

МОДУЛЬ 1

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АТМОСФЕРЫ

Задание № 1. Расчет характеристик рукавных фильтров

Цель работы – изучить методику и произвести расчет количественных и качественных характеристик рукавных фильтров.

Теоретические сведения

В промышленности наибольшее применение получили рукавные фильтры (рис. 1.1). При регенерации материала загрязненных рукавных фильтров используют обычно комбинированные методы.

Зернистые (насыпные) фильтры применяются в основном в цементной промышленности. Их недостаток – высокое гидравлическое сопротивление и сложность регенерации.

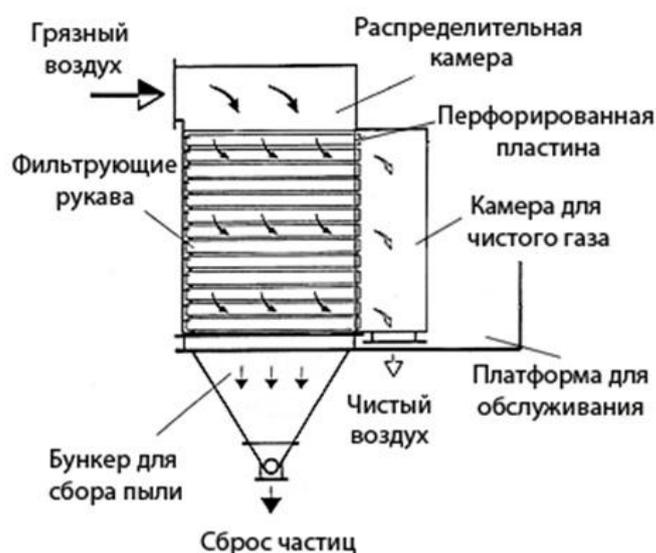


Рис. 1.1. Схема рукавного фильтра

Ниже в табл. 1.1–1.3 приводятся характеристики ряда рукавных и зернистых фильтров.

Фильтры рассмотренных типов имеют достаточно хорошую эффективность. Степень очистки достигает 99,5 %, в том числе для мелкодисперсных (< 3 мкм) пылей. Для зернистых фильтров концентрации на входе могут достигать 100 г/м³. Их производительность – до 20–25 м³/м²·мин.

Таблица 1.1

Нормальный ряд фильтров ФРО
(фильтры рукавные с обратной продувкой)

Марка	Площадь фильтрующей поверхности, м ²	Число рукавов	Число секций	Высота рукавов, мм	Диаметр рукава, мм
ФРО-1250-1	1266	252	6	8	200
ФРО-1650-1	1688	336	8	8	200
ФРО-2500-1	2530	504	12	8	200
ФРО-4100-2	4104	432	8	10	300
ФРО-5100-2	5130	540	10	10	300
ФРО-6000-2	6156	648	12	10	300
ФРО-7000-2	7182	756	14	10	300
ФРО-8000-2	8208	864	16	10	300
ФРО-20000-3	20520	2160	10	10	300
ФРО-24000-3	24624	2592	12	10	300

Примечание. Ткань – лавсан (130 °С) или стекловолокно (250–300 °С).

Таблица 1.2

Фильтры типа УРФМ с регенерацией обратной продувкой
и встряхиванием

Характеристика фильтра	Марка фильтра	
	УРФМ II М	УРФМ III
Площадь фильтрующей поверхности, м ²	2300	1610
Количество секций	20	14
Число рукавов	840	488
Габаритные размеры L × B × H	23 × 4,8 × 13,1	16,1 × 4,8 × 13,1
Масса, т	109	78,3

Примечание. Диаметр рукавов – 220 мм, высота – 4,063 м, ткань – нитрон (130 °С).

Таблица 1.3. Технические характеристики насыпных фильтров с обратной продувкой и вибрацией

Марка	Площадь фильтрующей поверхности, мм ²	Число		d гранул, мм	g, м ³ /(м ² ·мин)	Δp, Па	T _{max} газов	C ₀ , г/м ³
		секций	фильтрующих слоев					
ЗФ-4М	2–4	2–4	3	3–10	20	600–1500	140	20
ЗФ-6М	7,8–31,2	2–8	3	3–10	20	600–1500	140	20
ЗФ-8М	8–120	2–30	3	3–10	20	600–1500	140	20

Необходимая поверхность фильтра определяется, исходя из газовой нагрузки, м³/(м²·мин):

$$q_{\text{ф}} = q_{\text{н}} C_1 C_2 C_3 C_4 C_5, \quad (1.1)$$

где q_n – константа газовой нагрузки для различных видов пылей; C_1 – коэффициент, учитывающий способ регенерации; C_2 – коэффициент, учитывающий начальную запыленность газов z , г/м³; C_3 – коэффициент, учитывающий среднемедианный диаметр пыли d_m ; C_4 – коэффициент, учитывающий температуру газа T_r ; C_5 – коэффициент, учитывающий требования к уровню очистки. Указанные величины определяются по табл. 1.4. C_2 определяется по табл. 1.5.

Таблица 1.4

Значения констант для определения необходимой поверхности фильтра

Параметр	Условия	Значение
q_n	Жмых. Зерно. Комбикорм. Мука. Кожа. Опилки. Табак. Картон.	3,5
	Асбест и другие волокнистые материалы, в том числе целлюлозные; пыль, образующаяся при выбивке отливок из формы, при полировке; кальцинированная сода, тальк, гипс, гашеная известь, соль, песок и пыль от пескоструйных аппаратов.	2,6
	Глинозем, плавиковый шпат, каолин, известняк, кварц, руда, минеральная пыль, уголь, цемент, порошковые пигменты, резина, сахар.	2,0
	Кокс, летучая зола, порошки металлов, оксиды металлов, пластмассы, красители, силикаты, крахмал, сухие химикаты из нефтяного сырья.	1,7
	Технический углерод, активированный уголь, моющие вещества, порошковое молоко, возгоны цветных и черных металлов.	1,2
C_1	Импульсная регенерация ткани	1,0
	Импульсная регенерация нетканых материалов	1,1
	Обратная продувка со встряхиванием	0,7–0,85
	Обратная продувка без встряхивания	0,55–0,7

C ₃	$d_m > 100$ мкм	1,2–1,4
	$50 < d_m < 100$	1,1
	$10 < d_m < 50$	1,0
	$3 < d_m < 10$	0,9
	$d_m < 3$ мкм	0,7–0,9
C ₄	$t_{го} = 20$ °C	1
	$t_{го} = 40$ °C	0,9
	$t_{го} = 60$ °C	0,84
	$t_{го} = 80$ °C	0,78
	$t_{го} = 100$ °C	0,75
	$t_{го} = 120$ °C	0,73
	$t_{го} = 140$ °C	0,72
	$t_{го} = 160$ °C	0,70
C ₅	Концентрация пыли в очищенном газе – 30 мг/м ³ и выше	1
	Концентрация пыли в очищенном газе – 30 мг/м ³ и ниже	0,95

Таблица 1.5

Зависимость коэффициента C₂ от запыленности газа

Запыленность газа, z _о , г/м ³	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Коэффициент C ₂	1,00	0,95	0,92	0,90	0,87	0,86	0,855	0,85	0,84	0,83

Скорость фильтрации (м/с) эквивалентна понятию газовой нагрузки и определяется по формуле

$$\omega_{\phi} = q_{\phi} / 60. \quad (1.2)$$

Полное гидравлическое сопротивление фильтра определяется по формуле

$$\Delta p = \Delta p_{к} + \Delta p_{\phi}, \quad (1.3)$$

где – Δp полное гидравлическое сопротивление корпуса аппарата и фильтра;

Δp_k – потеря давления при прохождении очищаемого газа через корпус аппарата, Па; Δp_ϕ – гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки, Па.

Потеря давления при прохождении очищаемого газа через корпус аппарата определяется по формуле

$$\Delta p_k = \xi \frac{\omega_{вх}^2 \rho_r}{2}, \quad (1.4)$$

где ξ – коэффициент аэродинамического сопротивления корпуса аппарата (без фильтровального слоя); средняя плотность воздуха $\rho_r = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

Гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки складывается из постоянной составляющей Δp_1 – сопротивления фильтровальной перегородки с учетом пыли, оставшейся после регенерации, и переменной составляющей и Δp_2 – сопротивления, накапливающегося на перегородке за счет осевшей на ней пыли:

$$\Delta p_\phi = \Delta p_1 + \Delta p_2, \quad (1.5)$$

$$\Delta p_1 = A \mu \omega_\phi, \quad (1.6)$$

где A – коэффициент, м^{-1} ; μ – коэффициент динамической вязкости газа, Па·с.

Исходя из оптимальных условий работы фильтра, величина Δp_2 может приниматься равной 600–800 Па для пыли со среднемедианным диаметром $d_m < 20 \text{ мкм}$ и 250–350 Па при $d_m > 20 \text{ мкм}$.

Необходимая продолжительность периода фильтрации между регенерациями определяется по формуле

$$t_\phi = \frac{\Delta p_2}{B \mu \omega_\phi^2 z}, \quad (1.7)$$

где B – коэффициент, м/кг ; z – начальная запыленность газов при рабочих условиях, кг/м^3 .

Фактическая вязкость газа вычисляется по формуле

$$\mu = \mu_0 \frac{273+C}{273+t+C} \left(\frac{273+t}{273} \right)^{3/2}, \quad (1.8)$$

где C – константа Сюзерленда (для воздуха $C = 124$); t – температура очищаемого газа, $^\circ\text{C}$.

Определяют значения коэффициентов по формулам:

$$A = 670 \cdot 10^{-6} \frac{(1-\varepsilon_{\text{п}})^2 \varepsilon_{\text{тк}}^3 h_0^{2/3}}{d_m^{1.75} \varepsilon_0^3}, \quad (1.9)$$

$$B = 817 \frac{1-\varepsilon_0}{d_m^2 \varepsilon_0^3 \rho_{\text{ч}}}, \quad (1.10)$$

где ε_0 и $\varepsilon_{\text{тк}}$ – пористость слоя пыли и ткани соответственно, доли единиц; h_0 – удельное сопротивление ткани, отнесенное к толщине 1 м при скорости 1 м/с, Па; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частиц пыли, кг/м³; d_m – среднемедианный диаметр частиц пыли, м; для определения величин $\varepsilon_{\text{тк}}$ и h_0 можно воспользоваться табл. 1.6 или справочной литературой.

Пористость слоя пыли приближенно определяется выражением

$$\varepsilon_0 = 1 - 79 d_m^{0.47}. \quad (1.11)$$

Таблица 1.6

Некоторые свойства фильтровальных материалов

Основное волокно	Термостойкость, °С	Пористость $\varepsilon_{\text{тк}}$, доли единиц	Удельное гидравлическое сопротивление h_0 , Па
Шерсть	80–100	0,86	$0,84 \cdot 10^5$
Нитрон	130	0,83	$0,83 \cdot 10^5$
Стекловолокно	250–300	0,55	$27 \cdot 10^4$

Начальная запыленность газа перед фильтром при рабочих условиях определяется из соотношения

$$Z = Z_0 \frac{V_r'}{V_r}. \quad (1.12)$$

Для выбора аппарата определяется площадь поверхности фильтрации по формуле

$$F_{\text{ф}} = \frac{V_r + V_p'}{60 q_{\text{ф}}}, \quad (1.13)$$

где V_{Γ} – заданный расход газа, идущего на фильтрование, м³/ч; V_p' – предварительно рассчитанная величина расхода воздуха на регенерацию, м³/ч, определяемая при допущении, что скорость обратной продувки равна скорости фильтрования, определяемой по формуле

$$V_p' = \frac{V_{\Gamma} n_p t_p}{3600}, \quad (1.14)$$

где t_p – время отключения секции на обратную продувку (принимается в пределах 15–20 с); n_p – количество регенераций в течение 1 часа.

Выбор фильтра производится по каталогу в соответствии с принятыми условиями фильтрации (тип ткани, способ регенерации) с запасом 10–15 % по площади фильтрации. Затем уточняются параметры фильтра.

Площадь поверхности фильтрации, отключаемая на регенерацию в течение 1 ч, равна

$$F_p = \frac{N_c F_c n_p t_p}{3600}, \quad (1.15)$$

где N_c – число секций выбранного аппарата; F_c – площадь фильтрования одной секции, м².

Далее уточняется расход воздуха, подаваемого на обратную продувку в течение часа,

$$V_p = N_c F_c n_p t_p \omega_{\text{обр}}, \quad (1.16)$$

где $\omega_{\text{обр}}$ – скорость обратной продувки, равная

$$\omega_{\text{обр}} = \frac{k_p \varepsilon_{\text{тк}}}{60}, \quad (1.17)$$

где k_p – коэффициент регенерируемости тканей, равный 1,6–2,0 м/мин.

Окончательная площадь фильтрации должна быть равна или близка к площади фильтрации выбранного аппарата

$$F_{\Phi} = \frac{V_{\Gamma} + V_p}{60 q_{\Phi}}. \quad (1.18)$$

Уточненная газовая нагрузка определяется по формуле

$$q_{\Phi}' = \frac{\frac{V_{\Gamma} + V_p}{60} + F_c q_{\Phi}}{F_{\Phi} - F_c}, \quad (1.19)$$

результат по которой должен быть близок к расчетному значению q_{Φ} .

Продолжительность периода фильтрования между двумя регенерациями

всегда должна быть больше суммарной продолжительности регенерации остальных секций

$$t_{\phi} > (Nc - 1)t_p. \quad (1.20)$$

Пример расчета

Рассчитать и выбрать фильтровальный агрегат для следующих условий:

- объем очищаемого газа $V_{\Gamma}^{\prime} = 34\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$ при нормальных условиях,
- температура газа $t_{\Gamma o} = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$, газовая фаза по составу сходна с воздухом,
- подсос воздуха с температурой для охлаждения газа до допустимой по применению нитрона $t_{\Gamma} = 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- пыль – летучая зола со среднемедианным диаметром $d_m = 1 \text{ мкм}$,
- плотность материала пыли $\rho_{\text{ч}} = 2900 \text{ кг/м}^3$,
- начальная запыленность при нормальных условиях $z_o = 15,2 \text{ г/м}^3$,
- марка ткани фильтра – нитрон;
- регенерация – обратная продувка со встряхиванием.

1. Объем очищаемого газа с учетом подсоса воздуха, необходимого для создания допустимой температуры для ткани нитрон, равен

$$V_{B O} = V_{\Gamma}^{\prime} \frac{t_{\Gamma o} - t_{\Gamma}}{t_{\Gamma} - t_B} = 34000 \frac{150 - 130}{130 - 25} = 6,48 \cdot 10^3 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

2. Полный объем очищаемого газа с учетом подсоса воздуха при нормальных условиях равен

$$V_{\Gamma o} = V_{\Gamma}^{\prime} + V_{B O} = 3,4 \cdot 10^4 + 6,48 \cdot 10^3 = 4,05 \cdot 10^4 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

3. Расход газа, идущего на фильтрацию при рабочих условиях:

$$V_{\Gamma} = V_{\Gamma o} \frac{273 + t_{\Gamma}}{273} = 4,05 \cdot 10^4 \frac{273 + 150}{273} = 6,28 \cdot 10^4 \text{ м}^3 / \text{ч}$$

4. Начальная запыленность газа перед фильтром при рабочих условиях:

$$Z = Z_o \frac{V_{\Gamma}^{\prime}}{V_{\Gamma}} = 15,2 \frac{3,4 \cdot 10^4}{6,28 \cdot 10^4} = 8,24 \text{ г} / \text{м}^3.$$

5. Допустимая газовая нагрузка по формуле (1.1):

$$q_{\phi} = q_{\text{н}} C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 = 1,7 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 0,71 \cdot 0,95 = 0,771 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{м и н}),$$

где $C_2 = 1$ из таблицы 1.5, остальные значения из таблицы 1.4:

Параметр	Условия	Значение
$q_{\text{н}}$	Кокс, летучая зола, порошки металлов, оксиды металлов, пластмассы, красители, силикаты, крахмал, сухие химикаты из нефтяного сырья.	1,7
C_1	Обратная продувка со встряхиванием	0,7–0,85
C_3	$d_m < 3 \text{ мкм}$	0,7–0,9
C_4	$t_{\text{го}} = 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$	0,72
	$t_{\text{го}} = 160 \text{ }^{\circ}\text{C}$	0,70
C_5	Концентрация пыли в очищенном газе 30 мг/м^3 и ниже	0,95

6. Потеря давления при прохождении очищаемого газа через корпус аппарата при принятом коэффициенте гидравлического сопротивления корпуса $\xi = 2$ и скорости на входе $\omega_{\text{вх}} = 8 \text{ м/с}$:

$$\Delta p_{\text{к}} = \xi \frac{\omega_{\text{вх}}^2 \rho_{\text{г}}}{2} = 2 \cdot 8^2 \cdot \frac{1,2}{2} = 76,8 \text{ Па}.$$

7. Коэффициент динамической вязкости газа при рабочих условиях (коэффициент динамической вязкости при нормальных условиях $17,5 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ и константа Сюзерленда $C = 124$) по формуле (1.8):

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_0 \frac{273 + C}{273 + t + C} \left(\frac{273 + t}{273} \right)^{3/2} = 17,5 \cdot 10^6 \frac{273 + 124}{273 + 150 + 124} \left(\frac{273 + 150}{273} \right)^{3/2} = \\ &= 24,5 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с}. \end{aligned}$$

8. Пористость слоя пыли по формуле (1.11):

$$\varepsilon_0 = 1 - 79d_m^{0,47} = 1 - 79(1 \cdot 10^{-6})^{0,47} = 0,880.$$

9. Удельное гидравлическое сопротивление нитрона по таблице 1.6 $h_0 = 0,83 \cdot 10^5$.

10. Пористость нитрона также по таблице 1.6 $\varepsilon_{\text{тк}} = 0,830$.

11. Скорость фильтрации в соответствии с формулой (1.2):

$$\omega_{\phi} = q_{\phi}/60 = 0,771/60 = 0,0129 \text{ м/с}.$$

12. Коэффициент А по формуле (1.9):

$$A = 670 \cdot 10^{-6} \frac{(1 - \varepsilon_{\pi})^2 \varepsilon_{TK}^3 h_0^{2/3}}{d_m^{1.75} \varepsilon_0^3} =$$

$$= \frac{670 \cdot 10^{-6} (1 - 0,880)^2 \cdot 0,830^3 (0,83 \cdot 10^5)^{2/3}}{(1 \cdot 10^{-6})^{1,75} \cdot 0,880^3} = 4,87 \cdot 10^8 \text{ М}^{-1}.$$

Коэффициент В по формуле (1.10):

$$B = 817 \frac{1 - \varepsilon_0}{d_m^2 \varepsilon_0^3 \rho_{\pi}} = \frac{817(1 - 0,880)}{(1 \cdot 10^{-6})^2 0,880^3 \cdot 2900} = 4,96 \cdot 10^{10} \text{ М/К Г}.$$

13. Постоянное гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки с учетом пыли, оставшейся на ней после регенерации, по формуле (1.6):

$$\Delta p_1 = A \mu \omega_{\phi} = 4,87 \cdot 10^8 \cdot 24,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1,29 \cdot 10^{-2} = 154 \text{ Па}.$$

14. Гидравлическое сопротивление накапливающегося на фильтре слоя перед регенерацией из условий его устойчивости $\Delta p_2 = 700$ Па (для мелкой пыли $d_m < 20$ мкм).

15. Общее гидравлическое сопротивление аппарата по формуле (1.3):

$$\Delta p = 76,8 + 154 + 700 = 930,8 \text{ Па}.$$

16. Продолжительность периода фильтрации между двумя регенерациями по формуле (1.7):

$$t_{\phi} = \frac{\Delta p_2}{B \mu \omega_{\phi}^2 z} = \frac{700}{4,96 \cdot 10^{10} \cdot 24,5 \cdot 10^{-6} \cdot (1,29 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 8,24 \cdot 10^{-3}} = 420 \text{ с}.$$

17. Предварительно рассчитанная величина расхода воздуха на регенерацию в соответствии с формулой (1.14):

$$V_p / = \frac{V_r n_p t_p}{3600} = \frac{6,28 \cdot 10^4 \cdot 9 \cdot 20}{3600} = 3,14 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где t_p – время отключения секции на обратную продувку (принимается в пределах 15–20 с); $n_p = 3600/420 \approx 9$ – количество регенераций в течение 1 часа.

18. Для выбора аппарата определяется площадь поверхности фильтрации

$$F_{\phi} = \frac{V_r + V_p'}{60q_{\phi}} = \frac{6,28 \cdot 10^4 + 0,314 \cdot 10^4}{60 \cdot 0,771} = 1,425 \cdot 10^3 \text{ м}^2.$$

С учетом запаса по площади фильтрации выбираем фильтр УРФМ-III.

19. Площадь поверхности фильтрации, отключаемая на регенерацию в течение 1 ч:

$$F_p = \frac{N_c F_c n_p t_p}{3600} = \frac{1610 \cdot 20 \cdot 9}{3600} = 80,5 \text{ м}^2.$$

Принимаем к отключению 1 секцию в течение часа. Тогда количество регенераций определится по формуле

$$n_p = \frac{3600}{N_c F_c t_p} F_p = \frac{3600}{1610 \cdot 20 \cdot 13} 115 = 12,85.$$

20. Находим скорость обратной продувки:

$$\omega_{\text{обр}} = \frac{k_p \varepsilon_{\text{ТК}}}{60} = \frac{1,6 \cdot 0,83}{60} = 0,022 \text{ м/с.}$$

21. Уточняется расход воздуха, подаваемого на обратную продувку в течение часа:

$$V_p = N_c F_c n_p t_p \omega_{\text{обр}} = 1610 \cdot 20 \cdot 12,85 \cdot 0,022 = 9209,2 \text{ м}^3.$$

22. Окончательная площадь фильтрации должна быть равна или близка к площади фильтрации выбранного аппарата 1610 м²:

$$F_{\phi} = \frac{V_r + V_p}{60q_{\phi}} = \frac{6,28 \cdot 10^4 + 0,921 \cdot 10^4}{60 \cdot 0,771} = 1,557 \cdot 10^3 \text{ м}^2.$$

23. Уточняем газовую нагрузку:

$$q_{\phi}' = \frac{\frac{V_r}{60} + F_c q_{\phi}}{F_{\phi} - F_c} = \frac{\frac{6,28 \cdot 10^4}{60} + 115 \cdot 0,771}{1610 - 115} = 0,759 \text{ м/мин.}$$

24. Проверяем суммарное время регенерации:

$$(N_c - 1) t_p = (14 - 1) \cdot 20 = 260 \text{ с,}$$

что меньше продолжительности времени фильтрования $t_{\phi} = 420 \text{ с}$.

Так как полученные данные выполнены при соблюдении всех условий, фильтр марки УРФМ-III выбран правильно.

Алгоритм выполнения практической работы

1. Изучить теоретические сведения по методике определения количественных и качественных характеристик рукавных фильтров, которая представлена в методических указаниях к работе.

2. Выбрать вариант задания (табл. 1.7). Номер варианта выбирается для каждого студента по первым двум буквам его фамилии (табл. 1.8).

3. Произвести необходимые расчеты.

4. Составить отчет о практической работе в соответствии с требованиями (прил. А).

5. Ответить на вопросы самоконтроля.

Таблица 1.7

Вариант	Объем очищаемого газа при нормальных условиях $V'_г, \text{ м}^3/\text{ч}$	Температура газа $t_{г0}, \text{ }^\circ\text{C}$	Среднегеометрический диаметр пыли $d_m, \text{ мкм}$	Плотность материала пыли $\rho_p, \text{ кг/м}^3$	Начальная запыленность при нормальных условиях $Z_0, \text{ г/м}^3$	Метод регенерации	Пыль
1.	37000	160	1	1300	13,7	Обратная продувка и встряхивание	Целлюлоза
2.	29000	140	1,5	2700	15,4	Обратная продувка	Гипс
3.	35000	250	2	2700	18,3	Обратная продувка	Асбест
4.	27000	145	4	2330	14,1	Обратная продувка и встряхивание	Песок
5.	25000	140	2,5	1900	16,8	Обратная продувка и встряхивание	Минеральная пыль
6.	38000	155	2	1940	12,8	Обратная продувка	Летучая зола
7.	32500	160	2,5	1800	13,4	Обратная продувка и встряхивание	Минеральная пыль
8.	26700	150	2	1450	15,2	Обратная продувка и	Пластмасса

Вариант	Объем очищаемого газа при нормальных условиях $V'_г, \text{ м}^3/\text{ч}$	Температура газа $t_{г0}, \text{ }^\circ\text{C}$	Среднегеометрический диаметр пыли $d_m, \text{ мкм}$	Плотность материала пыли $\rho_ч, \text{ кг/м}^3$	Начальная запыленность при нормальных условиях $z_0, \text{ г/м}^3$	Метод регенерации	Пыль
						встряхивание	
9.	38000	160	2,8	2300	12,4	Обратная продувка	Металлические порошки
10.	35500	120	3,5	2300	16,2	Обратная продувка и встряхивание	Песок
11.	36000	140	1,5	2830	14,7	Обратная продувка и встряхивание	Химикаты из нефтяного сырья
12.	28500	135	1	2650	17,4	Обратная продувка	Тальк
13.	38500	110	2	600	14,3	Обратная продувка и встряхивание	Картон
14.	26000	145	2,5	700	18,3	Обратная продувка и встряхивание	Опилки
15.	28500	310	1	2700	14,9	Обратная продувка	Гипс
16.	37000	150	2	1700	12,8	Обратная продувка и	Глинозем

Вариант	Объем очищаемого газа при нормальных условиях $V'_г, \text{ м}^3/\text{ч}$	Температура газа $t_{г0}, \text{ }^\circ\text{C}$	Среднегеометрический диаметр пыли $d_m, \text{ мкм}$	Плотность материала пыли $\rho_p, \text{ кг/м}^3$	Начальная запыленность при нормальных условиях $Z_0, \text{ г/м}^3$	Метод регенерации	Пыль
						встряхивание	
17.	32500	90	3,5	700	12,9	Обратная продувка и встряхивание	Опилки
18.	23700	210	1,7	2350	17,2	Обратная продувка	Асбест
19.	40000	160	2,5	1300	11,4	Обратная продувка и встряхивание	Целлюлоза
20.	34500	125	2	2350	16,2	Обратная продувка и встряхивание	Соль
21.	37000	220	1	700	18,2	Обратная продувка	Мука
22.	29000	100	1,5	2700	15,4	Обратная продувка и встряхивание	Гипс
23.	40000	350	2	2700	18,3	Обратная продувка и встряхивание	Известняк
24.	28000	250	2,5	1200	17,1	Обратная продувка	Резина
25.	34000	140	4	700	16,8	Обратная продувка и	Опилки

Вариант	Объем очищаемого газа при нормальных условиях $V'_г, \text{ м}^3/\text{ч}$	Температура газа $t_{г0}, \text{ }^\circ\text{C}$	Среднегеометрический диаметр пыли $d_m, \text{ мкм}$	Плотность материала пыли $\rho_ч, \text{ кг/м}^3$	Начальная запыленность при нормальных условиях $Z_0, \text{ г/м}^3$	Метод регенерации	Пыль
						встряхивание	
26.	39000	155	1	2700	12,8	Обратная продувка и встряхивание	Гальк
27.	32000	260	3,5	120	13,4	Обратная продувка и встряхивание	Жмых
28.	24700	150	1	2900	15,2	Обратная продувка и встряхивание	Оксиды металлов
29.	40000	160	3	2300	15,4	Обратная продувка и встряхивание	Руда
30.	33500	280	2,5	1640	13,5	Обратная продувка	Кокс
31.	36000	90	1,5	2600	15,0	Обратная продувка и встряхивание	Асбест
32.	28000	130	1,5	1650	15,8	Обратная продувка и	Пластмассы

Вариант	Объем очищаемого газа при нормальных условиях $V'_г, \text{ м}^3/\text{ч}$	Температура газа $t_{г0}, \text{ }^\circ\text{C}$	Среднегеометрический диаметр пыли $d_m, \text{ мкм}$	Плотность материала пыли $\rho_p, \text{ кг/м}^3$	Начальная запыленность при нормальных условиях $Z_0, \text{ г/м}^3$	Метод регенерации	Пыль
						встряхивание	
33.	38500	320	2	2540	14,3	Обратная продувка	Известняк
34.	26500	140	2,5	120	19,3	Обратная продувка и встряхивание	Жмых
35.	28500	120	1	1800	14,8	Обратная продувка и встряхивание	Красители
36.	37500	300	2	2940	12,8	Обратная продувка	Металлические порошки
37.	32500	80	2	1800	12,9	Обратная продувка и встряхивание	Химикаты из нефтяного сырья
38.	23700	110	1,8	1450	17,2	Обратная продувка и встряхивание	Цемент
39.	40000	130	4,5	700	8,4	Обратная продувка	Опилки

Вариант	Объем очищаемого газа при нормальных условиях $V'_г, \text{ м}^3/\text{ч}$	Температура газа $t_{г0}, \text{ }^\circ\text{C}$	Среднегеометрический диаметр пыли $d_m, \text{ мкм}$	Плотность материала пыли $\rho_p, \text{ кг/м}^3$	Начальная запыленность при нормальных условиях $Z_0, \text{ г/м}^3$	Метод регенерации	Пыль
40.	34500	125	2	1300	16,2	Обратная продувка и встряхивание	Целлюлоза
41.	38000	180	1,5	2920	13,7	Обратная продувка и встряхивание	Летучая зола
42.	28000	140	2	2800	15,8	Обратная продувка и встряхивание	Минеральная пыль
43.	34000	340	2,5	1600	20,3	Обратная продувка	Глинозем
44.	22000	115	1	1330	14,3	Обратная продувка и встряхивание	Красители
45.	25000	80	3,2	1580	16,8	Обратная продувка и встряхивание	Пластмассы
46.	38000	290	2	1300	19,8	Обратная продувка	Кокс
47.	33500	130	4	2140	20,4	Обратная продувка и встряхивание	Песок

Вариант	Объем очищаемого газа при нормальных условиях $V'_г, \text{ м}^3/\text{ч}$	Температура газа $t_{г0}, \text{ }^\circ\text{C}$	Среднегеометрический диаметр пыли $d_m, \text{ мкм}$	Плотность материала пыли $\rho_p, \text{ кг/м}^3$	Начальная запыленность при нормальных условиях $Z_0, \text{ г/м}^3$	Метод регенерации	Пыль
48.	26000	120	2	1200	15,3	Обратная продувка и встряхивание	Резина
49.	38500	270	2,5	2350	12,8	Обратная продувка	Уголь
50.	23000	140	4,5	120	17,8	Обратная продувка и встряхивание	Жмых

Выбор варианта

Первые две буквы фамилии	№ варианта	Первые две буквы фамилии	№ варианта
Аа-Ак	1	Ма-Мл	21
Ал-Ая	2	Мк-Мя	22
Ба-Бк	3	На-Нл	23
Бл-Бя	4	Нм-Ня	24
Ва-Вк	5	Оа-Ок	25
Вл-Вя	6	Ол-Оя	26
Га-Гк	7	Па-Пк	27
Гл-Гя	8	Пл-Пя	28
Да-Дк	9	Ра-Рк	29
Дл-Дя	10	Рл-Ря	30
Еа-Ея	11	Са-Ск	31
Ёа-Ёя	12	Сл-Ся	32
Жа-Жя	13	Та-Тк	33
За-Зя	14	Тл-Тя	34
Иа-Ик	15	Уа-Ул	35
Ил-Ия	16	Ум-Уя	36
Ка-Кл	17	Фа-Фя	37
Км-Кя	18	Ха-Хя	38
Ла-Лк	19	Ца-Ця	39
Лл-Ля	20	Ча-Чя	40

Первые две буквы фамилии	№ варианта	Первые две буквы фамилии	№ варианта
Ша-Шл	41	Эл-Эя	46
Шм-Шя	42	Юа-Юл	47
Ща-Щл	43	Юм-Юя	48
Щм-Щя	44	Яа-Ял	49
Эа-Эк	45	Ям-Яя	50

Вопросы самоконтроля

1. Назовите основные количественные и качественные характеристики рукавных фильтров.
2. От каких величин зависит необходимая продолжительность периода фильтрации между регенерациями?
3. Как определяется площадь поверхности фильтрации для выбора аппарата?
4. В каких случаях рукавные и зернистые фильтры наиболее эффективны?

Задание № 2. Расчет и проектирование аппаратов механической очистки пылегазовых выбросов

Цель работы – ознакомиться с принципом работы циклона – аппарата сухой механической очистки от пыли – и рассчитать основные его параметры для выбранного источника образования пыли.

Основные теоретические сведения

Основными источниками загрязнения атмосферного воздуха являются автомобили, промышленные предприятия и тепловые электростанции. Очистка промышленных выбросов осуществляется в аппаратах сухой и мокрой очистки.

Широкое применение для сухой очистки газов от пыли получили циклоны различных типов. Циклоны не применяются для очистки влажных газов и взрывоопасных сред. 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. Наиболее часто применяются цилиндрические циклоны марок ЦН-11 (рис. 2.1), ЦН-15, ЦН-24, конические СК ЦН-34, СК ЦН-34М, СДК ЦН-33. Геометрические размеры цилиндрических и конических циклонов указываются в долях от внутреннего диаметра.

Газовый поток вводится в циклон через патрубок по касательной к внутренней поверхности корпуса и совершает вращательно-поступательное движение вдоль корпуса к бункеру. На частицу пыли действуют сила тяжести, сила сопротивления среды, центробежная сила. Центробежная сила направлена по радиусу к стенкам циклона и определяется по формуле

$$F_{ц} = \frac{\pi d_{ч}^3 W_{тг}^2}{6R} (\rho_{ч} - \rho_{г}), \quad (2.1)$$

где $d_{ч}$ – диаметр частиц, м; $W_{тг}$ – тангенциальная составляющая скорости газа, м/с; R – радиус циклона, м, $\rho_{ч}$ – плотность частиц пыли, кг/м³, $\rho_{г}$ – плотность газа, кг/м³.

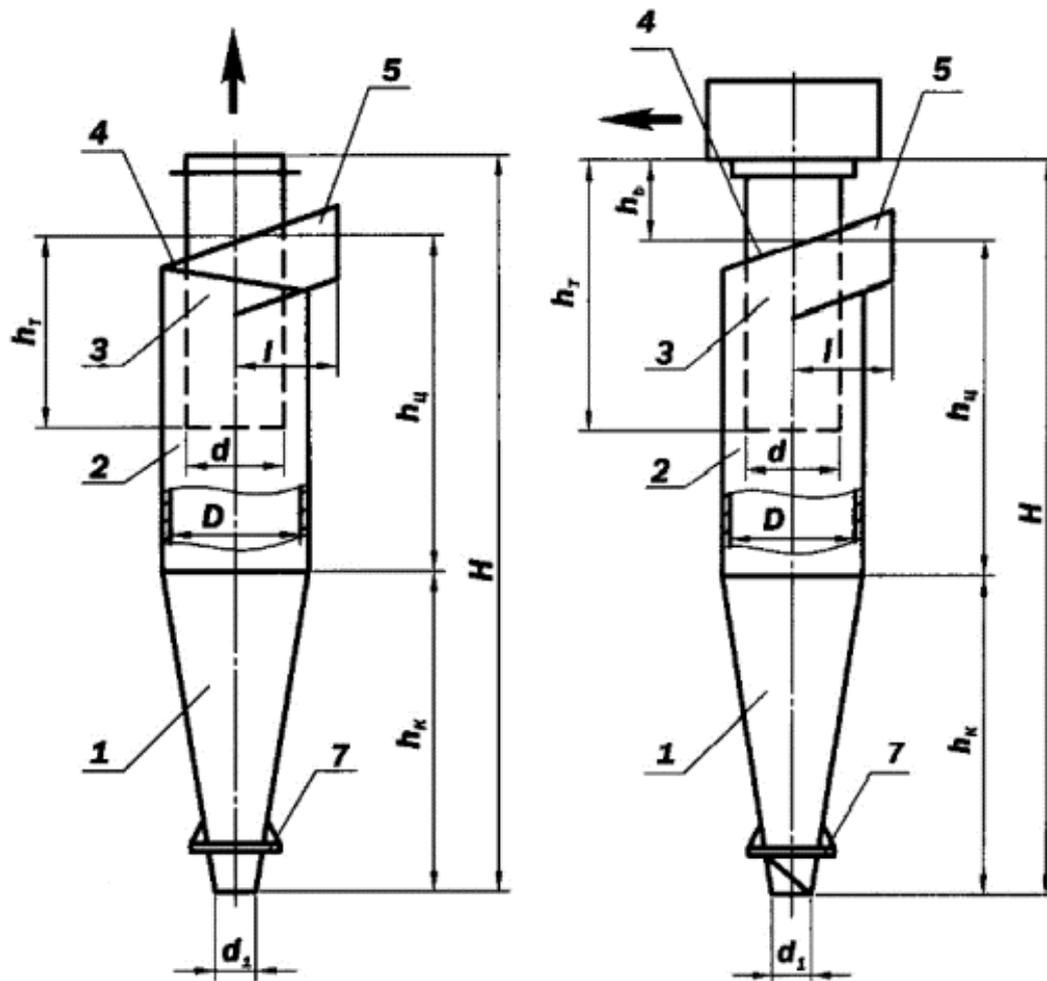


Рис. 2.1. Конструктивная схема циклона ЦН-11:1 – конус; 2 – цилиндр; 3 – выхлопная труба; 4 – винтовая крышка; 5 – входной патрубок; 6 – улитка; 7 – опорный фланец

Эффективность циклона (табл. 2.1) тем выше, чем больше диаметр частиц пыли, ее удельный вес, скорость вращения газового потока и чем меньше диаметр циклона. Отделение частиц пыли от газа, попавшего в бункер, происходит под действием центробежной силы при повороте газового потока в бункере (рис. 2.2). Освободившись от пыли, газовый поток образует вихрь и выходит через выходную трубу, а частицы пыли образуют на стенках циклона пылевой слой, который постепенно опускается в бункер.

Таблица 2.1

Параметры, определяющие эффективность циклонов

Параметры	Тип циклона						
	ЦН-24	ЦН-15У	ЦН-15	ЦН-11	СДК ЦН-33	СКЦН- 34	СК ЦН- 34М
Скорость движения газа в циклоне $\omega_{оп}$, м/с	4,5	3,5	3,5	3,5	2,0	1,7	2,0
Диаметр частиц освящаемых с эффективностью 50 % $d_{оп}^T$, мкм	8,50	6,00	4,50	3,65	2,31	1,95	1,13
Стандартное отклонение функции распределения парциальных коэффициентов очистки $lg \delta_{\eta}^T$	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,308	0,340

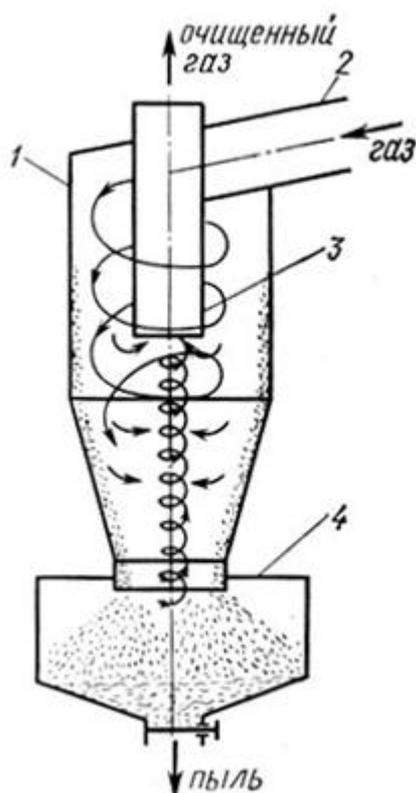


Рис. 2.2. Принцип действия циклона: 1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – выхлопная труба; 4 – бункер

При выборе и расчете циклонов необходимо учитывать абразивность и слипаемость пыли. 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. Так, для очистки газов от сажи применяются конические циклоны серии СК, которые обладают высокой эффективностью за счет более высокого гидравлического сопротивления.

Расчет циклонов ведут методом последовательных приближений [5]. Расчет начинают с циклона, для которого диаметр частиц пыли должен быть ориентировочно $d_m > 2d_{50}^T$, где d_m – медианный размер частиц, который представляет такой размер, при котором количество частиц крупнее d_m равно количеству частиц мельче d_m .

Диаметр циклона вычисляется по формуле:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi\omega_{\text{п}}}}, \quad (2.2)$$

где Q – количество очищаемого газа, $\text{м}^3/\text{с}$.

Полученное значение диаметра D округляется до ближайшего типового значения внутреннего диаметра циклона $D_{\text{ц}}$ (таблица 2.2).

Таблица 2.2

Типовые значения внутреннего диаметра циклона

$D_{\text{ц}}, \text{м}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0
--------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

По выбранному диаметру циклона находят действительную скорость движения газа в циклоне, $\text{м}/\text{с}$:

$$\omega_{\text{р}} = \frac{4Q}{\pi D_{\text{ц}}^2} \quad (2.3)$$

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

$$100 \cdot \left| \frac{\omega_{\text{р}} - \omega_{\text{оп}}}{\omega_{\text{оп}}} \right| \leq 15 \%$$

При отклонении более чем 15 % выбирают другой тип циклона.

Параметр d_{50} – это диаметр частиц, реально осаждаемых с эффективностью 50 % при рабочих условиях. Величина d_{50} определяется по формуле

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\frac{D_{\text{ц}} \rho_{\text{ч}} \mu \omega_{\text{т}}}{D_{\text{т}} \rho_{\text{чт}} \mu_{\text{т}} \omega_{\text{р}}}} \quad (2.4)$$

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

$$\omega_{\text{т}} = 3,5 \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

$$D_{\text{т}} = 0,6 \text{ м},$$

$$\rho_{\text{чт}} = 1930 \text{ кг/м}^3,$$

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

С учетом этих значений формула (2.4) принимает вид

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\frac{D_{\text{ц}} \cdot 1930 \cdot \mu \cdot 3,5}{0,6 \cdot \rho_{\text{чт}} \cdot 22,2 \cdot 10^{-6} \cdot \omega_{\text{р}}^X}}. \quad (2.5)$$

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

Расчет параметра X ведут по формуле

$$X = \frac{\lg(d_{\text{м}}/d_{50})}{\sqrt{(\lg \delta_{\eta}^T)^2 + (\lg \delta_{\text{ч}})^2}}. \quad (2.6)$$

По величине параметра X определяют значение нормальной функции распределения $\Phi(X)$. $\Phi(X)$ – это полный коэффициент очистки газа, выраженный в долях:

$$\Phi(X) = \begin{cases} 0,3762X + 0,5, & \text{при } 0 \leq X \leq 0,6 \\ 1 - \frac{1}{5,8X + 0,5}, & \text{при } X > 0,6 \end{cases} \quad (2.7)$$

Эффективность очистки газа в циклоне η определяется формулой:

$$\eta = \frac{1 + \Phi(X)}{2}. \quad (2.8)$$

Полученное значение сопоставляют с требуемым значением эффективности. Если η окажется меньше требуемого, то необходимо выбрать другой тип циклона с меньшим значением $\omega_{\text{оп}}$ и d_{50}^T .

Определение коэффициента гидравлического сопротивления циклона производят по формуле

$$\xi = K_1 \cdot K_2 \cdot \xi_{500}, \quad (2.9)$$

где K_1 – поправочный коэффициент на диаметр циклона (табл. 2.3), K_2 – поправочный коэффициент на запыленность газа (табл. 2.4), ξ_{500} – коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона диаметром 500 мм (табл. 2.5).

Таблица 2.3

Поправочный коэффициент K_1

$D_{ц}, м$	ЦН-11	ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24	СДК ЦН-3, СДК ЦН-34, СДК ЦН-34М
0,2	0,95	0,90	1,00
0,3	0,96	0,93	1,00
0,4	0,99	1,00	1,00
$\geq 0,5$	1,00	1,00	1,00

Таблица 2.4

Поправочный коэффициент K_2

Тип циклона	Запыленность на входе, $г/м^3$ (Свх)						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1,00	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,85
ЦН-15	1,00	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-15У	1,00	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
ЦН-24	1,00	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СДК ЦН-33	1,00	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СК ЦН-34	1,00	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90
СК ЦН-34М	1,00	0,99	0,97	0,95	—	—	—

Таблица 2.5

Коэффициент гидравлического сопротивления ξ_{500}

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

Вычисление гидравлического сопротивления циклона производят по формуле, Па:

$$\Delta P = \xi \frac{\rho \omega_p^2}{2}, \quad (2.10)$$

где ρ – плотность газа, кг/м³; ω_p – скорость газа в циклоне, м/с.

Величина гидравлического сопротивления ΔP и объемный расход Q очищаемого газа определяют мощность N , Вт, привода устройства для подачи газа к циклону:

$$N = \frac{K_3 \Delta P Q}{\eta_M \eta_B}, \quad (2.11)$$

где $K_3 = 1,2$ – коэффициент запаса мощности; $\eta_M = 0,8$ – КПД передачи мощности от электродвигателя к вентилятору; $\eta_B = 0,8$ – КПД вентилятора.

Определение концентрации пыли на выходе из циклона, кг/м³, производят по формуле

$$C_{\text{вых}} = C_{\text{вх}}(1 - \eta). \quad (2.12)$$

Требуемые исходные данные для расчета:

- Q – объем очищаемого газа, м³/с;
- ρ – плотность газа при рабочих условиях, кг/м³;
- μ – вязкость газа при рабочей температуре, Па с;
- d_m – медианный размер частиц пыли, мкм;
- $\lg \delta_c$ – стандартное отклонение размеров частиц пыли;
- $C_{\text{вх}}$ – входная концентрация пыли, г/м³;
- ρ_c – плотность частиц пыли, кг/м³;

- η – требуемая эффективность очистки газа.

В результате необходимо выбрать и рассчитать циклон, обеспечивающий требуемую эффективность очистки газа.

Пример расчета

Исходные данные:

- оборудование – вращающаяся цементная печь,
- вязкость газа при рабочей температуре $\mu = 17 \cdot 10^{-6}$ Па·с,
- объем очищаемого газа $Q = 12$ м³/с,
- плотность газа при рабочих условиях $\rho = 1,29$ кг/м³,
- медианный размер частиц пыли $d_M = 18$ мкм,
- стандартное отклонение размеров частиц пыли $\lg \delta_{\text{ч}} = 0,652$,
- входная концентрация пыли $C_{\text{вх}} = 20$ г/м³,
- плотность частиц пыли $\rho_{\text{ч}} = 2000$ кг/м³,
- требуемая эффективность очистки газа $\eta = 0,8$.

Исходя из заданного размера частиц пыли ($d_M = 18$ мкм), выбираем циклон, который очищает от частиц пыли размером $d_{50}^T = 8,5$ мкм – циклон ЦН-24 с характеристиками:

$$\omega_{\text{оп}} = 4,5 \text{ м/с}; \quad d_{50}^T = 8,5 \text{ мкм}; \quad \lg \delta_{\eta}^T = 0,308.$$

Определяем диаметр циклона:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 12}{3,14 \cdot 4,5}} = 1,84 \text{ м.}$$

По табл. 1.9 выбираем ближайшее значение типового диаметра $D_{\text{ц}} = 1,8$ м.

Далее получим действительную скорость движения газа в циклоне:

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

которую сравним с оптимальной

$$100 \left| \frac{4,72 - 4,5}{4,5} \right| = 4,8\% \leq 15 \%$$

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

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

$$d_{50} = 9,7 < d_m = 18.$$

Рассчитываем параметр X:

$$X = \frac{\lg(18/9,7)}{\sqrt{(0,308)^2 + (0,652)^2}} = 0,372.$$

По величине параметра X определяем значение нормальной функции распределения $\Phi(X)$:

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

Эффективность очистки газа в циклоне равна

$$\eta = \frac{1 + 0,64}{2} = 0,82;$$

$$\eta > 0,8.$$

Определяем коэффициент гидравлического сопротивления $\xi = 1 \cdot 0,93 \cdot 75$, откуда гидравлическое сопротивление циклона равно

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

Мощность привода устройства для подачи газа к циклону равна

$$N = \frac{1,2 \cdot 1002 \cdot 12}{0,8 \cdot 0,8} = 22551 \text{ Вт}.$$

Определим концентрацию пыли на выходе из циклона:

$$C_{\text{вых}} = 20(1 - 0,82) = 3,76 \text{ г/м}^3.$$

Вывод: выбираем циклон ЦН-24; $D_{\text{ц}} = 1,8 \text{ м}$; $\eta = 0,82$; $N = 22551 \text{ Вт}$; $C_{\text{вых}} = 3,76 \text{ г/м}^3$.

Алгоритм выполнения практической работы

1. Изучить теоретические сведения о принципе действия циклона и метод его расчета, представленные в указаниях к данной работе.

2. Вариант задания к работе (табл. 2.6). Номер варианта

распределяется по первым буквам фамилии студента по таблице 2.7.

3. Произвести необходимые расчеты для выбора типа циклона, обеспечивающего требуемую эффективность очистки газа. При необходимости дополнительно можно пользоваться нормативной и справочной литературой, рекомендуемой в указаниях к практической работе.

4. Составить отчет о практической работе в соответствии с требованиями (прил. А).

5. Начертить эскиз циклона с указанием размеров.

6. Ответить на вопросы самоконтроля

Варианты заданий

№ варианта	Объем очищаемого газа Q , м ³ /с	Плотность газа при рабочих условиях ρ , кг/м ³	Вязкость газа при рабочей температуре μ , Па с	Медианный размер частиц пыли d_m , мкм	Стандартное отклонение размеров частиц пыли $\lg \delta_{ch}$	Плотность частиц пыли ρ_{ch} , кг/м ³	Входная концентрация пыли $C_{вх}$, г/м ³	Требуемая эффективность очистки газа η
1.	10	1,15	$14 \cdot 10^{-6}$	18	0,65	2000	11	0,75
2.	11	1,16	$15 \cdot 10^{-6}$	12	0,55	2100	12	0,76
3.	12	1,17	$16 \cdot 10^{-6}$	9	0,45	2200	13	0,77
4.	13	1,18	$17 \cdot 10^{-6}$	8	0,4	2300	14	0,78
5.	14	1,19	$18 \cdot 10^{-6}$	6	0,35	2400	15	0,79
6.	15	1,20	$19 \cdot 10^{-6}$	4	0,3	2500	16	0,8
7.	16	1,21	$20 \cdot 10^{-6}$	3	0,25	2600	17	0,81

№ варианта	Объем очищаемого газа Q , м ³ /с	Плотность газа при рабочих условиях ρ , кг/м ³	Вязкость газа при рабочей температуре μ , Па·с	Медианный размер частиц пыли d_m , мкм	Стандартное отклонение размеров частиц пыли $\lg \delta_{ch}$	Плотность частиц пыли ρ_{ch} , кг/м ³	Входная концентрация пыли $C_{вх}$, г/м ³	Требуемая эффективность очистки газа η
8.	17	1,22	$21 \cdot 10^{-6}$	18	0,65	2700	18	0,82
9.	18	1,23	$14 \cdot 10^{-6}$	12	0,55	2800	19	0,83
10.	19	1,24	$15 \cdot 10^{-6}$	9	0,45	2900	20	0,84
11.	20	1,25	$16 \cdot 10^{-6}$	8	0,4	3000	21	0,85
12.	19	1,26	$17 \cdot 10^{-6}$	6	0,35	2050	22	0,86
13.	18	1,27	$18 \cdot 10^{-6}$	4	0,3	2150	23	0,87
14.	17	1,28	$19 \cdot 10^{-6}$	3	0,25	2250	24	0,88
15.	16	1,29	$20 \cdot 10^{-6}$	18	0,65	2350	25	0,90

№ варианта	Объем очищаемого газа Q , м ³ /с	Плотность газа при рабочих условиях ρ , кг/м ³	Вязкость газа при рабочей температуре μ , Па·с	Медианный размер частиц пыли d_m , мкм	Стандартное отклонение размеров частиц пыли $lg \delta_{ch}$	Плотность частиц пыли ρ_{ch} , кг/м ³	Входная концентрация пыли $C_{вх}$, г/м ³	Требуемая эффективность очистки газа η
16.	15	1,3	$21 \cdot 10^{-6}$	12	0,55	2450	26	0,91
17.	14	1,29	$14 \cdot 10^{-6}$	9	0,45	2550	27	0,92
18.	13	1,28	$15 \cdot 10^{-6}$	8	0,4	2650	28	0,93
19.	12	1,27	$16 \cdot 10^{-6}$	6	0,35	2750	29	0,94
20.	11	1,26	$17 \cdot 10^{-6}$	4	0,3	2850	30	0,95
21.	10	1,25	$18 \cdot 10^{-6}$	3	0,25	2950	29	0,75
22.	11	1,24	$19 \cdot 10^{-6}$	18	0,65	3000	28	0,76
23.	12	1,23	$20 \cdot 10^{-6}$	12	0,55	2000	27	0,77

№ варианта	Объем очищаемого газа Q , м ³ /с	Плотность газа при рабочих условиях ρ , кг/м ³	Вязкость газа при рабочей температуре μ , Па·с	Медианный размер частиц пыли d_m , мкм	Стандартное отклонение размеров частиц пыли $\lg \delta_{ch}$	Плотность частиц пыли ρ_{ch} , кг/м ³	Входная концентрация пыли $C_{вх}$, г/м ³	Требуемая эффективность очистки газа η
24.	13	1,22	$21 \cdot 10^{-6}$	9	0,45	2100	26	0,78
25.	14	1,21	$14 \cdot 10^{-6}$	8	0,4	2200	25	0,79
26.	15	1,20	$15 \cdot 10^{-6}$	6	0,35	2300	24	0,8
27.	16	1,19	$16 \cdot 10^{-6}$	4	0,3	2400	23	0,81
28.	17	1,18	$17 \cdot 10^{-6}$	3	0,25	2500	22	0,82
29.	18	1,17	$18 \cdot 10^{-6}$	18	0,65	2600	21	0,83
30.	19	1,16	$19 \cdot 10^{-6}$	12	0,55	2700	20	0,84
31.	20	1,15	$20 \cdot 10^{-6}$	9	0,45	2800	19	0,85

№ варианта	Объем очищаемого газа Q , м ³ /с	Плотность газа при рабочих условиях ρ , кг/м ³	Вязкость газа при рабочей температуре μ , Па·с	Медианный размер частиц пыли d_m , мкм	Стандартное отклонение размеров частиц пыли $\lg \delta_{ch}$	Плотность частиц пыли ρ_{ch} , кг/м ³	Входная концентрация пыли $C_{вх}$, г/м ³	Требуемая эффективность очистки газа η
32.	21	1,16	$21 \cdot 10^{-6}$	8	0,4	2900	18	0,86
33.	22	1,17	$14 \cdot 10^{-6}$	6	0,35	3000	17	0,87
34.	23	1,18	$15 \cdot 10^{-6}$	4	0,3	2050	16	0,88
35.	24	1,19	$16 \cdot 10^{-6}$	3	0,25	2150	15	0,90
36.	25	1,20	$17 \cdot 10^{-6}$	18	0,65	2250	14	0,91
37.	26	1,21	$18 \cdot 10^{-6}$	12	0,55	2350	13	0,92
38.	27	1,22	$19 \cdot 10^{-6}$	9	0,45	2450	12	0,93
39.	28	1,23	$20 \cdot 10^{-6}$	8	0,4	2550	11	0,94

№ варианта	Объем очищаемого газа Q , м ³ /с	Плотность газа при рабочих условиях ρ , кг/м ³	Вязкость газа при рабочей температуре μ , Па·с	Медианный размер частиц пыли d_m , мкм	Стандартное отклонение размеров частиц пыли $\lg \delta_{ch}$	Плотность частиц пыли ρ_{ch} , кг/м ³	Входная концентрация пыли $C_{вх}$, г/м ³	Требуемая эффективность очистки газа η
40.	29	1,24	$21 \cdot 10^{-6}$	6	0,35	2650	10	0,95
41.	30	1,25	$14 \cdot 10^{-6}$	4	0,3	2750	12	0,80
42.	29	1,26	$15 \cdot 10^{-6}$	3	0,25	2850	14	0,81
43.	27	1,27	$16 \cdot 10^{-6}$	18	0,65	2950	16	0,82
44.	26	1,28	$17 \cdot 10^{-6}$	12	0,55	3000	18	0,83
45.	25	1,29	$18 \cdot 10^{-6}$	9	0,45	2900	20	0,84
46.	24	1,3	$19 \cdot 10^{-6}$	8	0,4	2800	22	0,85
47.	23	1,29	$20 \cdot 10^{-6}$	6	0,35	2700	24	0,86

№ варианта	Объем очищаемого газа Q , м ³ /с	Плотность газа при рабочих условиях ρ , кг/м ³	Вязкость газа при рабочей температуре μ , Па с	Медианный размер частиц пыли d_m , мкм	Стандартное отклонение размеров частиц пыли $lg \delta_{ch}$	Плотность частиц пыли ρ_{ch} , кг/м ³	Входная концентрация пыли $C_{вх}$, г/м ³	Требуемая эффективность очистки газа η
48.	22	1,28	$21 \cdot 10^{-6}$	4	0,3	2600	26	0,87
49.	21	1,27	$14 \cdot 10^{-6}$	3	0,25	2500	28	0,88
50.	20	1,26	$15 \cdot 10^{-6}$	8	0,4	2400	30	0,89

Таблица 2.7.

Выбор варианта

Первые две буквы фамилии	№ варианта	Первые две буквы фамилии	№ варианта
Аа-Ак	1	Ма-Мл	21
Ал-Ая	2	Мк-Мя	22
Ба-Бк	3	На-Нл	23
Бл-Бя	4	Нм-Ня	24
Ва-Вк	5	Оа-Ок	25
Вл-Вя	6	Ол-Оя	26
Га-Гк	7	Па-Пк	27
Гл-Гя	8	Пл-Пя	28
Да-Дк	9	Ра-Рк	29
Дл-Дя	10	Рл-Ря	30
Еа-Ея	11	Са-Ск	31
Ёа-Ёя	12	Сл-Ся	32
Жа-Жя	13	Та-Тк	33
За-Зя	14	Тл-Тя	34
Иа-Ик	15	Уа-Ул	35
Ил-Ия	16	Ум-Уя	36
Ка-Кл	17	Фа-Фя	37
Км-Кя	18	Ха-Хя	38
Ла-Лк	19	Ца-Ця	39
Лл-Ля	20	Ча-Чя	40

Первые две буквы фамилии	№ варианта	Первые две буквы фамилии	№ варианта
Ша-Шл	41	Эл-Эя	46
Шм-Шя	42	Юа-Юл	47
Ща-Щл	43	Юм-Юя	48
Щм-Щя	44	Яа-Ял	49
Эа-Эк	45	Ям-Яя	50

Вопросы самоконтроля

1. Какие методы очистки пылегазовых выбросов существуют?
2. Опишите принцип действия циклона.
3. Назовите основные технические характеристики циклона.
4. Опишите порядок расчета циклона.

