

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»  
Кафедра «Обогащение полезных ископаемых»



**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
к выполнению практических работ по дисциплине  
**ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБОГАЩЕНИЯ**

для студентов специальности 21.05.04 "Горное дело"  
специализации "Обогащение полезных ископаемых"

Утверждено  
научно-издательским советом ДонНТУ  
Протокол № 2 от 23.03.2017 г.

Утверждено на заседании  
методической комиссии по специальности  
"Обогащение полезных ископаемых"  
Протокол № 6 от 20 января 2017 г.

Донецк

2017

УДК 622.7

Методические указания к выполнению практических работ по дисциплине «Вспомогательные процессы обогащения» / Сост.: доц. В.Г. Самойлик. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – 68 с.

Методические указания предназначены для студентов специальности 21.05.04 "Горное дело" специализации "Обогащение полезных ископаемых" стационарной и заочной формы обучения.

Определены цель, содержание и порядок выполнения практических работ, направленных на освоение методов расчета и выбора пылеулавливающего оборудования обогатительных фабрик.

Выполнение практических работ ориентировано на знание студентами современных методов математических вычислений.

Составитель: доц., к.т.н. Самойлик В. Г.

## Введение

Лекционный курс по дисциплине «Вспомогательные процессы обогащения» охватывает два технологических процесса: обеспыливание полезных ископаемых и пылеулавливание. Остальные процессы, также относящиеся к вспомогательным при обогащении полезных ископаемых (обезвоживание; фильтрование; сгущение пульпы; сушка; смешивание; окускование), рассматриваются в отдельных лекционных курсах.

На обогатительных фабриках, особенно с сухими процессами, многие операции переработки полезных ископаемых сопровождаются интенсивными пылеобразованием. Для удаления пыли используются системы пылеочистки.

Основным элементом систем пылеочистки являются пылеулавливающие аппараты. Среди исходных данных для выбора способов, технических средств и параметров пылеулавливания наиболее важным являются технологические и пылеаэродинамические.

Для обеспыливания используют сухие, мокрые и электрические методы.

В основе **сухих методов** лежат гравитационные, инерционные, центробежные механизмы осаждения или фильтрационные механизмы. **Мокрая очистка** газовых выбросов осуществляется путем тесного взаимодействия между жидкостью и запыленным газом на поверхности газовых пузырей, капель или жидкой пленки. **Электрическая очистка** газов основана на ионизации молекул газа электрическим разрядом и электризации взвешенных в газе частиц.

Мокрые способы очистки твердых и жидких аэрозолей имеют существенный недостаток - необходимость отделения уловленного загрязнителя от улавливающей жидкости. По этой причине мокрые способы следует применять только при отсутствии других методов очистки, отдавая предпочтение способам с минимальным расходом жидкости.

Целью практических работ по курсу «Вспомогательные процессы обогащения» является формирование у студентов навыков расчета и выбора пылеулавливающего оборудования.

Для качественного проведения практических работ необходима тщательная самоподготовка студентов, включающая:

- освоение теоретического материала по рекомендуемой литературе и конспекту лекций;
- изучение методических указаний к конкретной практической работе, уяснение цели, задачи и методики выполнения работы;
- ознакомление с требованиями, предъявляемыми к отчету по практической работе и подготовка необходимых таблиц для записи результатов исследований.

Работы выполняются студентами индивидуально. В начале занятий преподаватель контролирует готовность студентов к проведению текущей практической работы и принимает отчеты по предыдущей. Отчет о работе составляется на листах бумаги формата А4 в соответствии с ГОСТ 2.105-95 «Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Общие требования к текстовым документам».

## Дисперсный состав пыли

### 1. Общие положения

Дисперсный состав является одной из важнейших характеристик тонкоизмельченных материалов, определяющих их физико-химические свойства. В технике пылеулавливания и очистки газов дисперсный состав пыли имеет решающее значение, так как основной круг вопросов по расчету и выбору оборудования связан с этим параметром подлежащей улавливанию пыли.

Дисперсным (зерновым, гранулометрическим) составом пыли называется характеристика состава дисперсной фазы по размерам или скоростям оседания частиц. Она показывает, какую долю по массе, объему, поверхности или числу частиц составляют частицы в любом диапазоне их размеров или скоростей оседания. Дисперсный состав может быть выражен в виде таблицы, кривой или формулы распределения частиц пыли.

Степень дисперсности представляет собой качественный показатель, характеризующий "тонкость" пыли. В качестве условных показателей этого же свойства используются удельная поверхность, средний диаметр частиц, медианный диаметр и другие величины.

Проходом  $D$  (остатком  $R$ ) называется выраженная в процентах доля массы пыли, прошедшая через сито (оставшаяся на сите) с заданными размерами ячеек, от общей массы просеиваемой пробы пыли. Термины "проход" и "остаток" применяют и для подситовой области, подразумевая при этом долю массы частиц меньше или больше заданного размера.

### 2. Цель работы

Изучение методов представления результатов анализа дисперсного состава пыли.

### 3. Содержание работы

Результаты определения дисперсного состава в большинстве случаев представляются в виде таблиц. Наиболее часто данные дисперсионного анализа даются в виде фракций, выраженных в процентах от общего числа или массы (табл. 1.1).

Таблица 1.1.

## Дисперсный состав пыли

Размер частиц, мкм	Содержание фракции, %	Размер частиц, мкм	Содержание фракции, %
<1,6	2,08	10-16	18,74
1,6-2,5	3,61	16-25	14,57
2,5-4	8,32	25-40	12,50
4-6,3	17,56	>40	2,0
6,3-10	20,60	-	-

В некоторых методах анализа результаты записываются в виде таблиц с указанием процента массы или числа частиц, имеющих размер больше или меньше заданного (табл. 1.2).

Таблица 1.2

## Фракции пыли с частицами меньше или больше заданного размера

Размер частиц, мкм	Содержание частиц, %		Размер частиц, мкм	Содержание частиц, %	
	мельче	крупнее		мельче	крупнее
min	0,00	100,00	10,0	52,17	47,83
1,6	2,08	97,92	16,0	70,91	29,09
2,5	5,69	94,31	25,0	85,48	14,52
4,0	14,01	85,99	40,0	97,98	2,02
6,3	31,57	68,43	max	100,00	0,00

Результаты дисперсионного анализа можно представить в вид графиков. Принимая равномерным распределение частиц по размерам внутри каждой фракции, строят ступенчатый график, называемый гистограммой. По оси абсцисс откладывают размеры частиц, а по оси ординат – относительное содержание фракций, т. е. процентное содержание каждой фракции, отнесенное к массе всего материала (рис. 1.1).

Если процентное содержание каждой фракции разделить на разность размеров частиц, принятых в качестве граничных, и найденные значения отложить в системе координат как ординаты точек, абсцисс которых равны среднему для соответствующих фракций размеру частиц, то через полученные точки можно провести плавную дифференциальную кривую распределения частиц по размерам (рис. 1.2).

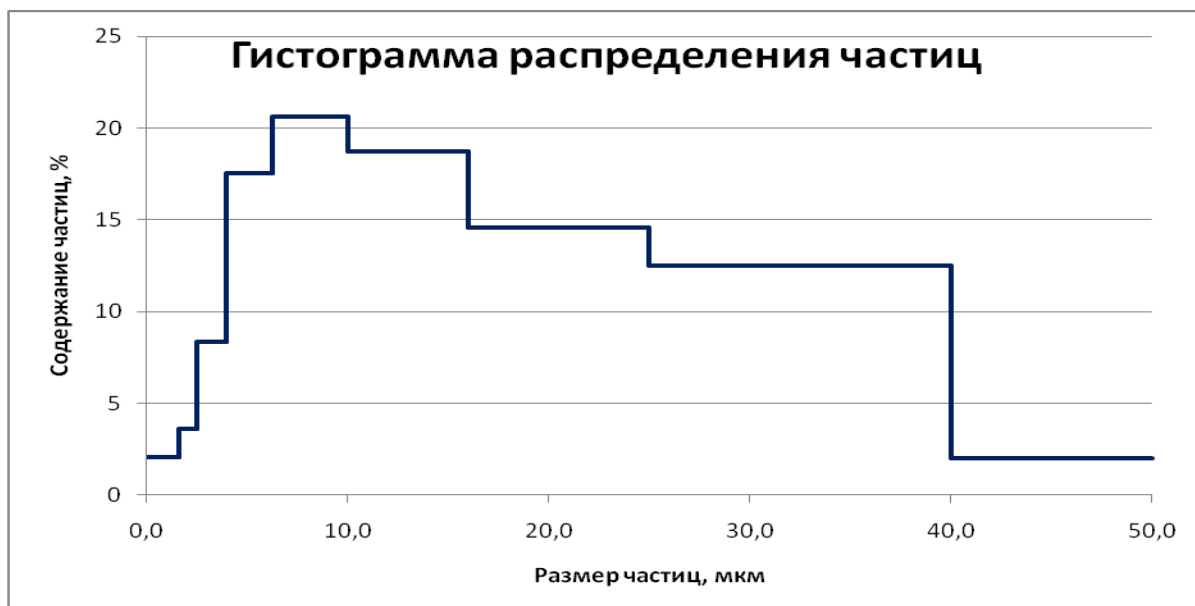


Рисунок 1.1 – Ступенчатый график фракционного состава частиц пыли

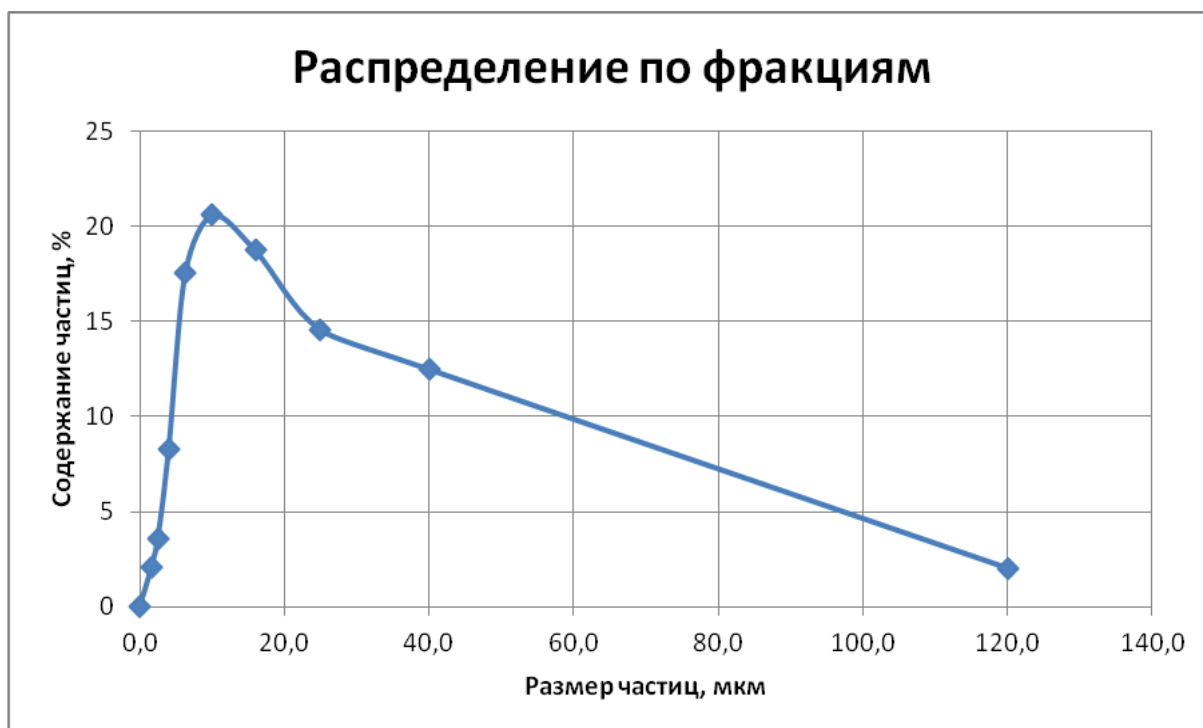


Рисунок 1.2 – Дифференциальная кривая распределения частиц пыли

Однако, наиболее удобным является графическое изображение результатов дисперсионных анализов в виде интегральных кривых  $R(d_{\text{ч}})$  или  $D(d_{\text{ч}})$ , каждая точка которых показывает относительное содержание частиц размерами больше или меньше заданного (рис. 1.3).

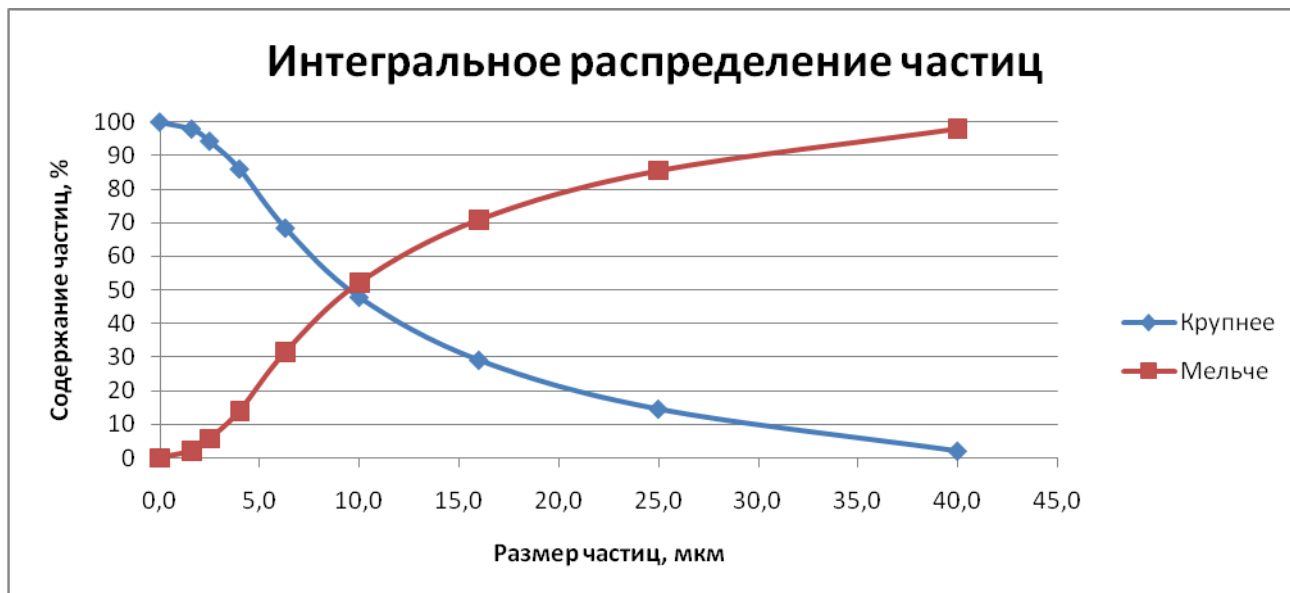


Рисунок 1.3 – Интегральное распределение в линейном масштабе координат

Интегральные кривые для частиц с логарифмически нормальным распределением удобно строить в вероятностно-логарифмической системе координат, где они приобретают вид прямых линий. Для построения такой системы координат по оси абсцисс в логарифмическом масштабе откладывают значения  $d_q$ , а по оси ординат – значения  $D(d_q)$  или  $R(d_q)$ .

#### 4. Задание для расчета

По результатам определения дисперсного состава пыли построить:

- ступенчатый график фракционного состава частиц пыли;
- дифференциальная кривая распределения частиц пыли;
- интегральное распределение частиц пыли в линейном масштабе координат.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 1.3.

#### 5. Содержание отчета

- Дисперсный состав пыли, характеристика;
- Способы представления результатов определения дисперсного состава;
- Результаты исследований.

#### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение терминам «проход» и «остаток».
2. Как строится ступенчатый график фракционного состава частиц пыли?
3. Как построить графическое изображение результатов дисперсионных анализов в виде интегральных кривых?

Таблица 1.3.

## Исходные данные для расчета дисперсного состава пыли

Размер частиц, мкм	Содержание частиц по фракциям крупности, % по вариантам									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<1,6	2,34	6,78	10,34	5,67	15,23	1,15	10,67	15,45	2,34	11,23
1,6-2,5	4,55	7,65	6,56	10,45	13,45	4,55	6,78	12,34	6,78	15,46
2,5-4	6,34	10,12	5,34	15,34	13,11	5,45	8,67	11,76	12,54	18,98
4-6,3	10,23	14,21	3,23	13,45	10,23	7,89	8,76	13,44	14,56	11,45
6,3-10	15,43	12,34	15,67	11,56	7,89	8,65	17,02	12,19	19,34	10,67
10-16	25,65	11,56	16,78	12,35	6,78	13,45	14,34	12,46	13,24	10,59
16-25	14,21	17,89	17,85	14,21	13,23	20,23	18,76	6,75	15,69	11,02
25-40	12,34	14,34	15,34	12,34	10,34	24,33	11,23	8,97	14,34	6,75
>40	8,91	5,11	8,89	4,63	9,74	14,30	3,77	6,64	1,17	3,85



## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

### Расчет пылеосадительной камеры

#### 1. Общие положения

Осаждение под действием сил тяжести, как правило, происходит при малых линейных скоростях потоков. Этот способ малоэффективен, так как действующие силы в данном случае невелики по сравнению с центробежными и другими силами, используемыми для этой же цели. В процессе отстаивания возможно с достаточной эффективностью отделить только крупные частицы, однако это наиболее простой и дешевый способ для первичного разделения неоднородных систем. В дальнейшем газ поступает на пылеулавливающие установки более высокой эффективности. Скорость осаждения поступивших в атмосферу частиц пыли зависит от их размеров. Если эта величина более 75 мкм, то твердые примеси быстро достигают поверхности почвы. При размерах от 5 до 75 мкм седиментация происходит медленно, более мелкие частицы образуют взвеси, которые при дыхании попадают в легкие человека. Падающие в неподвижном газе (воздухе) отдельные пылинки быстро достигают постоянной скорости. Частицы с диаметром, близким к 0,1 мкм, подчиняются броуновскому движению. Ниже указаны скорости оседания сферических частиц с плотностью 1000 кг/м<sup>3</sup>.

Диаметр частиц, мкм	200	100	90	10	5	1	0,5
Скорость осаждения, см/с	120	30	7	0,3	0,07	0,003	0,0007
Скорость осаждения, м/с	1,2	$3 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-6}$

#### 2. Цель работы

Изучение конструктивных особенностей пылеосадительных камер и методики их расчета.

#### 3. Содержание работы

В качестве аппаратов очистки газов от пыли используют пылеосадительные камеры (рис.2.1).

Запыленный газ поступает в корпус камеры (1), в которой установлены горизонтальные полки (2). Расстояние между полками от 100 до 300 мм. Газ очищается при прохождении в каналах между полками, на которых осаждается пыль. Пройдя полки, газ огибает вертикальную отражающую перегородку (3) и уходит из камеры. Вертикальная перегородка обеспечивает равномерное распределение газа между

полками. Осевшая на полках пыль удаляется с помощью скребков через люки (4). Осаждение твердых частиц в пылесадительных камерах возможно лишь при ламинарном режиме. Пылесадительные камеры используют для предварительной очистки сильно запыленных газов при размере частиц в газе более 5 мкм. Степень очистки газа от твердых частиц в этих аппаратах обычно не превышает 30-40%.

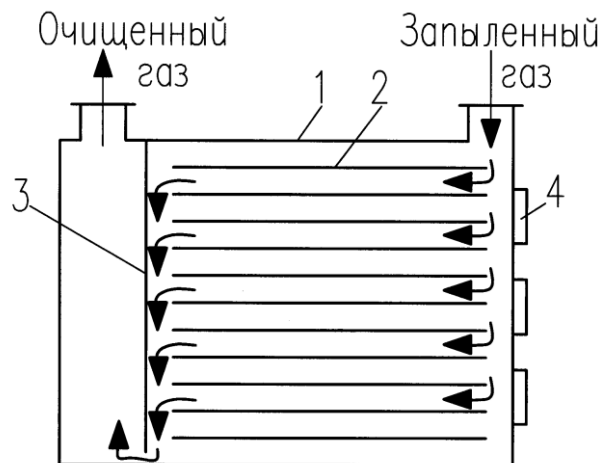


Рисунок 2.1 - Пылесадительная камера:

1 – корпус; 2 – полки; 3- отражательная перегородка; 4 – люки для удаления пыли

Для расчета пылесадительной камеры необходимо установить связь между расходом запыленного газа, скоростью осаждения и геометрическими размерами камеры.

Рассмотрим схему движения частицы в пылесадительной камере (рис. 2.2).

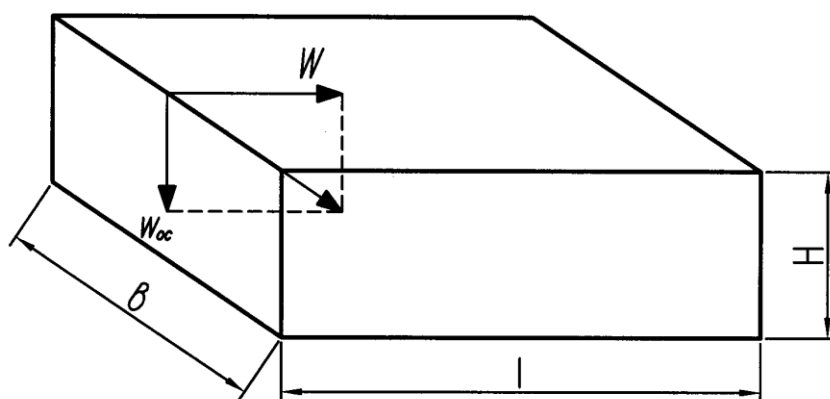


Рисунок 2.2 – Схема движения частицы в пылесадительной камере

Чтобы частица пыли, попадая в камеру, успела осесть, время ее пребывания в камере  $\tau_{np}$  должно быть больше или равно времени ее осаждения  $\tau_{oc}$ .

$$\tau_{np} = l/W ; \quad \tau_{oc} = H/W_{oc} \quad (2.1)$$

где  $W$  – скорость газа;  $W_{oc}$  – скорость осаждения.

Частица успеет осесть в камере, если  $\tau_{np} = \tau_{oc}$  или  $l/W = H/W_{oc}$ . Скорость газа в камере можно выразить через секундный расход (производительность) и площадь сечения (по уравнению расхода):  $W = V/(b \cdot H)$ , тогда  $l \cdot b \cdot H/V = H/W_{oc}$  или  $V = W_{oc} \cdot l \cdot b$ . Произведение  $l \cdot b$  есть площадь осаждения, т.е.

$$l \cdot b = F_{oc} \text{ и } V = W_{oc} \cdot F_{oc}, \quad (2.2)$$

т.е. производительность пылеосадительных камер зависит не от их высоты, а определяется площадью осаждения.

### **Пример.**

Определить размеры пылеосадительной камеры для очистки  $V = 5200 \text{ м}^3/\text{ч} = 1,444 \text{ м}^3/\text{с}$  газа плотностью  $\rho_c = 1,3 \text{ кг/м}^3$ ; динамической вязкостью  $\mu = 1,67 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ; кинематической вязкостью  $\nu = 1,28 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  от шарообразных частиц кварца диаметром  $50 \text{ мкм}$  и плотностью  $2650 \text{ кг/м}^3$ .

### **Решение.**

1. Так как скорость осаждения неизвестна, то сначала определим режим осаждения по критерию Архимеда:

$$Ar = \frac{g \cdot d^3 \cdot (\rho_T - \rho_c)}{\nu^2 \cdot \rho_c} = \frac{9,81 \cdot (50 \cdot 10^{-6})^3 \cdot (2650 - 1,3)}{(1,284 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 1,3} = 15,16.$$

режим осаждения ламинарный, т.к. критерий  $Ar < 33$  (переходный режим при  $33 < Ar < 8,3 \cdot 10^4$ , турбулентный – при  $Ar > 8,3 \cdot 10^4$ ).

2. Скорость осаждения при ламинарном режиме осаждения определяется по формуле Стокса:

$$W_{\tilde{m}} = \frac{d^2 \cdot g (\rho_{\tilde{O}} - \rho_{\tilde{n}})}{18\mu} = \frac{(50 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 9,81 \cdot (2600 - 1,3)}{18 \cdot 1,67 \cdot 10^{-5}} = 0,212 \text{ м/с}.$$

3. Среднее время пребывания газа в камере определяется отношением объема камеры к объемному расходу газа:

$$\tau_{\tilde{O}} = \frac{V_{\tilde{O}}}{V} = \frac{V_{\tilde{O}}}{1,444} = 0,692 \cdot V_{\tilde{O}}, \text{ с.}$$

4. Время осаждения частиц в камере  $\tau_{\hat{m}} = \frac{\dot{I}}{W_{\hat{m}}}$ , но частица успевает осесть, если  $\tau_{oc} = \tau_{np}$ . Тогда  $\tau_{oc} \cdot W_{oc} = H$  и, следовательно,  $H = \tau_{np} \cdot W_{oc}$ .

$$H = 0,212 \cdot 0,692 V_{кам} = 0,147 V_{кам}.$$

5. Площадь основания камеры:

$$F_{кам} = b \cdot l = \frac{V_{\hat{a}i}}{\dot{I}} = \frac{V_{\hat{a}i}}{0,147 \cdot V_{\hat{a}i}} = \frac{I}{0,147} = 6,8 \text{ м}^2.$$

6. Площадь поперечного сечения камеры:

$$b \cdot \dot{I} = \frac{V}{W}; \text{ где } W \text{ – скорость газа в камере.}$$

Примем скорость газа в камере 0,2 м/с.

$$\text{Тогда } b \cdot H = \frac{1,444}{0,2} = 7,2 \text{ м}^2.$$

Так как производительность пылеосадительной камеры не зависит от ее высоты, а определяется только площадью осаждения, то приняв высоту камеры, равную 2 м имеем:

$$b = 7,2/2 = 3,6 \text{ м.}$$

Длину камеры определяем исходя из формулы для определения площади основания камеры:

$$F_{кам} = b \cdot l = 6,8 \text{ м}^2.$$

Отсюда

$$l = 6,8/3,6 = 1,88 \text{ м.}$$

#### 4. Задание для расчета

Исходные данные для расчета пылеосадительной камеры приведены в табл. 2.1.

#### 5. Содержание отчета

- Особенности осаждения частиц пыли под действием сил тяжести;
- Описание способа отделения пыли в пылеосадительной камере;
- Схема движения частицы в пылеосадительной камере;
- Результаты исследований.

Таблица 2.1

## Исходные данные для расчета пылеосадительной камеры

Вариант	$V, \text{ м}^3/\text{ч}$	$\rho_c, \text{ кг}/\text{м}^3$	$\mu, \text{ Па}\cdot\text{с}$	$\nu, \text{ м}^2/\text{с}$	$d, \text{ мкм}$	$\rho_T, \text{ кг}/\text{м}^3$
1	5 000	1,30	$1,82 \cdot 10^{-5}$	$1,51 \cdot 10^{-5}$	80	2500
2	10 000	1,25	$1,76 \cdot 10^{-5}$	$1,41 \cdot 10^{-5}$	70	1800
3	7 000	1,35	$1,86 \cdot 10^{-5}$	$1,60 \cdot 10^{-5}$	90	1600
4	6 500	1,31	$1,82 \cdot 10^{-5}$	$1,51 \cdot 10^{-5}$	60	2400
5	9 700	1,26	$1,76 \cdot 10^{-5}$	$1,41 \cdot 10^{-5}$	40	2200
6	15 000	1,32	$1,86 \cdot 10^{-5}$	$1,60 \cdot 10^{-5}$	90	1700
7	8 500	1,27	$1,82 \cdot 10^{-5}$	$1,51 \cdot 10^{-5}$	80	2000
8	12 400	1,33	$1,76 \cdot 10^{-5}$	$1,41 \cdot 10^{-5}$	50	2900
9	6 800	1,29	$1,86 \cdot 10^{-5}$	$1,60 \cdot 10^{-5}$	60	2450
10	11 450	1,34	$1,71 \cdot 10^{-5}$	$1,32 \cdot 10^{-5}$	40	2650

**Контрольные вопросы**

1. Влияние крупности частиц пыли на скорость их осаждения.
2. Принцип работы пылеосадительной камеры.
3. Опишите методику определения размеров пылеосадительной камеры.

## Основные факторы, влияющие на степень улавливания пыли в циклонах

### 1. Общие положения

Для осаждения пылевых частиц под действием центробежных широко используются циклоны.

Циклоны – это аппараты, применяемые для разделения неоднородных систем газ – твёрдое тело под действием центробежной силы (рис. 3.1).

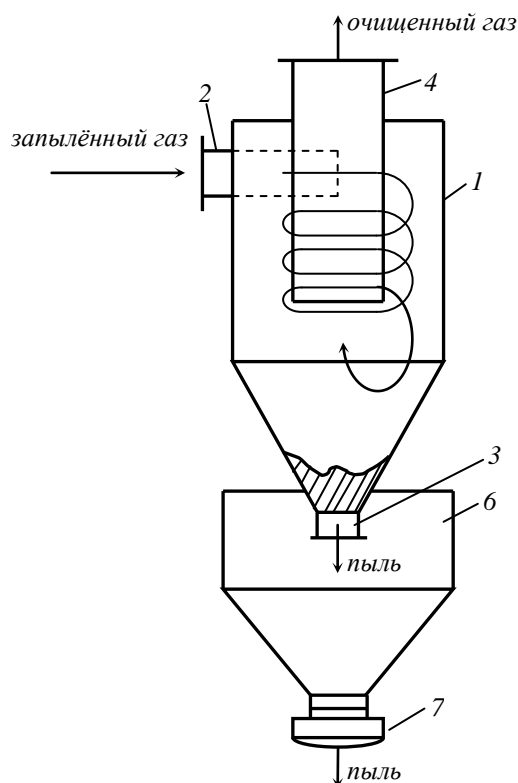


Рисунок 3.1– Схемы работы циклона

- 1 – корпус;
- 2 – входной патрубок;
- 3 – пылеотводящий патрубок;
- 4 – выхлопная труба;
- 5 – улитка;
- 6 – пылесборник;
- 7 – затвор.

Циклон может работать под напором (газодувка, вентилятор, компрессор перед циклоном) и под разрежением (вентилятор, вакуумнасос после циклона).

Составными элементами циклонов являются – корпус, выхлопная труба и бункер. Циклоны конструкции НИИОгаз изготавливают с левым и правым вращением газового потока. П – по часовой стрелке (см. со стороны выхлопной трубы); Л – вращение потока против часовой стрелки.

Запылённый газ поступает в циклон (рис 3.1) со скоростью 15-25 м/с по тангенциальному патрубку (2) в корпус циклона (1). При входе в аппарат прямолинейное движение газового потока преобразуется во вращательное. Вращение происходит в кольцевой щели между корпусом и центральной выхлопной трубой (4). Газовый поток движется по спирали вниз. При этом центробежная сила действует на частицы

пыли и они, прижимаясь к стенке корпуса, ссыпаются в бункер (6), а газ, дойдя до конической части циклона и не найдя выхода (пылесборник (3) закрыт), меняет направление, закручиваясь по меньшему радиусу, и выходит вверх по центральной трубе.

Циклоны характеризуются простотой конструкции, отсутствием движущихся частей, возможностью обработки химически агрессивных сред. Они обеспечивают повышенную степень разделения по сравнению с аппаратами гравитационного осаждения и более компактны.

## **2. Цель работы**

Изучение основных факторов, влияющих на степень улавливания пыли в циклонах.

## **3. Содержание работы**

Степень улавливания пыли в циклонах зависит от: 1) скорости газового потока на входе в циклон или скорости газа, отнесенного к сечению по внутреннему диаметру; 2) диаметра циклона; 3) входной концентрации взвешенных частиц; 4) температуры запылённого газа; 5) дисперсного состава и удельного веса пыли; 6) конструктивных особенностей циклона (эффективность очистки циклонов серии НИИОГАЗ падает с ростом угла входа в циклон); 7) колебаний нагрузки циклона.

### **Рассмотрим подробнее эти факторы.**

1). С увеличением скорости газового потока, степень улавливания пыли в циклоне повышается и чем мельче пыль, тем скорость должна быть выше. Однако, при скорости выше 25 м/с, завихрённый газовый поток будет срывать успевшие осесть в циклоне частицы пыли и снова возвращать их в поток, что приводит к уменьшению степени очистки. Чаще поддерживают скорость газов при входе в циклон 18-25 м/с, а скорость, отнесённую к сечению цилиндра, принимают равной 2,8-3,5 м/с. Для циклонов конструкции НИИОГаз рекомендуются следующие значения скоростей (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Рекомендуемые значения скоростей запылённого газа для циклонов НИИОГаз

Тип циклонов	ЦН-24	ЦН-15У, ЦН-15, ЦН-11	СК-ЦН-33, СК-ЦН- 34М	СК-ЦН-34
$\omega_{\text{опт}}$ , м/с	4,5	3,5	2,0	1,7

2). С увеличением диаметра цилиндрической части ухудшается степень пылеулавливания, так как частица пыли проходит больший путь в процессе выделения из

газа, вследствие этого увеличивается время сепарации частицы из потока до стенки. Для сухих циклонов рекомендуют ограничиться значением диаметра 1000 мм, а для очистки большого количества газа устанавливать группу циклонов меньшего размера. Диаметр циклонов НИИОгаза можно проверить и сопоставить с фактической величиной, в зависимости от производительности по формуле:

$$D_{\text{с}} = \sqrt{\frac{4V}{\pi\omega}}, \quad (3.1)$$

где  $V$  – производительность, м<sup>3</sup>/ч;

$\omega$  – скорость газа, отнесенная к сечению (принимается в пределах 3-3,5), м/с.

3). От диаметра циклона зависит и начальная концентрация взвешенных частиц. Пыли, которые содержат 60-70% частиц диаметром меньше 10 мкм, ведут себя как слипающиеся. Для слабослипающихся пылей начальные концентрации не должны превышать следующих значений (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Зависимость концентрации слабослипающейся пыли от диаметра циклона

Диаметр циклона, мм	800	600	500	400	300	200	100
Допустимая концентрация, кг/м <sup>3</sup>	2,5	2,0	1,5	1,2	1,0	0,8	0,6

При работе со среднеслипающимися пылями концентрация должна быть уменьшена в 4 раза и 8-10 раз для сильнослипающихся пылей по сравнению с указанными в таблице величинами.

4). С повышением температуры газа увеличивается его вязкость (табл. 3.3), что ухудшает условия улавливание пыли.

Таблица 3.3

Зависимость динамической вязкости воздуха от температуры

Температура, °С	0	20	50	100	160	200	250
Динамическая вязкость, $\mu \cdot 10^6$ , Па·с	17,2	18,1	19,6	21,9	24,5	26,0	27,4

Скорость осаждения частиц:

$$\omega_{\text{с}} = \frac{\omega^2(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{г}})d^2 \cdot R}{18\mu_{\text{г}}}, \quad (3.2)$$

где  $\omega$  – угловая скорость, рад/с;

$R$  – радиус вращения частицы пыли, м;

$\rho_{\text{г}}, \rho_{\text{п}}$  – плотность газа и пыли, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  – динамический коэффициент вязкости газа, Па·с.



Однако необходимо помнить, что температура газа должна быть на 15-20<sup>0</sup>С выше точки росы (температура, соответствующая полному насыщению воздуха водяными парами в процессе охлаждения), чтобы избежать конденсации влаги из воздуха и замачивания рабочих поверхностей циклона.

5). Чем крупнее пыль и больше её плотность, тем выше степень улавливания. Для приближенного определения последней в циклонах различного типа с учётом температуры, гидравлического сопротивления, среднего медианного размера пыли, её плотности, диаметра циклона можно пользоваться номограммой (рис. 3.2).

**Пример.**

Определить степень улавливания пыли в циклоне СДК-ЦН-33, если его диаметр 800 мм, гидравлическое сопротивление 1000 Па, температура газа 200<sup>0</sup>С, плотность пыли 4000 кг/м<sup>3</sup>, медианный размер пыли  $d_{50}=10$  мкм.

**Решение.**

По номограмме (рис. 3.2) на верхней шкале сопротивления циклона находим точку, соответствующую  $\Delta P=1000$  Па.

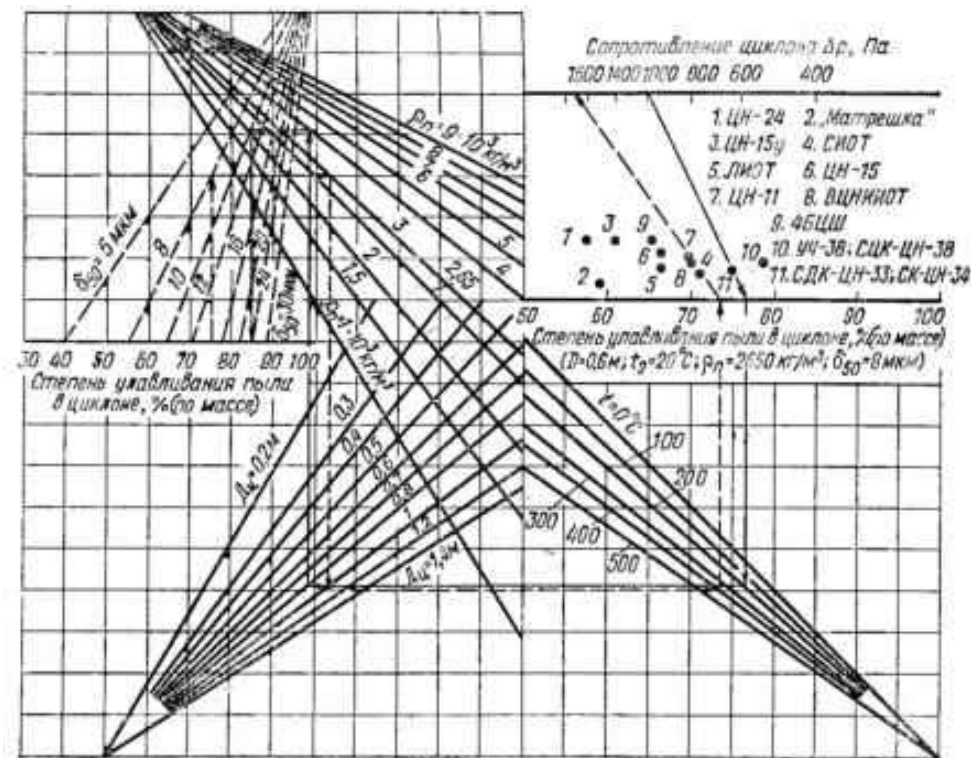


Рисунок 3.2 – Номограмма для определения степень улавливания циклона

Через неё и точку 11, принадлежащую циклону СДК-ЦН-33, проводим прямую линию до пересечения с горизонтальной шкалой в середине номограммы, на кото-

рой указана степень улавливания пыли в циклоне диаметром 0,6 м;  $t = 20^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho = 2650 \text{ кг/м}^3$  и  $d_{50} = 8 \text{ мкм}$ . От этой точки опускаем вертикаль до линии, соответствующей  $200^{\circ}\text{C}$ . Из точки пересечения – горизонтальную линию до пересечения с линией, выражающей диаметр циклона. Затем – вертикальную линию до пересечения с линией, характеризующей плотность пыли  $\rho=4000 \text{ кг/м}^3$ , горизонталь до линии  $d_{50}=10 \text{ мкм}$  и вертикаль от этой точки до шкалы, где находим степень улавливания пыли ( $\eta=85\%$ ).

#### **4. Задание для расчета**

Исходные данные для расчета степень улавливания циклона приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Исходные данные для расчета степень улавливания циклона

Вариант	Тип циклона	$\Delta P$ , Па	$T$ , $^{\circ}\text{C}$	$D_{\text{ц}}$ , мм	$\rho$ , $\text{кг/м}^3$	$d_{50}$ , мкм
1	ЦН-24	1400	300	800	1500	8
2	ЦН-15у	750	200	400	2000	10
3	ЦН-11	600	300	400	3000	8
4	ЛИОТ	800	400	600	1500	16
5	ЦН-15	650	100	300	2650	16
6	СДК-ЦН-33	1100	200	700	2000	5
7	СИОТ	800	300	800	3000	10
8	ЦН-15	700	400	500	2000	12
9	ЛИОТ	1000	300	500	3000	16
10	СДК-ЦН-33	1000	200	600	1500	8

#### **5. Содержание отчета**

- Основные факторы, влияющие на степень улавливания пыли в циклонах;
- Методика определения степени улавливания циклона;
- Номограмма для определения степень улавливания циклона;
- Результаты вычислений.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Перечислите основные факторы, влияющие на степень улавливания пыли в циклонах.
2. Как влияет изменение скорости газового потока на степень улавливания пыли?
3. Опишите методику определения степень улавливания циклона по номограмме.

## Расчёт циклонов

### 1. Общие положения

Для сухой механической очистки газов от пыли получили циклоны различных типов. В настоящее время применяется около двадцати типов циклонов. Сравнительные испытания циклонов различного типа показали, что для промышленного применения они могут быть ограничены в большинстве случаев цилиндрическими и коническими циклонами НИИОГаз (научно-исследовательский институт по промышленной и санитарной очистке газов). Наиболее часто применяются цилиндрические циклоны марок ЦН-11, ЦН-15, ЦН-24, конические СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М, СДК-ЦН-33.

Циклоны НИИОГаз подразделяются на высокоэффективные и высокопроизводительные. Циклоны СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, ЦН-11 относятся к высокоэффективным циклонам. При диаметрах менее 1 м они обеспечивают степень очистки 85-95% при улавливании частиц диаметром более 5 мкм. Циклоны типа ЦН-24 относятся к высокопроизводительным, они могут надежно и без забивания работать при высокой входной запыленности. Циклоны типа ЦН-15 занимают среднее положение и обеспечивают несколько меньшую степень очистки, чем циклоны ЦН-11, но обладают большей надежностью при работе в условиях повышенной запыленности. При выборе и расчете циклона необходимо учитывать свойства пыли – абразивность и слипаемость. Для уменьшения абразивного износа следует выбирать циклоны, исходя из наименьших значений скорости газа. При улавливании сильно слипающейся пыли не рекомендуется применять циклоны малого диаметра (менее 0,8 м), которые склонны к залипанию.

### 2. Цель работы

Отработка методики расчета промышленного циклона.

### 3. Содержание работы

Для расчета циклона необходимы следующие исходные данные:

- количество очищаемого газа при рабочих условиях  $V_p$ , м<sup>3</sup>/с;
- плотность газа при рабочих условиях  $\rho_g$ , кг/м<sup>3</sup>;
- динамическая вязкость газа при рабочей температуре  $\mu_g$ , Па·с;
- дисперсный состав пыли, задаваемый двумя параметрами:

$d_m$ , мкм - медианный размер частиц пыли (представляет такой размер, при котором количество частиц крупнее  $d_m$ , равно количеству частиц мельче  $d_m$ ); и

$lg\sigma_q$  - среднее квадратическое отклонение в функции распределения частиц по размерам;

- запыленность газа  $C_{ex}$ , г/м<sup>3</sup>;

- плотность частиц пыли  $\rho_{ч}$ , кг/м<sup>3</sup>;

- требуемая эффективность очистки газа  $\eta$ .

Расчет циклона проводится методом последовательных приближений в следующем порядке.

1. Задавшись типом циклона (с учётом  $V_p$ ,  $C_{ex}$  и  $\eta$ ), по таблице 4.1 определяют оптимальную скорость газа в аппарате  $\omega_{opt}$ , м/с.

Таблица 4.1

Параметры, определяющие эффективность циклонов

Тип циклона	ЦН-24	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
$\omega_{opt}$ , м/с	4,5	3,5	3,5	2,0	1,7	2,0
$d_{50}^T$ , мкм	8,5	4,5	3,65	2,31	1,95	1,13
$lg\sigma_{\eta}^T$	0,308	0,352	0,352	0,364	0,308	0,340

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

2. Определяют диаметр циклона при принятой  $\omega_{opt}$ , м:

$$D = \sqrt{\frac{4V_p}{\pi\omega_{opt}}}. \quad (4.1)$$

Полученное значение  $D$  округляют до ближайшего типового значения внутреннего диаметра циклона  $D_{ц}$  (табл. 4.2). Если расчётный диаметр циклона превышает его максимально допустимое значение, то необходимо применять два или более параллельно установленных циклона.

Таблица 4.2

Типовые значения внутреннего диаметра циклона, м

$D_{ц}$	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
---------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

3. По выбранному диаметру циклона находят скорость движения газа в циклоне, м/с:

$$\omega = \frac{4V_p}{\pi n D_{ц}^2}, \quad (4.2)$$

где  $n$  – число циклонов.

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

$$100 \left| \frac{\omega - \omega_{\text{н\ddot{o}}}}{\omega_{\text{н\ddot{o}}}} \right| \leq 15 \%.$$

4. Определяют коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона:

$$\xi = k_1 k_2 \xi_{500}, \quad (4.3)$$

где  $k_1$  – поправочный коэффициент на диаметр циклона (табл. 4.3);

$k_2$  – поправочный коэффициент на запылённость газа (табл. 4.4);

$\xi_{500}$  – коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона диаметром 500 мм (табл. 4.5).

Таблица 4.3

Поправочный коэффициент  $k_1$  на диаметр циклона

Тип циклона	Значения $k_1$ , для $D$ , мм				
	150	200	300	450	500
ЦН-11	0,94	0,95	0,96	0,99	1,0
ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24	0,85	0,90	0,93	1,0	1,0
СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблица 4.4

Поправочный коэффициент  $k_2$  на запылённость газа

Тип циклона	Значение $k_2$ при $C_{\text{вх}}$ , г/м <sup>3</sup>						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,5
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,90	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	0,90	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	0,90
СК-ЦН-34М	1	0,99	0,97	0,95	-	-	-

Коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона (D= 500 мм)

Тип циклона	Значения $\xi_{500}$		Тип циклона	Значения $\xi_{500}$	
	При выхлопе в атмосферу	При выхлопе в гидравлическую сеть		При выхлопе в атмосферу	При выхлопе в гидравлическую сеть
ЦН-11	245	250	СДК-ЦН-33	520	600
ЦН-15	155	163	СК-ЦН-34	1050	1150
ЦН-24	75	80	СК-ЦН-34М	-	2000

5. Определяют потери давления в циклоне, Па:

$$\Delta P = P_{a\bar{o}} - P_{a\bar{o}\bar{o}} = \xi \frac{\rho_A \omega^2}{2}, \quad (4.4)$$

где  $\rho_r$  и  $\omega$  - соответственно, плотность и скорость газа в расчётном сечении аппарата;

$\xi$  - коэффициент гидравлического сопротивления.

Если потери  $\Delta P$  приемлемы, переходят к определению эффективности очистки газа в циклоне.

6. Эффективность очистки газа в циклоне:

$$\eta = 0,5[1 + \Phi(x)], \quad (4.5)$$

где  $\Phi(x)$  – табличная функция от параметра  $x$ , равного:

$$x = \lg\left(\frac{d_i}{d_{50}}\right) / \sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta}^{\bar{o}} + \lg^2 \sigma_{\pm}}. \quad (4.6)$$

где  $d_{50}$  – диаметр частиц, реально осаждаемых с эффективностью 50% при рабочих условиях.

Для учёта влияния на величину  $d_{50}$  отклонения реальных условий работы от типовых (табл. 4.1 Примечание) используют соотношение:

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\left(\frac{D_{\bar{o}}}{D_{\bar{o}}}\right) \left(\frac{\rho_{\pm, \bar{o}}}{\rho_{\pm}}\right) \left(\frac{\mu}{\mu_{\bar{o}}}\right) \left(\frac{\omega_{\bar{o}}}{\omega}\right)}. \quad (4.7)$$

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

Определив по формуле (4.6) значение  $x$ , находим значение нормальной функции распределения  $\Phi(x)$  по данным таблицы 4.6.

Значения нормальной функции распределения

x	-1,8	-1,6	-1,4	-1,2	-1	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2
Φ(x)	0,0359	0,0548	0,0808	0,1151	0,1587	0,2119	0,2743	0,3446	0,4207
x	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
Φ(x)	0,5000	0,5793	0,6554	0,7257	0,7881	0,8413	0,8849	0,9192	0,9452

Затем по формуле 4.5 определяют расчётное значение эффективности очистки газа в циклоне.

Если расчётное значение  $\eta$  окажется меньше необходимого, по условиям допустимого выброса пыли в атмосферу, то нужно выбрать другой тип циклона с большим значением коэффициента гидравлического сопротивления. Для ориентировочных расчётов можно пользоваться формулой:

$$\frac{\xi_1}{\xi_2} = \left( \frac{1 - \eta_1}{1 - \eta_2} \right)^2 \frac{\omega_1 D_2}{\omega_2 D_1}, \quad (4.8)$$

где индекс 1 относится к расчетным, а индекс 2 – к требуемым значениям параметров циклона.

### **Пример.**

Определить диаметр циклона для осаждения пыли диаметром  $d_m=20$  мкм,  $\lg\sigma_{\text{ч}}=0,468$  и плотностью  $\rho_{\text{ч}}=2900$  кг/м<sup>3</sup>. Расход воздуха при рабочей температуре  $V_p=2475$  м<sup>3</sup>/ч. Температура воздуха 70°C,  $\mu_0=17,3 \cdot 10^{-6}$  Па·с,  $\rho_0=1,293$  кг/м<sup>3</sup> при  $T=273$ К. Концентрация входящей в циклон пыли 5,0 г/м<sup>3</sup>. Требуемая эффективность очистки  $\eta=0,96$ . Циклон работает на выхлоп в атмосферу.

### **Решение.**

1. Выбираем циклон ЦН-11.

Для него оптимальная скорость газа  $\omega_{\text{опт}}=3,5$  м/с (табл.4.1).

2. Диаметр циклона:  $D = \sqrt{\frac{4V_p}{\pi\omega_{\text{опт}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2475}{3,14 \cdot 3,5 \cdot 3600}} = 0,50 \text{ м}$ .

Принимаем  $D_{\text{ц}} = 0,5$  м.

3. По выбранному диаметру циклона определяем действительную скорость газа:

$$\omega = \frac{4V_p}{\pi D_{\text{ц}}^2} = \frac{4 \cdot 2475}{3,14 \cdot 1 \cdot (0,5)^2 \cdot 3600} = 3,53 \text{ м/с}$$

Проверяем отклонение действительной скорости в циклоне от принятой:

$$100 \left| \frac{\omega - \omega_{\text{нб}}}{\omega_{\text{нб}}} \right| = 100 \frac{3,53 - 3,50}{3,50} = 0,85 \%$$

Принимаем действительную скорость в циклоне  $\omega = 3,53$  м/с, т.к. она отклоняется от оптимальной менее чем на 15%.

4. Определяем коэффициент гидравлического сопротивления, используя данные табл. 4.3-4.5:

$$\xi = k_1 \cdot k_2 \cdot \xi_{500} = 1 \cdot 0,98 \cdot 245 = 240,1.$$

5. Рассчитываем гидравлическое сопротивление, предварительно найдя плотность газа при  $70^\circ\text{C}$  ( $T = 273 + 70 = 343\text{K}$ ):

$$\rho_A = \rho_0 \frac{\dot{O}_0}{\dot{O}} = 1,293 \frac{273}{343} = 1,029 \text{ г/л}.$$

$$\Delta D = \xi \rho_A \frac{\omega^2}{2} = \frac{240,1 \cdot 1,029 \cdot 3,53^2}{2} = 1513,26 \text{ Па}.$$

6. Динамическая вязкость газа при  $70^\circ\text{C}$  ( $T = 343\text{K}$ ):

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + \tilde{N}}{T + C} \left( \frac{T}{273} \right)^{3/2} = 17,1 \cdot 10^{-6} \frac{273 + 124}{343 + 124} \left( \frac{343}{273} \right)^{3/2} = 20,7 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

где  $C$  - постоянная Сатерленда (для воздуха  $C = 124$  в интервале  $T = 0-553\text{K}$ ).

7. Из таблицы 4.1 находим значение  $d_{50}^T = 3,65$  мкм для циклона ЦН-11 диаметром  $D_T = 600$  мм при табличной плотности частиц  $\rho_{ч.м} = 1930$  кг/м<sup>3</sup>; динамическая вязкость газа  $\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6}$  Па·с, а также величину  $\lg \sigma_\eta^T = 0,352$ .

Пересчитаем значение  $d_{50}$  при рабочих условиях по формуле:

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\left( \frac{D_\delta}{D_\delta} \right) \left( \frac{\rho_{\delta}}{\rho_{\delta}} \right) \left( \frac{\mu}{\mu_\delta} \right) \left( \frac{\omega_\delta}{\omega} \right)} = 3,65 \sqrt{\left( \frac{0,5}{0,6} \right) \left( \frac{1930}{2900} \right) \frac{20,7 \cdot 10^{-6}}{22,2 \cdot 10^{-6}} \left( \frac{3,5}{3,53} \right)} = 2,625 \text{ мкм}$$

Полученное значение  $d_{50}$  меньше  $d_m$ , поэтому можно продолжать расчет.

8. Эффективность очистки газа в циклоне:  $\eta = 0,5[1 + \Phi(x)]$ .

$$x = \lg \left( \frac{d_i}{d_{50}} \right) / \sqrt{\lg^2 \sigma_\eta^T + \lg^2 \sigma_\delta} = \lg \frac{20}{2,625} / \sqrt{0,352^2 + 0,468^2} = 1,35 \approx 1,4.$$

Дисперсный состав пыли  $d_{50}^T$  и  $\lg \sigma_\eta$  находим в табл. 4.1.

Из табл. 4.6 выбираем  $\Phi(x) = 0,9192$ .

$$\eta = 0,5[1 + 0,9192] \approx 0,959 \approx 96\%.$$

Расчетное значение  $\eta$  соответствует необходимому, т.е. выбранный нами для очистки пыли циклон марки ЦН-11 с диаметром 0,5 м подходит по условию задания.



#### 4. Задание для расчета

Исходные данные для расчета циклона приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7.

Исходные данные для расчета циклона

Вариант	Тип циклона	$V_p$ , м <sup>3</sup> /ч	$t$ , °С	$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu_0$ , $\cdot 10^{-6}$ Па·с	$\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	$d_m$ , мкм	$C_{вх}$ , г/м <sup>3</sup>	$lg\sigma_{\text{ч}}$	$\eta$ , %	Вид выхлопа
1	ЦН-24	1800	100	1,293	17,1	1800	25	65	0,32	85	В атмосферу
2	ЦН-15	3600	200	1,293	17,1	2000	30	35	0,35	90	
3	ЦН-11	8600	90	1,293	17,1	3000	44	50	0,31	88	
4	СДК-ЦН-33	7000	70	1,293	17,1	1900	14	25	0,34	91	
5	СК-ЦН-34	4500	100	1,293	17,1	2650	28	75	0,30	80	
6	СК-ЦН-34М	2500	80	1,293	17,1	2000	42	65	0,32	85	В сеть
7	ЦН-15	5500	100	1,293	17,1	3000	36	40	0,38	83	
8	ЦН-11	9000	60	1,293	17,1	2000	22	75	0,43	90	
9	СДК-ЦН-33	6800	90	1,293	17,1	3000	38	50	0,56	95	
10	ЦН-24	9000	100	1,293	17,1	1700	21	80	0,34	91	

#### 5. Содержание отчета

- Исходные данные, необходимые для расчета циклона;
- Методика расчета циклона;
- Результаты вычислений.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Перечислите исходные данные, необходимые для расчета циклона.
2. Как влияет величина диаметра на гидравлическое сопротивление одиночного циклона?
3. Как влияет величина запыленности газа на гидравлическое сопротивление одиночного циклона?
4. Опишите методику расчета циклона.

Расчёт батарейных циклонов

1. Общие положения

Батарейные циклоны применяются для очистки дымовых газов тепловых электростанций, промышленных котельных, сжигающих твердое топливо, для улавливания пыли в отходящих газах сушильных и агломерационных установок, а также в других отраслях промышленности. Состоят из нескольких десятков и даже сотен циклонных элементов, параллельно установленных в одном корпусе, имеющим общий вход и выход очищаемого газа, а также общий бункер (рис. 5.1).

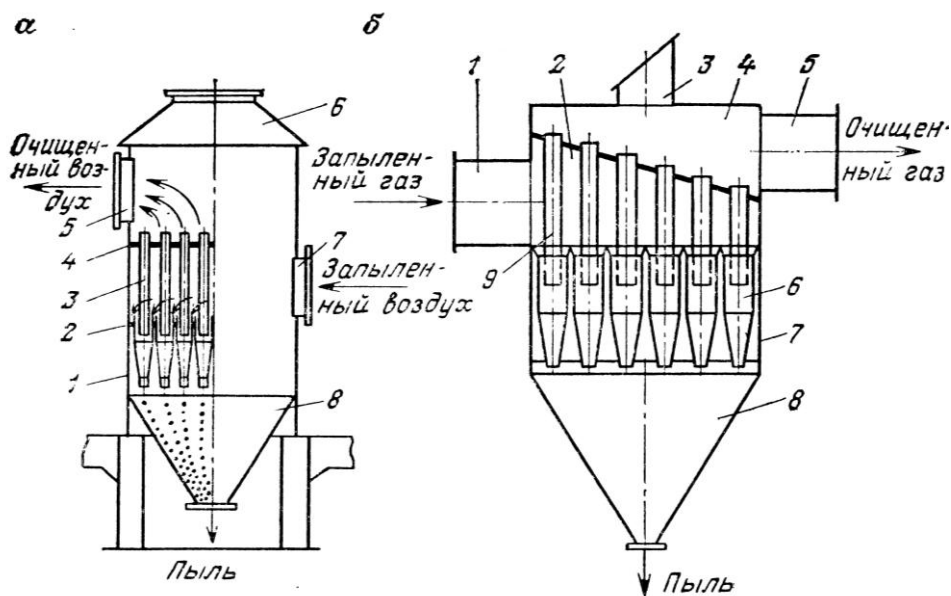


Рисунок 5.1 - Батарейные циклоны (а – БЦ-1; б – БЦ-2)

Циклон БЦ-2: 1 - подводящий патрубок; 2 - газораспределительная камера; 3 - предохранительный клапан; 4 - камера очищенного газа; 5 - патрубок очищенного газа; 6 - циклонный элемент; 7 - корпус; 8 - бункер; 9- выхлопная труба

Закручивание газа в циклонных элементах производится с помощью лопаточных завихрителей типа «винт» или «розетка» либо за счет улиточного входа газа. Запыленный газ через патрубок поступает в камеру грязного газа и распределяется по циклонным элементам. С помощью циклонных элементов производится очистка газа от пыли. Уловленная пыль отводится в бункер, далее через затвор выгружается наружу. Очищенный газ после циклонных элементов поступает в камеру чистого газа, а затем с помощью дымососа выбрасывается через дымовую трубу в атмосферу. Камеры чистого и грязного газа, а также бункер между собой разделяются герметичными перегородками. На входе в камеру грязного газа располагается шибер, с помощью которого производится отключение части циклонных элементов в случае снижения расхода очищаемых газов.

Завихрители типа «винт» или «розетка» (рис. 5.2) устанавливают в кольцевом пространстве между стенкой цилиндрической части каждого циклонного элемента и его выхлопной трубой.

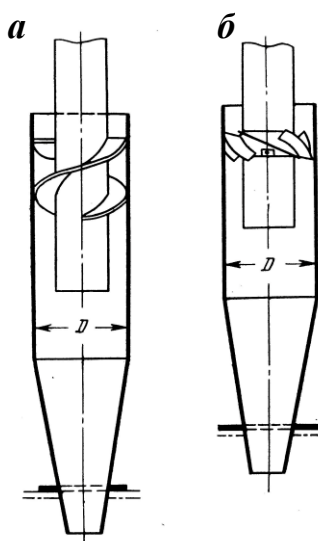


Рисунок 5.2 – Циклонные элементы:  
а - с направляющим аппаратом типа "винт";  
б - с направляющим аппаратом типа "розетка"

Направляющее устройство типа "винт" состоит из двух винтовых лопаток, наклоненных под углом  $\alpha = 25^\circ$ . Оно менее подвержено забиванию пылью, чем устройство типа "розетка", состоящее из восьми лопаток, наклоненных под углом 25 или  $30^\circ$ . Благодаря такой компоновке размеры батарейных циклонов (в плане) меньше, чем группы обычных циклонов при той же производительности. В целом такие батарейные циклоны позволяют очищать с равной эффективностью большие, чем в случае одиночных циклонов, объемы газа, но при этом они более металлоемки и менее надежны (особенно при высокой концентрации пыли и при пыли, склонной к слипанию).

Обычно батарейные циклоны состоят из элементов диаметром 100, 150 и 250 мм. Применение элементов малого диаметра приводит к возрастанию их числа в аппарате, что увеличивает опасность вредных перетоков газов между элементами. Поэтому чаще всего применяют элементы диаметром 250 мм. Оптимальная скорость газов в элементе лежит в пределах от 3,5 до 4,75 м/с.

Среди батарейных циклонов наибольшее распространение в промышленности нашли циклоны типов БЦ-2, ПБЦ, ЦБ-254Р производительностью от 12 000 до 125 000 м<sup>3</sup>/ч.

## **2. Цель работы**

Отработка методики расчета батарейного циклона.

### 3. Содержание работы

Расчет батарейных циклонов проводится в следующей последовательности.

1. Задаются оптимальной скоростью потока  $\omega_{\text{опт}}$  в пределах 3,5-5 м/с. Нижний предел лимитируется опасностью забивания направляющего аппарата, верхний - интенсификацией абразивного износа элементов и уноса пыли.

2. Рассчитывают расход газа через один циклонный элемент  $q_{\text{опт}}$ , при котором обеспечиваются оптимальные условия его работы:

$$q_{\text{опт}} = 0,785 \omega_{\text{опт}} D^2, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (5.1)$$

Внутренний диаметр циклонного элемента  $D$  обычно принимают в пределах 250 мм. Дальнейшее уменьшение диаметра не приводит к увеличению степени очистки.

3. Определяют количество циклонных элементов, необходимое для оптимальных условий работы батарейного циклона:

$$n_{\text{опт}} = V_p / q_{\text{опт}}. \quad (5.2)$$

4. По таблице 5.1 принимают типовую конструкцию батарейного циклона с близкой пропускной способностью и числом элементов таким образом, чтобы число элементов выбранного батарейного циклона  $n$  отличалось от  $n_{\text{опт}}$  не более, чем на 10%.

5. Далее определяют действительную скорость в циклонном элементе  $\omega$ :

$$\omega = V_p / 0,785 n D^2, \text{ м/с}. \quad (5.3)$$

6. По уточненной скорости потока в циклонном элементе определяют потери давления в циклоне  $\Delta P$ :

$$\Delta P = \zeta \cdot \rho_r \cdot \omega^2 / 2, \text{ Па}. \quad (5.4)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления  $\zeta$  батарейных циклонов принимают по опытным данным (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Техническая характеристика батарейных циклонов

Тип циклона	Число элементов в циклонах различных типоразмеров	Оптимальная скорость потока газа в элементе, м/с	Производительность по газу, м <sup>3</sup> /с	Коэффициент гидравлического сопротивления, $\xi$	Тип циклонного элемента	Температура газов, Т, °С
БЦ-2	20; 25; 30; 36; 42; 56	4,5	4,2-13,6	80	"розетка" $\alpha = 25^\circ$	до 400
ЦБ-254Р	25; 30; 40; 50; 60; 80	4,5	5,7-18,3	90	"розетка" $\alpha = 25^\circ$	до 150
ПБЦ	24; 36; 48; 92; 116; 140	3,5	3,3-34,7	120	с полууличным подводом	до 120

Если потери  $\Delta P$  приемлемы, переходят к определению эффективности очистки газа в циклоне.

7. Коэффициент очистки газа в элементе батарейного циклона определяют по методике расчета индивидуального циклона, используя опытные значения  $d_{50}^T$  и  $lg\sigma_\eta^T$  принятого типа элемента, которые приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2.

Параметры, определяющие эффективность батарейных циклонов

Параметры	Тип направляющего аппарата			
	"розетка" $\alpha = 25^\circ$	"розетка" $\alpha = 30^\circ$	"винт"	с полуулиточным подводом
$d_{50}^T$ , мкм	3,85	5	4,5	3
$lg\sigma_\eta^T$	0,46	0,46	0,46	0,325

Примечание. Параметры, приведенные в таблице, соответствуют следующим условиям работы циклонных элементов: средняя скорость газа в элементе  $\omega_T = 4,5$  м/с; диаметр циклонного элемента  $D_T = 0,25$  м; плотность частиц  $\rho_{ч,Т} = 2200$  кг/м<sup>3</sup>; динамическая вязкость газа  $\mu_T = 23,7 \cdot 10^{-6}$  Па·с.

Эффективность очистки газа в циклоне:

$$\eta = 0,5[1 + \Phi(x)], \quad (5.5)$$

где  $\Phi(x)$  – табличная функция от параметра  $x$ , равного:

$$x = \lg\left(\frac{d_m}{d_{50}}\right) / \sqrt{\lg^2 \sigma_\eta^T + \lg^2 \sigma_\mu}. \quad (5.6)$$

где  $d_{50}$  – диаметр частиц, реально осаждаемых с эффективностью 50% при рабочих условиях.

Для учёта влияния на величину  $d_{50}$  отклонения реальных условий работы от типовых (указаны в табл. 5.1) используют соотношение:

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\left(\frac{D}{D_T}\right) \left(\frac{\rho_{ч,Т}}{\rho_ч}\right) \left(\frac{\mu}{\mu_T}\right) \left(\frac{\omega_T}{\omega}\right)}. \quad (5.7)$$

Определив по формуле (5.6) значение  $x$ , находят значение нормальной функции распределения  $\Phi(x)$  по данным таблицы 4.6.

Затем по формуле 5.5 определяют расчётное значение эффективности очистки газа в циклоне и сравнивают его с заданным.

### Пример.

Рассчитать степень очистки в батарейном циклоне дымовых газов котлоагрегата при температуре 140°C, динамической вязкости газа в нормальных условиях  $\mu_0 = 17,3 \cdot 10^{-6}$  Па·с, расходе газа  $V_p = 130000$  м<sup>3</sup>/ч. Запыленность газа 42 г/м<sup>3</sup>, плот-

ность дымовых газов в нормальных условиях  $\rho_0 = 1,31 \text{ кг/м}^3$ . Характеристика золы:  $d_M = 20 \text{ мкм}$ ;  $\sigma_{\text{ч}} = 3,0$ ;  $\rho_{\text{ч}} = 2240 \text{ кг/м}^3$ .

### **Решение.**

Расчеты выполняем в следующем порядке.

1. Принимаем значение оптимальной скорости:

$$\omega_{\text{опт}} = 5 \text{ м/с.}$$

2. Определяем расход газа через один циклонный элемент, принимая его диаметр 250 мм:

$$q_{\text{опт}} = 0,785 \omega_{\text{опт}} D^2 = 0,785 \cdot 5 \cdot 0,25^2 = 0,245 \text{ м}^3/\text{с.}$$

3. Определяем количество элементов:

$$n_{\text{опт}} = V_p / q_{\text{опт}} = 130000 / (3600 \cdot 0,245) = 36,1 / 0,245 = 148 \text{ шт.}$$

4. Выбираем два батарейных циклона типа ЦБ-254Р-80 (Приложение 1), составленных из 80 циклонных элементов с направляющими типа "розетка". При выборе типа циклона, кроме его соответствия по количеству элементов, принималась во внимание и возможность работы при температуре среды до  $150^\circ\text{C}$ . Зола, образующаяся при сгорании бурых углей, не слипающаяся, что допускает использование направляющих типа "розетка".

Определяем действительную скорость потока через 1 элемент:

$$\omega = V_p / 0,785 n D^2 = 36,1 / (0,785 \cdot 160 \cdot 0,25^2) = 4,6 \text{ м/с,}$$

что близко к оптимальной скорости (4,5 м/с) для выбранного типа батарейного циклона.

5. Определяем плотность и динамическую вязкость дымовых газов в рабочих условиях при  $140^\circ\text{C}$  ( $T = 273 + 140 = 413\text{K}$ ):

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left( \frac{T}{273} \right)^{3/2} = 17,1 \cdot 10^{-6} \frac{273 + 124}{413 + 124} \left( \frac{413}{273} \right)^{3/2} = 23,5 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с},$$

где  $C$  - постоянная Сатерленда (для воздуха  $C = 124$  в интервале  $T = 0 - 553\text{K}$ ).

$$\rho_r = \rho_0 \cdot T_0 / T = 1,31 \cdot 273 / 413 = 0,81 \text{ кг/м}^3.$$

Принимаем по таблице 5.1 коэффициент гидравлического сопротивления элемента  $\xi = 90$  и вычисляем потери давления в циклоне:

$$\Delta P = \xi \cdot \rho_r \cdot \omega^2 / 2 = 90 \cdot 0,81 \cdot 4,6^2 / 2 = 771 \text{ Па.}$$

Величина потери давления в циклоне приемлема для тягодутьевых устройств типовых котельных.

6. Принимаем по таблице 5.2 значения  $d_{50}^T = 3,85 \text{ мкм}$  и  $\lg \sigma_{\eta}^T = 0,46$  для элемента типа "розетка" с углом наклона завихрителей  $25^\circ$ .

Пересчитываем значение  $d_{50}$  при рабочих условиях:

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\left(\frac{D}{D_T}\right) \left(\frac{\rho_{ч.г}}{\rho_{ч}}\right) \left(\frac{\mu}{\mu_T}\right) \left(\frac{\omega_T}{\omega}\right)} = 3,85 \sqrt{\left(\frac{0,25}{0,25}\right) \left(\frac{2200}{2700}\right) \left(\frac{23,5 \cdot 10^{-6}}{23,7 \cdot 10^{-6}}\right) \left(\frac{4,5}{4,6}\right)} = 1,68 \text{ мкм}$$

Подсчитываем параметр осаждения  $x$  и находим по таблице 4.6 соответствующее ему значение интеграла вероятности  $\Phi(x)$ :

$$x = \lg\left(\frac{d_i}{d_{50}}\right) / \sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta}^{\delta} + \lg^2 \sigma_{\varepsilon}} = \lg\left(\frac{20}{1,68}\right) / \sqrt{0,46^2 + \lg^2 3} = 1,889. \quad \Phi(x) = 0,9705.$$

Эффективность очистки газа в циклоне:

$$\eta = 0,5[1 + \hat{O}(\delta)] = 0,5[1 + 0,9705] = 0,98.$$

#### **4. Задание для расчета**

Исходные данные для расчета батарейного циклона приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3.

Исходные данные для расчета батарейного циклона

Вариант	$V_p, \text{ м}^3/\text{ч}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho_0, \text{ кг/м}^3$	$\mu_0, \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$	$\rho_{ч}, \text{ кг/м}^3$	$d_m, \text{ мкм}$	$C_{вх}, \text{ г/м}^3$	$\sigma_{ч}$	$\eta, \%$
1	180000	100	1,310	17,1	1800	25	65	2,0	85
2	160000	200	1,297	17,1	2000	30	35	2,3	90
3	86000	90	1,294	17,1	3000	44	50	3,2	88
4	110000	70	1,291	17,1	1900	14	25	3,5	91
5	65000	100	1,312	17,1	2650	28	75	2,7	80
6	25000	80	1,298	17,1	2000	42	65	3,1	85
7	150000	100	1,293	17,1	3000	36	40	2,4	83
8	90000	220	1,299	17,1	2000	22	75	2,3	90
9	68000	90	1,291	17,1	3000	38	50	2,6	95
10	80000	160	1,317	17,1	1700	21	80	2,9	91

#### **5. Содержание отчета**

- Исходные данные, необходимые для расчета батарейного циклона;
- Методика расчета батарейного циклона;
- Результаты вычислений.

#### ***Контрольные вопросы***

1. За счет чего происходит закручивание газа в циклонных элементах?
2. Укажите основные элементы батарейного циклона.
3. Перечислите основные технические характеристики батарейных циклонов типа ЦБ-254Р.
4. Опишите методику расчета батарейного циклона.

Расчёт вихревых пылеуловителей

1. Общие положения

В вихревом пылеуловителе, как и в циклоне, сепарация пыли основана на использовании центробежных сил. Основным их отличием от циклонов является наличие вспомогательного закручивающего газового потока.

Применяют два вида вихревых пылеуловителей: сопловые (рис. 6.1, а) и лопаточные (рис. 6.1, б).

В аппарате того и другого типа запыленный газ поступает в камеру через входной патрубок с завихрителем типа «розетка» и обтекателем. В кольцевом пространстве между корпусом аппарата и входным патрубком расположена подпорная шайба, которая обеспечивает безвозвратный спуск пыли в бункер.

В вихревом аппарате соплового типа (рис. 6.1, а) запыленный поток закручивается лопаточным завихрителем и движется вверх, подвергаясь при этом воздействию вытекающих из тангенциально расположенных сопел струй вторичного газового потока. Под действием центробежных сил взвешенные в потоке частицы отбрасываются к периферии, а оттуда - в возбуждаемый струями вихревой поток вторичного газа, направляющий их вниз в кольцевое межтрубное пространство. Вторичный обтекания потока очищаемого газа постепенно полностью проникает газовый поток в ходе в него. Обтекатель направляет поток газа к периферии. Пылевые частицы за счет воздействия центробежных сил перемещаются из центральной части потока к периферии.

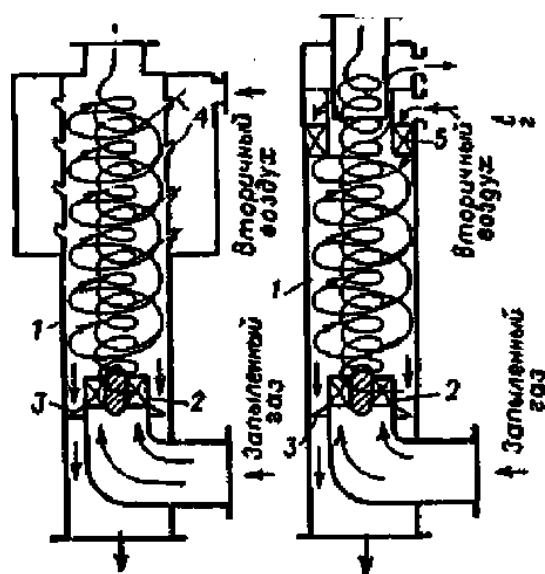


Рисунок 6.1 – Вихревые пылеуловители соплового (а) и лопаточного (б) типов:

1 - камера; 2 - лопаточный завихритель; 3 - подпорная шайба; 4 - сопла;

5 - кольцевой лопаточный завихритель



Далее процесс в аппаратах двух видов несколько отличается. В сопловом аппарате на запыленный поток воздействуют струи вторичного воздуха (газа), выходящие из сопел, расположенных тангенциально. Поток переходит во вращательное движение.

Отброшенные под действием центробежных сил к стенкам аппарата пылевые частицы захватываются спиральным потоком вторичного воздуха (газа) и вместе с ним движутся вниз в бункер. Здесь частицы пыли выделяются из потока, а очищенный воздух (газ) снова поступает на очистку,

Сопла для подачи вторичного воздуха нужно расположить по нисходящей спирали. Оптимальной явилась установка 8 сопел диаметром 11 мм двумя спиральными рядами под углом наклона  $30^\circ$ . В качестве оптимальной рекомендуется установка лопаток завихрителя под углом  $30^\circ$ - $40^\circ$  при отношении диаметра завихрителя к диаметру аппарата, равном 0,8-0,9.

Вихревой пылеуловитель лопаточного типа (рис. 6.1, б) отличается тем, что вторичный поток вводится в верхней части аппарата через завихритель. В аппарате лопаточного типа вторичный воздух, отобранный с периферии очищенного потока, подается кольцевым направляющим аппаратом с наклонными лопатками. По основным показателям аппараты лопаточного типа оказались более эффективными: при одинаковом диаметре камеры – 200 мм и производительности 330 м<sup>3</sup>/ч гидравлическое сопротивление соплового аппарата составило  $3,7 \cdot 10^3$  Па, эффективность 96,5 %, а лопаточного – соответственно  $2,8 \cdot 10^3$  Па и 98% (при улавливании особо мелкодисперсной пыли).

Применяют следующие способы подведения к вихревому пылеуловителю воздуха, необходимого для закручивания обеспыливаемого потока: из окружающей среды, из очищенного потока, из запыленного потока. Первый вариант целесообразен, если очистке подвергается горячий газ, который необходимо охладить. Применяя второй вариант, можно несколько повысить эффективность очистки, так как для использования в качестве вторичного воздуха отбирают периферийную часть потока очищенного воздуха с наибольшим содержанием остаточной пыли. Третий вариант наиболее экономичен: производительность установки повышается на 40-65% с сохранением эффективности очистки.

В вихревых пылеуловителях достигается весьма высокая для аппаратов, основанных на использовании центробежных сил, эффективность очистки – 98-99% и выше. На эффективность очистки оказывает незначительное влияние изменение нагрузки (в пределах от 50 до 115%) и содержание пыли в очищаемом воздухе (газе) – от 1 до 500 г/м<sup>3</sup>. Аппарат может применяться для очистки газов с температурой до 700°C. В вихревом пылеуловителе не наблюдается износа внутренних стенок аппа-

рата, что связано с особенностями его воздушного режима. Аппарат более компактен, чем другие пылеуловители, предназначенные для сухой очистки выбросов.

## 2. Цель работы

Отработка методики расчета вихревых пылеуловителей.

## 3. Содержание работы

Пылеуловитель выбирают, исходя из расхода запыленного газа, по которому можно рассчитать диаметр аппарата:

$$D_a = (4V_r / \pi u_r)^{0.5} \quad (6.1)$$

где  $V_r$  – объемный расход запыленного газа, м<sup>3</sup>/с;

$u_r$  – скорость газа в рабочей зоне пылеуловителя, м/с (рекомендуется принимать в пределах 5-12 м/с).

Критический диаметр частиц, полностью улавливаемых в пылеуловителе, может быть рассчитан по одной из зависимостей:

$$d_{кр} = \left\{ (u_r / H) \ln(D_a / D_{тр}) / [(1/18\mu_r)(\rho_r - \rho_f)\omega^2] \right\}^{0.5}; \quad (6.2)$$

$$d_{кр} = (3/2\pi s) [(\mu_r / \rho_r) \tau \ln(1 + V_2 / V_1)]^{0.5}, \quad (6.3)$$

где  $H$  – высота пылеулавливающей камеры, м;

$D_{тр}$  – диаметр патрубка для подвода запыленного газа, м;

$\omega$  – угловая скорость газового потока в аппарате, с<sup>-1</sup>;

$s$  – число оборотов потока газа в пылеуловителе,

$\tau = 1/2\pi R_1^2 H / (V_1 + V_2)$  – время пребывания газа в ядре потока, с;

$R_1$  – радиус ядра потока, принимаемый равным радиусу ввода первичного потока, м;

$V_1, V_2$  – объемный расход первичного и вторичного потоков газа, м<sup>3</sup>/с.

Эффективность пылеулавливания (в %) является основным критерием, по которому оценивается работа вихревого пылеуловителя, и определяется как отношение количества уловленной пыли к общему количеству пыли, поступающему в аппарат:

$$\varepsilon = [(c_H - c_K) / c_H] \cdot 100. \quad (6.4)$$

Так как запыленный газ в пылеуловитель может подаваться двумя потоками – через верхний и нижний подводящие патрубки, то общая эффективность очистки будет определяться в зависимости от распределения потоков по вводам:

$$\varepsilon = (V_1 \varepsilon_1 + V_2 \varepsilon_2) / V, \quad (6.5)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – эффективность пылеулавливания в первичном и вторичном потоках газа.

Величины  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  (в %) могут быть рассчитаны по зависимостям:

$$\varepsilon_1 = [(D_{лп}^2 - 4r_{лп}^2) / (D_{лп}^2 - D_{вт}^2)] \cdot 100; \quad (6.6)$$

$$\varepsilon_2 = [(D_a^2 - 4r_{2i}^2) / (D_a^2 - D_{2п}^2)] \cdot 100, \quad (6.7)$$

где  $D_{1п}$  – диаметр ввода первичного потока;

$D_{вт}$  – диаметр втулки аксиального завихрителя;

$r_{1i}$  и  $r_{2i}$  – радиус, на котором частица входит в аппарат с потоками газа;

$D_a$  – диаметр аппарата;

$D_{2п}$  – внутренний диаметр вторичного потока.

Гидравлическое сопротивление вихревых пылеуловителей рассчитывают по зависимости, аналогичной применяемой для расчета циклонов:

$$\Delta P = \xi v_r^2 \rho_r / 2, \quad (6.8)$$

где  $v_r$  – скорость газа в рабочей зоне аппарата, м/с;

$\xi_{гв}$  – коэффициент гидравлического сопротивления аппарата, рассчитываемый по скорости  $v_r$ .

### **Пример.**

Определить конструктивные размеры и гидравлическое сопротивление вихревого пылеуловителя при следующих исходных данных:

Производительность по запыленному воздуху $V_r$ , м <sup>3</sup> /ч	2400
Скорость воздуха в рабочей зоне аппарата $v$ , м/с	до 10
Температура воздуха, поступающего на очистку $t$ , °С	95
Плотность воздуха в нормальных условиях $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	1,35
Начальная запыленность воздуха $C_{вх}$ , кг/кг	0,0167
Давление в аппарате $P$ , МПа	0,1

### **Решение.**

Определяем геометрические размеры аппарата.

Диаметр вихревого пылеуловителя:

$$D_a = [4V_r / (\pi v)]^{0,5} = [4 \cdot 2400 / (3,14 \cdot 10 \cdot 3600)]^{0,5} = 0,29 \text{ м.}$$

Принимаем диаметр аппарата  $D_a = 0,3$  м.

Действительная скорость газа в аппарате:

$$v = 4V_r / (\pi D_a^2 \cdot 3600) = 4 \cdot 2400 / (3,14 \cdot 0,3^2 \cdot 3600) = 9,8 \text{ м/с.}$$

Определяем значения коэффициентов  $\chi_1$  и  $\chi_2$ , задаваясь коэффициентом  $\alpha = F_2/F_1 = 2$  и коэффициентом  $\gamma = v/v_1 = 0,5$  (где  $F_1$ ,  $F_2$  – проходные сечения патрубков верхнего и нижнего потоков,  $v_1$  – скорость газа в верхнем патрубке):

$$\chi_1 = [\gamma / (1 + \alpha)]^{0,5} = [0,5 / (1 + 2)]^{0,5} = 0,408;$$

$$\chi_2 = [1 - \alpha\gamma / (1 + \alpha)]^{0,5} = [1 - 2 \cdot 0,5 / (1 + 2)]^{0,5} = 0,801.$$

Диаметр ввода нижнего потока:

$$D_1 = \chi_1 D_a = 0,408 \cdot 0,3 = 0,12 \text{ м.}$$

Диаметр патрубка вывода очищенного воздуха:

$$D_{\text{вых}} = \chi_2 D_a = 0,801 \cdot 0,3 = 0,22 \text{ м.}$$

Высота рабочей зоны аппарата:

$$H_{\text{рз}} = (2,8 \div 3,1) D_a = 3,1 \cdot 0,3 = 0,93 \text{ м.}$$

Примем высоту  $H_{\text{рз}} = 1 \text{ м.}$

Диаметр отбойной шайбы:

$$D_{\text{ш}} = (0,9 \div 0,95) D_a = 0,93 \cdot 0,3 = 0,28 \text{ м.}$$

Площадь ввода верхнего и нижнего потоков:

$$F_2 = F - F_{\text{вых}} = (\pi / 4) (D_a^2 - D_{\text{вых}}^2) = (3,14 / 4) (0,3^2 - 0,22^2) = 0,033 \text{ м}^2;$$

$$F_1 = \pi D_1^2 / 4 = 0,785 \cdot 0,12^2 = 0,0113 \text{ м}^2.$$

Фактическое соотношение величины  $\alpha$ :

$$\alpha = F_2 / F_1 = 0,033 / 0,0113 = 2,9.$$

Так как для промышленных аппаратов значение  $\alpha$  должно быть в пределах  $2 \div 4$ , то коррекцию геометрических размеров аппарата проводить не следует.

Диаметр вытеснителя:

$$d_{\text{выт}} = 0,1 D_a = 0,1 \cdot 0,3 = 0,03 \text{ м.}$$

Лопатки завихрителей нижнего и верхнего потоков рекомендуют установить под углом  $\beta = 30^\circ$  к горизонту.

Рассчитаем потери давления в аппарате.

Конструктивный параметр интенсивности крутки потока:

$$n = (8D_1^2 / 3\pi) [(D_1^3 - d_{\text{выт}}^3) / (D_1^2 - d_{\text{выт}}^2)] \text{tg } \beta = \\ (8 \cdot 0,12^3 / 3 \cdot 3,14) [(0,12^3 - 0,03^3) / (0,12^2 - 0,03^2)] \text{tg } 30^\circ = 0,545.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления нижнего потока:

$$\xi_1 = 5,5n + [260 + 4,8(n - 3,8)^2] [(V_2 / V_r) - 0,3]^3 = \\ = 5,5 \cdot 0,545 + [260 + 4,8(0,545 - 3,8)^2] [(1776 / 2400) - 0,3]^3 = 29,5,$$

где  $V_2 = 0,74V_r$  – объемный расход вторичного потока газа,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Коэффициент гидравлического сопротивления верхнего потока:

$$\xi_2 = 2,6 + 158(0,6 - V_2 / V_r)^2 = 2,6 + 158(0,6 - 1776 / 2400)^3 = 2,6.$$

Общий коэффициент гидравлического сопротивления:

$$\xi = \xi_1 (1 - V_2 / V_r)^3 (F / F_1)^2 + \xi_2 (V_2 / V)^3 (F / F_1)^2 =$$

$$29,5(1 - 0,74)^3(0,071/0,0113)^2 + 2,6(0,74)^3(0,071/0,033)^2 = 25,3.$$

Гидравлическое сопротивление аппарата определяем по формуле:

$$\Delta P = \xi \rho_r v^2 / 2,$$

где  $v$  – действительная скорость газа в аппарате, м/с;

$\rho_r$  – плотность газа при рабочих условиях ( $t = 95^\circ\text{C}$ ), кг/м<sup>3</sup>.

$$\rho_r = \rho_0 T / (T + t) = 1,35 \cdot 273 / (273 + 95) = 0,96 \text{ кг/м}^3.$$

$$\Delta P = 25,3 \cdot 0,96 \cdot 9,8^2 / 2 = 2\,332 \text{ Па}.$$

Гидравлическое сопротивление соответствует средним значениям, характерным для вихревых пылеуловителей.

Принимаем пылеуловитель с рассчитанными конструктивными размерами.

#### 4. Задание для расчета

Исходные данные для расчета вихревого пылеуловителя приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1.

Исходные данные для расчета вихревого пылеуловителя

Вариант	$V_r$ , м <sup>3</sup> /ч	$t$ , °C	$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	$v_r$ , м/с	$P$ , МПа	$C_{вх}$ , Г/м <sup>3</sup>
1	2800	90	1,310	до 10	0,1	65
2	3600	180	1,297	до 8	0,1	35
3	8600	90	1,294	до 12	0,1	50
4	1600	75	1,291	до 8	0,1	25
5	6500	100	1,312	до 10	0,1	75
6	2500	85	1,298	до 7	0,1	65
7	4500	100	1,293	до 9	0,1	40
8	1900	60	1,299	до 12	0,1	75
9	6800	120	1,291	до 11	0,1	50
10	5500	135	1,317	до 8	0,1	80

#### 5. Содержание отчета

- Принцип работы вихревого пылеуловителя;
- Методика расчета вихревого пылеуловителя;
- Преимущества вихревого пылеуловителя перед циклонными аппаратами;
- Результаты вычислений.

### ***Контрольные вопросы***

1. Как происходит выделение частиц пыли в вихревом аппарате соплового типа?
2. Как происходит выделение частиц пыли в вихревом пылеуловителе лопаточного типа?
3. Перечислите основные способы подведения воздуха к вихревому пылеуловителю.
4. Опишите методику расчета вихревого пылеуловителя.

Расчёт пенных пылеуловителей

1. Общие положения

Пенные пылеуловители представляют собой аппараты, корпус которых разделен решеткой с равномерно расположенными мелкими отверстиями (рис. 7.1). Запыленный поток поступает под решетку, очищенный удаляется из верхней части корпуса. Вода поступает на решетку сверху. В зависимости от конструкции пылеуловителя вода с поверхности решетки отводится через отверстия в решетке и частично через слив, либо только через отверстия.

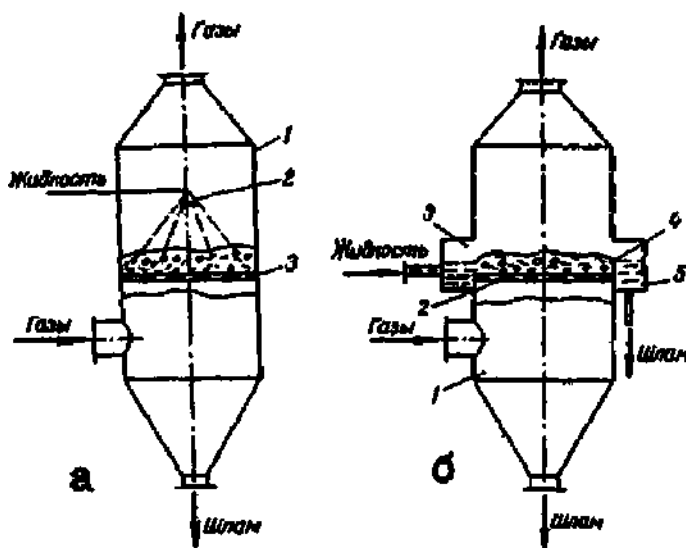


Рисунок 7.1 – Схемы пенных пылеуловителей:

- a* – пенный пылеуловитель с провальной решеткой: 1 - корпус; 2 - оросительное устройство; 3 - решетка; *б* – пенный пылеуловитель с переливной решеткой: 1 - корпус; 2 - решетка; 3 - приемная коробка; 4 - порог; 5 - сливная коробка.

Пенные аппараты относятся к низконапорным пылеуловителям, это одно из больших преимуществ данных аппаратов перед другими конструкциями.

По способу отвода жидкости с решетки их подразделяют на два основных типа: с переливными решетками и с провальными решетками.

В пенном пылеуловителе с переливной решеткой (рис. 7.1 б) запыленный газ подают под решетку. При прохождении газа сквозь решетку на ней образуется слой пены высотой 100-200 мм. Пена со шламом через порог сливается в выходной патрубков и удаляется. С помощью порога регулируется высота слоя пены на решетке.

Крупные частицы пыли осаждаются в коническую часть пылеуловителя и отводятся из аппарата в виде шлама. Скорость движения запыленного газа на входе – 2-2,5 м/с, эффективность улавливания пыли – до 99%, расход воды – 0,8-0,9 л/м<sup>3</sup> очищаемого газа. Недостаток пылеуловителей с переливной решеткой – возможность забивания отверстий решетки твердыми частицами.

Этот недостаток устраняется в пенных пылеуловителях с провальной решеткой (рис. 7.1 а), в котором подача воды осуществляется через форсунки непосредственно на решетку.

Для очистки газов чаще всего используются провальные щелевые и дырчатые решетки. Диаметр отверстий дырчатых решеток принимают в пределах 3-8 мм, а относительное свободное сечение (отношение площади отверстий к площади тарелки)  $f_{св} = 0,15-0,25$ .

Удельное орошение для очистки газов от пыли принимают в пределах 0,4-0,6 литров на 1 м<sup>3</sup> газов. Для создания устойчивого пенного слоя на решетке необходимо поддерживать скорость газа в свободном сечении аппарата в пределах 0,8-2,2 м/с, при этом минимальная скорость газов, необходимая для создания устойчивого пенного режима на решетке, составляет порядка 1 м/с.

В новейших пенных аппаратах с провальными решетками (ПАСС) применяют так называемые стабилизаторы пенного слоя, что позволяет повысить скорость газа до 4 м/с.

В качестве стабилизатора рекомендуется использовать сотовую решетку высотой  $h_{ст} = 60$  мм с ячейками размером от 35×35 до 45×45 мм. Решетки промышленных аппаратов ПАСС могут быть дырчатыми и трубчатыми. Аппараты с трубчатыми решетками обозначаются ПАСС-Т, а с дырчатыми – ПАСС-Д.

Разработан нормализованный ряд аппаратов ПАСС с корпусами круглого сечения на расход газа  $Q = 2,5 \div 64$  тыс. м<sup>3</sup>/ч (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Нормализованный ряд аппаратов типа ПАСС

Тип аппарата	Расход газа, тыс. м <sup>3</sup> /ч	Скорость газа в свободном сечении аппарата, м/с	Основные размеры аппарата, мм			
			Высота, $H$	Диаметр, $D$	диаметр выходного патрубка, $D_1$	диаметр входного патрубка, $D_2$
1	2	3	4	5	6	7
ПАСС-Т(Д)-3	2,5- 3,4	2,9	3670	600	285	100
ПАСС-Т(Д)-4	3,4- 4,5	2,85	3790	700	355	100
ПАСС-Т(Д)-5	4,5- 6,2	2,96	3910	800	400	100
ПАСС-Т(Д)-7	6,2- 8,4	3,05	4160	920	450	100



Окончание таблицы 7.1

1	2	3	4	5	6	7
ПАСС-Т(Д)-10	8,4- 11,7	2,94	4300	1100	500	100
ПАСС-Т(Д)-14	11,7- 16,5	2,95	4860	1300	560	100
ПАСС-Т(Д)-20	16,5-23,2	3,12	5300	1500	630	100
ПАСС-Т(Д)-30	23,2-32,6	3,05	6050	1800	800	150
ПАСС-Т(Д)-40	32,6-45,7	3,14	6710	2100	900	150
ПАСС-Т(Д)-55	45,7-64,0	3,10	7630	2500	1020	150

К недостаткам пенных аппаратов можно отнести: неполное улавливание частиц размером менее 2 мкм, необходимость установки брызгоуловителей при прохождении газов через решетку со скоростью более 1,5 м/с, трудность обеспечения равномерного пенного слоя по всей поверхности решетки, необходимость стабилизации подачи газов на очистку.

## 2. Цель работы

Отработка методики расчета пенных пылеуловителей.

## 3. Содержание работы

Расчет гидравлического сопротивления пенных аппаратов со стабилизатором слоя может быть проведен по зависимости:

$$\Delta P_{\text{общ}} = \Delta P_p + \Delta P_{\text{п}} + \Delta P_{\sigma} + \Delta P_a, \quad (7.1)$$

где  $\Delta P_p$ ,  $\Delta P_{\text{п}}$ ,  $\Delta P_{\sigma}$ ,  $\Delta P_a$  – потери напора соответственно сухой решетки, слоя пены, за счет сил поверхностного натяжения, корпуса аппарата.

Величина  $\Delta P_p$  (в Па) может быть найдена по формуле:

$$\Delta P_p = 1,82 (v_{\Gamma}^0)^2 \rho_{\Gamma} / 2S_0, \quad (7.2)$$

где  $v_{\Gamma}^0$  – скорость газа в отверстиях решетки, м/с;  $S_0$  – относительная площадь свободного сечения решетки, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>.

Потеря напора  $\Delta P_{\text{п}}$  (в Па) за счет слоя пены на решетке:

$$\Delta P_{\text{п}} = 0,447 H_{\text{п}} \rho_{\text{ж}} g / (v_{\Gamma}^0)^{0,5}, \quad (7.3)$$

где  $H_{\text{п}}$  – высота слоя пены, м;

$\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$v_{\Gamma}^0$  – скорость газа в отверстиях решетки, м/с.

В уравнении (7.3) высота слоя пены  $H_{\text{п}}$  (мм) может быть найдена по зависимости:

$$H_{\text{п}} = 4,8 v_{\Gamma}^{0,79} m^{0,2} / (d_0^{0,14} S_0^{1,9}), \quad (7.4)$$

где  $m$  – плотность орошения, л/м<sup>3</sup> газа;

$d_0$  – диаметр отверстий решетки, мм.

Потерю напора  $\Delta P_\sigma$  (в Па) под действием сил поверхностного натяжения рассчитывают по формуле:

$$\Delta P_\sigma = 4\sigma/d_0, \quad (7.5)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения воды, Н/м.

Гидравлическое сопротивление корпуса аппарата  $\Delta P_a$  (в Па) рассчитывают по зависимости:

$$\Delta P_a = \xi_a v_r^2 \rho_r / 2, \quad (7.6)$$

где  $\xi_a = 25 \div 28$  – коэффициент гидравлического сопротивления корпуса аппарата.

Степень фракционной очистки  $\eta_\phi$  (в %) может быть рассчитана по зависимости:

$$\eta_{\phi i} = 100 [1 - 87,1(1,37 - d_{\phi i}^{0,1}) / H_{\phi}^{0,9} \cdot v_r^{0,25}], \quad (7.7)$$

где  $d_{\phi i}$  – средний эквивалентный размер частиц фракции, мкм;

$H_{\phi}$  – высота слоя пены, мм;

$v_r$  – скорость газа в сечении аппарата, м/с.

Общую степень очистки определяют по уравнению:

$$\eta = [\eta_{\phi 1} R(d_1) + \eta_{\phi 2} R(d_2) + \dots + \eta_{\phi n} R(d_n)] / 100, \quad (7.8)$$

где  $R(d_i)$  – содержание узких классов пыли с размером  $d_i$ , %.

### **Пример.**

Рассчитать пенный аппарат для очистки технологических газов, удаляемых после сушилки с кипящим слоем. Общий расход газа  $V = 20\,000$  м<sup>3</sup>/ч, температура газа 75°C, плотность газа при рабочих условиях  $\rho_r = 1,02$  кг/м<sup>3</sup>, температура орошающей воды 20°C, коэффициент поверхностного натяжения воды  $\sigma = 7,2 \cdot 10^{-2}$  Н/м. Пыль – плохо смачивая, начальная концентрация пыли  $C_r = 2$  г/м<sup>3</sup>. Дисперсный состав пыли приведен в таблице 7.2.

Таблица 7.2

Дисперсный состав пыли

$d_r$ , мкм	0-5	5-10	10-15	15-20	20-30	30-50
$R(d_r)$ , %	24	26	17	6	13	14

### **Решение.**

Принимаем за базовую конструкцию аппарат типа ПАСС, а скорость газа в сечении аппарата из условий устойчивости слоя пены  $v_r^0 = 3$  м/с.

Площадь сечения корпуса аппарата:

$$S = V / (3600 v_r^0) = 20000 / (3600 \cdot 3) = 1,85 \text{ м}^2.$$

Диаметр корпуса аппарата:

$$D_0 = (4S/\pi)^{0,5} = (4 \cdot 1,85/3,14)^{0,5} = 1,54 \text{ м.}$$

Примем (табл. 7.1) действительный диаметр корпуса равным 1500 мм, тогда действительная скорость газа в сечении аппарата:

$$v_r = v_r^0 D_0^2 / D^2 = 3 \cdot 1,54^2 / 1,5^2 = 3,15 \text{ м/с.}$$

Расход жидкости принимаем с учетом оптимальной работы аппарата при плотности орошения  $L_0 = 1 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ :

$$L_{\text{ж}} = L_0 S_{\text{д}} = 1 \cdot 1,77 = 1,77 \text{ м}^3 / \text{ч},$$

$$\text{где } S_{\text{д}} = 0,785 D^2 = 1,77 \text{ м}^2.$$

Относительную площадь свободного сечения дырчатой решетки  $S_0 (\text{м}^2 / \text{м}^2)$  вычисляем при высоте слоя пены 100 мм, диаметре отверстий 5 мм и плотности жидкости  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

$$\begin{aligned} S_0 &= 1,37 v_r^{0,458} L_0^{0,152} / (H_{\text{п}}^{0,61} d_0^{0,085} \rho_{\text{ж}}^{0,61}) = \\ &= 1,37 \cdot 3,15^{0,458} \cdot 1^{0,152} / (0,1^{0,61} \cdot 0,005^{0,085} \cdot 1000^{0,61}) = 0,21. \end{aligned}$$

Проверяем действительную высоту слоя пены по уравнению (7.4):

$$\begin{aligned} H_{\text{п}} &= 4,8 v_r^{0,79} m^{0,2} / (d_0^{0,14} S_0^{1,9}) = \\ &= 4,8 \cdot 3,15^{0,79} \cdot 0,05^{0,2} / (0,005^{0,14} \cdot 0,21^{1,9}) = 101 \text{ мм}, \end{aligned}$$

$$\text{где } m = L_0 / V = 1000 / 20000 = 0,05 \text{ л/м}^3.$$

Шаг между отверстиями в случае ромбической разбивки определяем по формуле:

$$t = d_0 (0,91 / S_0)^{0,5} = 0,005 (0,91 / 0,21)^{0,5} = 0,01 \text{ м} = 10 \text{ мм.}$$

Вычисляем полное гидравлическое сопротивление аппарата по формуле (7.1):

$$\Delta P_{\text{общ}} = \Delta P_p + \Delta P_{\text{п}} + \Delta P_{\sigma} + \Delta P_a,$$

где величины  $\Delta P_p$ ,  $\Delta P_{\text{п}}$ ,  $\Delta P_{\sigma}$ ,  $\Delta P_a$  определяем по формулам (7.2), (7.3), (7.5), (7.6):

$$\Delta P_p = 1,82 v_r^2 \rho_r / 2S_0 = 1,82 \cdot 3,15^2 \cdot 1,02 / 2 \cdot 0,21 = 43,9 \text{ Па};$$

$$\Delta P_{\text{п}} = 0,447 H_{\text{п}} \rho_{\text{ж}} g / (v_r)^{0,5} = 0,447 \cdot 0,101 \cdot 1000 \cdot 9,81 / 3,15^{0,5} = 114 \text{ Па};$$

$$\Delta P_{\sigma} = 4\sigma / d_0 = 4 \cdot 7,2 \cdot 10^{-2} / 0,005 = 50,4 \text{ Па};$$

$$\Delta P_a = \xi_a v_r^2 \rho_r / 2 = 27 \cdot 3,15^2 \cdot 1,02 / 2 = 137 \text{ Па};$$

$$\Delta P_{\text{общ}} = 43,9 + 114 + 50,4 + 137 = 345 \text{ Па.}$$

Степень фракционной очистки определяем по формуле для плохо смачиваемой пыли (7.7):

$$\eta_{\text{фи}} = 100 [1 - 87,1(1,37 - d_{\text{п}}^{0,1}) / H_{\text{п}}^{0,9} \cdot v_r^{0,25}],$$

$$\text{где } d_{\text{п1}} = (0 + 5) / 2 = 2,5 \text{ мкм}; d_{\text{п2}} = (5 + 10) / 2 = 7,5 \text{ мкм}; d_{\text{п3}} = (10 + 15) / 2 = 12,5 \text{ мкм и т. д.}$$

В результате вычислений получаем следующие фракционные степени очистки:

$d_T$ , мкм	0-5	5-10	10-15	15-20	20-30	30-50
$\eta_{\text{фв}}$ %	79,34	89,32	93,96	97,46	100	100

Общая степень очистки:

$$\eta = (79,34 \cdot 24 + 89,32 \cdot 26 + 93,96 \cdot 17 + 97,46 \cdot 6 + 100 \cdot 13 + 100 \cdot 14) / 100 = 90,6\%.$$

Остаточная концентрация пыли в газе на выходе из аппарата:

$$C_{\text{вых}} = C_T (100 - \eta) / 100 = 2(100 - 90,6) / 100 = 0,188 \text{ г/м}^3.$$

Судя по полученному результату, степень очистки технологических газов в пенном аппарате не слишком высока и практически одинакова со степенью их очистки в высокоэффективном циклоне. Ввиду общего недостатка всех мокрых способов очистки – образования загрязненных стоков, применение циклона в данном случае более целесообразно.

#### 4. Задание для расчета

Исходные данные для расчета пенного пылеуловителя приведены в табл. 7.3-7.4.

Таблица 7.3.

Исходные данные для расчета пенного пылеуловителя

Вариант	$V$ , м <sup>3</sup> /ч	$\xi_a$	$\rho_T$ , кг/м <sup>3</sup>	$v_{\text{г}}^0$ , м/с	$\sigma \cdot 10^{-2}$ , Н/м	$C_T$ , г/м <sup>3</sup>
1	21800	25	1,310	3,0	7,42	6
2	33600	28	1,297	2,8	7,34	3
3	18600	26	1,294	2,9	7,25	5
4	41600	27	1,291	3,1	7,28	2
5	26500	25	1,312	2,7	7,23	7
6	32500	27	1,298	2,8	7,29	6
7	14500	28	1,293	3,2	7,20	4
8	31900	26	1,299	2,7	7,18	7
9	26800	25	1,291	2,8	7,21	5
10	35500	27	1,317	2,9	7,19	8

#### 5. Содержание отчета

- Принцип работы вихревого пылеуловителя;
- Методика расчета вихревого пылеуловителя;
- Преимущества вихревого пылеуловителя перед циклонными аппаратами;
- Результаты вычислений.

Фракционный состав пыли  $R(\delta)$ 

Вариант	Содержание фракций пыли $R(d_T)$ , %					
	0-5 мкм	5-10 мкм	10-15 мкм	15-20 мкм	20-30 мкм	30-60 мкм
1	4	6	10	24	28	28
2	5	9	18	28	30	10
3	7	8	12	26	22	15
4	6	9	24	28	27	6
5	12	21	29	18	12	8
6	10	30	28	18	9	5
7	8	12	18	29	21	12
8	15	22	26	12	8	7
9	28	28	24	10	6	4
10	6	27	28	24	9	6

**Контрольные вопросы**

1. Как происходит выделение частиц пыли в вихревом аппарате соплового типа?
2. Как происходит выделение частиц пыли в вихревом пылеуловителе лопаточного типа?
3. Перечислите основные способы подведения к вихревому пылеуловителю воздуха.
4. Опишите методику расчета вихревого пылеуловителя.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 8

### Расчёт рукавных фильтров

#### 1. Общие положения

Фильтрование применяют в промышленности для тонкого разделения пылегазовых систем. С его помощью можно добиться более полной, чем в процессах осаждения, очистки газа от взвешенных частиц. В процессе фильтрования твёрдые частицы примесей оседают на входной части пористой перегородки и задерживаются в порах, образуя на поверхности перегородки слой и, таким образом, становятся для вновь поступающих частиц частью фильтровальной перегородки, что увеличивает эффективность очистки фильтра, и перепад давления на фильтре. Осаждение частиц на поверхности пор фильтроэлемента происходит в результате совокупного действия эффекта касания, а также диффузионного, гравитационного и инерционного процессов.

Движущей силой фильтрования является разность давлений до и после фильтра. Эта разность создаётся с помощью насоса, компрессора, вакуум-насоса. При сухой очистке газов в большинстве случаев используют фильтрование с закупориванием пор.

Таблица 8.1

Эксплуатационные свойства фильтровальных тканей

Ткань	Толщина, мм	Воздухопроницаемость (предельная) при $\Delta P=4,9$ Па, $m^3/m^2$ мин.	Химическая стойкость в различных средах				Допустимая температура $t_d, ^\circ C$
			Щелочи	Окисляющие агенты	Кислоты	Растворители	
1	2	3	4	5	6	7	8
Сукно №2 (арт. 20), саржа 2×2, шерсть+хлопок	1,5	3	X	У	ОП	ОХ	80
Байка ЧШ (артикул 21), саржа 2×2			ОП	У	У	Х	95
Нитрон (арт. 1609), саржа 2×2	1,6	7,5	У	Х	У	Х	120

Окончание таблицы 8.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Нитрон НЦМ, саржа 2×2 с на- чёсом			У	Х	У	Х	120
Ткань ЦМ (шерсть+30% капрона, арт. 83), саржа 2×2			У	У	ОП	Х	85
Лавсан (без на- чёса)	1,4	4,0	У-П	Х	Х	Х	130
Лавсан (с начё- сом) № 5386а			У-П	Х	Х	Х	130
Хлорин № 5231	1,32	7,0	ОХ	ОХ	ОХ	У-Х	70
Стеклоткань ТССНФ	0,22	2,7	У-П	ОХ	Х	ОХ	240
ОХ – очень хорошо; Х – хорошая; У – удовлетворительная; П – плохая; ОП – очень плохая							

В зависимости от типа фильтровальной перегородки различают следующие фильтры для очистки газов: а) с гибкими пористыми перегородками из природных, синтетических, минеральных волокон (тканевые материалы), нетканых волокнистых материалов (войлок, капрон и др.), металлоткани и др. (табл. 8.1); б) с полужесткими пористыми перегородками (слой из волокон, металлических сеток и др.); в) с жесткими пористыми перегородками (из керамики, пластмасс, спечённых или спрессованных металлических порошков); г) с зернистыми перегородками (слой кокса, гравия, песка и др.). Выбор фильтровальной перегородки определяется размером дисперсных частиц, температурой газа, его химическими свойствами, а также допустимым гидравлическим сопротивлением.

## 2. Цель работы

Отработка методики расчета рукавных фильтров.

## 3. Содержание работы

Расчёт рукавных фильтров сводится к определению общей поверхности его рукавов  $F_{об}$ :

$$F_{об} = z\pi dH, \quad (8.1)$$

где  $z$  – общее число рукавов;

$d$  – диаметр рукава;

$H$  – высота рукава.

В процессе эксплуатации фильтра часть рукавов отключают на регенерацию, поэтому общая поверхность рукавов определяется соотношением:

$$F_{об} = F_{\phi} \cdot z / (z - z_p) \quad (8.2)$$

где  $F_{\phi}$  – расчётная поверхность фильтрации;

$z_p$  – число рукавов, отключённых на регенерацию. Для односекционных фильтров можно принять  $z_p = (0,15 \div 0,20)z$ .

Расчетная поверхность фильтрации находится:

$$F_{\phi} = V / \omega_z, \quad (8.3)$$

где  $V$  – объёмный расход газа, поступающего в аппарат;

$\omega$  – допустимая скорость фильтрования через рукав.

Она представляет собой скорость, при которой гидравлическое сопротивление заполненного фильтра достигает максимально допустимой величины, и может быть найдена экспериментально.

Обычно величина  $\omega_z = (0,8 \div 1,0) \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 / \text{м}^2 \cdot \text{с}$ .

Для фильтров, имеющих  $n$  самостоятельных секций (табл. 8.2), количество рукавов, работающих одновременно на продувку равно:

$$z_p = z / n, \quad (8.4)$$

где  $n$  – количество секций.

Общее количество газов, поступающих в рукавный фильтр, определяется по формуле:

$$V = V_{\Gamma} + V_{пр} + V_{п.в}, \quad (8.5)$$

где  $V_{\Gamma}$  – расход запылённого газа, поступающего в аппарат,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$V_{пр} = (0,1 \div 0,2)V_{\Gamma}$  – расход продувочного воздуха,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$V_{п.в}$  – расход подсасываемого в аппарат воздуха,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

Расход подсасываемого воздуха зависит от температуры запылённого газа, поступающего в фильтр. Если запылённый газ подходит к фильтру с высокой температурой  $t_{\Gamma}$ , которую необходимо снизить до  $t_{см}$  (смеси) ниже допустимой температуры  $t_{д}$  (табл. 8.1) за счёт подсоса холодного воздуха, то количество этого воздуха можно рассчитать:

$$V_{п.в} = V_{\Gamma} \frac{\rho_{\Gamma} (t_{\Gamma} - t_{см})}{\rho_{в} (t_{см} - t_{в})}, \quad (8.6)$$



где  $\rho_{\Gamma}$  и  $\rho_{\text{в}}$  – соответственно плотность газа и плотность подсасываемого из атмосферы воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$t_{\text{в}}$  – температура атмосферного воздуха, °С (для ориентировочных расчётов  $t_{\text{в}}=20^{\circ}$ ).

Таблица 8.2

Основные параметры рукавных фильтров

Марка фильтра	Общая площадь поверхности фильтра F, м <sup>2</sup>	Число секций n, шт.	Общее число рукавов Z, шт.	Диаметр рукава d, мм	Длина рукава L, м
ФРО-1250-1	1266	6	252	200	8
ФРО-1650-1	1688	8	336		
ФРО-2500-1	2530	12	504		
ФРО-4100-2	4104	8	432	300	10
ФРО-5100-2	5130	10	540		
ФРО-6000-2	6156	12	648		
ФРО-7000-2	7182	14	756		
ФРО-8000-2	8208	16	864		
ФРО-20000-3	20520	10	2160		
ФРО-24000-3	24624	12	2592	135	6
ФРКДИ-550	550	1	216		
ФРКДИ-720	720		288		
ФРКДИ-1100	1100		432		
ФРКИ-30	30	1	36	135	2
ФРКИ-60	60	2	72		
ФРКИ-90	90	3	108		
ФРКИ-180	180	4	114		3
ФРКИ-360	360	8	228		
ФРУ-II-15	15	2	28	130	1,5
ФРУ-II-20	20				2
ФРУ-II-25	25				2,5
ФРУ-III-37,5	37,5				3
ФРУ-IV-50	50	4	56		

Условные обозначения

ФРКИ: Ф – фильтр; Р – рукавный; К – каркасный; И – с импульсной продувкой; цифры – площадь фильтрующей поверхности, м<sup>2</sup>.

ФРКДИ: ДИ – с двухсторонней импульсной продувкой.

ФРО: О – с регенерацией обратной продувкой.

ФРУ: У – унифицированный; римские цифры – количество секций; Цифра после тире – площадь фильтрующей поверхности, м<sup>2</sup>.

Если запылённый газ подходит к фильтру с температурой меньшей, чем допускаемая температура  $t_d$ , то количество подсасываемого воздуха принимают:

$$V_{н.в} = (1,05 \div 1,10) V_r. \quad (8.7)$$

Рассчитанная по (8.3) поверхность фильтрации должна быть проверена на допустимую запыляемость ткани:

$$F_\phi \geq G_n / G_d, \quad (8.8)$$

где  $G_n$  – исходное количество пыли в газе, г/с;

$G_d = (0,2 \div 0,3) \text{ г}/(\text{м}^2\text{с})$  - допустимая удельная запыляемость ткани.

Если рукавный фильтр используется как последующая ступень очистки при известной степени улавливания в предыдущей ступени  $\eta_1$ , то количество твердой фазы, поступающей на рукавный фильтр, определяется по уравнению:

$$G_{н2} = G_{н1} (1 - \eta_1) \quad (8.9)$$

где  $G_{н1}$  – начальное количество твёрдой фазы в газе перед входом его в первую ступень очистки, г/с.

Концентрация твёрдой фазы рассчитывается по уравнению (8.9) с учётом объёмного расхода газа перед каждой ступенью очистки.

$$X_n = \frac{G_n}{V}; \quad X_k = \frac{G_k}{V}, \quad (8.10)$$

где  $V$  – расход газа, проходящего через пылеуловитель, м<sup>3</sup>/с;

$X_n, X_k$  – начальная и конечная концентрация пыли в газе, г/м<sup>3</sup>.

### **Пример.**

Выбрать пылеулавливающий аппарат по следующим исходным данным: расход газа  $V_{ог}=13 \text{ м}^3/\text{с}$ ; температура газа  $t_g=200^\circ\text{C}$ ; концентрация твёрдой фазы в газе  $X_n=65 \text{ г}/\text{м}^3$ ,  $\rho_q = 2240 \text{ кг}/\text{м}^3$ , дисперсный состав частиц:  $d_m = 20 \text{ мкм}$ ;  $\sigma_q = 3,0$ . Степень очистки – не ниже  $\eta=0,99$ ; разрежение в системе  $P=500 \text{ Па}$ ; запылённый газ сухой, не агрессивный.

### **Решение.**

1. Учитывая высокую дисперсность частиц, большую концентрацию их в газе и степень очистки, целесообразно применить двухступенчатую очистку: 1 стадия – в циклоне, вторая – в рукавном фильтре.

Для предварительной очистки можно использовать высокоэффективный циклон (НИИОгаз), расчёт и выбор которого дан в Практической работе 4. Примем, что для рассматриваемого случая эффективность очистки газа на первой стадии в циклоне составит  $\eta_1=0,8$ .

Учитывая неагрессивность газов, выбираем в качестве фильтровальной ткани лавсан с начёсом, допускающий максимальную температуру газа  $t_d=130^{\circ}\text{C}$  (табл. 8.1).

2. Примем температуру газа на входе в фильтр (после смешения с подсасываемым воздухом)  $t_{\text{см}}=120^{\circ}\text{C}$ .

3. Расход газа, поступающего в фильтр, разрежение в котором  $P=500$  Па, составит:

$$V_z = V_{oz} \frac{TP_o}{T_o P} = 13 \frac{(273+120) \cdot 1 \cdot 10^5}{273(1 \cdot 10^5 - 500)} = 18,72 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

4. Расход подсасываемого воздуха, обеспечивающего снижение температуры газа от  $200^{\circ}\text{C}$  до  $120^{\circ}\text{C}$  по (8.6), равен:

$$V_{\text{н.в}} = V_r \frac{\rho_r (T_r - t_{\text{см}})}{\rho_b (t_{\text{см}} - t_b)} = 18,72 \cdot 0,62 \frac{200 - 120}{120 - 20} = 9,28 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

$$\frac{\rho_r}{\rho_b} = \frac{\rho_o \frac{T_o P}{T_r P_o}}{\rho_o \frac{T_o P}{T_b P_o}} = \frac{\rho_o}{\rho_o} \frac{T_o P \cdot T_b \cdot P}{T_r P_o \cdot T_o \cdot P} = \frac{T_b}{T_r} = \frac{273+20}{273+200} = \frac{293}{473} = 0,62 \text{ - отношение}$$

плотностей горячего газа и подсасываемого воздуха.

5. Расход воздуха, подаваемого на продувку, примем:

$$V_{\text{пр}} = 0,2V_r = 0,2 \cdot 18,72 = 3,74 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

6. Объёмный расход газа, поступающего в аппарат:

$$V = V_r + V_{\text{пр}} + V_{\text{н.в}} = 18,72 + 3,74 + 9,28 = 31,74 \text{ , м}^3 / \text{с}$$

7. Расчетная площадь поверхности фильтрации по (8.3) при  $\omega_2=0,009 \text{ м}^3 / \text{м}^2 \text{с}$  составит:

$$F_{\phi} = \frac{18,72 + 3,74 + 9,28}{0,009} = 3526,66 \text{ м}^2.$$

8. Примем предварительно фильтр марки ФРО-4100-2 с основными параметрами:  $F=4104 \text{ м}^2$ ;  $Z=432$ ;  $n=8$  (табл. 8.2). Тогда число рукавов, участвующих в продувке (регенерации) по (8.4) будет равно  $Z_p=432/8=54$ .

9. Общая площадь поверхности фильтра по (6.2) составит

$$F = \frac{3526,66 \cdot 432}{432 - 54} = 4030,4 \text{ м}^2.$$

Следовательно, выбранный фильтр имеет общую площадь поверхности фильтрации, достаточную для принятого объёма газа.

10. Расход пыли перед первой ступенью очистки равен:

$$G_{н1} = X_{н} \cdot V_{оз} = 65 \cdot 13 = 845 \text{ з/с}.$$

11. Количество твёрдой фазы, поступающей с газом в рукавный фильтр при степени очистки в первой ступени  $\eta_1=0,8$ , по (6.9) составит:

$$G_{н2} = G_{н1}(1 - \eta_1) = 845(1 - 0,8) = 169 \text{ з/с}.$$

Площадь поверхности фильтрации по допустимым условиям запылённости ткани, согласно (8.8) равна  $F_{\phi} \geq 169 / 0,2 = 845 \text{ м}^2$ , что значительно меньше ранее выбранной площади поверхности фильтрации.

Таким образом, фильтр марки ФРО-4100-2 соответствует заданным условиям.

#### 4. Задание для расчета

Исходные данные для расчета рукавных фильтров приведены в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Исходные данные для расчета рукавных фильтров

Вариант	$V_{оз}, \text{ м}^3/\text{с}$	$t_2, \text{ }^\circ\text{C}$	$X_{н}, \text{ г/м}^3$	$P, \text{ Па}$	$\rho_{ч}, \text{ кг/м}^3$	$d_{м}, \text{ мкм}$	$\sigma_{ч}$	$\eta_1, \%$	$\eta, \%$
1	18	100	65	500	1800	25	2,0	85	98
2	36	150	40	400	2000	30	2,3	90	99
3	26	90	75	450	3000	44	3,2	88	99
4	11	140	50	550	1900	14	3,5	91	98
5	65	180	80	500	2650	28	2,7	80	99
6	25	80	65	400	2000	42	3,1	85	99
7	45	190	35	450	3000	36	2,4	83	98
8	90	150	50	550	2000	22	2,3	80	99
9	68	90	25	500	3000	38	2,6	89	99
10	55	200	75	400	1700	21	2,9	81	98

#### 5. Содержание отчета

- Основные параметры рукавных фильтров;
- Методика расчета рукавных фильтров;
- Результаты вычислений.

### ***Контрольные вопросы***

1. Как классифицируют фильтры для очистки газов в зависимости от типа фильтровальной перегородки?
2. Укажите основные эксплуатационные свойства фильтровальных тканей.
3. Расшифруйте наименование фильтра ФРКДИ-720.
4. Опишите методику расчета рукавного фильтра.

### Расчёт электрофильтров

#### 1. Общие положения

Электрическая очистка запыленного газа одна из наиболее совершенных. Действие электрофильтров основано на ионизации запылённого газа, т.е. выделении в газопылевом потоке положительно и отрицательно заряженных ионов, и свободных частиц. Загрязнённые газы, поступающие в электрофильтр, всегда оказываются частично ионизированными за счёт внешних воздействий (рентгеновских и космических лучей, радиоактивных излучений, нагрева газа и др.), поэтому они способны проводить ток, попадая в пространство между двумя электродами. Если к электродам подвести электрическое напряжение, то между ними возникает электростатическое поле и по его силовым линиям начнут двигаться ионы газа. Скорость их движения и кинетическая энергия будут определяться напряженностью этого поля. Если повысить разность потенциалов между электродами до нескольких тысяч вольт, то скорость движения, а, следовательно, кинетическая энергия ионов и электронов возрастает настолько, что они сами при соударении ионизируют встречные молекулы. Вновь образующиеся заряды при своём движении также ионизируют газ. Поэтому образование ионов происходит лавинообразно и газ полностью ионизируется. Такая ионизация носит название ударной.

При этом наблюдается потрескивание и слабое свечение газа (корона) вокруг проводника, который носит название коронирующего электрода. Ионы и электроны, имеющие тот же знак, что и заряд коронирующего электрода, движутся к противоположно заряженному, так называемому осадительному электроду. В электрофильтрах коронирующие электроды всегда присоединяются к отрицательному полюсу, поэтому к осадительному электроду (заряженному положительно) движутся только отрицательные ионы и свободные электроны. Последние по пути “прилипают” к нейтральным молекулам, превращая их так же в отрицательные ионы.

В области “короны” образуются положительные ионы, они и оседают на коронирующем электроде, и нейтрализуются, однако основная масса ионов осаждаётся на осадительных электродах. Пройдя к осадительным электродам, частицы пыли отдают им свой заряд и сбрасываются с электрода под действием собственной тяжести или при встряхивании. С увеличением напряженности сверх некоторой критической величины происходят проскоки искр, а затем электрический пробой и короткое замыкание электродов. Поэтому в электрофильтрах создают неоднородное электрическое поле, напряжение которого убывает по мере удаления от коронирующего электрода. Тогда почти весь слой газа между короной и осадительным электродом

играет роль изоляции, предотвращающей искровой разряд между электродами. Неоднородность поля достигается путём устройства электродов в виде проводов, помещённых по оси труб в трубчатом электрофилт্রে или натянутых между параллельными пластинами в пластинчатом электрофилт্রে. Электрофилт্রে работают только на постоянном напряжении, так как при переменном напряжении заряженные частицы быстро меняют направление своего движения, вследствие чего часть их не успевает осесть на электродах и выносится с газом из электрофилт্রে. Скорость движения частиц пыли в электрофилт্রে близка к скорости газа и составляет 0,5-2 м/с. Причиной, вызывающей движение частицы к осадительному электроду, является сила взаимодействия между электрическим полем и зарядом частицы (движущая сила процесса филтрования).

Конструкцию электрофилтров определяют следующие условия работы: состав и свойства очищаемых газов, концентрация и свойства взвешенных частиц, параметры газового потока, требуемая эффективность очистки и т.д. В промышленности используют несколько типовых конструкций сухих и мокрых электрофилтров, применяемых для очистки технологических выбросов (Приложение 2).

Хотя электрофилт্রে работают при высоком напряжении (40-75 кВ), расход электроэнергии в них невелик и обычно составляет 0,2-0,3 кВт·ч на 1000 м<sup>3</sup> газа. Гидравлическое сопротивление электрофилтров меньше, чем у большинства других аппаратов газоочистки, и составляет 150-200 Па. Степень очистки 95-99%. Однако, электрофилт্রে характеризуются достаточно высокой стоимостью, сложны в эксплуатации, непригодны для очистки газов от частиц с малым электросопротивлением.

## 2. Цель работы

Отработка методики расчета электрофилтров.

## 3. Содержание работы

Расчет и выбор электрофилтров проводится в следующей последовательности. Площадь сечения активной зоны электрофилтра

$$f = K \cdot \frac{V_2}{\omega_2}, \quad (9.1)$$

где  $V_2$  – объёмный расход газа при температуре очистки, м<sup>3</sup>/с;

$\omega_2$  – скорость газа в электрофилт্রে,  $\omega_2 = 0,8 \div 2$  м/с;

$K = 1,1$  – коэффициент запаса, учитывающий подсосы атмосферного воздуха.

Степень очистки газа в электрофилт্রে:

$$\eta = 1 - \exp(-\omega_2 a), \quad (9.2)$$

где  $\omega_d$  – скорость дрейфа заряженных частиц по направлению к осадительному электроду, м/с;

$a$  – коэффициент, характеризующий геометрические размеры аппарата и скорость газа в нём.

Коэффициент  $a$  для всех типов осадительных электродов рассчитывается по формуле:

$$a = \frac{L\Pi}{(f_3\omega_d)}, \quad (9.3)$$

где  $L$  – длина осадительного электрода, м;

$\Pi$  – активный периметр осадительного электрода, м;

$f_3$  – площадь сечения активной зоны, ограниченной стенками осадительного электрода, м<sup>2</sup>.

Для пластинчатых электродов  $\Pi/f_3=2/v$ , где  $v$  – расстояние между пластинами. Для всех электродов можно принять  $v = 0,3$  м.

Реальная скорость дрейфа заряженных частиц принимается в два раза меньше рассчитанной из условий стоковского режима осаждения и определяется:

$$\omega_d = 6 \cdot 10^{-12} K_v E^2 r_c / \mu_g, \quad (9.4)$$

где  $E$  – напряжение электрического поля, В/м;

$r_c$  – радиус частицы (средний радиус частиц для узкого класса крупности), мкм;

$\mu_g$  – вязкость газа, Па·с;  $K_v=1$  для частиц размером от 2 до 50 мкм; для частиц

размером от 0,1 до 2 мкм  $K_v = \left(1 + \frac{1}{10^7 r_c}\right)$ .

Напряженность электрического поля:

для трубчатых осадительных электродов:

$$E = \sqrt{\frac{i_o}{2\pi\epsilon_0 k}}, \quad (9.5)$$

для пластинчатых осадительных электродов:

$$E = \sqrt{\frac{i_o v}{2\pi\epsilon_0 k l}}, \quad (9.6)$$

где  $i_o$  – линейная плотность тока короны, А/м;

$\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$  – электрическая постоянная, Ф/м;

$k$  – подвижность ионов, м<sup>2</sup>/(В·с) (табл. 9.1);

$v$  – расстояние между пластинами электродов, м;

$l$  – расстояние между соседними коронирующими электродами в ряду, м (чаще  $l=0,25$  м).

Линейная плотность тока короны:

для трубчатых электродов:



$$i_o = \frac{2k}{9 \cdot 10^9 R^2 \ln R \frac{R}{R_1}} U(U - U_o), \quad (9.7)$$

для пластинчатых электродов:

$$i_o = \frac{4\pi^2 k k_1}{9 \cdot 10^9 l^2 \left( \frac{\pi b}{2l} + \ln \frac{2\pi R_1}{l} \right)} U(U - U_o), \quad (9.8)$$

где:  $U$  – напряжение на электродах, принимается не более  $80 \cdot 10^3$  В;

$U_o$  – критическое напряжение на электродах, при котором возникает коронирующий заряд, В;

$R$  – радиус осадительного электрода, м (при ориентировочных расчётах можно принимать  $R=0,15$  м);

$R_1$  – радиус коронирующего электрода, м (при ориентировочных расчётах можно принимать  $R_1=0,0015$  м);

$k_1=0,12(l/b)^2$  – коэффициент компоновки электродов между пластинами.

Критическое напряжение  $U_o$  на электродах, при котором возникает коронирующий заряд, определяется соотношением:

для трубчатых электродов:

$$U_o = E_o R_1 \ln \frac{R}{R_1}, \quad (9.9)$$

для пластинчатых электродов:

$$U_o = E_o R_1 \left( \frac{\pi b}{2l} - \ln \frac{2\pi R_1}{l} \right). \quad (9.10)$$

Здесь  $E_o$  – критическая напряженность, рассчитываемая по эмпирическим формулам Пика.

Для коронирующего электрода положительной полярности:

$$E_o = 3,37 \left( \beta + 0,0242 \sqrt{\frac{\beta}{R_1}} \right) \cdot 10^6, \quad (9.11)$$

для коронирующего электрода отрицательной полярности:

$$E_o = 3,04 \left( \beta + 0,0311 \sqrt{\frac{\beta}{R_1}} \right) \cdot 10^6, \quad (9.12)$$

где  $\beta$  – относительная плотность, определяемая отношением плотностей газа при рабочих и нормальных условиях:

$$\beta = \frac{293}{273+t} \left( 1 \pm \frac{P}{10^5} \right), \quad (9.13)$$

где  $t$  – рабочая температура газа, °С;

$P$  – избыточное давление или разрежение в газоходе, Па.

Так как скорость дрейфа,  $a$ , следовательно, и степень очистки зависят от диаметра частиц пыли, общую степень очистки электрофильтра следует рассчитывать по фракционным их значениям в соответствии с формулой:

$$\eta = \eta_1(\delta_1)R(\delta_1) + \eta_2(\delta_2)R(\delta_2) + \dots + \eta_n(\delta_n)R(\delta_n), \quad (9.14)$$

где  $R(\delta_i)$  - содержание фракции пыли с размером  $\delta_i$ .

Таблица 9.1

Подвижность ионов в газах и парах при нормальных условиях

Газ и пары	Подвижность ионов $k \cdot 10^4 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	
	Отрицательных	Положительных
Окись углерода	1,15	1,11
Сернистый ангидрид	0,41	0,41
Двуокись углерода	0,96	-
Водяной пар при $100^\circ\text{C}$	0,57	0,62
Воздух:		
Очень чистый	2,48	1,84
Сухой	2,10	1,32
Насыщенный водяными парами при $25^\circ\text{C}$	1,58	-

### Пример.

Выбрать аппарат для улавливания пыли если: концентрация твёрдых частиц в газе при нормальных условиях  $C_n=0,035 \text{ кг/м}^3$ ; разрежение в системе  $P=1300 \text{ Па}$ ; объёмный расход газа  $V_{o\bar{a}}=25 \text{ м}^3/\text{с}$ ; температура отходящего газа  $130^\circ\text{C}$ ; вязкость газа при  $130^\circ\text{C}$   $\mu_e=2,15 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ; степень очистки не ниже  $\eta=0,95$ . Фракционный состав пыли следующий:

$\delta_{\text{ч}}$ , мкм	0-0,5	0,5-1	1-5	5-8	8-10	10-15	15-20	20-30
$R(\delta)$	0,02	0,03	0,08	0,10	0,15	0,12	0,30	0,20

### Решение.

1. Объём газа, поступающего на очистку при температуре  $130^\circ\text{C}$ :

$$V_{\bar{a}} = V_{o\bar{a}} \frac{TP_o}{T_o P} = 25 \frac{(273 + 130) \cdot 1 \cdot 10^5}{273(1 \cdot 10^5 - 1300)} = 36,95 \hat{u}^3 / \hat{n}.$$

2. По условию, содержание пыли в газе, с размерами частиц от 0 до 5 мкм составляет 13% (2+3+8). Принимаем скорость газа в аппарате  $\omega_e=0,8 \text{ м/с}$ , тогда площадь сечения в активной зоне по (9.1):

$$f = K \cdot \frac{V_z}{\omega_z} = 1,1 \cdot \frac{36,95}{0,8} = 50,81 \text{ м}^2.$$

Такую площадь сечения активной зоны могут обеспечить фильтры УГ2-3-53, ДВП-2×30-БЦ; ЦГТ-1-60-3 (приложение 3).

3. Расход электроэнергии, потребляемой каждым из указанных фильтров:

$$N = N_{y\partial} \cdot \frac{V_z}{1000},$$

где  $N_{y\partial}$  выбираем из приложения 2.

а) для фильтра УГ2-3-53:

$$N = \frac{0,3 \cdot 36,95 \cdot 3600}{1000} = 39,90 \text{ кВт};$$

б) для фильтра ДВП-2×30-БЦ:

$$N = \frac{0,11 \cdot 36,95 \cdot 3600}{1000} = 14,63 \text{ кВт};$$

в) для фильтра ЦГТ-1-60-3:

$$N = \frac{0,3 \cdot 36,95 \cdot 3600}{1000} = 39,905 \text{ кВт}.$$

4. Руководствуясь минимальными затратами энергии выбираем для последующей работы фильтр ДВП-2×30-БЦ, имеющий следующие параметры (приложение 2): длину осадительных пластин  $L=7,9$  м; расстояние между пластинами  $0,3$  м; расстояние между коронирующими электродами  $l=0,25$  м; радиус коронирующего электрода  $R_1=0,0015$  м.

5. Относительная плотность газа ( $\beta$ ) (9.13):

$$\beta = \frac{293}{(273+130)} \left( 1 - \frac{1300}{10^5} \right) = 0,72.$$

6. Критическая напряженность поля (9.12):

$$E_o = 3,04 \left( \beta + 0,0311 \sqrt{\frac{\beta}{R_1}} \right) \cdot 10^6 = 3,04 \left( 0,72 + 0,0311 \sqrt{\frac{0,72}{1,5 \cdot 10^{-3}}} \right) \cdot 10^6 = 4,26 \cdot 10^6 \text{ В/м}.$$

7. Критическое напряжение короны (9.10):

$$U_o = E_o R_1 \left( \frac{\pi \beta}{2l} - \ln \frac{2\pi R_1}{l} \right) = 4,26 \cdot 10^6 \cdot 0,0015 \left( \frac{3,14 \cdot 0,3}{2 \cdot 0,25} - \ln \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{0,25} \right) = 32,95 \cdot 10^3 \text{ В}.$$

8. Коэффициент компоновки электродов между пластинами:

$$k_1 = 0,12 \left( \frac{0,25}{0,3} \right)^2 = 0,83.$$

9. Коэффициент  $k$  выбираем из таблицы 9.1.

$$k = 1,84 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / \text{В} \cdot \text{с}.$$

10. Линейная плотность тока короны (9.8):

$$i_o = \frac{4\pi^2 k k_1}{9 \cdot 10^9 l^2 \left( \frac{\pi \varepsilon}{2l} + \ln \frac{2\pi R_1}{l} \right)} U(U - U_o) =$$

$$= \frac{4 \cdot 3,14^2 \cdot 0,083 \cdot 1,84 \cdot 10^{-4}}{9 \cdot 10^9 \cdot 0,25^2 \left( \frac{3,14 \cdot 0,3}{2 \cdot 0,25} - \ln \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{0,25} \right)} \cdot 60 \cdot 10^3 (60 \cdot 10^3 - 32 \cdot 10^3) \approx 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ A/м},$$

где  $U=60 \cdot 10^3$  В – напряжение на электродах.

11. Напряженность электрического поля (9.6):

$$E = \sqrt{\frac{i_o \varepsilon}{\pi \varepsilon_o k l}} = \sqrt{\frac{0,35 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3}{3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,84 \cdot 10^{-4} \cdot 0,25}} = 2,9 \cdot 10^5 \text{ В/м}$$

12. Скорость дрейфа частиц диаметром:

а) от 2 до 5 мкм в соответствии с (9.4):

$$\omega_q = 6 \cdot 10^{-12} K_q E^2 r_q / \mu_z = 6 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \frac{(2,9 \cdot 10^5)^2 \cdot r_q}{2,15 \cdot 10^{-5}} = 2,34 \cdot 10^4 r_q \text{ м/с}.$$

$K_q=1$  (для частиц от 2-50 мкм);

б) от 0,1 до 2 мкм:

$$\omega_q = 6 \cdot 10^{-12} \cdot \left( 1 + \frac{1}{10^7 r_q} \right) \frac{(2,9 \cdot 10^5)^2 \cdot r_q}{2,15 \cdot 10^{-5}} = 2,34 \cdot 10^4 \left( 1 + \frac{1}{10^7 r_q} \right) r_q \text{ м/с}.$$

13. Коэффициент  $a$  (9.3):

$$a = \frac{2L}{(v\omega_z)} = \frac{7,9 \cdot 2}{(0,3 \cdot 0,8)} = 65,83 \text{ с/м}.$$

14. Найдём для каждого размера частиц скорость по (9.4) и степень очистки газа по (9.2). Для удобства дальнейшие результаты вычислений сведём в табл. 9.2.

$$\omega_{q(0,5)} = 2,34 \cdot 10^4 \left( 1 + \frac{1}{10^7 \cdot 0,25 \cdot 10^{-6}} \right) \cdot 0,25 \cdot 10^{-6} = 2,34 \cdot 10^{-2} \left( 1 + \frac{1}{10 \cdot 0,25} \right) \cdot 0,25 = 0,81 \cdot 10^{-2} \text{ м/с};$$

$$\omega_{q(1)} = 2,34 \cdot 10^{-2} \left( 1 + \frac{1}{10 \cdot 0,5} \right) \cdot 0,5 = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ м/с};$$

$$\omega_{q(5)} = 2,34 \cdot 10^4 r_q = 2,34 \cdot 10^4 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} = 2,34 \cdot 10^{-2} \cdot 2,5 = 5,85 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}.$$

Аналогично рассчитываем скорость для частиц с диаметром 8, 10, 15, 20, 30 мкм.

Степень очистки газа определяем по формуле (9.2):

$$\eta_{(0,5)} = 1 - \exp(-\omega_q a) = 1 - \exp(-0,0081 \cdot 65,83) = 1 - \exp(-0,533) = 1 - e^{-0,533} = 1 - 2,718^{-0,533} =$$

$$= 1 - \frac{1}{2,718^{0,533}} = 1 - \frac{1}{1,707} = 1 - 0,58 = 0,42;$$

$$\eta_{(1)} = 1 - \exp(-0,014 \cdot 65,83) = 1 - e^{-0,921} = 1 - \frac{1}{2,718^{0,921}} = 1 - \frac{1}{2,5} = 0,6.$$

Аналогично рассчитываем пофракционную степень очистки для  $\eta_{(5)} - \eta_{(30)}$  и полученные данные заносим в таблицу 9.2.

Таблица 9.2

Пофракционная степень очистки

Рассчитываемый параметр	Максимальные размеры частицы во фракции $\delta_{ч}$ , мкм							
	0,5	1,0	5,0	8,0	10	15	20	30
$\omega_{ч} \cdot 10^2, м/с$	0,81	1,4	5,85	9,36	11,7	17,55	23,4	35,1
$\eta$ по (9.2)	0,42	0,6	0,977	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999

Общая степень очистки по формуле (9.14):

$$\eta = 0,42 \cdot 0,02 + 0,6 \cdot 0,03 + 0,977 \cdot 0,08 + 0,998 \cdot 0,10 + 0,999 \cdot 0,15 + 0,999 \cdot 0,12 + 0,999 \cdot 0,30 + 0,999 \cdot 0,20 = 0,973.$$

Следовательно, требуемую степень очистки газа при заданных условиях удовлетворяет выбранный электрофильтр ДВП-2×30БЦ.

#### 4. Задание для расчета

Исходные данные для расчета электрофильтров приведены в табл. 9.3-9.4.

Таблица 9.3

Исходные данные для расчета электрофильтров

Вариант	$V_{oz}, м^3/с$	$t_2, ^\circ C$	$C_n, г/м^3$	Разрежение P, Па	$\mu_2 \cdot 10^{-5} Па \cdot с$	$\eta, \%$
1	24	100	65	500	2,19	98
2	36	150	40	900	2,40	99
3	26	90	75	650	2,15	99
4	22	140	50	850	2,37	98
5	35	180	80	1200	2,53	99
6	25	80	65	1400	2,11	99
7	45	190	35	1450	2,58	98
8	54	150	50	950	2,41	99
9	39	90	25	900	2,15	99
10	55	200	75	800	2,60	98

Фракционный состав пыли R( $\delta$ )

Вариант	Содержание фракций пыли R( $\delta$ ), доли единицы							
	0-0,5 мкм	0,5-1,0 мкм	1,0-5,0 мкм	1,0-8,0 мкм	8,0-10 мкм	10-15 мкм	15-20 мкм	20-30 мкм
1	0,02	0,03	0,08	0,10	0,15	0,12	0,30	0,20
2	0,02	0,03	0,08	0,20	0,15	0,22	0,20	0,10
3	0,05	0,08	0,08	0,20	0,09	0,22	0,10	0,18
4	0,10	0,08	0,06	0,20	0,09	0,19	0,10	0,18
5	0,24	0,08	0,06	0,08	0,09	0,11	0,20	0,14
6	0,04	0,09	0,12	0,18	0,20	0,16	0,12	0,09
7	0,09	0,09	0,11	0,14	0,19	0,18	0,10	0,10
8	0,07	0,12	0,11	0,16	0,08	0,11	0,11	0,24
9	0,03	0,08	0,09	0,12	0,11	0,18	0,19	0,20
10	0,11	0,13	0,17	0,12	0,15	0,09	0,08	0,15

**5. Содержание отчета**

- Принцип работы электрофильтров;
- Методика расчета электрофильтров;
- Результаты вычислений.

***Контрольные вопросы***

1. На чем основан принцип действие электрофильтров?
2. Какие параметры учитываются при расчете площади сечения активной зоны электрофильтра?
3. Как рассчитывают общую степень очистки электрофильтра?
4. Опишите методику расчета электрофильтра.

## Список литературы к практическим работам

1. Газоочистные аппараты сухого и мокрого типов: Каталог / Ю.Н. Попов, С.С. Янковский, М.Г. Мазус и др. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1984. – 92с.
2. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: Справ. изд. / Г.М.-А. Алиев. – М.: Metallургия, 1986. – 544 с.
3. ГОСТ 12.2.043–80. Оборудование пылеулавливающее. Классификация.
4. ГОСТ 25199–82. Оборудование пылеулавливающее. Термины и определения.
5. Левашов, С.П. Системы защиты воздушной среды: Учебное пособие / С.П. Левашов. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2003. – 122 с.
6. Ветошкин, А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки. Учебное пособие / А.Г. Ветошкин.– Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 210 с.
7. Сухая очистка запылённых газов. Учебное пособие / Л.В. Щукина, А.А. Асламов, Е.В. Подоплелов. – Ангарск: Изд-во Ангарской гос. техн. академии, 2006. -100 с.
8. Рекомендации по проектированию очистки воздуха от пыли в системах вытяжной вентиляции / ЦНИИПромзданий. – М.: Стройиздат, 1985. – 36 с.
9. Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации циклонов НИИОГАЗ. – Ярославль: ВООГП. 1971. – 138 с.

Технические характеристики батарейных циклонов БЦ-2

Типоразмер циклона	Суммарная площадь сечения циклонных элементов, м <sup>2</sup>	Расход газа, м <sup>3</sup> /ч при перепаде давления ΔP, Па		Число циклонных элементов	Масса, кг
		450	600		
БЦ-2-4х(3+2)	1,012	15000	17400	20	3530
БЦ-2-5х(3+2)	1,265	18900	21800	25	4140
БЦ-2-5х(4+2)	1,518	22600	26100	30	4850
БЦ-2-6х(4+2)	1,822	27200	31400	36	5600
БЦ-2-6х(4+3)	2,125	33160	36600	42	6360
БЦ-2-7х(5+3)	2,834	42200	49000	56	7950

Техническая характеристика батарейных циклонов ПБЦ

Типоразмер циклона	Суммарная площадь сечения циклонных элементов, м <sup>2</sup>	Производительность, тыс. м <sup>3</sup> /ч	Число циклонных элементов	Масса, кг
ПБЦ-15	1,003	12-15	24	4000
ПБЦ-25	1,505	25-30	36	5000
ПБЦ-35	2,006	35-40	48	6100
ПБЦ-50	3,845	50-60	92	12500
ПБЦ-75	4,849	75-85	116	13300
ПБЦ-100	5,852	100-125	140	15300

Техническая характеристика батарейных циклонов ЦБ-254Р

Типоразмер циклона	Производительность, м <sup>3</sup> /ч при скорости потока газа в циклонном элементе 4,5 м/с	Число циклонных элементов	Масса, кг
ЦБ-254Р-25	20580	25	3630
ЦБ-254Р-30	24630	30	4170
ЦБ-254Р-40	32900	40	5210
ЦБ-254Р-50	41100	50	6576
ЦБ-254Р-60	49350	60	7700
ЦБ-254Р-80	65750	80	10000



Технические характеристики электрофильтров

Типоразмер	Площадь активного сечения, м <sup>2</sup>	Площадь осаждения, м <sup>2</sup>	Разряжение э/ф, КПа / кгс/м <sup>2</sup>	Допустимая запыленность, г/м <sup>3</sup>	Габаритные размеры, мм
<b><u>Односекционные электрофильтры</u></b>					
ЭГА1-10-6-4-2	16,5	635	5/500	90	9260*4900*12410
ЭГА1-10-6-4-3		952			13440*4900*13410
ЭГА1-10-6-5-2		794			10540*4900*13410
ЭГА1-10-6-5-3		1190			15390*4900*13410
ЭГА1-10-6-6-2		952			11890*4900*13410
ЭГА1-10-6-6-3		1430			17280*4900*13400
ЭГА1-12-6-5-2	19,8	952	5/500	90	10540*5560*1341
ЭГА1-10-6-5-3		1430			15360*5560*13410
ЭГА1-10-6-6-3	28,7	1656	5/500	90	13440*6160*13910
ЭГА1-10-6-6-3		2210			17620*6160*13910
ЭГА1-10-6-6-3		1656			11820*6160*14910
ЭГА1-10-6-6-3		2485			17280*6160*14910
ЭГА1-10-6-6-3	32,8	1578	5/500	90	10540*6760*14910
ЭГА1-10-6-6-3		2368			15360*6760*14910
ЭГА1-10-6-6-3		3155			20180*6760*14910
Там же ЭГА1-18-7,5-4-4; ЭГА1-20-7,5-4,3; ЭГА1-24-7,5-5-2; ЭГА1-28-7,5-4-3; ЭГА1-30-7,5-4-3; ЭГА1-36-9-4-3; ЭГА1-40-7,5-4-3.					
<b><u>Двухсекционные электрофильтры</u></b>					
ЭГА2-48-12-6-3	1558	13490	5/500	90	17280*17540*19910
ЭГА2-48-12-6-4		17990			22740*17540*19910
ЭГА2-56-9-6-2	137	7905	5/500	90	11820*19940*16910
ЭГА2-56-9-6-3		11860			17280*19940*16910
ЭГА2-56-9-6-4		15820			22740*19940*16910
ЭГА2-56-12-6-3	181,7	15740	5/500	90	17280*19940*19910
ЭГА2-56-12-6-4		20990			22740*19940*19910

Основные параметры электрофильтров

Марка электрофильтра	Площадь сечения активной зоны, F, м <sup>2</sup>	Максимальная температура газа на входе, °C	Наибольшая степень очистки, $\eta$	Удельный расход электроэнергии на очистку 1000 м <sup>3</sup> /ч газа, кВт/ч	Параметры электрофильтров, м			Назначение
					L	R	R <sub>1</sub> · 10 <sup>3</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
УГ 1-2-10	10	250	0,99	0,3	2,5	-	1,5	Сухая очистка газов, образующихся в процессе сушки, обжига, агломерации, сжигания топлива
УГ 1-2-15	15	250						
УГ 2-3-26	26							
УГ 2-3-37	37							
УГ 2-3-53	53							
УГ 2-3-74	74	250						
УГ 3-3-88	88							
УГ 3-3-115	115							
УГ 3-4-177	177							
УГ 3-4-230	230	265						
УГ 3-4-265	265							
Ц 7,5-2СК	7,5	150	0,95-0,99	0,3	3,4	-	1,0	Очистка отходящих газов сушилок
Ц 11,5-2СК	11,5	170		0,2				
Ц 23-3 ТБ	23			0,3				
ДВП 2×16,5-бц	33	170	0,97-0,99	0,11	7,9		1,5	Очистка дым. газов от золы после батарейных циклонов
ДВП 2×30-бц	60							
СГ-15-3	15	250	0,99	0,65	4,8		1,2	Улавливание сажи
СГ-15-2								
ПГ-5,3	5,3	65-120	0,95	0,37	3,5	0,135	1,0	Очистка газов от пыли и смолы-при газификации углем
ПГ-7,6	7,6	0,35		1,2				

Окончание приложения 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
С-3,5	3,5	100	0,98	0,4	3,5	0,125	1,5	Очистка газов от смолы и масел в коксохимических производствах
С-5	5							
С-7,2	7,2							
ЦГТ1-60-3	60	425	0,97	0,3	2,5	-	1,1	Очистка неагрессивных высокотемпературных газов от пыли
ЦГТ1-80-3	80							
ШМК-2	2	20-45	0,99	0,4	3,5	0,125	1,5	Очистка газов в производстве серной кислоты, мышьяка, селена
ШМК-3	3							
ШМК-6,6	6,6							

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
1. Дисперсный состав пыли.....	4
2. Расчет пылеосадительной камеры.....	9
3. Основные факторы, влияющие на степень улавливания пыли в циклонах.....	14
4. Расчёт циклонов .....	19
5. Расчёт батарейных циклонов.....	26
6. Расчёт вихревых пылеуловителей .....	32
7. Расчёт пенных пылеуловителей.....	39
8. Расчёт рукавных фильтров.....	46
9. Расчёт электрофильтров.....	54
Список литературы к практическим работам .....	63
Приложение 1.....	64
Приложение 2.....	65
Приложение 3.....	66