

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция»

РАСЧЕТ ЦИКЛОНА СТФ-Ц

Методические указания
к выполнению расчетно-графической работы

Минск
БНТУ
2011

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция»

РАСЧЕТ ЦИКЛОНА СТФ-Ц

Методические указания
к выполнению расчетно-графической работы
для студентов специальности
1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана
воздушного бассейна»

Минск
БНТУ
2011

УДК 628.511 (075.8)

ББК 30н

Р 24

Составители:

В.Д. Сизов, В.Н. Короткий, И.С. Бракович

Рецензенты:

С.Л. Ровин, В.И. Глуховский

Цель методических указаний – помочь студентам в самостоятельном выполнении расчетно-графической работы в соответствии с программой дисциплины «Очистка вентиляционного воздуха и ресурсосбережение».

Рассматриваются вопросы расчета технических характеристик циклона СТФ-Ц в зависимости от вида пыли, даются рекомендации по выполнению работы, ее составу и объему. Приводится список рекомендуемой литературы и приложения, которые включают табличные и графические данные, необходимые для выполнения расчетов.

Предназначено для студентов V и VI курсов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.	4
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.	5
2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ПАРАМЕТРЫ ЦИКЛОНОВ СТФ-Ц.	10
3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.	12
3.1. Цель и исходные данные для выполнения работы.	12
3.2. Порядок проведения расчетов.	13
3.3. Пример выполнения работы.	20
Заключение.	30
Литература.	30
Приложения.	31

Введение

Целью изучения материалов, изложенных в данном издании, является ознакомление на практических занятиях с разработанным специалистами БНТУ циклоном СТФ-Ц для очистки газовых выбросов предприятий от пыли и его техническими характеристиками. Студенты должны научиться правильно оценивать состав пылегазовых выбросов, по физико-химическим свойствам пыли и расходам загрязненного воздуха подбирать соответствующий размер циклона, рассчитывать его остальные технические характеристики с целью наиболее эффективной очистки выбросов от пыли.

Приведенный пример расчета параметров циклона позволит студентам верно производить необходимые вычисления и оценивать эффективность работы циклона.

Методические указания разработаны в соответствии с учебной программой дисциплины «Очистка вентиляционных выбросов и ресурсосбережение».

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Очистка от пыли необходима во многих случаях: соблюдение санитарно-гигиенических требований для обеспечения комфортного проживания населения и создание безопасных условий для эффективной работы производственного персонала на рабочих местах, защиты вентиляционного оборудования (например, калориферов, воздухоохладителей, вентиляторов и т. д.); очистки промышленных технологических выбросов и т. п.

Название (тип) пылеулавливающего аппарата зависит от механизма отделения частиц пыли от воздушно-газового потока. При *гравитационном* осаждении частицы аэрозолей осаждаются из потока загрязненного воздуха под действием силы тяжести. Для этого необходимо создать соответствующий режим движения загрязненного воздуха в аппарате с учетом размера частиц, их плотности и т. д.

Инерционное осаждение основано на том, что частицы пыли и взвешивающая среда ввиду значительной разности плотностей обладают различной инерцией. Частицы пыли, двигаясь по инерции, отделяются от газовой среды в результате столкновения с препятствием.

Осаждение под действием центробежной силы происходит при криволинейном движении загрязненного пылевоздушного потока. Под действием возникающих центробежных сил аэрозольные частицы отбрасываются на периферию аппарата и осаждаются в пылеприемный бункер.

Эффект зацепления. Частицы аэрозолей, взвешенные в воздушной среде, задерживаются в узких, извилистых каналах и порах при прохождении пылегазового потока через фильтровальные материалы.

Мокрая очистка. Смачивание поверхности элементов аппаратов водой или другой жидкостью способствует задержанию пылевых частиц на данной поверхности.

Осаждение в электрическом поле. Проходя электрическое поле, частицы аэрозолей получают заряд. Двигаясь к электродам противоположного знака, они осаждаются на них.

В практике улавливания пылевых частиц находят применение и другие методы: укрупнение частиц в акустическом поле, термофорез, фотофорез, воздействие магнитного поля, биологическая очистка. В устройствах для очистки аэрозольных выбросов наряду с

основным механизмом улавливания обычно используются и другие закономерности. Благодаря этому общая и фракционная эффективность аппарата достигает более высокого уровня.

Наибольшее распространение в системах пылеочистки получили циклоны, т. е. аппараты, работающие по принципу осаждения под действием центробежной силы. Циклоны широко применяются для очистки от пыли вентиляционных и технологических выбросов во всех отраслях народного хозяйства.

Принцип работы циклона заключается в спиралевидном закручивании потока запыленного воздуха в цилиндрической части циклона, где под действием центробежной силы частицы пыли прижимаются к стенкам циклона и под влиянием сил тяжести опускаются вниз в бункерное устройство, из которого пыль периодически удаляется через пылевой затвор. Преимущества циклонов: простота устройства и обслуживания, сравнительно небольшое аэродинамическое сопротивление, высокая производительность и небольшая стоимость. К недостаткам необходимо отнести малое улавливание пылевых частиц размером менее 5 мкм.

Эффективность очистки газа в циклонах в основном определяется дисперсным составом и плотностью частиц улавливаемой пыли, а также вязкостью газа, зависящей от его температуры. При уменьшении диаметра циклона и повышении до определенного предела скорости газа в циклоне эффективность очистки возрастает. Поэтому, диаметры серийно выпускаемых циклонов не превышают 5 м. В СНГ для циклонов принят стандартизированный ряд внутренних диаметров D : 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400 и 3000 мм.

Конструктивно циклоны могут быть выполнены одиночными, групповыми и батарейными. Среди одиночных и групповых циклонов наибольшее распространение получили циклоны НИИОГаза типов ЦН и СК-ЦН производительностью 600–230 000 м³/ч, а среди батарейных циклонов – БЦ, ПБЦ производительностью от 12 000 до 480 000 м³/ч.

В институте НИИОГаз разработан ряд конструкций цилиндрических и конических циклонов. Широкое распространение получили цилиндрические циклоны ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24 (рис. 1). Цифровое обозначение циклона соответствует углу наклона крышки аппарата и патрубка, подводящего запыленный поток. Для дан-

ных циклонов характерна удлиненная цилиндрическая часть корпуса. Циклон ЦН-15у имеет укороченную коническую часть. Его применяют при ограничении по высоте и он имеет несколько худшие показатели, чем ЦН-15.

К коническим циклонам НИИОГаз относятся аппараты СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34м (рис. 2). Циклоны имеют удлиненную коническую часть и спиральный входной патрубок. Они предназначены в основном для улавливания сажи и отличаются высокой эффективностью очистки.

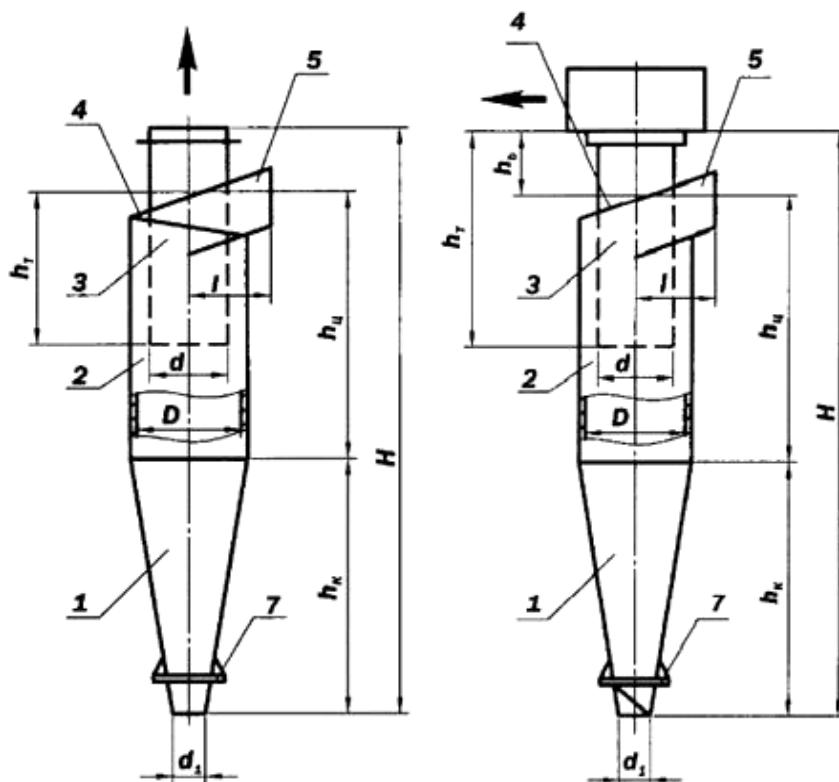


Рис. 1. Циклон ЦН:

- 1 – конус; 2 – цилиндр; 3 – выхлопная труба; 4 – винтовая крышка;
5 – входной патрубок; 6 – улитка; 7 – опорный фланец

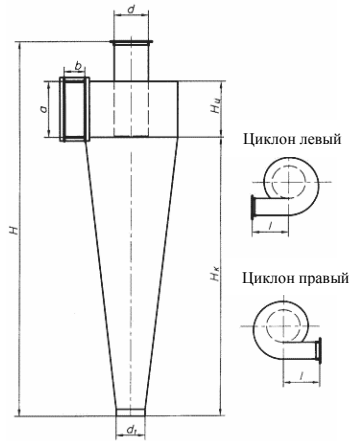


Рис. 2. Циклон СК ЦН

Циклоны СИОТ (Свердловский институт охраны труда) полностью лишены цилиндрической части (рис. 3). Выхлопная труба опущена в верхнюю часть конуса. Входной патрубок имеет треугольное сечение. При установке циклона на всасывающей линии вентилятора очищенный газ (воздух) выходит из аппарата через раскручиватель с винтовой крышкой, а при установке на нагнетательной линии – через шахту с колпаком или раскручивателем в виде плоского щита.

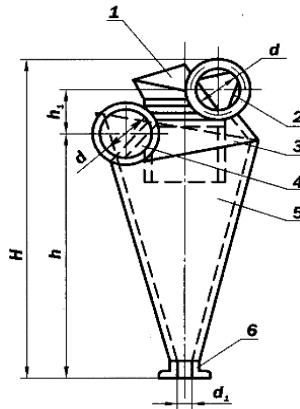


Рис. 3. Циклон СИОТ:

1 – раскручиватель с винтовой крышкой; 2, 4 – выходной и входной патрубок;
3 – крышка корпуса; 5 – корпус; 6 – пылеотводящий патрубок

Циклоны ВЦНИИОТ (г. Москва) отличаются наличием обратного конуса (рис. 4). Пылегазовый проток проходит в бункер через кольцевую щель между двумя соосными конусными поверхностями. Обеспыленный газ (воздух) возвращается в корпус циклона через отверстие в вершине внутреннего конуса.

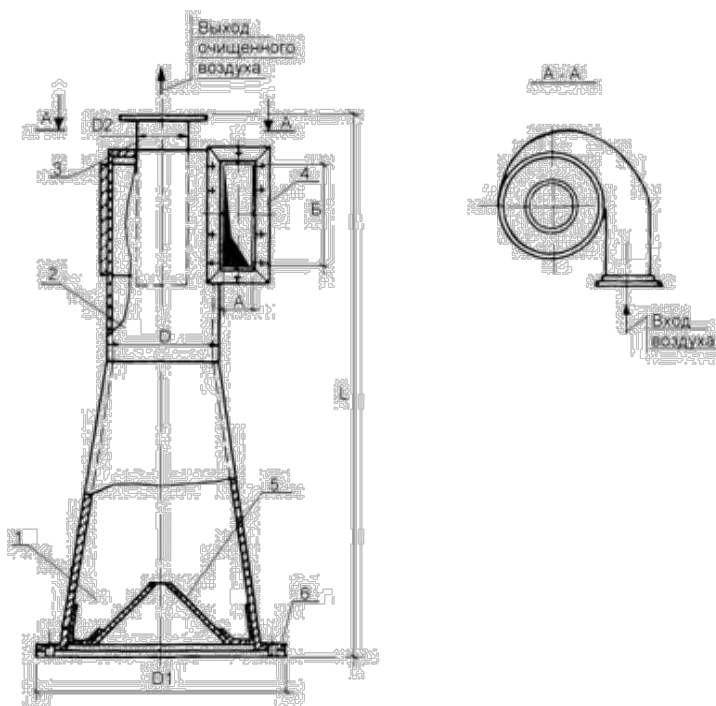


Рис. 4. Циклон ВЦНИИОТ:

- 1 – обратный конус; 2 – цилиндр; 3 – выхлопная труба; 4 – входной патрубок;
5 – коническая вставка (внутренний конус); 6 – соединительный фланец

2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ПАРАМЕТРЫ ЦИКЛОНОВ СТФ-Ц

В методических указаниях представлены конструктивные особенности, методика подбора и расчета нового циклона типа СТФ-Ц, разработанного на уровне изобретения кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» БНТУ (патент № 3781) применительно к газовым выбросам асфальтобетонных заводов (АБЗ).

Принципиальное отличие в работе этой модели циклона от известных заключается в том, что устройство позволяет повысить эффективность очистки запыленных потоков до 5 % в зависимости от гранулометрического состава пылей, увеличить срок эксплуатации циклонов на 10–15 % за счет уменьшения истирания его рабочих поверхностей вследствие разделения пыли на фракции при их движении и сепарации в рабочем пространстве циклона, предотвратить налипание мелких частиц на рабочие поверхности циклона при конденсации водяных паров вследствие наличия изолирующего пространства между корпусом и кожухом.

Этот циклон предназначен для очистки отходящих газов от средне- и мелкодисперсной пыли, образующейся в результате дробления, сортировки, пересыпки, истирания минералов и продуктов их переработки с содержанием до 15 % слипающихся веществ.

Областью преимущественного применения циклона типа СТФ-Ц являются пылеулавливающие системы асфальтобетонного производства.

Характерно, что улавливание пыли на технологическом оборудовании АБЗ обусловлено не только обеспечением требуемых санитарных норм, но и экономическими соображениями. Количество уловленной пыли достигает 10 % производительности оборудования и она в дальнейшем используется как дополнительный технологический продукт.

Принципиальная схема циклона СТФ-Ц представлена на рис. 5. Циклон содержит цилиндрическо-конический корпус, состоящий из цилиндрической 1 и конической 2 частей. К цилиндрической части корпуса присоединены входной патрубков 3 и выходной 4, а к конической части через диафрагму 5 – внутренняя секция 6 бункера. Корпус 1 расположен в кожухе 7. Образованное между ними пространство 8 соединено через отверстия 9 в стенке кожуха с внешней секцией 10 бункера. По всей боковой поверхности цилиндрической

части корпуса равномерно расположены отверстия *11*. Внутренняя секция *6* и внешняя секция *10* бункера снабжены люками с запорными устройствами *12*. Между диафрагмой *5* и конической частью *2* кожуха расположено кольцевое отверстие *13*.

Циклон работает следующим образом. Запыленный поток поступает в циклон через тангенциальный входной патрубок *3*, имеющий угол наклона к горизонту $0-15^\circ$. В полости корпуса *1* циклона происходит спиралеобразное движение потока с перемещением его от входного патрубка *3* до открытого сечения выходного патрубка *4*. При этом часть частиц пыли под действием центробежных сил устремляется к стенке *1* цилиндрической части корпуса и через отверстия *11* попадает в пространство *8* между корпусом и кожухом *7* и далее через отверстия *9* в секцию *10* бункера. Оставшаяся часть частиц, не попавшая в отверстия *11*, увлекается потоком в нижнюю коническую часть *2* корпуса циклона и далее через отверстие *13* попадает во внутреннюю секцию *6* бункера. Очищенный поток удаляется через выходной патрубок *4*, а пыль секции *6* и *10* бункера через люки с запорными устройствами *12* направляется в пылесборник.

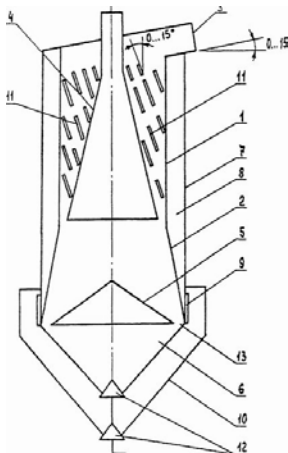


Рис. 5. Циклон СТФ-Ц:

- 1* – цилиндрическая часть корпуса циклона; *2* – коническая часть корпуса циклона;
- 3* – входной патрубок; *4* – выходной патрубок; *5* – диафрагма;
- 6* – внутренняя секция бункера; *7* – кожух циклона; *8* – пространство между корпусом и кожухом циклона; *9* – отверстия в кожухе; *10* – внешняя секция бункера;
- 11* – отверстия в цилиндрической части корпуса; *12* – запорное устройство;
- 13* – кольцевое отверстие

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Предлагаемая методика расчета циклона СТФ-Ц несколько отличается от стандартной. А именно, определение общей эффективности отдельного циклона и системы, состоящей из нескольких циклонов, можно проводить как по эмпирическим формулам, полученным на основании экспериментальных данных, так и по расчетным зависимостям, основывающимся на фракционной эффективности циклона и фракционном составе пыли.

При расчетах циклона определяют его диаметр, общие размеры, гидравлическое сопротивление и коэффициент очистки. Последний можно рассчитать используя теоретические зависимости. Для этого в каждом конкретном случае необходимо знать фракционный состав пыли, ее физико-механические свойства, находить интегрально-функциональное распределение пыли по размерам в вероятностно-логарифмической системе координат.

3.1. Цель и исходные данные для выполнения работы

Цель работы: подобрать по заданным исходным данным циклон, определить его основные размеры, а также установить его эффективность очистки (фракционную и общую).

Исходные данные для выполнения работы

Номер исходных данных (N) – последние две цифры в номере зачетной книжки студента (либо номер по порядку в списке группы обучения).

1. Расход газа (воздуха), поступающего в циклон первой ступени очистки при производительности АБЗ 25 т/ч, $L = 3000 + 1000N$ ($\text{м}^3/\text{ч}$).
2. Концентрация пыли на входе в циклон $\mu = 50 + 5N$ ($\text{г}/\text{м}^3$).
3. Температура поступающего в аппарат газа (воздуха) $t = 150 + 5N$ ($^{\circ}\text{C}$).
4. Пыль кварцевая с плотностью частиц $\rho_n = 2000 + 10N$ ($\text{кг}/\text{м}^3$).
5. Дисперсный состав пыли характеризуется данными, приведенными в табл. 1.

Дисперсный состав пыли

Размер частиц фракции d_i , мкм	<1	1–3	3–5	5–7	7–10	10–15	15–20	20–30	30–40	40–60
Выход фракции по массе p_i , %	1,98	5,24	8,07	3,41	8,52	13,14	11,44	17,70	11,80	18,70

Принципиальная схема системы двухступенчатой очистки приведена на рис. 6.

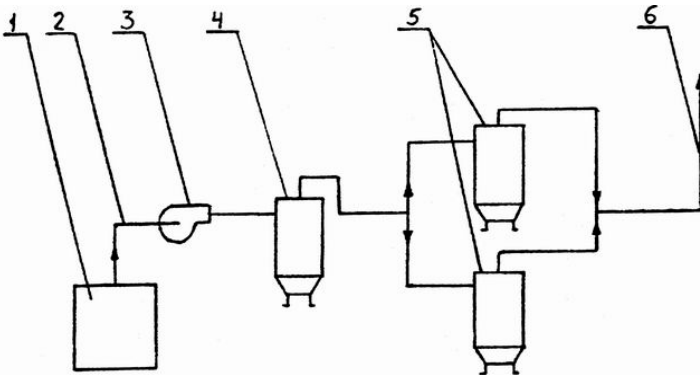


Рис. 6. Принципиальная схема системы пылеочистки для АБЗ

- 1 – технологическое оборудование АБЗ;
- 2 – трубопровод забор загрязненных газов; 3 – вентилятор;
- 4 – циклон СТФ-Ц первой ступени очистки;
- 5 – циклоны СТФ-Ц второй ступени очистки;
- 6 – трубопровод выброса в атмосферу очищенных газов

3.2. Порядок проведения расчетов

1. По заданным исходным данным (L , м³/ч) подбирают циклон СТФ-Ц и задаются его размерами (прил. А).
2. Определяют скорость газа во входном сечении циклона.
3. Определяют скорость газа в корпусе циклона.

4. На основании исходных данных выполняют оценку дисперсного состава пыли.

5. Определяют эффективность циклона $\eta_{ц}$ по известному уравнению регрессии.

6. Определяют параметр фракционной эффективности циклона СТФ-Ц и с учетом его значения находят фракционную эффективность $\eta_{ф}$ пылеулавливания.

7. Определяют общую эффективность пылеулавливания циклона СТФ-Ц.

8. Определяют потерю давления в циклоне.

9. Определяют мощность, необходимую для работы пылеуловителя.

Процесс осаждения в пылеуловителях типа циклон наиболее полно характеризуется фракционной эффективностью. В общем виде величина фракционной эффективности осаждения пыли устройством показывает, какая доля частиц определенного размера улавливается. Зная эти величины можно определить общую эффективность устройства при осаждении в нем любой пыли известного гранулометрического состава.

Фракционная эффективность [1, 2]

$$\eta_{ф}(d) = 1 - \exp(-a \cdot d^{\alpha}), \quad (1)$$

где d – определяющий размер фракции;

a – параметр, подлежащий определению по формуле (9);

$\alpha = 1,4$ – параметр, рекомендуемый для циклонов и пылеуловителей, при значении критерия $Fr = 150...250$.

$$Fr = \omega^2 \cdot R/g,$$

где ω – угловая скорость вращения газа в пылеулавливающем устройстве;

R – средний радиус криволинейного канала устройства (вращения вихря);

g – ускорение свободного падения.

При изменении Fr от 50 до 150 параметр α находится в пределах от 1,4 до 1,7. Промежуточные значения параметра α могут быть найдены интерполированием.

Плотность частиц различных пылей асфальто-бетонного производства составляет 2500–2800 кг/м³.

В практике оценки дисперсных составов пылей и фракционной эффективности широко используется формула Розина–Раммлера [1, 3]

$$P(d) = \exp\left[-\left(\frac{d}{d_e}\right)^n\right], \quad (2)$$

где d_e – размер частиц, соответствующих суммарному выходу по плюсу $P = 0,368$ (36,8 %);

n – параметр, характеризующий однородность смеси частиц по фракциям.

Если в формуле (2) принять $1/d_e^n = b$, тогда

$$P(d) = \exp(-b \cdot d^n). \quad (3)$$

Отсюда дифференциальная функция распределения частиц по фракциям имеет вид

$$f_1(d) = n \cdot b \cdot d^{n-1} \cdot \exp(-b \cdot d^n). \quad (4)$$

Если требуется определить фракционную эффективность пылеуловителя по гранулометрической характеристике еще не исследованной пыли, то параметры ее дифференциальной характеристики определяются следующим образом.

Из формул (2) и (3) следует, что если им удовлетворяет гранулометрический состав пыли, подлежащей улавливанию в различных устройствах, то для графического изображения зависимостей $P = f(d)$ удобно пользоваться специальной сеткой (см. рис. 9), при построении которой для оси абсцисс применена обычная логарифмическая шкала, а по оси ординат отложены преобразованные значения P в двойном логарифмическом масштабе. Построенная таким образом прямая линия имеет угловой коэффициент n , который характеризует однородность смеси частиц по фракциям. По этому графику можно также определить размер частиц d_e , соответствующий суммарному выходу $P = 0,368$ (36,8 %).

Параметры d_e и n могут быть определены по данным о суммарных выходах двух фракций P_1 и P_2 с достаточно большим различием в значениях их размеров d_1 и d_2 . В случае, когда суммарные выходы по плюсу выражены в %, искомые параметры вычисляются по следующим формулам:

$$\frac{\lg\left(\lg\frac{100}{P_1}\right) - \lg\left(\lg\frac{100}{P_2}\right)}{\lg d_1 - \lg d_2}; \quad (5)$$

$$d_e = \frac{d_1}{\sqrt[n]{2,302 \cdot \lg\frac{100}{P_1}}} = \frac{d_2}{\sqrt[n]{2,302 \cdot \lg\frac{100}{P_2}}}. \quad (6)$$

Общая эффективность циклона $\eta_{ц}$ определяется по следующему уравнению регрессии:

$$\eta_{ц} = 103,1 - 3,39w - 0,253\mu + 0,021w\mu + 0,114w^2, \quad (7)$$

где w – скорость потока на входе в циклон, м/с;

μ – концентрация пыли на входе в циклон, г/м³.

После подстановки в уравнение общей эффективности формул (1) и (4) имеем также

$$\eta_{ц} = b \cdot n \cdot \int_0^{\infty} d^{n-1} \cdot \exp(-b \cdot d^n) \cdot (1 - \exp(-a \cdot d^a)) \bar{d} d. \quad (8)$$

Параметр фракционной эффективности a определяется по эмпирической формуле

$$a = 0,58\eta_{ц}^9. \quad (9)$$

В том случае, если система пылеочистки состоит не из одной, а из нескольких ступеней, тогда фракционная эффективность пылеулавливающей системы, состоящей из нескольких одинаковых последовательно установленных циклонов определяется по формуле

$$\eta_{\text{фс}} = 1 - \exp(-\kappa \cdot a \cdot d^\alpha), \quad (10)$$

где κ – количество ступеней улавливания.

Фракционная эффективность системы из последовательно установленных пылеуловителей различной эффективности

$$\eta_{\text{фс}} = 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^K a_i \cdot d^\alpha\right), \quad (11)$$

где a_i – параметр фракционной эффективности каждого из циклонов в отдельности.

С целью упрощения расчетов для определения фракционной эффективности $\eta_{\text{ф}}$ пылеуловителей по формуле (1) используется номограмма (рис. 7), где в качестве исходных данных применены размер частиц d и параметр фракционной эффективности a .

Расчетная общая эффективность $\eta_{\text{цр}}$ циклона вычисляется как сумма произведений фракционных эффективностей $\eta_{\text{фи}}$ на массовые выходы p_i фракций пыли, поступающей на очистку,

$$\eta_{\text{цр}} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^m p_i \eta_{\text{фи}} \quad (12)$$

Эффективность пылеулавливающей системы, состоящей из нескольких последовательно установленных циклонов, определяется по формуле

$$\eta_{\text{цс}} = 1 - (1 - \eta_{\text{ц1}}) \cdot (1 - \eta_{\text{ц2}}) \dots (1 - \eta_{\text{ци}}), \quad (13)$$

где $\eta_{\text{ц1}}, \eta_{\text{ц2}}, \eta_{\text{ци}}$ – эффективности первого, второго и последующих циклонов.

Также необходимо учитывать некоторое снижение эффективности пылеочистки последующих ступеней по сравнению с ее расчетными значениями для одиночных циклонов.

Работа циклонов характеризуется их гидравлическим сопротивлением (потерями давления). Гидравлическое сопротивление ΔP (Па) представляет собой разность полных давлений на входе в циклон и на выходе из него. Величина потерь давления определяется по формуле

$$\Delta P = \zeta_{\text{ц}} \frac{\rho_{\text{г}} \cdot w_{\text{ц}}^2}{2}, \quad (14)$$

где $w_{\text{ц}}$ – скорость потока в корпусе циклона, м/с;

$\rho_{\text{г}}$ – плотность газа, кг/м³;

$\zeta_{\text{ц}}$ – коэффициент сопротивления, отнесенный к скорости в циклоне, устанавливается экспериментально. Для циклонов типа СТФ-Ц $\zeta_{\text{ц}} = 215$.

При определении перепада давлений ΔP , может измеряться скорость потока w на входе в циклон. Тогда коэффициент гидравлического сопротивления циклона, отнесенный к скорости в его входном сечении:

$$\zeta = \frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_{\text{г}} \cdot w^2}. \quad (15)$$

По окончании расчета полученные значения эффективности очистки и аэродинамического сопротивления сопоставляются с требуемыми. В случае необходимости производится пересчет с изменением типажа циклона или системы очистки.

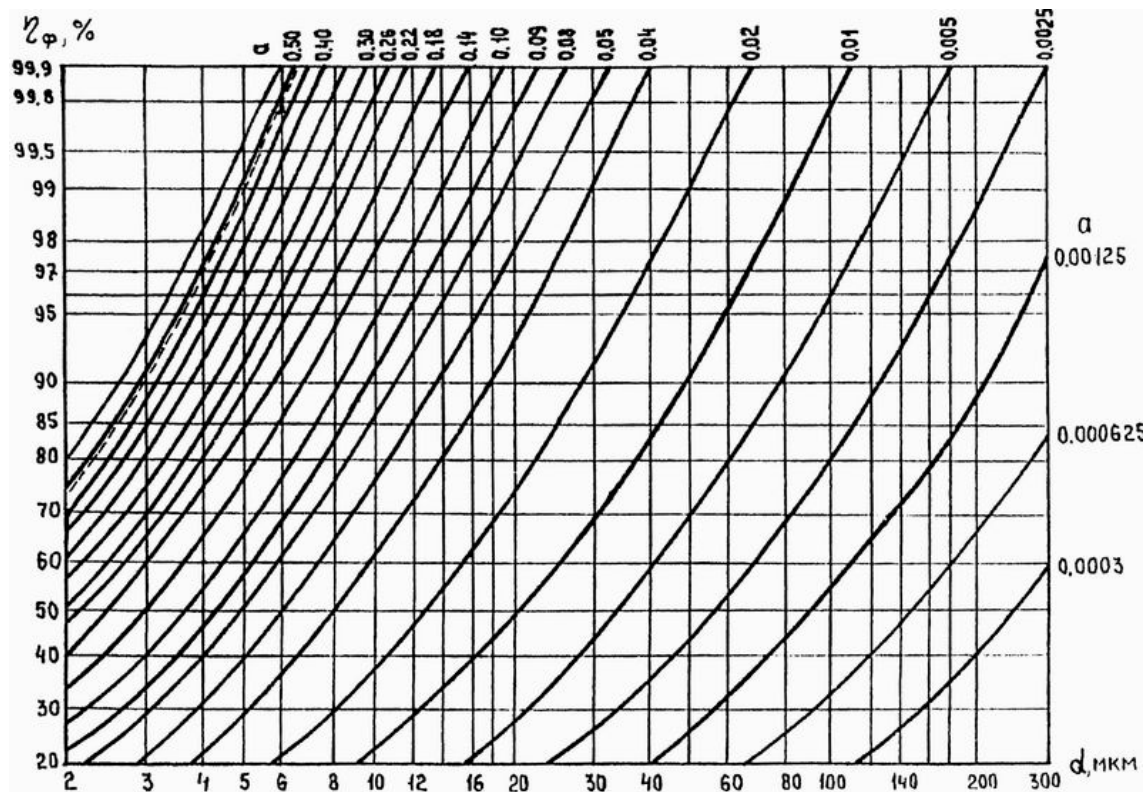


Рис. 7. Номограмма для определения фракционной эффективности циклона СТФ-Ц

3.3. Пример выполнения работы

Задание: подобрать по заданным исходным данным циклон СТФ-Ц, определить его эффективности (фракционную и общую) при работе в первой ступени очистки, рассчитать эффективность пылеулавливания системы из двух ступеней очистки и потери давления в ней, оценить затраты мощности на пылеулавливание.

Исходные данные:

1. Расход газа (воздуха), поступающего в циклон первой ступени очистки при производительности АБЗ 25 т/ч, $L = 8000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($2,22 \text{ м}^3/\text{с}$).
2. Концентрация пыли на входе в циклон $\mu = 90 \text{ г}/\text{м}^3$.
3. Температура поступающего в аппарат газа (воздуха) $t = 180 \text{ }^\circ\text{C}$.
4. Пыль кварцевая с плотностью частиц $\rho_{\text{п}} = 2650 \text{ кг}/\text{м}^3$.
5. Дисперсный состав пыли характеризуется данными, приведенными в табл. 1.

Последовательность расчета:

1. По данным прил. А для расхода $L = 8000 \text{ м}^3/\text{ч}$ выбираем циклон СТФ-Ц со следующими размерами (рис. 8):

- 1) внутренний диаметр циклона $D = 800 \text{ мм}$;
- 2) внутренний диаметр выхлопной трубы циклона $d = 480 \text{ мм}$;
- 3) внутренний диаметр пылевыпускного отверстия $d_1 = 240 \text{ мм}$;
- 4) высота входного патрубка $a = 526 \text{ мм}$;
- 5) ширина входного патрубка $b = 160 \text{ мм}$;
- 6) ширина входного патрубка на входе $b_1 = 208 \text{ мм}$;
- 7) длина входного патрубка $l = 480 \text{ мм}$;
- 8) высота выхлопной трубы $h = 1688 \text{ мм}$;
- 9) высота цилиндрической части корпуса циклона $h_1 = 1104 \text{ мм}$;
- 10) высота конической части $h_2 = 784 \text{ мм}$;
- 11) диаметр конической части выхлопной трубы $d_2 = 660 \text{ мм}$;
- 12) диаметр конической части корпуса циклона $d_3 = 952 \text{ мм}$;
- 13) диаметр колпака $d_4 = 640 \text{ мм}$;
- 14) высота внутреннего бункера $h_3 = 480 \text{ мм}$;
- 15) высота наружного бункера $h_4 = 570 \text{ мм}$;
- 16) диаметр наружного бункера $d_5 = 1140 \text{ мм}$;
- 17) диаметр наружного корпуса $D_1 = 960 \text{ мм}$;
- 18) высота выхлопного патрубка верхней улитки $a_1 = 528 \text{ мм}$;

- 19) ширина выхлопного патрубка верхней улитки $b_2 = 208$ мм;
- 20) диаметр выхлопной трубы верхней улитки $d_6 = 230$ мм;
- 21) полная высота циклона $H = 3648$ мм;
- 22) толщина стенки циклона $S = 5$ мм.

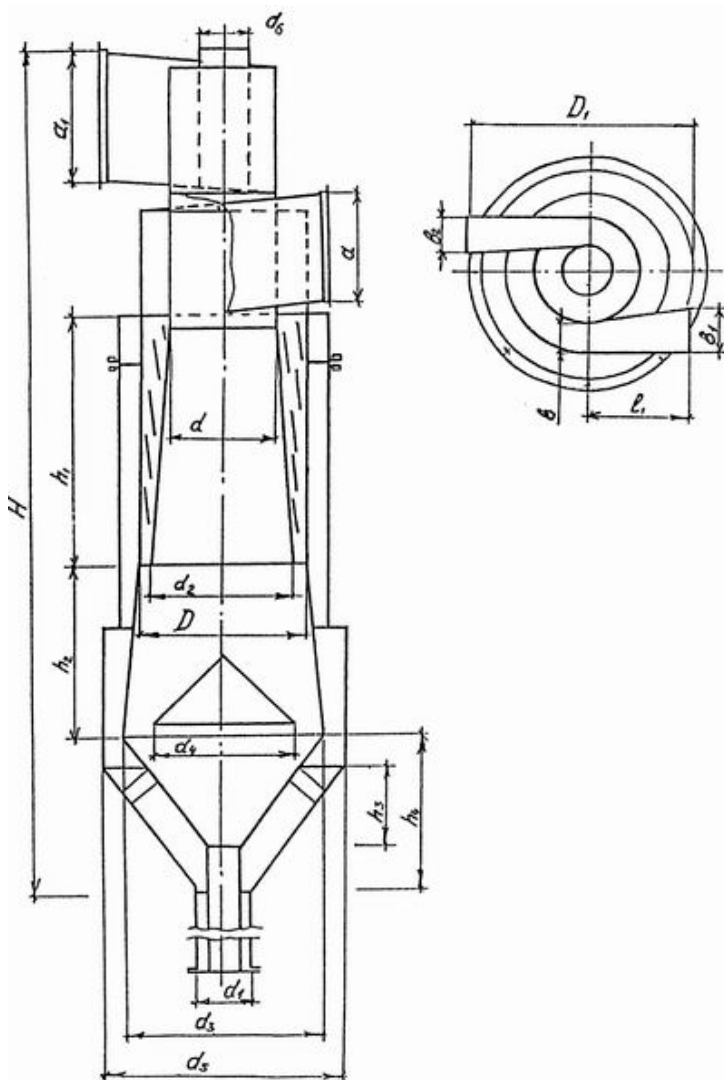


Рис. 8. Конструктивные параметры циклона СТФ-Ц

2. Скорость газа во входном сечении циклона

$$w = \frac{L}{3600 F} = \frac{8000}{3600 \cdot 0,526 \cdot 0,208} \cong 20 \text{ м/с},$$

где $F = a \cdot b_1$ – площадь входного отверстия циклона, м².

3. Условная скорость газа в корпусе циклона

$$w_{\text{ц}} = \frac{4L}{\pi \cdot D_1^2} = \frac{4 \cdot 8000}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,96^2} \cong 3,1 \text{ м/с}.$$

4. На основании данных табл. 1 выполним оценку дисперсного состава пыли, которая необходима для установления фракционной и общей эффективности циклона.

4.1. По табл. 1 определяем исходные данные для вычисления параметров функций распределения частиц по фракциям. При этом находим суммарные выходы по плюсу $P(d)$ и минусу $P_1(d)$, выходы фракций на единицу длины интервала $p_i/\Delta d$. Табл. 2 заполняется следующим образом. Начальный суммарный выход по минусу $P_1(d)$ принимается равным 100 %, а начальный выход по плюсу $P(d)$ равен выходу по массе самой крупной фракции 18,7 %. Далее ячейки заполняются согласно методике, приведенной в табл. 2. Для заполнения графы 6 необходимо определить Δd (мкм) – разность крайних диаметров частиц одного интервала, т. е. $\Delta d = d_{\text{max}} - d_{\text{min}}$.

Полученные данные сводим в табл. 2.

4.2. Руководствуясь расчетными данными (табл. 2) строим график суммарных выходов по плюсу $P = f(d)$ (см. рис. 9). Из этого построения следует, что определяющий размер частиц $d_e = 32$ мкм (для $P = 36,8$ %), а коэффициент неоднородности смеси частиц по фракциям, как угловой коэффициент прямой на рис. 9, $n = \text{tg}\alpha = 36,8/32 = 1,15$.

Таблица 2

Исходные данные для определения параметров функций распределения частиц по фракциям $P_i(d)$ и $f_1(d) = p_i/\Delta d$

	Размер частиц фракции d_i , мкм	Средний размер фракций d , мкм	Выход фракции по массе, p_i , %	Суммарные выходы фракций, %		Выход фракций на единицу длины интервала $p_i/\Delta d$, %/мкм
				по плюсу $P(d)$	по минусу $P_1(d)$	
	1	2	3	4	5	6
А	40–60	50	18,70	(А3) 18,70	100	0,94
Б	30–40	35	11,80	(А4 + Б3) 30,50	(А5 – А4) 81,30	1,18
В	20–30	25	17,70	(Б4 + В3) 48,20	(А5 – Б4) 69,50	1,77
Г	15–20	17,50	11,44	(В4 + Г3) 59,64	(А5 – В4) 51,80	2,29
Д	10–15	12,50	13,14	(Г4 + Д3) 72,73	(А5 – Г4) 40,36	2,63
Е	7–10	8,50	8,52	(Д4 + Е3) 81,30	(А5 – Д4) 27,22	2,84
Ж	5–7	6	3,41	(Е4 + Ж3) 84,71	(А5 – Е4) 18,70	1,70
З	3–5	4	8,07	(Ж4 + З3) 92,78	(А5 – Ж4) 15,29	4,04
И	1–3	2	5,24	(З4 + И3) 98,02	(А5 – З4) 7,22	2,62
К	< 1	0,5	1,98	(И4 + К3) 100	(А5 – И4 = К3) 1,98	1,98

4.3. Размер частиц d_e может быть также вычислен по формуле (6). Для этого необходимо и достаточно знать два значения P_1 и P_2 , соответствующие размерам фракций d_1 и d_2 . Из расчета (табл. 2) имеем для $d_1 = 50$ мкм – $P_1 = 18,7$ % и для $d_2 = 8,5$ мкм – $P_2 = 81,3$ %. По этим данным, воспользовавшись формулой (5), вычисляем коэффициент неоднородности смеси

$$d_e = \frac{d_2}{\sqrt[n]{2,302 \cdot \lg \frac{100}{P_2}}} = \frac{8,5}{\sqrt[1,18]{2,302 \cdot \lg \frac{100}{81,3}}} = 32,2 \text{ мкм.}$$

По формуле (6) размер частиц

$$n = \frac{\lg(\lg \frac{100}{P_1}) - \lg(\lg \frac{100}{P_2})}{\lg d_1 - \lg d_2} = \frac{\lg(\lg \frac{100}{18,7}) - \lg(\lg \frac{100}{81,3})}{\lg 50 - \lg 8,5} = 1,18.$$

4.4. Параметр дифференциальной функции распределения (4)

$$b = \frac{1}{d_e^n} = \frac{1}{32,2^{1,18}} = 0,017.$$

Тогда интегральная и дифференциальная функции распределения частиц пыли по фракциям будут соответствовать формулам (2–4):

$$P = \exp[-(\frac{d}{32,2})^{1,18}] \text{ или } P = \exp(-0,017 \cdot d^{1,18});$$

$$f_1(d) = \frac{P_i}{\Delta d} = 0,02 \cdot d^{0,18} \cdot \exp(-0,017 \cdot d^{1,18}).$$

5. Согласно формуле (7) общая эффективность циклона СТФ-Ц (первая ступень)

$$\eta_{цл} = 103,1 - 3,39 \cdot w - 0,253 \cdot \mu + 0,021 \cdot w \cdot \mu + 0,114 \cdot w^2 =$$

$$= 103,1 - 3,39 \cdot 20 - 0,253 \cdot 90 + 0,021 \cdot 20 \cdot 90 + 0,114 \cdot 20^2 = 95,93 \%,$$

или в долях единицы $\eta_{цл} = 0,959$.

6. Параметр a_1 фракционной эффективности циклона СТФ-Ц первой ступени очистки можно определить по формуле (9)

$$a_1 = 0,58\eta_1^9 = 0,58 \cdot 0,959^9 = 0,40.$$

7. Пользуясь формулой (1) для заданных размеров частиц пыли (табл. 2) можно определить фракционную эффективность $\eta_{\phi i}$ первой ступени очистки.

Полученные результаты сведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты определения фракционной эффективности

Средний размер фракции d , мкм	Выход фракции по массе p_i , %	Первая ступень очистки		Система из 2 ступеней	
		Фракционная эффективность $\eta_{\phi i}$	$p_i \eta_{\phi i}$	Фракционная эффективность $\eta_{\phi ci}$	$p_i \eta_{\phi ci}$
50	18,70	1	18,70	1	18,70
35	11,80	1	11,80	1	11,80
25	17,70	1	17,70	1	17,70
17,50	11,44	1	11,44	1	11,44
12,50	13,14	1	13,14	1	13,14
8,50	8,52	1	8,52	1	8,52
6	3,41	0,994	3,39	0,998	3,40
4	8,07	0,940	7,59	0,970	7,83
2	5,24	0,670	3,51	0,730	3,83
0,5	1,98	0,147	0,29	0,171	0,34

8. Расчетная общая эффективность циклона первой ступени находится как сумма произведения фракционных эффективностей $\eta_{\phi i}$ на массовые выходы p_i фракций пыли. Согласно формуле (12) и данным табл. 3

$$\eta_{ц1} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^m p_i \cdot \eta_{\phi i},$$

$$\begin{aligned} \eta_{ц1} &= 0,187 + 0,118 + 0,177 + 0,114 + \\ &+ 0,131 + 0,085 + 0,034 + 0,076 + 0,035 + 0,003 = 0,960. \end{aligned}$$

Таким образом, общая эффективность циклона СТФ-Ц (первая ступень), вычисленная на основании данных об его фракционной эффективности, составляет $\eta_{ц1} = 0,960$.

9. На основании формулы (14) потери давления в циклоне СТФ-Ц (первая ступень очистки)

$$\Delta P_1 = \zeta_{ц} \cdot \frac{\rho_r \cdot w_{ц}^2}{2} = 215 \cdot \frac{0,779 \cdot 3,1^2}{2} = 805 \text{ Па},$$

где $\zeta_{ц} = 215$ – коэффициент сопротивления циклона;

$\rho_r = 0,779$ – плотность газа при $t = 180$ °С и $V = 760$ мм рт. ст. (без учета поправки на влажность газа, т. к. с ее увеличением ρ_r уменьшается).

10. Основываясь на данных о фракционной эффективности η_{ϕ} циклона СТФ-Ц (см. табл. 3) и его общей эффективности $\eta_{ц1}$, определяем концентрацию пыли на выходе из первой ступени очистки

$$\mu_2 = \mu - \eta_{ц1} \cdot \mu = 90 - 0,96 \cdot 90 = 3,6 \text{ г/м}^3$$

Таким образом, на работу первой ступени очистки, состоящей из одного циклона СТФ-Ц, потери давления составляют 805 Па, а концентрация пыли на выходе – 3,6 г/м³ при общей эффективности 96 %.

11. На первой стадии проектирования для второй ступени очистки используем два параллельно соединенных между собой циклона СТФ-Ц того же типоразмера (см. пункт 1 настоящего расчета). Скорость газа на входе в каждый из циклонов СТФ-Ц второй ступени составит $w_2 = w/2 = 10$ м/с. Для получения наибольшей общей эффективности второй ступени скорость w_2 не должна превышать 8 м/с. Тогда в трубопроводе, соединяющем первую и вторую ступени очистки, можно сделать отвод в атмосферу 20 % запыленного газа с концентрацией $\mu_2 = 3,6$ г/м³. Такое решение представляется целесообразным только в том случае, если суммарные пылевые выбросы из отвода и второй ступени очистки не будут превышать допустимую концентрацию пыли в воздухе (ПДК). Учитывая, что во вторую ступень очистки поступает аэрозоль с относительно малой концентрацией ($\mu_2 = 3,6$ г/м³), примем скорость потока на ее входе $w_2 = 10$ м/с и выполним все расчеты для указанной скорости потока. Общая эффективность пылеулавливания во второй ступени будет несколько меньше, чем для случая, когда скорость оптимальная ($w_2 = 7...8$ м/с).

12. По методике, изложенной в пункте 4 настоящего расчета, проводим оценку дисперсного состава пыли на входе во вторую ступень очистки. В результате расчетов имеем $d_e = 2,6$ мкм, $b = 0,17$.

13. Общая эффективность второй ступени очистки (7)

$$\eta_{ц2} = 103,1 - 3,39 \cdot 10 - 0,253 \cdot 3,6 + 0,021 \cdot 10 \cdot 3,6 + 0,114 \cdot 10^2 = 80,45 \%,$$

или в долях единицы $\eta_{ц2} = 0,805$.

14. Параметр фракционной эффективности (9)

$$a_2 = 0,58 \eta_{ц2}^9 = 0,58 \cdot 0,805^9 = 0,082.$$

Тогда суммарный параметр фракционной эффективности системы из двух ступеней очистки

$$a = a_1 + a_2 = 0,40 + 0,082 = 0,482.$$

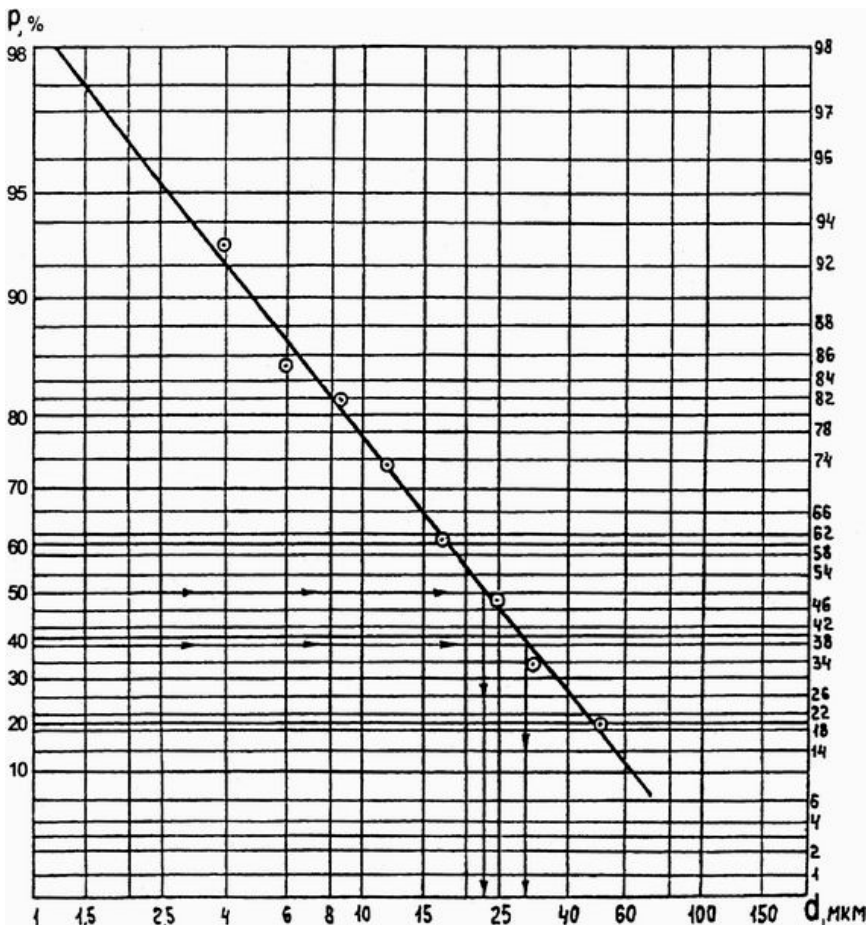


Рис. 9. Зависимость суммарного выхода P по плюсу от размера d частиц

Для определения фракционной эффективности системы из двух ступеней последовательно соединенных циклонов СТФ-Ц разной общей эффективности также можно воспользоваться формулой (11), которая для рассмотренного случая принимает вид

$$\eta_{\text{фс}} = 1 - \exp(-0,482 \cdot d^{1,4}).$$

Полученные результаты сведены в табл. 3.

Общая эффективность системы пылеулавливания из двух ступеней очистки, составленной из одного циклона СТФ-Ц первой ступени и двух циклонов того же типоразмера второй ступени, согласно формуле (13) $\eta_{\text{цр}} = 0,967$. При этом пылевые выбросы в атмосферу будут составлять $2,97 \text{ г/м}^3$. Расчеты дают общую эффективность системы $\eta_{\text{цс}} = 0,99$, что соответствует выбросам в атмосферу $1,0 \text{ г/м}^3$. Таким образом, вторая ступень очистки обеспечивает уменьшение пылевых выбросов с $3,6 \text{ г/м}^3$ до $1,0 \dots 2,97 \text{ г/м}^3$.

15. Потери давления во второй ступени очистки при условии скорости газа в корпусе циклона $w_2 = w_1/2 = 3,1/2 = 1,55 \text{ м/с}$

$$\Delta P_2 = \zeta \cdot \frac{\rho_{\text{г}} \cdot w_2^2}{2} = 215 \cdot \frac{0,779 \cdot 1,55^2}{2} = 201 \text{ Па.}$$

16. Суммарные потери давления в двух ступенях очистки

$$\Sigma P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = 805 + 201 = 1006 \text{ Па.}$$

17. Полученное значение потерь давления характеризует сопротивление непосредственно очистных агрегатов. Потери давления всей системы очистки будут включать потери в очистных агрегатах и в системе воздухопроводов, воздухозаборных устройствах и др. На основании данных об общих потерях давления и расходе воздуха проводится подбор воздуходувной машины (прил. Б).

Таким образом, применение двухступенчатой системы очистки сухого пылеулавливания обеспечивает эффективность пылеочистки от кварцевой пыли на 97–99 %. При этом в атмосферу выбрасывается аэрозоль с концентрацией $1,0\text{--}2,97 \text{ г/м}^3$, содержащая частицы кварцевой пыли размером менее 2 мкм ($\approx 56 \%$), 2–4 мкм ($\approx 39 \%$), 4–6 мкм ($\approx 5 \%$). Надо отметить, что частицы размером 6 мкм улавливаются в этой системе на 99,8 %, размером 4 мкм на 97 %, размером 2 мкм на 73 % и размером менее 1 мкм всего лишь на 17,1 %.

В итоге вторая ступень очистки из двух циклонов СТФ-Ц обеспечивает снижение запыленности газовых выбросов с $3,6$ до $2,97 \text{ г/м}^3$, что позволяет выполнить требования норм ПДВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методические указания к проведению расчетно-графической работы «Расчет циклона СТФ-Ц» дают возможность студентам специальности «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна» изучить теоретические положения по подбору циклонов и на практике подобрать по соответствующим пылегазовым выбросам циклон с конкретными техническими характеристиками для обеспечения эффективности очистки газовых выбросов.

Литература

1. Коузов, П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П.А. Коузов. – 3-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1987. – 264 с.: ил.
2. Банит, Ф.Г. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов / Ф.Г. Банит, А.Д. Мальгин. – М.: Стройиздат, 1979. – 351 с.: ил.
3. Кислов, Н.В. Аэродинамика измельченного торфа / Н.В. Кислов. – Минск: Наука и техника, 1987. – 147 с.
4. Теплогазоснабжение и вентиляция: курсовое и дипломное проектирование / под ред. проф. Б.М. Хрусталева. – Минск: ДизайнПРО, 1997. – 384 с.: с ил.
5. Рекомендации по проектированию и расчету пылеуловителей типа циклон для предприятий стройиндустрии / Н.В. Кислов [и др.]. – Минск: Технопринт, 2001. – 40 с.: ил.
6. Алиев, Г.М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: справочник / Г.М.-А. Алиев. – М.: Metallургия, 1986. – 544 с.: ил.
7. Очистка промышленных газов от пыли / В.Н. Ужов [и др.]. – М.: Химия, 1981. – 392 с.: ил.
8. Внутренние санитарно-технические устройства: в 3 ч. / под ред. Н.Н. Павлова и Ю.И. Шиллера. – Ч.2: Вентиляция и кондиционирование воздуха. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1992. – 416 с.: ил. – (Справочник проектировщика).
9. Циклон: патент Респ. Беларусь № 3781 от 28.09.1998 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Типаж циклонов СТФ-Ц

№	L , м ³ /ч	Внут- ренний диа- метр циклона D , мм	Внут- ренний диаметр выхлоп- ной трубы $d_{тр.}$, мм	Внут- ренний диаметр пыле- выпуск- ного отвер- стия d_1 , мм	Высота входного патрубка $a = 0,56 D$, мм	Ширина входного патрубка $b = 0,2 D$, мм	Ширина входного патрубка на входе $b_1 = 0,36$ D , мм	Длина входно- го па- трубка $l = 0,6 D$, мм	Высота выхлоп- ной трубы $h = 2,11 D$, мм	Высота цилин- дриче- ской части корпуса циклона $h_1 = 1,38$ D , мм	Высота кони- ческой части $h_2 = 0,98$ D , мм
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	3000	500	300	170	330	100	130	300	1055	690	490
2	6000	700	420	220	462	140	182	420	1477	966	686
3	8000	800	480	240	528	160	208	480	1688	1104	784
4	12000	1000	600	300	660	200	260	600	2110	1380	980
5	18000	1200	720	360	792	240	312	720	2532	1656	1176
6	28000	1500	900	450	990	300	390	900	3165	2070	1470
7	32000	1600	960	480	1050	320	416	960	3376	2200	1570
8	40000	1800	1080	540	1188	360	468	1080	3798	2484	1760

№	Диаметр конической части выхлопной трубы d_2 , мм	Диаметр конической части корпуса циклона $d_3 = 1,19 D$, мм	Диаметр колпака $d_4 = 0,8 D$, мм	Высота внутреннего бункера h_3 , мм	Высота наружного бункера h_4 , мм	Диаметр наружного бункера d_5 , мм	Диаметр наружного корпуса D_1 , мм	Высота выхлопного патрубка верхней улитки a_1 , мм	Ширина выхлопного патрубка верхней улитки b_2 , мм	Диаметр выхлопной трубы верхней улитки d_6 , мм	Полная высота циклона H , м	Толщина стенки циклона S , м
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	400	595	400	300	360	715	600	330	130	140	2280	3
2	590	833	560	420	500	1000	640	462	182	200	3192	3
3	660	952	640	480	570	1140	960	528	208	230	3648	5
4	850	1190	800	560	720	1430	1230	660	260	276	4560	5
5	1000	1428	960	710	860	1710	1440	792	312	350	5472	6
6	1340	1785	1200	900	1070	2140	1700	990	390	420	6840	6
7	1400	1904	1280	950	1150	2290	1800	1056	416	450	7296	6
8	1600	2142	1440	1070	1300	2570	2000	1188	468	500	8208	8

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ПОДБОР ВОЗДУХОДУВНОЙ МАШИНЫ

Воздуходувную машину подбирают руководствуясь значением расхода воздуха и общими потерями давления в системе [8]. Общие потери давления слагаются из потерь давления, полученных при расчете установки, и потерь давления на неучтенные сопротивления, связанные с качеством оборудования и монтажа. Величину неучтенных потерь давления принимают равной 10–15 % от суммарных потерь давления, полученных при расчете:

$$\Delta P = (1,1 \dots 1,15) \cdot \sum \Delta P_i \quad (\text{Б1})$$

Требуемый расход воздуха

$$L = L' \cdot m, \quad (\text{Б2})$$

где m – коэффициент, учитывающий потери воздуха через загрузочное устройство. Для шлюзовых питателей барабанного типа $m = 1,10 \dots 1,20$.

Требуемую мощность электродвигателя воздуходувной машины

$$N = \frac{L \cdot P}{1000 \cdot \eta_{в.м} \cdot \eta_{пр}} \cdot k_1, \text{ кВт}$$

где $\eta_{в.м}$ – КПД воздуходувной машины, определяемый по графикам характеристики [8];

$\eta_{пр}$ – КПД передачи;

k_1 – коэффициент запаса мощности на пусковой момент, выбирают по прилагаемой таблице.

КПД передачи и коэффициент запаса мощности

N, кВт	k_1	Вид передачи	$\eta_{пр}$
< 0,5	1,5	Непосредственная посадка на вал	1,0
0,51–1	1,3	электродвигателя	
1,01–2	1,2	Соединение валов вентилятора	0,98
2,01–5	1,15	и электродвигателя при помощи муфты	
> 5	1,10	Клиноременная	0,95
		Плоскоременная	0,90

Учебное издание

РАСЧЕТ ЦИКЛОНА СТФ-Ц

Методические указания
к выполнению расчетно-графической работы
для студентов специальности
1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана
воздушного бассейна»

Составители:
СИЗОВ Валерий Дмитриевич
КОРОТКИЙ Владимир Николаевич
БРАКОВИЧ Игорь Сергеевич

Редактор Е.О. Коржуева
Компьютерная верстка А.Г. Занкевич

Подписано в печать 05.10. 2011.
Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.
Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 2,03. Уч.-изд. л. 1,59. Тираж 100. Заказ 332.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет.
ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.
Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.
Министерство образования Республики Беларусь