

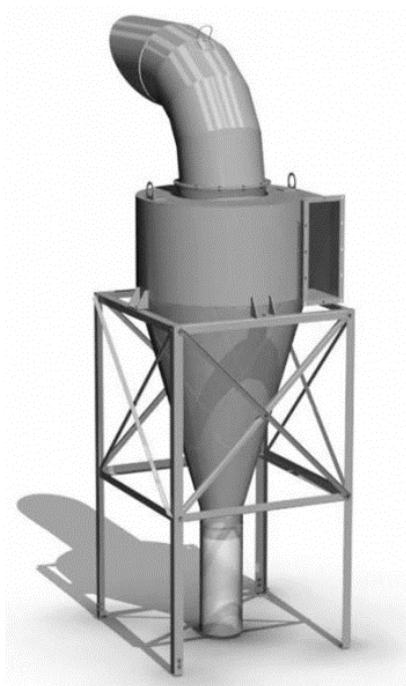
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

Кафедра "Производственная безопасность, экология и химия"

## РАСЧЕТ ЦИКЛОНА

*Учебно-методическое пособие к выполнению практической работы по дисциплине «Экологическая безопасность» для магистров очной и заочной форм обучения по направлениям подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»*



г. Н. Новгород, 2024 год

Составители: О.В. Маслеева, И.Г. Трунова, Т.В.Кирилловых,  
Я. Петухов

УДК: 502.7:621.311.1

Расчет циклона: Учебно - методическое пособие к выполнению практической работы по дисциплине "Экологическая безопасность" для магистров очной и заочной форм обучения по направлениям подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»/НГТУ им. Р.Е. Алексеева; Сост. О.В. Маслеева и др. Н.Новгород, 2024, 22 с.

В методическом пособии рассматривается способ очистки промышленных выбросов от пыли с помощью циклона. Дана методика расчета и выбора циклона, приведены исходные данные для расчета и выбора циклона при очистке выбросов от различного производственного оборудования.

Редактор Э.Б. Абросимова

Подп. к печ. 29.06.2023. Формат 60x841/16. Бумага газетная.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1. Тираж 30 экз. Заказ .

---

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева.  
Типография НГТУ. 603950. Н. Новгород, ул. Минина, 24.

© Нижегородский  
государственный  
технический  
университет  
им. Р. Е. Алексеева, 2024г.

## 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

### 2.1. Источники выбросов пыли в теплоэнергетике

Основными источниками загрязнения атмосферного воздуха являются автотранспорт, ТЭС, обогатительные фабрики, металлургические, цементные и сажевые заводы. 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.

Предприятия энергетики являются основным источником выбросов в атмосферу в результате сжигания топлива, выбросы которых составляют в год 5343 тыс. т твёрдых веществ или 38% от суммарных выбросов этих веществ по России. Основной вклад в загрязнение вносят ТЭС, использующие в качестве топлива уголь.

В настоящее время в России эксплуатируются 124 угольные ТЭС суммарной установленной мощностью 57,9 ГВт. Средний срок службы действующих угольных ТЭС составляет уже около 50 лет.

Источниками пылеобразования топливных хозяйств угольных электростанций являются угольные дробилки, мельницы, ленточные конвейеры, промежуточные угольные бункера.

На ТЭС, работающих на угле перед подачей топлива в котлоагрегат, топливо измельчают.

Уголь на ТЭС доставляется железнодорожным транспортом (рис. 1). Уголь из вагонов подают в приемный бункер, далее по ленточному конвейеру попадает в узел пересыпки, далее или на угольный склад, или по ленточному конвейеру в дробильное отделение, по ленточному конвейеру уголь поступает в бункера котлоагрегатов. В дробильном отделении уголь измельчается до кусков с линейными размерами не более 10 -15 мм, а также из топлива удаляются инородные включения. После из угля берется проба на химический анализ и на определение теплоты сгорания.

На рис.1 обозначено: 1 – вагоноопрокидыватель, 2 - приемный бункер, 3 - ленточный конвейер, 4 - узел пересыпки, 5 - ленточный конвейер подачи топлива в дробильное отделение, 6 - ленточный конвейер подачи топлива

на склад, 7 - ленточный конвейер выдачи топлива со склада, 8 - дробильное отделение, 9 - ленточный конвейер подачи топлива в главный корпус ТЭС, 10 - узел пересыпки, 11 - ленточный конвейер подачи топлива в бункера котлоагрегатов.

Все эти технологические процесс сопровождаются выбросами пыли.

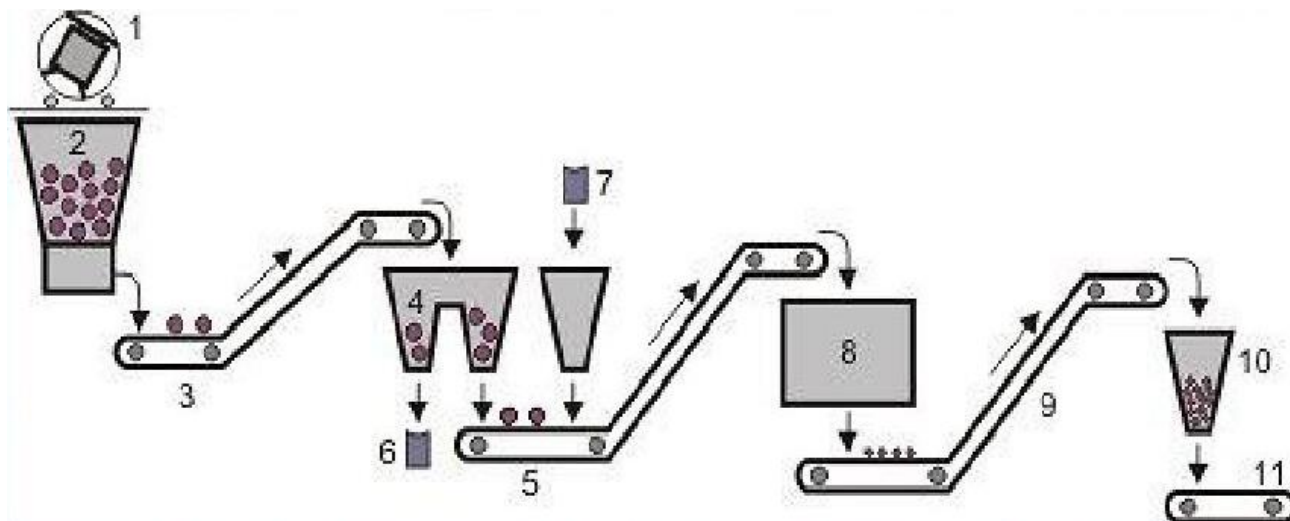


Рис.1 Подготовка твердого топлива к сжиганию

## 2.2. Характеристики пыли

Аэрозоль представляет собой дисперсную систему, в которой дисперсной средой является воздух, а дисперсной фазой — твердые частицы. Наиболее мелкие аэрозольные частицы по размерам близки к крупным молекулам, а для наиболее крупных наибольший размер определяется их способностью более или менее длительное время находиться во взвешенном состоянии.

Под дисперсным составом понимают распределение частиц аэрозолей по размерам. Он показывает, из частиц какого размера состоит данный аэрозоль, и массу или количество частиц соответствующего размера.

Интервал дисперсности аэрозольных частиц весьма велик: от  $10^{-6}$  до 10 мм. Весь диапазон размеров частиц разбивают на фракции. Под фракцией понимают массовые доли частиц, содержащихся в определенном интервале размеров частиц. В табл.1 приведен дисперсный состав золовых частиц.

Таблица 1

Дисперсный состав золовых частиц,

Размер частиц, мкм	0 - 10	11 - 20	21 - 30	31 - 40	40 - 74	75 - 149	Более 150
Фракции, %	25	24	16	14	13	6	2

Дисперсный состав пыли имеет первостепенное значение для разработки пылеулавливающих аппаратов.

Также важным параметром пыли является ее плотность. От плотности частиц пыли зависит эффективность ее осаждения в центробежных пылеуловителях.

### **2.3. Аппараты очистки воздуха от пыли**

Для очистки промышленных выбросов от твердых взвешенных веществ (пыли) применяются следующие способы:

- сухая механическая очистка (пылесадительные камеры, жалюзийные аппараты, циклоны, вихревые пылеуловители),
- мокрая механическая очистка (скрубберы),
- электрофильтры,
- фильтры.

В основе сухих методов лежат гравитационные, инерционные, центробежные механизмы осаждения или фильтрационные механизмы. При использовании мокрых методов очистка газовых выбросов осуществляется путем тесного взаимодействия между жидкостью и запыленным газом на поверхности капель жидкости. Электрическая очистка газов основана на ионизации молекул газа электрическим разрядом, за счет этого частицы аэрозолей получают заряд и начинают двигаться к электродам противоположного знака, осажаясь на них. В фильтрах используют тканевые, волокнистые, сетчатые материалы.

К основным характеристикам оборудования для очистки от пыли относятся:

- эффективность (степень) очистки воздуха от пыли,
- производительность, характеризуется объемом воздуха, которое очищается за 1 час
- фракционная эффективность, определяющая полноту улавливания частиц определенных размеров,
- остаточное содержание пыли в газе при выходе его из пылеуловителя;
- гидравлическое сопротивление, от его величины которого зависит требуемое давление вентилятор
- энергоемкость, определяемая потреблением электроэнергии на очистку 1000 м<sup>3</sup> газа.
- расход потребляемой энергии,
- стоимость очистки.

Степень очистки выбросов определяется гранулометрическим составом пыли, размерами и плотностью частиц.

## 2.4 Циклон

Широкое применение для сухой очистки газов от пыли получили циклоны (рис. 2).



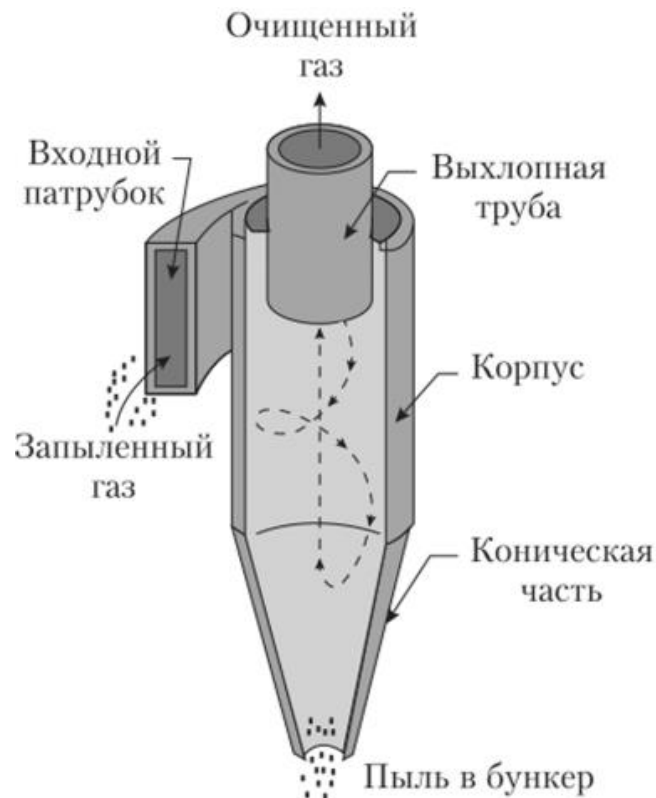
Рис. 2 Циклон

### 2.4.1. Принцип работы циклона

Работа циклона для очистки воздуха основана на применении центробежной и инерционной сил.

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.

В сужающейся части скорость запыленного воздуха увеличивается, частицы загрязнений по инерции продолжают опускаться в нижнюю часть циклона. Пыль, под действием силы инерции, продолжает осыпаться в нижнюю часть и попадает в накопительный бункер, из которого регулярно удаляется. Очищенный воздух резко меняет направление на  $180^\circ$  и попадает в выхлопную вертикальную трубу, через которую выходит наружу (рис. 3).



**Рис.3 Принцип действия циклона**

Центробежная сила направлена по радиусу к стенкам циклона и определяется по формуле:

$$F_{цб} = \frac{\pi d_{ч}^3}{6} \cdot \frac{W_{тг}^2}{R} \cdot (\rho_{ч} - \rho_{г}) \quad (1)$$

где  $d_{ч}$  - диаметр частиц,

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

$R$  - радиус циклона,

$\rho_{ч}$  - плотность частиц пыли,

$\rho_{г}$  - плотность газа.

Например - частица массой  $m$  двигающаяся по круговой траектории радиуса  $r$  с тангенциальной скоростью  $u_{т}$ . Для типичных условий  $u_{т} = 15$  м/с,  $r = 0,6$  м эта сила примерно в 39 раз превышает силу тяжести. Поэтому указанная центробежная сила резко увеличивает осаждение в аппарате.

Из формулы 1 видно, что эффективность циклона выше, чем больше диаметр частиц пыли, её удельный вес, скорость вращения газового потока и чем меньше диаметр циклона.

## 2.4.2. Конструкции циклонов

Циклоны являются одним из основных аппаратов для очистки воздуха и отходящих технологических газов от твердых загрязнений, которые образуются в результате деятельности различных производственных предприятий деревообработки, энергетики, в химической промышленности.

. Циклоны предназначены для сухой очистки газовой смеси от твердой неслипающейся и волокнистой пыли.

В зависимости от условий использования и вида загрязнений рабочей среды различают различные виды циклонов для очистки воздуха. Высокая эффективность очистки достигается в интервале размера загрязняющих частиц от 5 мкм до 40 мкм. Температура рабочей среды не должна превышать 400°C, а пыль не должна иметь слипающихся и волокнистых включений.

Широкое применение циклонов в качестве сухой очистки воздуха и газов обеспечили их существенные преимущества:

- высокая степень очистки;
- высокая производительность;
- разнообразие моделей с возможностью подбора для конкретных условий эксплуатации;
- высокая энергоэффективность;
- низкая стоимость производства;
- отсутствие подвижных частей;
- обеспечение эффективной работы при изменении концентрации пыли.
- Использовать циклоны можно в любых климатических зонах, температура эксплуатации составляет от -40°C до +40°C.

Благодаря простоте конструкции, отсутствию подвижных узлов и механизмов, возможности увеличения производительности путем объединения в группы и батареи, циклоны сухой очистки широко применяются в технологических и подготовительных производственных процессах.

Корпус устройства может иметь конусную форму (СДК) с расширением вверх или цилиндрическую (ЦН). Цилиндрические и конусные сегменты могут различаться диаметром и длиной оборудования, учитывающие скорость потока и концентрацию загрязнений. Для увеличения производительности без потери эффективности очистки циклоны могут объединяться попарно в группы или создавать батареи (рис.4).



**Рис. 4 Батареи циклонов**

### **Циклон цилиндрический ЦН**

Конструктивно циклон для удаления пыли из воздуха или технологических газов состоит из нескольких основных частей: цилиндрический корпус с конусной нижней частью; входной патрубок для загрязненной газовой смеси; выходной вертикальный патрубок для чистого воздуха; накопительный бункер с затвором для хранения и удаления пыли (рис. 5).

В зависимости от производительности вентилятора одиночные модели ЦН имеют диаметр корпуса от 200 до 1200 мм, организация в группы предполагает наличие двух, четырех, шести и восьми циклонов с диаметром от 300 до 900 мм.

Цифра в условном обозначении - угол наклона входного патрубка.

### **Циклон конический СДК-ЦН-33**

Высокую степень очистки устройству обеспечивают конструктивные особенности, которые выражаются в конической форме корпуса, занимающей значительную часть всего циклона.

Циклон СДК-ЦН-33 состоит из конического корпуса, в верхней части которого находится небольшая цилиндрическая вставка с входным патрубком спиралевидной формы для направления входящего запыленного потока. В середине корпуса располагается вертикальная стальная труба для удаления очищенного воздуха (рис. 6).

Высокая степень очистки и значительные габаритные размеры исключают их групповое исполнение и применение.

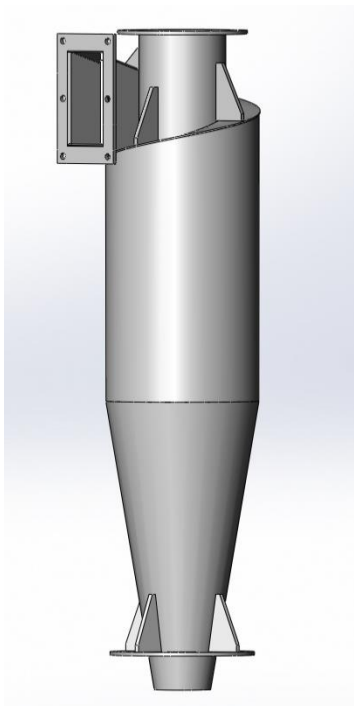


Рис. 5

Технические характеристики цилиндрического циклона ЦН:

- Максимальная температура очищаемого газа - 400°С.
- Допустимая запыленность – до 1200 г/м<sup>3</sup>.
- Максимальное давление – 5 кПа.
- Степень очистки – 80-95%.
- Коэффициент гидравлического сопротивления – 147-182.
- Угол наклона входного патрубка 11, 15 и 24°



Рис. 6

Технические характеристики конического циклона СДК ЦН:

- Производительность по воздуху 1100 – 63600 м<sup>3</sup>/ч
- Максимальная температура очищаемого газа - 250°С.
- Размер пыли не менее 5 мкм
- Максимальное давление – 1,5 кПа.
- Оптимальная скорость потока запыленного газа 2 м/с
- Степень очистки – до 98%.
- Угол наклона входного патрубка 33°
- Максимальная запыленность 1000 г/м<sup>3</sup>

Конструктивные схемы цилиндрического и конического циклонов представлены на рис.8 и 9. Геометрические размеры циклонов указываются в долях от внутреннего диаметра.

### 3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЦИКЛОНА

Для расчета циклона необходимы следующие исходные данные:

- объем очищаемого газа при рабочих условиях;
- плотность газа при рабочих условиях;
- динамическая вязкость газа при рабочей температуре
- дисперсный состав пыли (размер частиц пыли и стандартное отклонение размеров частиц пыли);
- запыленность газа,
- плотность частиц,
- требуемая эффективность очистки газа

В табл.1 приведены технические характеристики цилиндрических (ЦН) и конических (СК) циклонов.

В табл.1 используются следующие обозначения:

$w_{оп}$  – скорость движения газа в циклоне, м/с,

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

$lg\delta_{\eta}^T$  - стандартное отклонение функции распределения парциальных коэффициентов очистки.

*Таблица 1*

**Технические характеристики цилиндрических и конических циклонов**

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

Расчет циклона проводится методом последовательных приближений в следующем порядке.

Выбирают тип циклона по табл. 1. Тип циклона выбирают из условия, что диаметр частиц пыли должен быть ориентировочно  $d_m > 2 d_{50}^T$ .

$d_m$  - 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:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot w_{оп}}} \quad (2)$$

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

Полученное значение диаметра  $D$  округляется до ближайшего типового значения внутреннего диаметра циклона  $D_{ц}$  (табл.2).

**Таблица 2**

**Типовые значения внутреннего диаметра циклона**

$D_{ц}, \text{ м}$	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 ( $w_p$ ):

$$w_p = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_{ц}^2}, \text{ м/с} \quad (3)$$

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

$$100 \cdot \left| \frac{w_p - w_{оп}}{w_{оп}} \right| \leq 15\% \quad (4)$$

При отклонении более чем 15% выбирают другой тип циклона.

Диаметр частиц, реально осаждаемых с эффективностью 50% при рабочих условиях ( $d_{50}$ ), определяется по формуле:

$$d_{50} = d_{50}^T \cdot \sqrt{\frac{D_{ц} \cdot \rho_{чТ} \cdot \mu}{D_T \cdot \rho_{ч} \cdot \mu_T \cdot w_p}} \quad (5)$$

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

$$w_{оп} = 3,5 \text{ м/с}$$

$$D_T = 0,6 \text{ м}$$

$$\rho_{чТ} = 1930 \text{ кг/м}^3$$

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

С учетом этих значений формула (3) принимает вид

$$d_{50} = d_{50}^T \cdot \sqrt{\frac{D_{ц}}{0,6} \cdot \frac{1930}{\rho_{ч}} \cdot \frac{\mu}{22,2 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{3,5}{w_p}} \quad (6)$$

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

$$X = \frac{\lg\left(\frac{d_m}{d_{50}}\right)}{\sqrt{(\lg\delta_{\eta}^T)^2 + (\lg\delta_{ч})^2}} \quad (7)$$

По величине параметра  $X$  определяют значение нормальной функции распределения  $\Phi(X)$ .

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

Эффективность очистки газа в циклоне ( $\eta$ ) определяются

$$\eta = \frac{1 + \Phi(x)}{2} \quad (9)$$

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

Определение коэффициента гидравлического сопротивления ( $\xi$ ) циклона:

$$\xi = K_1 \cdot K_2 \cdot \xi_{500} \quad (10)$$

где  $K_1$  - поправочный коэффициент на диаметр циклона (табл. 3),  
 $K_2$  - поправочный коэффициент на запыленность газа (табл. 4),  
 $\xi_{500}$  - коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона диаметром 500 мм (табл. 5).

Таблица 3

Поправочный коэффициент  $K_1$ 

$D_{ц}, м$	Поправочный коэффициент $K_1$		
	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  $K_2$ 

Тип циклона	Поправочный коэффициент $K_2$ при запыленности на входе ( $C_{вх}$ ), г/м <sup>3</sup>						
	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
СДК ЦН-34М	1,00	0,99	0,97	0,95	-	-	-

Таблица 5

## Коэффициент гидравлического сопротивления

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

Вычисление гидравлического сопротивления циклона производят по формуле:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{\rho \cdot w_p^2}{2}, \text{ Па} \quad (11)$$

где  $\rho$  - 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:

$$N = \frac{K_3 \cdot \Delta P \cdot Q}{\eta_M \cdot \eta_B}, \text{ Вт} \quad (12)$$

$K_3$  - коэффициент запаса мощности, ( $K_3 = 1,2$ ),  
 $\eta_M$  - КПД передачи от электродвигателя к вентилятору ( $\eta_M = 0,8$ ),  
 $\eta_B$  - КПД вентилятора ( $\eta_B = 0,8$ ).

Определение концентрации пыли на выходе из циклона:

$$C_{\text{ВЫХ}} = C_{\text{ВХ}} \cdot (1 - \eta), \text{ г/м}^3 \quad (13)$$

#### 4. ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

Согласно заданию преподавателя (табл. 7) выбрать и рассчитать циклон, обеспечивающий требуемую эффективность очистки газа от пыли.

Расчетным путем определить размеры циклона, степень очистки газа, концентрацию пыли на выходе из аппарата и мощность вентилятора.

Начертить циклон с указанием размеров (рис. 8 или 9).

Принять:

- плотность газа при рабочих условиях  $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$
- вязкость газа при рабочей температуре  $\mu = 17,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

#### 5. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Таблица 6

Исходные данные

Параметр	Обозначение	Величина
Объем очищаемого газа	$Q$	12 м <sup>3</sup> /с
Плотность газа при рабочих условиях	$\rho$	1,29 кг/м <sup>3</sup>
Вязкость газа при рабочей температуре	$\mu$	17,3*10 <sup>-6</sup> Па с
Медианный размер частиц пыли	$d_M$	18 мкм
Стандартное отклонение размеров частиц пыли	$\lg \delta_{\text{ч}}$	0,652
Входная концентрация пыли	$C_{\text{ВХ}}$	20 г/м <sup>3</sup>
Плотность частиц пыли	$\rho_{\text{ч}}$	2000 кг/м <sup>3</sup>
Требуемая эффективность очистки газа	$\eta$	0,8

Исходя из заданного размера частиц пыли  $d_M = 18 \text{ мкм}$ , выбираем по табл. 1 цилиндрический циклон, который очищает от частиц пыли  $d_{50}^T = 8,50 \text{ мкм}$ .

Циклон: ЦН – 24

$$w_{\text{оп}} = 4,5 \text{ м/с}$$

$$d_{50}^T = 8,50 \text{ мкм}$$

$$\lg \delta_{\eta}^T = 0,308$$

Определяем диаметр циклона:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot w_{\text{оп}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 12}{\pi \cdot 4,5}} = 1,84 \text{ м}$$

По табл. 2 выбираем ближайшее меньшее значение типового диаметра

$$D_{\text{ц}} = 1,8 \text{ м}$$

Находим действительную скорость движения газа в циклоне:

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

$$100 \cdot \left| \frac{w_p - w_{\text{оп}}}{w_{\text{оп}}} \right| = 100 \cdot \left| \frac{4,72 - 4,5}{4,5} \right| = 4,8\% \leq 15\%$$

Действительная скорость в циклоне отклоняться от оптимальной менее 15%.

Диаметр частиц, реально осаждаемых с эффективностью 50% при рабочих условиях:

$$d_{50} = d_{50}^T \cdot \sqrt{\frac{D_{\text{ц}}}{0,6} \cdot \frac{1930}{\rho_{\text{ч}}} \cdot \frac{\mu}{22,2 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{3,5}{w_p}}$$

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

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

Полученное значение  $d_{50}$  меньше  $d_{\text{м}}$  (заданного).

$$X = \frac{\lg\left(\frac{d_M}{d_{50}}\right)}{\sqrt{\lg^2 \delta_\eta + \lg^2 \delta_\zeta}} = \frac{\lg\left(\frac{18}{9,7}\right)}{\sqrt{0,308^2 + 0,652^2}} = 0,372$$

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

$$\eta = \frac{1 + \Phi(x)}{2} = \frac{1 + 0,64}{2} = 0,82$$

$$\eta = 0,82 > 0,8$$

Эффективность очистки газа в циклоне соответствует заданной.

Коэффициент гидравлического сопротивления циклона:

$$\xi = K_1 \cdot K_2 \cdot \xi_{500} = 1 \cdot 0,93 \cdot 75 = 69,75$$

Гидравлическое сопротивление циклона:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{\rho \cdot w_p^2}{2} = 69,75 \cdot \frac{1,29 \cdot 4,72^2}{2} = 1002 \text{ Па}$$

Мощность привода устройства для подачи газа к циклону:

$$N = \frac{K_3 \cdot \Delta P \cdot Q}{\eta_M \cdot \eta_B} = \frac{1,2 \cdot 1002 \cdot 12}{0,8 \cdot 0,8} = 22545 \text{ Вт}$$

Концентрации пыли на выходе из циклона:

$$C_{\text{вых}} = C_{\text{вх}} \cdot (1 - \eta) = 20 \cdot (1 - 0,82) = 3,6 \text{ г/м}^3$$

### **Выводы:**

Циклон марки ЦН - 24 диаметром  $D_{\text{ц}} = 1,8 \text{ м}$  обеспечивает эффективность очистки газа с  $\eta = 0,82$ .

Конструкция циклона показана на рис. 7.

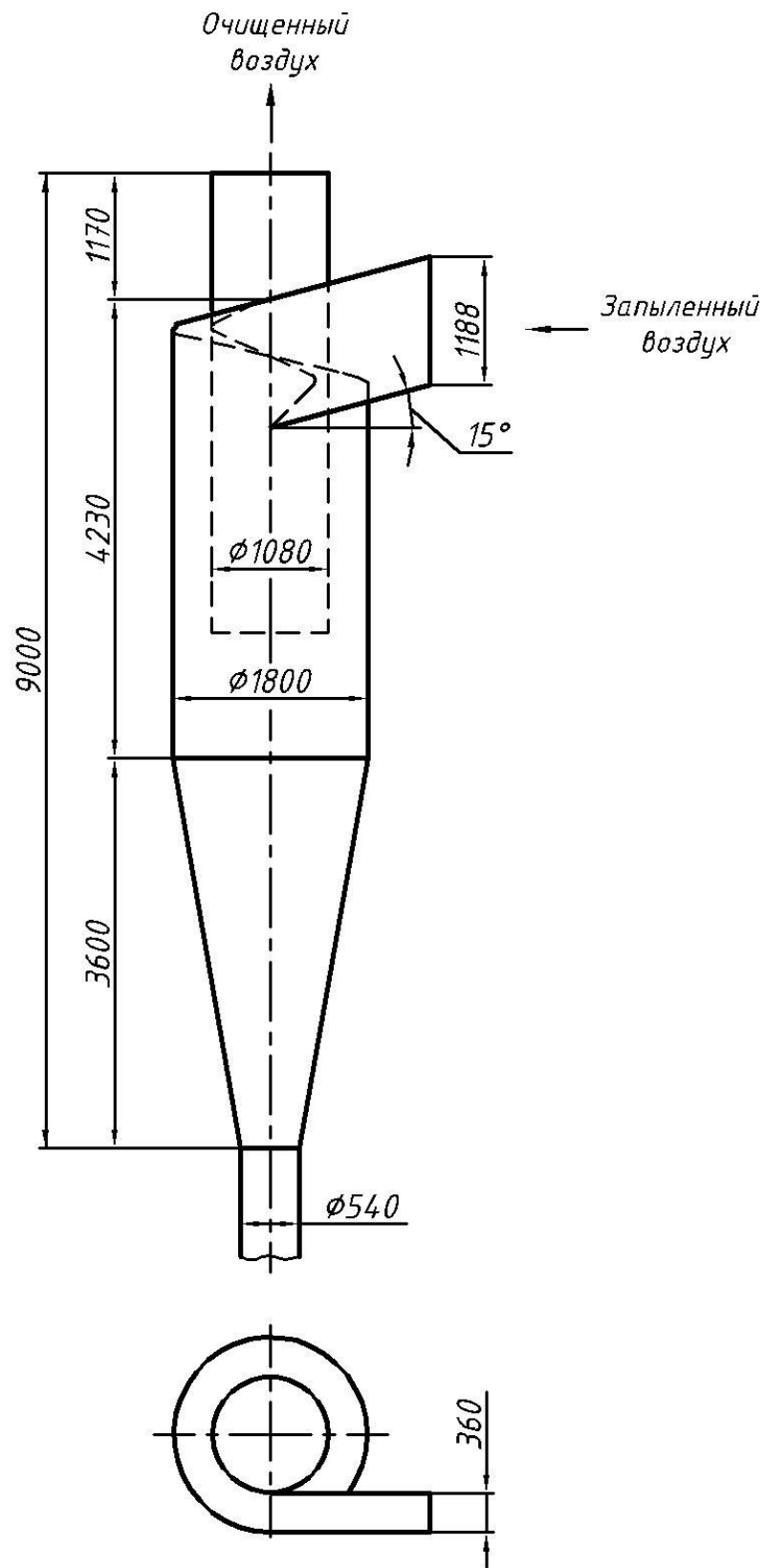


Рис. 7 Циклон марки ЦН - 24 диаметром  $D_{ц} = 1,8$  м

## 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.
- 4 Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки. Учебное пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. 210 с.
5. Василевский М.В. Обеспыливание газов инерционными аппаратами: монография. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 258 с.
6. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Текст.: учеб.пособие для вузов/А.Г. Ветошкин.-М.: высш. школа, 2008 г. 639 с.
- 7 <https://sibelkon.ru/produkcziya/pyileulavlivayushhee-oborudovanie/ciklonnye-filtry/ciklon-sdk-cn-33/>

## Исходные данные для расчета циклона

№	$Q$ м <sup>3</sup> /с	$d_m$ мкм	$lg\delta_{\text{ч}}$	$C_{\text{вх}}$ г/м <sup>3</sup>	$\rho_{\text{ч}}$ кг/м <sup>3</sup>	$\eta$
1	20	23	0,501	30	2000	0,85
2	26	20	0,602	10	2000	0,80
3	10	14	0,535	25	2000	0,80
4	16	9	0,497	20	2000	0,80
5	10	56	0,97	100	2240	0,80
6	2	16	0,250	10	2600	0,85
7	10	14	0,250	20	2600	0,85
8	10	7	0,301	15	2600	0,85
9	5	15	0,334	50	1350	0,80
10	1	6	0,468	20	2900	0,80
11	10	7	0,345	40	2000	0,80
12	10	18	0,652	20	2000	0,85
13	5	10	0,352	1	2700	0,85
14	2	13	0,215	100	2900	0,85
15	3	8	0,506	40	2650	0,80
16	10	8	0,210	4	1800	0,80
17	10	15	0,360	10	1800	0,80
18	12	11	0,360	20	1800	0,80
19	8	20	0,352	10	2700	0,80
20	5	12	0,468	60	2900	0,85
21	6	38	0,214	10	2500	0,85
22	3	9	0,385	10	2900	0,80
23	8	10	0,468	2	2700	0,80
24	7	30	0,312	15	2500	0,85
25	2	6	0,268	10	2900	0,80
26	9	30	0,314	8	2500	0,85
27	10	6	0,468	10	2000	0,80
28	12	7	0,214	2	2000	0,80
29	8	18	0,385	15	2240	0,80
30	5	10	0,468	10	2600	0,85

Обозначения принятые в табл. 7:

$Q$  - объем очищаемого газа,

$d_m$  - медианный размер частиц пыли,

$lg\delta_{\text{ч}}$  - стандартное отклонение размеров частиц пыли,

$C_{\text{вх}}$  - входная концентрация пыли,

$\rho_{\text{ч}}$  - плотность частиц пыли,

$\eta$  - требуемая эффективность очистки газа.

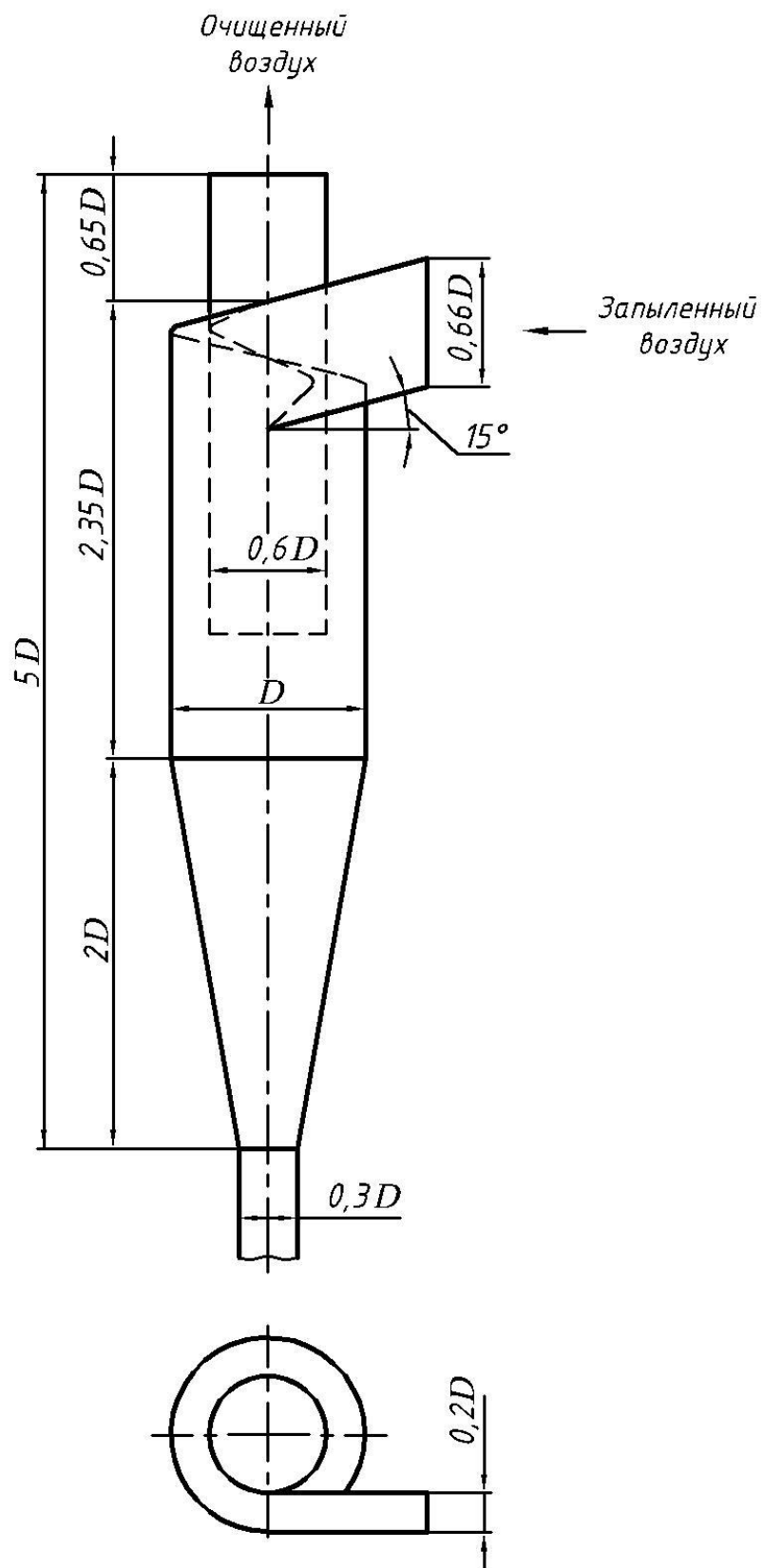
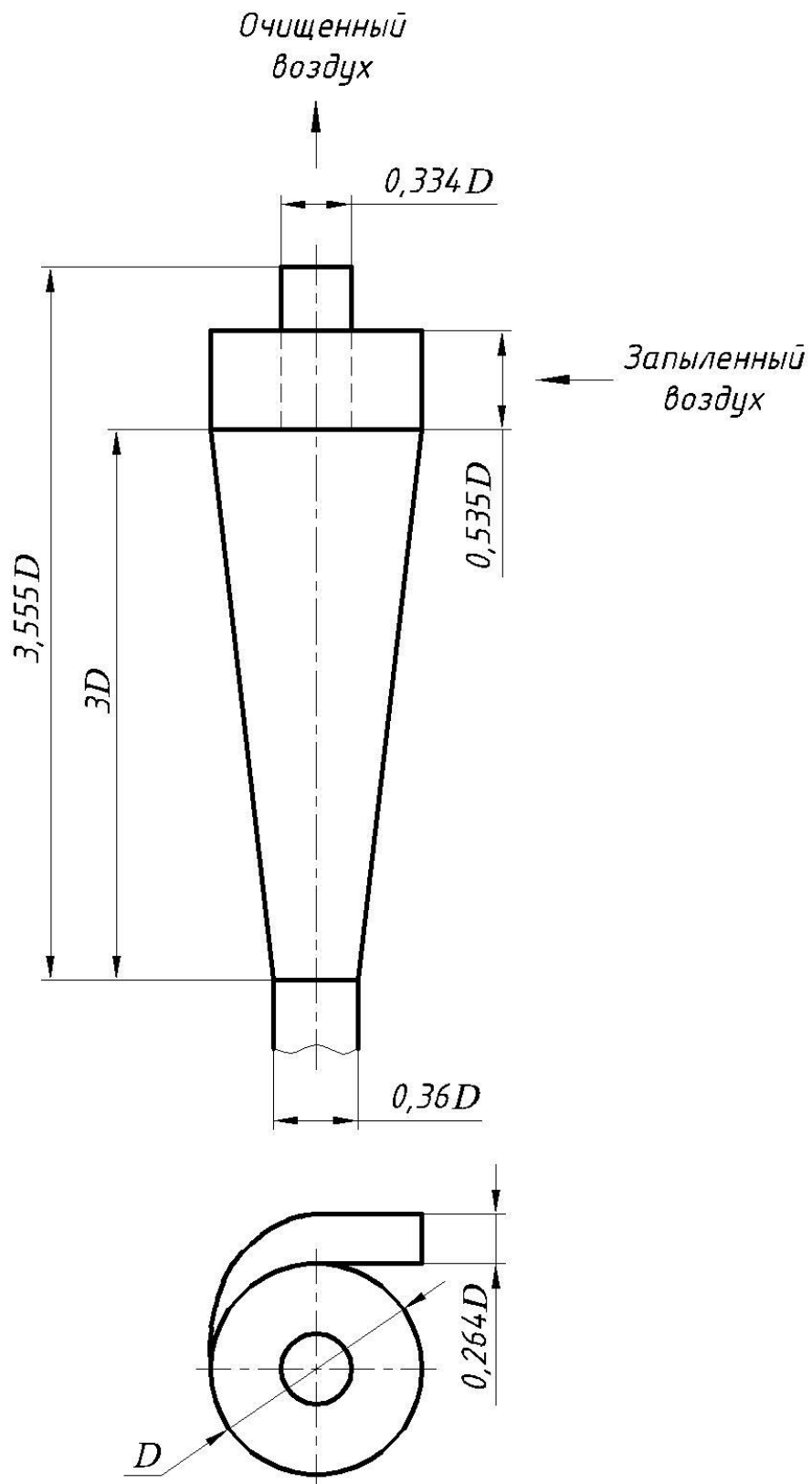


Рис. 8 Циклон цилиндрический



**Рис. 9 Циклон конический**