предназначен для улавливания волокнистой пыли, выделяющейся при переработке семян хлопчатника. Так же ЦКК применяется на деревообрабатывающих предприятиях. Характерной особенностью данного циклона является наличие дополнительного конического элемента – конуса-коагулятора. В коагуляторе пылевые частицы коагулируют, образуя устойчивые агрегаты, в результате эффективность циклона повышается и достигает 99%.

Регулируемый циклон РЦ – предназначен для улавливания слипающихся и маслянистых пылей. Это – циклон со спиральным подводом воздуха, который закручивается с помощью спирально-винтового закручивающего аппарата. Он снабжен специальным регулирующим устройством, которое позволяет регулировать воздушный режим работы аппарата. Данная конструкция позволяет предотвратить вынос крупных частиц, позволяет осуществлять коагуляцию пыли.

Циклон с внутренней рециркуляцией (ЦВК) – предназначен для улавливания пыли сои и других видов неслипающейся, мелкодисперсной пыли. Разработан на базе циклона ЦН-15, и отличается от него тем, что в выхлопной трубе имеется щелевое отверстие и винтообразная направляющая лента. Благодаря этому повышается эффективность циклона, которая достигает 99%.

Для унификации циклонов Институтом охраны труда (Санкт-Петербург) были проведены сравнительные испытания различных циклонов по единой методике. По результатам проведенных испытаний циклон ЦН-11, как обладающей наибольшей эффективностью, рекомендован для преимущественного применения.

Выбор и расчет циклонов

Циклоны выбирают по расчетной производительности аппарата и расчетной скорости газа при входе в циклон с обеспечением необходимой эффективности очистки при минимальных энергетических затратах (то есть при минимальном гидравлическом сопротивлении). Скорость запыленного потока на входе в циклон должна быть не ниже транспортной скорости, несущей частицы пыли. При снижении этой скорости возникают отложения пыли на стенках газохода и во входном патрубке циклона.

В таблице 1 представлена скорость на выходе для некоторых видов циклонов при одинаковой скорости на входе – 18 м/с.

Таблица 1. Скорость на выходе из некоторых видов циклонов:

Тип циклона	Скорость газа на входе в циклон м/сек	Скорость газа на выходе из циклона м/сек
ЦН-15	18	11
ЦН-24	18	18,4
ВЦНИИОТ	18	23

Общие потери напора в циклоне равны

$$\Delta P_{\text{ц}} = \zeta_{\text{вх}} \frac{v_{\text{вх}}^2 \rho}{2}$$

Где

$v_{\text{вх}}$ - скорость потока во входном патрубке, м/с.

$\zeta_{\text{вх}}$ - коэффициент гидравлического сопротивления циклона.

Иногда общие потери напора в циклоне определяют также по условной скорости газа в циклоне, отнесенной к площади живого сечения цилиндрической части циклона.

$$\Delta P_{\text{ц}} = \zeta_0 \frac{v_0^2 \rho}{2}$$

Где

v_0 - условная скорость газа в циклоне, то есть вертикальная составляющая скорости газового потока в циклоне, м/с. Обычно v_0 находится в пределах 3 – 3,5 м/с.

ζ_0 - коэффициент гидравлического сопротивления циклона, отнесенный к скорости в полном сечении аппарата.

Для большинства видов циклонных аппаратов коэффициенты $\zeta_{\text{вх}}$ и ζ_0 постоянны, и не зависят от числа Re. Значения этих коэффициентов для наиболее часто встречающихся видов циклонов приведены ниже:

Таблица 2. Коэффициенты гидравлического сопротивления циклонов:

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

В значение коэффициента гидравлического сопротивления циклонов НИИОГаза вносят поправки, учитывающие диаметр циклона и запыленность воздуха при входе в циклон: $\zeta = K_1 K_2 \zeta_{табл}$, где K_1 - поправочный коэффициент на диаметр циклона, K_2 - поправочный коэффициент на диаметр циклона, а $\zeta_{табл}$ - коэффициент местного сопротивления циклона, определенный по таблице 2.

Таблица 3. Значения поправочного коэффициента K_1 на диаметр циклона:

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

Таблица 4. Значения поправочного коэффициента K_2 на запыленность (при $D=500$ мм.):

Тип циклона	Поправочный коэффициент K_2 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

Расчет циклонов производится по следующим данным:

1. Расход газа, подлежащего очистке при рабочих условиях Q_p , м³/с.
2. плотность газа в рабочих условиях ρ_g , кг/м³.
3. Температура газа, T , К.
4. Динамическая вязкость газа при данной температуре, μ_g , Па·с.
5. Дисперсный состав пыли, который задается двумя факторами:
 - Средний размер пыли (такой размер пыли, при котором количество частиц, крупнее этого размера равно количеству частиц мельче его), d_m .
 - Среднее квадратичное отклонение в функции распределения частиц по размерам, $\lg \sigma_v$.
6. Исходная запыленность газа, C_{ex} , г/м³.

7. Требуемая запыленность газа, $C_{\text{вых}}$, г/м³.

8. Плотность пыли, $\rho_{\text{ч}}$, кг/м³.

Расчет производят следующим образом

- Вычисляют требуемую эффективность очистки газа

$$\varepsilon = \frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}}$$

- Задаются типом циклона. По таблице 5 определяют оптимальную скорость газа в аппарате, v_{opt} .

- Определяют необходимую площадь циклона, м²:

$$F = \frac{Q_P}{v_{\text{opt}}}$$

- Задаются количеством циклонов N , и определяют диаметр циклона, м.

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,785 N}}$$

- Вычисляют действительную скорость газа в циклоне

$$v = \frac{Q_P}{0,785 N D^2}$$

Действительная скорость газа не должна отличаться от оптимальной более, чем на 15%.

- Принимают по таблице 2 коэффициент гидравлического сопротивления для данного циклона. Для циклонов НИИОГаза вносят поправки на диаметр циклона и запыленность по таблицам 3 и 4 соответственно.

- Определяют потери давления в циклоне, Па, по формуле:

$$\Delta P = \zeta_0 \frac{\rho_{\text{г}} v^2}{2}$$

Если потери вполне приемлемы, переходят к определению эффективности очистки газа в циклоне.

- Приняв по таблице 5 значения d_{50}^T и $\lg \sigma_{\text{ч}}^T$ для табличных условий, определяют значения d_{50} при рабочих условиях (диаметре циклона, скорости потока, плотности пыли, динамической вязкости газа) по уравнению:

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\frac{D}{D_T} \frac{\rho_{\text{чT}}}{\rho_{\text{ч}}} \frac{\mu}{\mu_{\text{ч}}} \frac{v_T}{v}}$$

- Определяют параметр x по формуле:

$$x = \frac{\lg \frac{d_m}{d_{50}}}{\lg^2 \sigma_{\text{г}} + \lg^2 \sigma_{\text{ч}}}$$

По графику 3 определяют значение функции $\Phi(x)$ ¹, и находят эффективность циклона η :

$$\eta = 0,5(1 + \Phi(x)).$$

Полученное значение сравнивают с требуемым. Если оно меньше, чем требуемое, то принимают другой циклон, и рассчитывают его аналогичным образом. Замена одного типа циклона на другой, при условии сохранения сопротивления газового тракта постоянным, производится за счет изменения диаметра циклона.

¹ – при эффективности циклона от 40 до 95 % можно применять следующую приближенную формулу для вычисления $\Phi(x)$:
 $\Phi(x) = -0,0556 x^3 - 0,0044 x^2 + 0,3989 x + 0,5$. Погрешность при вычислении этого уравнения составляет 0,1 %.

Диаметр нового циклона в этом случае определяется из следующей формулы:

$$D_2 = D_1 \sqrt[4]{\frac{\zeta_{02}}{\zeta_{01}}}$$

Где D_2 - диаметр нового циклона.

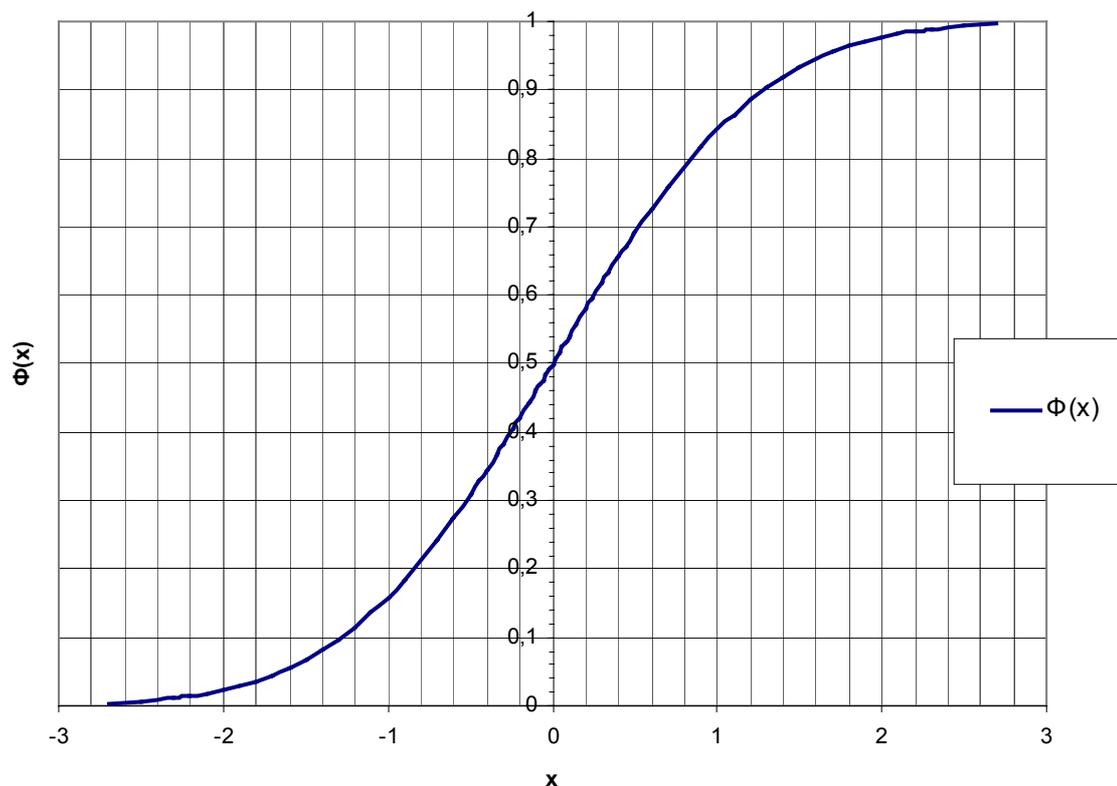
D_1 - диаметр старого циклона.

Таблица 5. Параметры, определяющие эффективность циклона:

Параметры	ЦН-24	ЦН-15у	ЦН-15	ЦН-11	СДК- ЦН-33	СДК- ЦН-34	СИОТ	ВЦНИИ ОТ
d_{50}^T , мкм.	8,5	6,0	4,5	3,65	2,31	1,13	2,6	8,6
$\lg \sigma_{\eta}^T$	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,340	0,28	0,32
v_{opt} , м/с.	4,5	3,5	3,5	3,5	2,0	2,0	1,0	4,0

Примечание: Значение d_{50}^T в таблице соответствует следующим условиям эксплуатации циклонов: средняя скорость газа в циклоне $v = 3,5$ м/с; диаметр циклона $D = 600$ мм; плотность частиц $\rho = 1930$ кг/м³; динамическая вязкость газа $\mu_g = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

График 3: Значение функции $\Phi(x)$:



Кроме того, для циклонов НИИОГаз существуют номограммы определения эффективности циклонов ЦН-15, ЦН-24 в зависимости от d_{50} и $\lg \sigma_{\eta}$.

Последовательная установка циклонов

Для повышения эффективности очистки в условиях высокой запыленности поступающего газа иногда применяют последовательную установку двух или трех (реже –

четырёх) циклонов. В этом случае вторая ступень улавливает ту часть пыли, которая, из-за высокой запыленности, была вынесена из циклона первой ступени очистки.

Потери напора последовательно соединенных циклонов равны сумме потерь напора на отдельных циклонах:

$$\Delta P_{\text{общ}} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \dots$$

а степень очистки (эффективность) последовательно соединенных циклонов описывается зависимостью:

$$\eta_{\text{общ}} = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2)(1 - \eta_3) \dots$$

Где $\Delta P_1; \Delta P_2; \Delta P_3; \dots$ - потери напора отдельно на первом, втором, третьем циклоне.

$\eta_1; \eta_2; \eta_3 \dots$ - эффективность первого, второго, третьего циклона.

Исследование эффективности улавливания последовательно соединенных циклонов в промышленных условиях показывает, что улавливание пыли происходит в основном в 1-ой ступени очистки. Последующие ступени имеют низкую эффективность улавливания - не более 30 %.

Так было показано, что при установке последовательно соединенных циклонов в количестве 3-х штук одного типа для улавливания сажи ПМ-50 эффективность 1-ой ступени - 76,3 %, 2-ой ступени - 35 %, 3-ей ступени - 28 %.

Результаты испытаний двух циклонов ЦН-15У диаметром 600 мм, соединенных последовательно, работающих на кварцевой пыли: $d_{50} = 15$ мкм, $\lg \sigma_q = 0,568$, $t = 18^\circ \text{C}$ представлены в таблице 6.

Таблица 6. Последовательное соединение двух циклонов:

Показатели	Циклон одиночный ЦН-15У $D = 600$ мм.	Установка двух последовательно соединенных циклонов ЦН-15У $D = 600$ мм.
Условная скорость в корпусе циклона, м/с	3,5	3,5
Потери напора, кгс/м ²	115,0	230,0
Коэффициент очистки, %	80,5	86,5