

Федеральное агентство по образованию
ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет-УПИ»

РАСЧЕТ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ

Часть 1

Расчет циклонов и рукавных фильтров

Методические указания к курсовому проектированию
по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии»

Екатеринбург

2006

УДК 628.511.

Составители А.Е. Замураев, В.Б. Пономарев
Научный редактор доц. канд. техн. наук Ф.С. Югай

РАСЧЕТ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ. В 3 ч. Ч. 1. Расчет циклонов и рукавных фильтров. / А.Е. Замураев, В.Б. Пономарев. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. 50 с.

Методические указания к курсовому проектированию предназначены для студентов всех форм обучения по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» специальностей: 240304 - Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов, 240306 - Химическая технология монокристаллов, материалов и изделий электронной техники, 200204 - Оптические технологии и материалы.

В методических указаниях приведены основные методики расчета пылеуловителей, циклонов и рукавных фильтров, даны примеры расчета и рекомендации по использованию и эксплуатации пылеулавливающего оборудования на предприятиях промышленности строительных материалов.

Библиогр.: 10 назв. Табл. 11. Рис. 8.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. РАСЧЕТ ЦИКЛОНОВ.....	6
1.1. Краткая характеристика циклонов.....	6
1.2. Методика расчета циклонов.....	10
1.3. Пример расчета циклонов.....	23
1.4. Рекомендации по использованию и эксплуатации циклонов.....	27
2. РАСЧЕТ РУКАВНЫХ ФИЛЬТРОВ.....	29
2.1. Краткая характеристика фильтров.....	29
2.2. Методика расчета фильтров	31
2.3. Примеры расчета рукавного фильтра	43
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	49

ВВЕДЕНИЕ

Производство изделий в промышленности строительных материалов связано с использованием и высокотемпературной переработкой больших количеств весьма разнообразных по физико-химическим свойствам сырьевых материалов и топлива, что приводит к образованию пылегазовых выбросов, загрязняющих атмосферный воздух. Эффективность обезвреживания и очистки вредных выбросов на разных предприятиях находится в пределах 60...90 %.

Жесткие современные требования по защите атмосферного воздуха обуславливают необходимость разработки и освоения новых более эффективных средств и методов защиты атмосферы на предприятиях стройиндустрии. Широкое применение мало- и безотходных технологий, нового поколения пылеочистных аппаратов должно обеспечить снижение выбросов вредных веществ до предельно допустимых уровней.

Современный научно-технический потенциал позволяет решать проблему защиты атмосферного воздуха на производстве двумя путями.

Первый путь, имеющий в настоящее время преобладающее значение, связан с разработкой и освоением новых средств и методов очистки пылегазовых выбросов. Он реализуется при строительстве новых и реконструкции действующих пылегазоочистных сооружений за счет значительных капитальных вложений. Анализ затрат на системы очистки показывают, что капитальные вложения в целом на предприятиях стройиндустрии составляют 10 % от общего объема капитальных вложений.

Второй путь, позволяющий кардинально решить проблему защиты атмосферного воздуха, – создание мало- и безотходных технологий на производстве. При таком способе производства продукции наиболее рационально и комплексно используются сырье и энергия в цикле сырьевые ресурсы → производство → потребление → вторичные сырьевые ресурсы, в результате чего любые воздействия на окружающую среду не нарушают ее нормального функционирования.

Сегодня такой путь в основном из-за экономических трудностей (необходимость больших капитальных затрат на коренную реконструкцию производства) имеет ограниченное применение.

В настоящее время предприятия оснащены аппаратами для очистки газов от пыли, удовлетворяющими гигиеническим и технологическим требованиям. Применяемое пылеочистное оборудование (циклоны, тканевые фильтры и электрофильтры) хотя по некоторым параметрам соответствует мировому уровню развития техники, однако по многим из них значительно ниже.

Прекращение загрязнения атмосферного воздуха отходами промышленных предприятий представляет собой сложную организационно-техническую задачу, осуществление которой связано с выполнением комплекса мероприятий:

- оборудование предприятий пылегазоочистными сооружениями;
- переход к экологизированной малоотходной технологии производства с использованием отходов одних производств в качестве сырья для других;
- рационализация технологических процессов предприятий путем замены используемого сырья;
- установление научно обоснованных значений предельно допустимых выбросов (ПДВ) и предельно допустимых концентраций примесей (ПДК) в воздухе [1].

1. РАСЧЕТ ЦИКЛОНОВ

1.1. Краткая характеристика циклонов

Широкое распространение получили обеспыливающие устройства, в которых для осаждения частиц используется центробежная сила. В современных усовершенствованных конструкциях циклонов возможно достаточно эффективно улавливать твердые или капельные частицы размером от 5 мкм и больше. Улавливание пыли в циклонах основано на использовании инерции частиц [2].

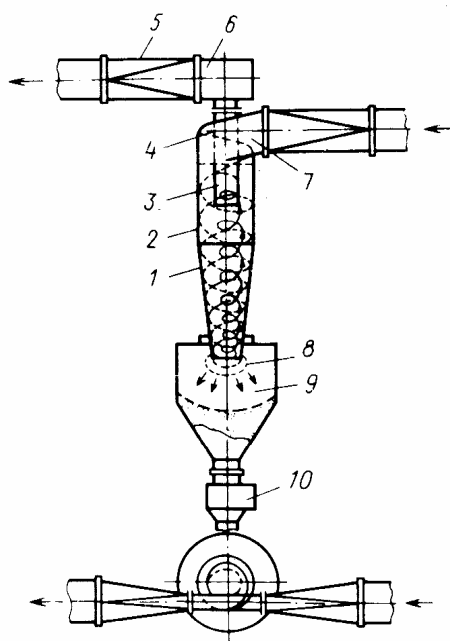


Рис. 1.1. Общий вид циклона НИИОгаз

Общая схема циклона представлена на рис. 1.1. Циклон состоит из конической части 1, цилиндрической части 2, выхлопной трубы 3, винтообразной крышки 4, газохода очищенных газов 5, улитки для вывода газа 6 (возможно исполнение циклонов без улитки), входного патрубка 7, пылевывпускного отверстия 8, бункера 9, пылевого затвора 10.

Газовый поток со взвешенными в нем твердыми частицами вводится с большой скоростью по касательной к стенке цилиндрической части циклона, где делает несколько спиральных витков в сторону пылеотводящего отверстия,

а затем по внутренней спирали движется к выхлопной трубе. При входе в циклон взвешенные в потоке частицы по инерции движутся по своим первоначальным траекториям, а затем под воздействием аэродинамических сил их траектории искривляются. Те из частиц, масса которых достаточно велика, успевают достичь стенок циклона, т.е. отделяются от потока. Под влиянием силы тяжести и увлекающего действия осевого движения отделившиеся частицы опускаются и через пылевыпускное отверстие поступают в бункер, где они оседают.

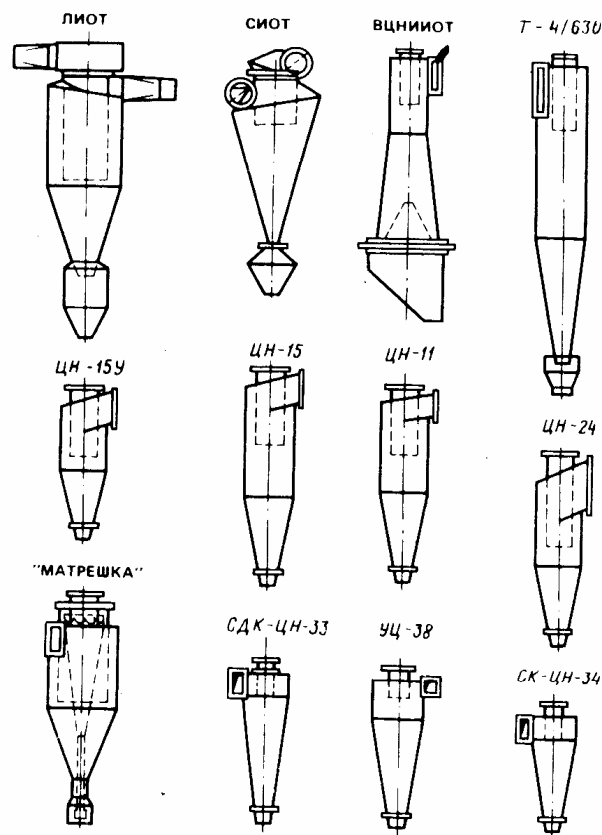


Рис. 1.2. Аэродинамические схемы циклонов:

На рис. 1.2 показаны разновидности циклонов одного назначения. Каждый циклон имеет свои конструктивные и эксплуатационные особенности, которые необходимо учитывать при выборе пылеулавливающего устройства.

Циклоны СИОТ не имеют цилиндрической части корпуса, а выхлопная труба введена непосредственно в конус. Особенности этих циклонов являются также треугольное сечение входного патрубка и небольшая высота.

Широко распространенный ранее циклон ЛИОТ по эффективности уступает другим рассмотренным циклонам.

Характерная особенность циклонов ВЦНИИОТа – расширяющаяся коническая часть с внутренним дополнительным конусом, что уменьшает абразивный износ нижней части конуса. Это достигается в результате того, что за цилиндрической частью устраивается не традиционная сужающаяся коническая, а расширяющаяся в виде конфузора часть.

Кроме перечисленных применяют циклоны «Матрешка», называемые так потому, что внутри циклона расположен дополнительный циклон меньшего размера. Циклон "Матрешка" по эффективности, металлоемкости и сложности конструкции также уступает другим циклонам.

В связи с многообразием существующих циклонов были проведены их сравнительные испытания по единой методике, разработанной во ВНИИОТе.

В результате исследований установлено, что из цилиндрических циклонов НИИОгаз наиболее эффективен циклон ЦН-11, поэтому этот циклон включен в унифицированный ряд для изготовления. Циклон удобен для компоновки в группы, имеет небольшие размеры. Циклон «Матрешка» наименее эффективен для улавливания пыли, кроме того, он наиболее металлоемкий и сложный в изготовлении. В промышленности строительных материалов применяют циклоны различных типов: НИИОгаз, ЦКТИ, ЛИОТ, СИОТ и ВЦНИИОТ. В настоящее время наибольшее распространение получили циклоны НИИОГАЗ, которые могут быть цилиндрическими и коническими.

К цилиндрическим циклонам НИИОГАЗ относятся аппараты типа ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У и ЦН-24. Их отличительной особенностью является удлиненная цилиндрическая часть корпуса, расположение крышки входного патрубка соответственно под углами 11, 15 и 24° к горизонтали. Циклоны ЦН-15У имеют несколько меньшую высоту и более низкие технико-экономические показатели по сравнению с другими аппаратами типа ЦН.

К коническим циклонам относится циклон СИОТ и циклоны НИИОгаз типа СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34 и СК-ЦН-34М. Они отличаются от циклонов типа

ЦН длиной конической части, наличием спирального входного патрубка и малым отношением диаметров выхлопной трубы и корпуса циклона (соответственно 0,334, 0,340 и 0,22). Циклон СК-ЦН-34М применяют для улавливания пылей с высокими абразивными свойствами или слипаемостью. Потери давления в этом циклоне значительно выше, чем в других конических циклонах.

Циклон СЦН-40 является цилиндро-коническим циклоном НИИОгаз и обладает более высокой степенью очистки по сравнению с известными циклонами типа ЦН-15, ЦН-11, СК-ЦН-34, УЦ-38. Вынос пыли из циклона СЦН-40 в 2,5 раза меньше, чем из циклона ЦН-15 и в 1,5 раза меньше по сравнению с циклонами СК-ЦН-34 и УЦ-38 при равных энергозатратах. Циклоны СЦН-40 имеют относительно высокую скорость газа в пристенной зоне (до 24 м/с), поэтому при улавливании липкой пыли менее подвержены забиванию конуса циклона. Абразивный износ циклона СЦН-40 при одинаковых производительности и сопротивлении в 1,25 раза ниже, чем у циклона ЦН-15. Длина цилиндрической и конической части циклона равна 1,6 диаметра. В последнее время длину конической части циклона принимают равной 2,0 диаметра.

Циклоны СЦН-40 целесообразно устанавливать в тех случаях, когда требуется повышенная степень очистки газов и гидравлическое сопротивление не лимитируется. Например, степень очистки воздуха в циклоне диаметром 1,0 м от кварцевой пыли с медианным размером частиц 10 мкм, плотностью 2,6 г/см³ при плановой скорости 1,6 м/с и температуре 20 С составляет 93 % при начальной запыленности до 1000 г/м³.

Цилиндрические циклоны относятся к высокопроизводительным, а конические – к высокоэффективным аппаратам. Диаметр цилиндрических циклонов обычно не превышает 2000 мм, а диаметр цилиндрической части конических – 3000 мм [3]. Циклоны изготовляют правого и левого вращения газового потока.

Согласно ГОСТ 9617-67 для циклонов принят следующий ряд диаметров: 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400 и 3000 мм.

1.2. Методика расчета циклонов

Определение гидравлического сопротивления и размеров циклона

Гидравлическое сопротивление циклона ΔP , Па, можно определить по широко известной формуле механики газов

$$\Delta P = \zeta \frac{W^2 \rho}{2}, \quad (1.1)$$

где ζ – коэффициент сопротивления циклона;

$W_{\text{ц}}$ – условная скорость газа, отнесенная к полному сечению циклона в плане, м/с;

$\rho_{\text{г}}$ – плотность газа при рабочих условиях, кг/м³.

Коэффициент сопротивления циклона ζ зависит от ряда факторов: диаметра циклона, концентрации пыли, компоновки циклонов в группе, организации выхода газа из выхлопной трубы и некоторых других – и исчисляется по формуле

$$\zeta = K_1 K_2 \zeta_{500} + K_3,$$

где K_1 – поправочный коэффициент на влияние диаметра циклона;

K_2 – поправочный коэффициент на влияние запыленности газа;

ζ_{500} – коэффициент сопротивления циклона диаметром 500 мм. При включении циклона в сеть значение ζ_{500} немного меньше по сравнению с выбросом газа непосредственно в атмосферу или в большой объем, так как в последнем случае теряется энергия выходящего газа. При наличии на выходе раскручивателя коэффициент сопротивления снижается на 20...25 %;

K_3 – поправочный коэффициент на влияние групповой компоновки циклонов, равный 35 при двухрядной компоновке и 60 при круговой компоновке.

Численные значения коэффициентов ζ_{500} (для циклона с выходом в сеть), ζ'_{500} (для циклона с выходом в атмосферу), K_1 , K_2 и расчетных параметров циклонов конструкции НИИОгаза приведены в табл. 1.1...1.3 (для циклонов всех типов $W_{ц} = 3$ м/с).

Таблица 1.1

Значения коэффициентов сопротивления

Параметры	Тип циклона					
	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-24	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-22
d/D	0,59	0,59	0,59	0,33	0,34	0,22
ζ_{500}	245	155	75	520	1050	2000
ζ'_{500}	250	163	80	600	1150	—

Таблица 1.2

Значения коэффициента K_1

Тип циклона	D , мм				
	150	200	300	400	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

1	2	3	4	5	6	7	8
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,97	0,90	0,87	0,86
СДК-ЦН-33	1	0,81	0,78	0,78	0,77	0,76	0,745
СК-ЦН-34	1	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90

Плотность газов при рабочих условиях, кг/м^3 , находят по формуле

$$\rho_r = \rho_0 \frac{273 \cdot (P_{\text{бар}} \pm P_r)}{(273 + t_r) \cdot 101,3 \cdot 10^3},$$

где ρ_0 – плотность газов при нормальных условиях ($t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_0 = 101,3 \cdot 10^3 \text{ Па}$);

t_r – температура газов на входе в циклон, $^\circ\text{C}$;

$P_{\text{бар}}$ – барометрическое давление, Па;

P_r – избыточное давление (разрежение) газа при входе в циклон, Па.

Если плотность сухих газов дана при нормальных условиях $\rho_{0с}$, то плотность влажных газов при тех же условиях

$$\rho_0 = \frac{(\rho_{0с} + x) \cdot 0,804}{0,804 + x},$$

где x — влагосодержание газа, кг/м^3 .

Скорость газа в циклоне, м/с, равна расходу газа при рабочих условиях V , отнесенному к полному поперечному сечению циклона в плане $F_{\text{ц}}$:

$$W_{\text{ц}} = \frac{V}{F_{\text{ц}}} = \frac{V_0 (272 + t_r) \cdot 101325}{F_{\text{ц}} \cdot 273 (P_{\text{бар}} \pm P_r)}.$$

Опыт показывает, что скорость газа в циклоне имеет для каждого типа оптимальное значение $W_{\text{опт}}$, м/с, от которого она не должна отклоняться более чем на $\pm 15\%$:

ЦН-24.....4,5 ЦН-15у3.....3,5 СДК-ЦН-33.....2,0 СК-ЦН-22.....2,0
ЦН-15.....3,5 ЦН-11.....3,5 СК-ЦН-341.....1,7 СЦН-40.....1,6

При скоростях $W_{\text{ц}}$, выходящих за указанные пределы в большую сторону, возрастает расход энергии, в меньшую сторону – снижается эффективность [4].

Расчет эффективности циклонов

Большой опыт, накопленный при испытаниях циклонов в промышленных условиях и на специальных стендах, позволил разработать методы расчета циклонов, основанные на полученных экспериментальных данных. Для облегчения расчетов широко используют графические методы с применением специально построенных графиков и номограмм. Однако наиболее обобщенным и надежным является расчет эффективности с использованием элементов теории вероятностей [5].

Как известно, в вероятностно-логарифмических координатах дисперсный состав большинства пылей аппроксимируется прямой линией и характеризуется двумя параметрами: среднемедианным размером d_m и среднеквадратическим отклонением $\lg \sigma_{\text{п}}$ функции распределения. Среднемедианный размер d_m представляет собой такой размер частицы, при котором суммарная масса всех частиц размером более d_m равна суммарной массе всех частиц размером менее d_m . Среднеквадратическое отклонение $\lg \sigma_{\text{п}}$ находят из следующего соотношения, которое является свойством интеграла вероятности:

$$\lg \sigma_{\text{п}} = \lg(d_{84,1}/d_m) = \lg(d_m/d_{15,9}),$$

где $d_{84,1}$ и $d_{15,9}$ - абсциссы точек, ординаты которых имеют значения соответственно 84,1 и 15,9 % и определяются по заданному распределению пыли по размерам (рис. 1.3).

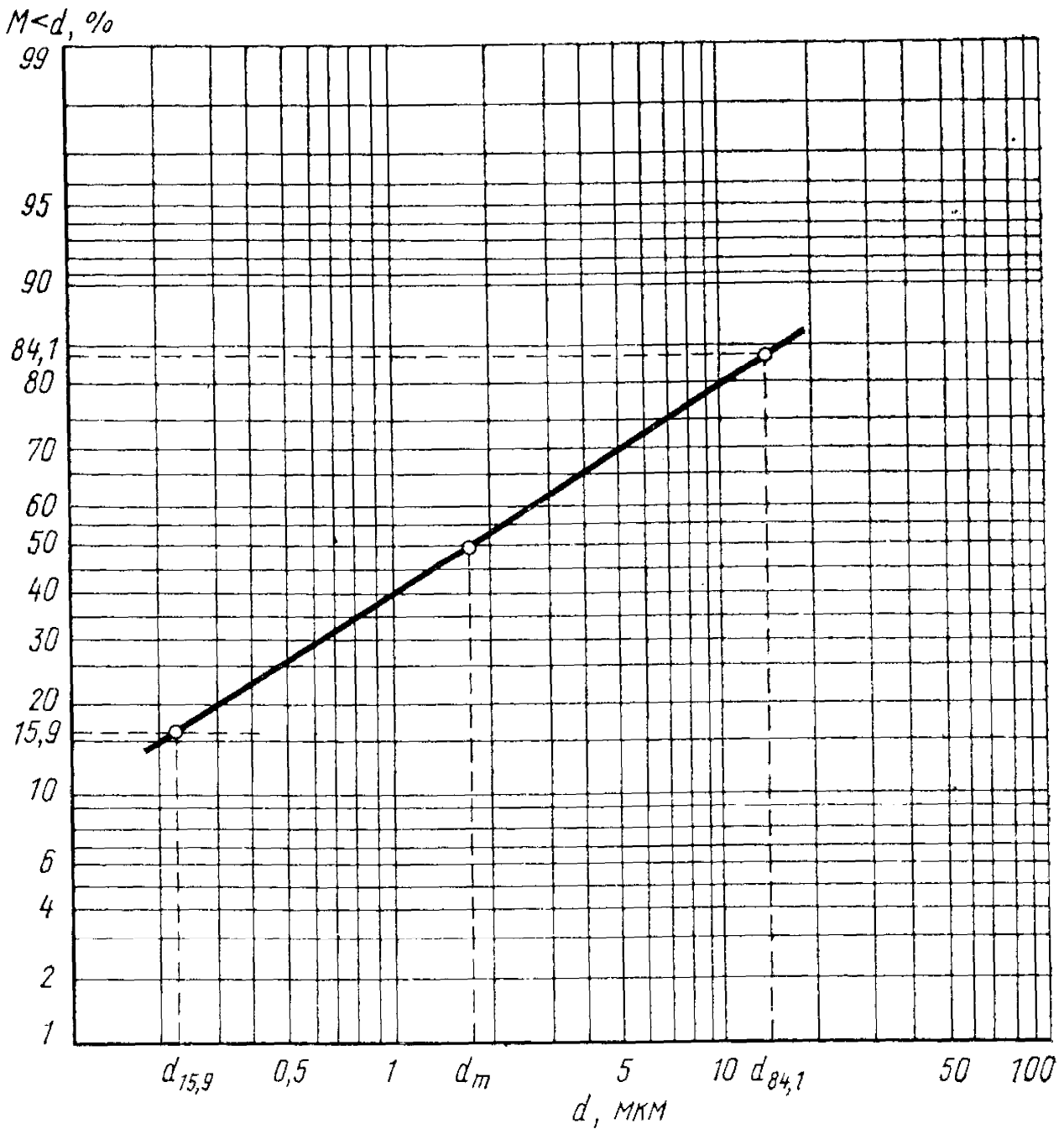


Рис. 1.3. График распределения частиц пыли по размерам

Кривые парциальной эффективности циклонов также могут быть охарактеризованы двумя аналогичными параметрами d_{50}^T и $\lg \sigma_\eta$, численные значения которых для различных типов циклонов конструкции НИИОгаза могут быть приняты из табл. 1.4.

Таблица 1.4

Значения d_{50}^T и $\lg \sigma_\eta$ для циклонов конструкции НИИОгаз

Параметр	ЦН-24	ЦН-15	ЦН-15у	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-22	СЦН-40
d_{50}^T	8,50	6,00	4,50	3,65	2,31	1,95	1,13	1,0
$\lg \sigma_\eta$	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,308	0,340	0,308

Приведенные данные соответствуют следующим условиям работы циклонов (значения табличные): $W_T = 3,5$ м/с; $D_T = 0,6$ м; $\rho_{\text{чт}} = 1930$ кг/м³; $\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Па · с.

На основании математической обработки уравнения для вероятностных функций было получено следующее выражение для полной очистки в циклоне

$$\eta = \Phi(x).$$

Величина x применительно к циклонам может быть определена по следующей формуле

$$x = \frac{\lg\left(\frac{d_m}{d_{50}}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_\chi}}. \quad (1.2)$$

Численное значение функции $\Phi(x)$ находят в зависимости от величины x по табл. 1.5.

Таблица 1.5

Значения нормальной функции распределения

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
1	2	3	4	5	6	7	8
-2,70	0,0035	-1,62	0,0526	-1,08	0,1401	-0,56	0,2877
-2,60	0,0047	-1,60	0,0548	-1,06	0,1446	-0,54	0,2946
-2,50	0,0062	-1,58	0,0571	-1,04	0,1492	-0,52	0,3015
-2,40	0,0082	-1,56	0,0594	-1,02	0,1539	-0,50	0,3085
-2,30	0,0107	-1,54	0,0618	-1,00	0,1587	-0,48	0,3156
-2,20	0,0139	-1,52	0,0643	-0,98	0,1635	-0,46	0,3228
-2,10	0,0179	-1,50	0,0668	-0,96	0,1685	-0,44	0,3300
-2,00	0,0228	-1,48	0,0694	-0,94	0,1736	-0,42	0,3372
-1,98	0,0239	-1,46	0,0721	-0,92	0,1788	-0,40	0,3446
-1,96	0,0250	-1,44	0,0749	-0,90	0,1841	-0,38	0,3520
-1,94	0,0262	-1,42	0,0778	-0,88	0,1894	-0,36	0,3594
-1,92	0,0274	-1,40	0,0808	-0,86	0,1949	-0,34	0,3669
-1,90	0,0288	-1,38	0,0838	-0,84	0,2005	-0,32	0,3745
-1,88	0,0301	-1,36	0,0869	-0,82	0,2061	-0,30	0,3821
-1,86	0,0314	-1,34	0,0901	-0,80	0,2119	-0,28	0,3897
-1,84	0,0329	-1,32	0,0934	-0,78	0,2177	-0,26	0,3974
-1,82	0,0344	-1,28	0,1003	-0,76	0,2236	-0,24	0,4052
-1,80	0,0359	-1,26	0,1038	-0,74	0,2297	-0,22	0,4129
-1,78	0,0375	-1,24	0,1075	-0,72	0,2358	-0,20	0,4207
-1,76	0,0392	-1,22	0,1112	-0,70	0,2420	-0,18	0,4286
-1,74	0,0409	-1,20	0,1151	-0,68	0,2483	-0,16	0,4364
-1,72	0,0427	-1,18	0,1190	-0,66	0,2546	-0,14	0,4443
-1,70	0,0446	-1,16	0,1230	-0,64	0,2611	-0,12	0,4522
-1,68	0,0465	-1,14	0,1271	-0,62	0,2676	-0,10	0,4602
-1,66	0,0485	-1,12	0,1314	-0,60	0,2743	-0,08	0,4681
-1,64	0,0505	-1,10	0,1357	-0,58	0,2810	-0,06	0,4761

Окончаение табл. 1.5

1	2	3	4	5	6	7	8
-0,04	0,4840	0,50	0,6915	1,04	0,8508	1,60	0,9452
-0,02	0,4920	0,52	0,6985	1,08	0,8599	1,62	0,9474
0,00	0,5000	0,54	0,7054	1,10	0,8643	1,64	0,9495
0,02	0,5080	0,56	0,7123	1,12	0,8686	1,66	0,9515
0,04	0,5160	0,58	0,7190	1,14	0,8729	1,68	0,9535
0,06	0,5239	0,60	0,7257	1,16	0,8770	1,70	0,9554
0,08	0,5319	0,62	0,7324	1,18	0,8810	1,72	0,9573
0,10	0,5398	0,64	0,7389	1,20	0,8849	1,74	0,9591
0,12	0,5478	0,66	0,7454	1,22	0,8888	1,76	0,9608
0,14	0,5557	0,68	0,7517	1,24	0,8925	1,78	0,9625
0,16	0,5636	0,70	0,7580	1,26	0,8962	1,80	0,9641
0,18	0,5714	0,72	0,7642	1,28	0,8997	1,82	0,9656
0,20	0,5793	0,74	0,7703	1,30	0,9032	1,84	0,9671
0,22	0,5871	0,76	0,7764	1,32	0,9066	1,86	0,9686
0,24	0,5948	0,78	0,7823	1,34	0,9099	1,88	0,9699
0,26	0,6026	0,80	0,7881	1,36	0,9131	1,90	0,9713
0,28	0,6103	0,82	0,7939	1,38	0,9162	1,92	0,9726
0,30	0,6179	0,84	0,7995	1,40	0,9192	1,94	0,9738
0,32	0,6255	0,86	0,8051	1,42	0,9222	1,96	0,9750
0,34	0,6331	0,88	0,8106	1,44	0,9251	1,98	0,9761
0,36	0,6406	0,90	0,8159	1,46	0,9279	2,00	0,9772
0,38	0,6480	0,92	0,8212	1,48	0,9306	2,10	0,9821
0,40	0,6554	0,94	0,8264	1,50	0,9332	2,20	0,9861
0,42	0,6628	0,96	0,8315	1,52	0,9357	2,30	0,9893
0,44	0,6700	0,98	0,8365	1,54	0,9382	2,40	0,9918
0,46	0,6772	1,00	0,8413	1,56	0,9406	2,50	0,9938
0,48	0,6844	1,02	0,8461	1,58	0,9429	2,60	0,9953

Входящая в формулу (1.2) величина d_{50} представляет собой размер частиц, осажденных при фактических условиях работы выбранного циклона с эффективностью 50 %. Эта величина может быть найдена из выражения

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\frac{D}{D_T} \frac{\rho_{чТ}}{\rho_ч} \frac{\mu}{\mu_T} \frac{W_T}{W}},$$

где D_T , $\rho_{чТ}$, μ_T , W_T – параметры, соответствующие условиям, при которых получены табличные значения d_{50}^T и $\lg \sigma_\eta$;

D , $\rho_ч$, μ , W – параметры, соответствующие фактическим условиям работы циклона.

При очистке газов с высокой концентрацией пыли ($Z > 10$ г/м³) степень очистки газа в циклоне обычно несколько увеличивается и может быть определена по следующей эмпирической зависимости:

$$\eta' = \eta + (100 - \eta) \cdot 0,12Z_1 \lg Z_1/100,$$

где η – степень очистки газа в циклоне при начальной запыленности 10 г/м³, %;
 Z_1 – начальная концентрация пыли в газе, г/м³.

В случае, когда полученная в результате расчета эффективность оказывается недостаточной, следует уменьшить размеры циклона, т. е. повысить скорость и гидравлическое сопротивление. При этом степень очистки газа в циклоне возрастает. Если и этого окажется недостаточно, следует переходить на другой, более эффективный тип циклона, например с ЦН-24 на ЦН-15 или с ЦН-15 на ЦН-11. При этом следует повторить как расчет гидравлического сопротивления, так и расчет эффективности. Если и этого окажется недостаточно, следует переходить на другой, более эффективный тип циклона, например с ЦН-24 на ЦН-15 или с ЦН-15 на ЦН-11. При этом следует повторить как расчет гидравлического сопротивления, так и расчет эффективности.

Батарейные циклоны (мультициклоны)

Как известно, увеличение диаметра циклона приводит к снижению его эффективности, вследствие чего циклоны типа ЦН диаметром более 1000 мм применять не рекомендуется, что сильно ограничивает пропускную способность установки. Для объединения в группы обычные циклоны плохо приспособлены. Поэтому групповая компоновка их ограничена и конструктивно весьма несовершенна. Даже при создании группы из восьми циклонов типа ЦН-15 ее пропускная способность не превысит 50000 м³/ч. В связи с этим возникла необходимость в простых циклонных элементах небольшого диаметра, т. е. имеющих высокую степень очистки и приспособленных для объединения в большие группы с высокой пропускной способностью [6]. Применяют циклонные элементы с диаметром цилиндрической части корпуса 100, 150, 250 мм. В целях удобства объединения и компактности установки придание газовому потоку вращения достигается обычно не тангенциальным подводом газа, а размещением внутри циклонного элемента специального устройства, представляющего собой либо двухлопастной винт (рис. 1.4, а), либо розетку, состоящую из лопаток, установленных к оси под углом $\alpha = 25 \dots 30^\circ$ (рис. 1.4, б).

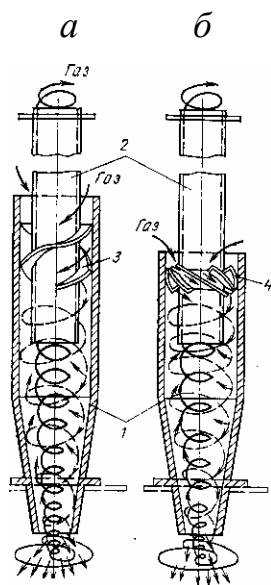


Рис. 1.4. Элементы батарейных циклонов: 1 – корпус элемента; 2 – выхлопная труба; 3 – винт; 4 – розетка

Розетки работают эффективнее, однако они чувствительнее к засорению, и поэтому их не рекомендуется использовать при чрезмерно высокой запыленности газа и слипающейся пыли. В некоторых типах батарейных циклонов применяют улиточный и полуулиточный подвод газа. Циклонные элементы компонуют в батареи, где они работают параллельно (рис. 1.5).

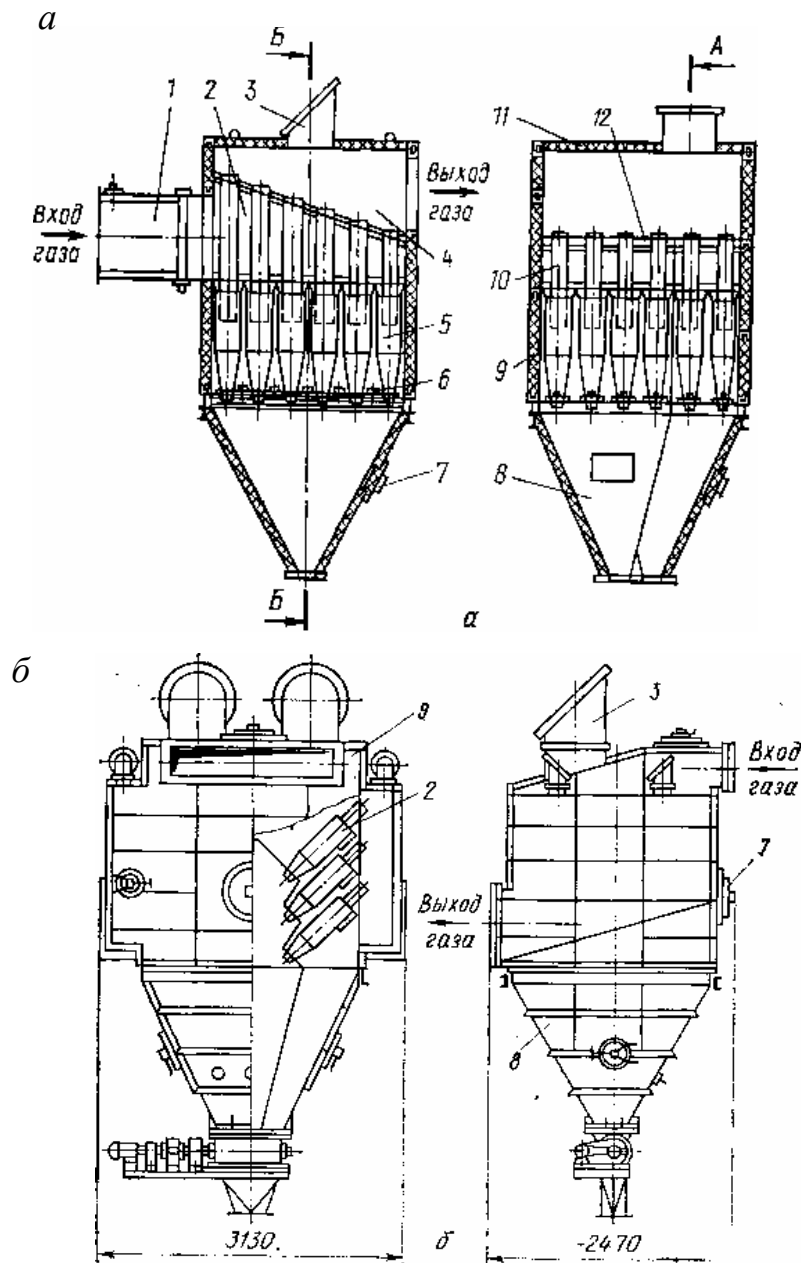


Рис. 1.5 Общий вид батарейных циклонов: 1 - подводящий патрубок; 2 - газораспределительная камера; 3 - предохранительный клапан; 4 - камера чистого газа; 5 - циклонный элемент; 6 - нижняя решетка; 7 - люк; 8 - бункер; 9 - корпус; 10 - выхлопная труба; 11 - крышка; 12 - верхняя крышка

Очищаемые газы вводятся через входной патрубок в общую распределительную камеру, откуда распределяются по отдельным элементам. Далее из сборной камеры очищенный газ через выходной патрубок, направленный в сторону, выводится из аппарата. Во избежание абразивного износа наружной поверхности на выхлопных трубах первых рядов укрепляют специальные защитные щитки, выполненные из половинок труб несколько большего диаметра.

Пыль, осаждающаяся в циклонных элементах, сыпается в общий для всех элементов бункер. Пространство между циклонными элементами засыпается шлаком. Большое число циклонных элементов, объединенных общим пылевым бункером, требует равномерного распределения газа по циклонным элементам. Последние должны быть строго одинаковых размеров, смонтированы с одинаковыми допусками и одинаковым гидравлическим сопротивлением.

Число циклонных элементов, объединенных общим пылевым бункером, не должно превышать 8 в ряду по ходу газов и 12 в ряду, перпендикулярном ему. При устройстве в бункере поперечной перегородки, ограничивающей перетекание газов, число элементов может быть увеличено до 10 в ряду по ходу газов и до 16 в ряду, перпендикулярном этому ходу.

Для равномерного распределения газа по элементам подвод к распределительной камере следует осуществлять с помощью диффузора с углом раскрытия не более 15° и шириной выхода, равной ширине камеры. Высота распределительной камеры определяется из условия, что скорость газов в живом сечении первого по ходу газов ряда труб не должна превышать 10...14 м/с.

Неравномерное распределение газа по циклонным элементам приводит к перетеканию газа из одних элементов в другие через общий пылевой бункер. Подсос в слабозагруженные элементы газа из бункера резко ухудшает процесс осаждения в них пыли. Кроме того, неравномерное распределение газа по элементам создает предпосылки для забивания пылью завихривающих устройств.

Расчет батарейных циклонов в принципе аналогичен расчету группы обычных циклонов. Сначала в зависимости от запыленности газов и свойств пыли выбирают диаметр циклонного элемента D (при большой начальной за-

пыленности газов и слипающейся пыли принимают элементы больших диаметров).

Далее определяют расход газа через один элемент V_1 , м³/с, при оптимальной скорости $W_{\text{опт}}$, которая для большинства элементов составляет 4,5 м/с:

$$V_1 = 0,785D^2W_{\text{опт}}.$$

Необходимое число циклонных элементов n при оптимальных условиях работы равно $n_{\text{опт}} = V/V_1$, где V — общий расход газа.

Руководствуясь правилами компоновки элементов в батарее, а также каталожными данными, определяем число элементов в батарее n и действительную скорость газа в элементе, которая не должна отличаться от оптимальной более чем на 10 %:

Потеря давления в батарейном циклоне:

$$\Delta P = \zeta \frac{W^2 \rho}{2},$$

где ζ — коэффициент сопротивления, который можно принимать равным для винтовых завихрителей 85, для розеточных при $\alpha = 30$ и 25° соответственно 65 и 90;

ρ — плотность газа при рабочих условиях, кг/м³.

Преимущества батарейных циклонов перед одиночными состоят в том, что батарейные циклоны могут быть рассчитаны на расход газов, который слишком велик для группы одиночных циклонов; при одном и том же расходе газа батарейный циклон значительно компактнее группы одиночных циклонов.

По сравнению с одиночными батарейные циклоны имеют следующие недостатки: повышенную металлоемкость, составляющую 200...500 кг металла на очистку 1000 м³/ч газа, т. е. примерно вдвое большую, чем одиночные циклоны; меньшую надежность в эксплуатации из-за возможности неравномерного рас-

пределения газа между циклонными элементами и подсоса воздуха через общий бункер; возможность засорения завихрителя при начальной запыленности газа более 100 г/м^3 .

Эффективность батарейных циклонов находят по той же методике, что и одиночных. Необходимые для расчета данные по циклонам с различными завихривающими устройствами приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6

Исходные данные для расчета батарейных циклонов

Параметры	«Винт»	«Розетка»	
Угол α , град	-	25	30
D , мм	250	250	250
d_{50}^T , мкм	4,5	3,85	5,0
$Ig \sigma_{\eta}$	0,46	0,46	0,46

Приведенные данные соответствуют следующим условиям работы циклонов: $D_T = 250 \text{ мм}$; $W_T = 4,5 \text{ м/с}$; $\mu_T = 23,7 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$; $\rho_{\text{гт}} = 2200 \text{ кг/м}^3$.

Опыт эксплуатации показывает, что эффективность батарейного циклона на 10...20 % ниже эффективности отдельного его элемента.

Наиболее частыми причинами нарушения нормальной работы батарейных циклонов являются: засорение завихривающих устройств отдельных циклонных элементов, а также прохождение газа мимо циклонных элементов вследствие износа выхлопных труб или нарушения герметичности опорных решеток. И та, и другая причины вызывают изменение сопротивления циклона, за которым нужно тщательно следить в процессе эксплуатации.

1.3. Пример расчета циклона

Выбрать циклон типа ЦН-15, определить его гидравлическое сопротивление и эффективность при следующих исходных данных:

- расход газа при нормальных условиях $V_0 = 40000 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- плотность газа $\rho_0 = 0,675 \text{ кг/м}^3$;

- температура газа $T = 250$ °С;
- вязкость газа $\mu = 24,8 \cdot 10^{-6}$ Па·с;
- барометрическое давление $P_{бар} = 101,3$ кПа;
- разрежение в циклоне $P_r = 100$ Па;
- начальная концентрация пыли в газе $C = 25$ г/м³;
- характеристика дисперсного состава пыли: $d_m = 10$ мкм; $lg \sigma_q = 0,7$;
- плотность частиц пыли $\rho_q = 3000$ кг/м³.

Циклон должен работать в сети без раскручивателя.

Решение. Плотность газа при рабочих условиях:

$$\rho_2 = \rho_0 \frac{273 \cdot (P_{бар} \pm P_r)}{(273 + t_r) \cdot 101,3 \cdot 10^3} = 1,29 \frac{273 \cdot (101,3 \cdot 10^3 - 100)}{(273 + 250) \cdot 101,3 \cdot 10^3} = 0,673 \text{ кг/м}^3.$$

Расход газа при рабочих условиях

$$V_r = \frac{V_0 \rho_0}{\rho_r \cdot 3600} = \frac{40000 \cdot 1,29}{0,673 \cdot 3600} = 21,3 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Диаметр циклона при оптимальной скорости $W_{опт} = 3,5$ м/с

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot V_r}{\pi \cdot W_{опт}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 21,3}{3,14 \cdot 3,5}} = 2,78 \text{ м}.$$

Так как диаметр циклона слишком большой, необходимо выполнить установку из шести циклонов ЦН-15. Расход газа тогда на один циклон получится

$$\frac{V_r}{6} = \frac{21,3}{6} = 3,55 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Уточненный диаметр циклона:

$$D = \sqrt{\frac{4V_r}{\pi \cdot W_{\text{опт}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,55}{3,14 \cdot 3,5}} = 1,137 \text{ м.}$$

Примем ближайший стандартный диаметр 1200 мм и найдем действительную скорость газа в циклоне:

$$W_{\text{ц}} = \frac{4V_r}{\pi D^2} = \frac{3,55 \cdot 4}{3,14 \cdot 1,2^2} = 3,14 \text{ м/с.}$$

Ввиду того что действительная скорость отличается от оптимальной менее чем на 15 % (10,3 %), остановимся на выбранном диаметре циклона.

Вычислим коэффициент сопротивления циклона:

$$\zeta = K_1 \cdot K_2 \cdot \zeta_{500} = 1 \cdot 0,92 \cdot 155 = 142,6 \approx 143.$$

Величины K_1 , K_2 и ζ_{500} берем из табл. 1.1, 1.2, 1.3.

Коэффициент гидравлического сопротивления группы циклонов определяется по формуле

$$\zeta_{\text{гц}} = \zeta_{\text{ц}} + K_3 = 143 + 35 = 178,$$

где K_3 – коэффициент, учитывающий дополнительные потери давления, связанные с компоновкой циклонов в группу прямоугольной компоновки.

Для прямоугольной компоновки, при организованном подводе запыленного газа, циклонные элементы расположены в одной плоскости. Отвод из общей камеры чистого газа - $K_2 = 35$.

Гидравлическое сопротивление циклона:

$$\Delta P = \zeta \frac{W^2 \rho}{2} = 142,6 \cdot \frac{3,14^2 \cdot 0,673}{2} = 473 \text{ Па.}$$

Гидравлическое сопротивление циклонной установки из шести циклонов

$$\Delta P = \zeta_{\text{ци}} \frac{W_{\text{ц}}^2 \rho_{\text{г}}}{2} = 178 \cdot \frac{3,14^2 \cdot 0,673}{2} = 590 \text{ Па.}$$

Размер частиц d_{50} , улавливаемых выбранным циклоном при рабочих условиях с эффективностью 50 %, определим по следующей формуле:

$$d_{50} = d_{50}^{\dot{\circ}} \sqrt{\frac{D}{D_{\dot{\circ}}} \frac{\rho_{\dot{\circ}}}{\rho_{\dot{\circ}}} \frac{\mu}{\mu_{\text{T}}} \frac{W_{\dot{\circ}}}{W}} = 4,5 \sqrt{\frac{1,2 \cdot 1930 \cdot 24,8 \cdot 10^{-6} \cdot 3,5}{0,6 \cdot 3000 \cdot 22,2 \cdot 10^{-6} \cdot 3,14}} = 5,7 \text{ мкм,}$$

где D_{T} , $\rho_{\text{чТ}}$, μ_{T} , W_{T} – величины, соответствующие условиям, при которых получена величина $d_{50} = 4,5$ мкм;

D , $\rho_{\text{ч}}$, μ , W_{T} – величины, соответствующие действительным условиям работы циклона.

Определим параметр x по следующей формуле:

$$x = \frac{\lg\left(\frac{d_m}{d_{50}}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta} + \lg^2 \sigma_{\alpha}}} = \frac{\lg\left(\frac{10}{5,7}\right)}{\sqrt{0,352^2 + 0,7^2}} = 0,312.$$

Определим численное значение функции $\Phi(x)$, полный коэффициент очистки газа, выраженный в долях (по табл. 1.5), по следующей формуле:

$$\eta = \Phi(x) = \Phi(0,312) = 0,6225.$$

Если η окажется меньше требуемого, необходимо увеличить количество циклонов или выбрать другой тип циклона с большим значением $\zeta_{\text{ц}}$.

1.4. Рекомендации по использованию и эксплуатации циклонов

В процессе эксплуатации циклонные установки следует подвергать систематическим осмотрам, наружные осмотры необходимо производить несколько раз в смену. Результаты осмотров записывают в журнал начальника смены. Внутренние осмотры выполняют во время остановки основного технологического оборудования. В батарейных циклонах обращают внимание на степень изношенности элементов, наросты пыли на направляющих лопатках, герметичность затворов и питателей.

С повышением крупности частиц и ее плотности эффективность очистки возрастает. Повышение температуры газов, которое обуславливает увеличение их вязкости, а также увеличение диаметра цилиндрической части циклона вызывает снижение эффективности очистки.

С повышением скорости газового потока улучшается улавливание пыли в циклоне. Однако при больших скоростях рост КПД замедляется, а при переходе некоторого предела, зависящего от конструкции циклона и дисперсного состава улавливаемой пыли, начинает даже снижаться. Это вызвано возникновением завихрений, срывающих уже осевшие частицы пыли, и дроблением скоагулированных пылевых агрегатов. Эффективные скорости входа газа в циклон колеблются от 20 до 25 м/с, но не менее 15 м/с.

Поток, поступающий в выхлопную трубу, продолжает интенсивно вращаться. Затухание этого вращательного движения происходит медленно. Для устранения вращательного движения на выходе из циклона и уменьшения гидравлических потерь, иногда применяют специальные устройства, например раскручиватели.

Бункер участвует в аэродинамике циклонного процесса, поэтому использование циклонов без бункера или с уменьшенными размерами по сравнению с рекомендуемыми, снижает КПД аппаратов.

Основные требования при эксплуатации циклонов:

1. *Своевременное освобождение бункеров циклонов от пыли.* При нерегулярном выпуске пыли происходит переполнение бункера, что недопустимо, так как уменьшается степень очистки в результате выноса уловленной пыли из бункера и возможно забивание циклона пылью. Для циклонов ЦН слой пыли в бункере при наибольшем его заполнении должен быть ниже пылевыпускных отверстий не менее чем на высоту двух диаметров этих отверстий.

2. *Контроль величины газодинамического сопротивления циклона.* Увеличение сопротивления с одновременным ухудшением очистки указывает на вероятность замазывания мокрой пылью аппаратов либо является результатом повышения расхода газов. Уменьшение сопротивления с одновременным ухудшением очистки является результатом того, что газопылевой поток проходит через щели, минуя циклоны.

Для предупреждения забивания аппаратов улавливаемым продуктом при очистке газов от сильно слипающихся пылей устанавливают вибраторы на бункерах, а иногда и на конической части циклонов, которые включаются периодически в зависимости от характеристики пыли. При установке вибраторов желательно предусмотреть компенсаторы между циклонами и примыкающими участками газоходов (для предотвращения поломки частей по сварным швам).

3. *Предварительное отделение наиболее крупных частиц.* Резко снижается скорость износа стенок циклонов при улавливании высокоабразивной пыли. Если позволяют размеры аппарата, то желательна футеровка его изнутри керамической плиткой.

4. *Снижение начальной запыленности газов.* Для обеспечения надежной работы циклонов при очистке газов от среднеслипающихся пылей допустимая запыленность должна быть уменьшена в 4 раза, а для сильно слипающихся в 8...10 раз.

5. *Установка сигнализаторов уровня пыли.* Циклонные установки должны снабжаться сигнализаторами уровня пыли в бункере. При их отсутствии проверяют уровень пыли путем легкого обстукивания стенок бункера по звуку [7].

2. РАСЧЕТ РУКАВНОГО ФИЛЬТРА

2.1. Краткая характеристика фильтров

Различают матерчатые фильтры (рис. 2.1) рамного или рукавного типов. В рамных ткань натягивается на рамки. Рукавные фильтры более совершенны по конструкции и надежности в работе.

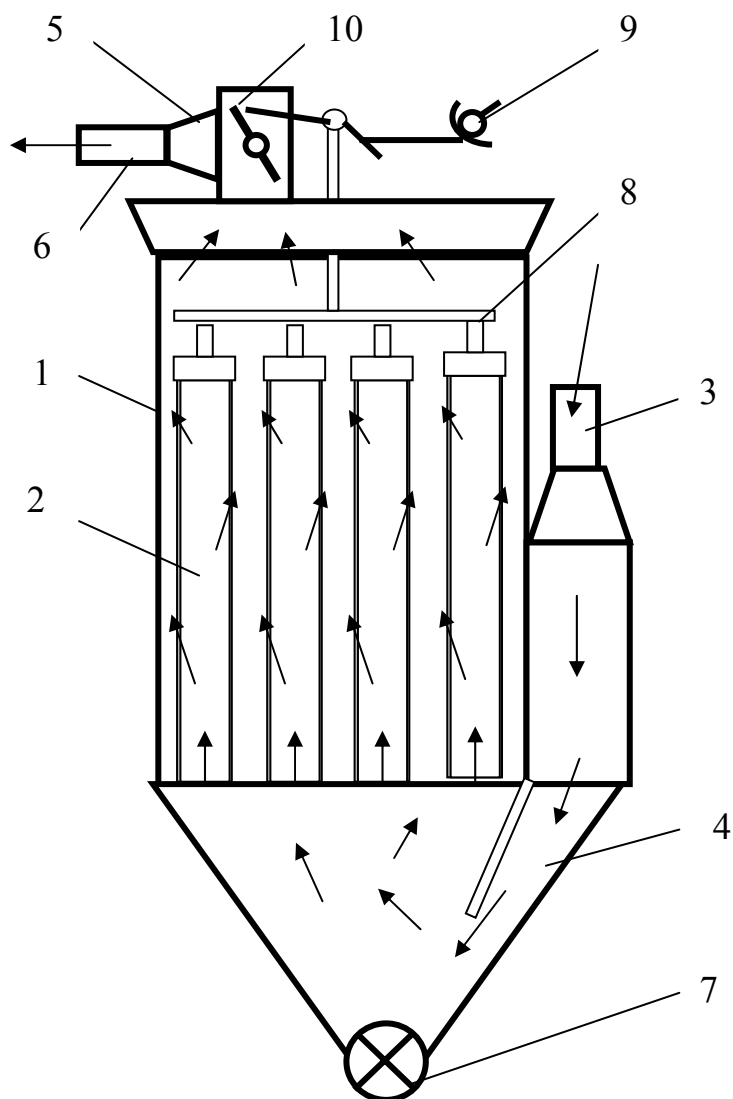


Рис. 2.1. Схема рукавного фильтра: 1 – металлический корпус; 2 – матерчатые рукава; 3 – трубопровод; 4 – нижняя часть фильтра; 5 – труба; 6 – общий трубопровод; 7 – винтовой транспортер; 8 – планка; 9 – встряхивающий механизм; 10 – заслонка

В закрытом металлическом корпусе 1 фильтра подвешиваются матерчатые рукава 2 цилиндрической формы. Рукава собраны в секции по 8...12 штук. Секции разделены перегородками на отдельные камеры. Нижние концы рукавов открыты для входа газов. Запыленный газ по трубопроводу 3 подводится в нижнюю часть 4 фильтра, откуда направляется в нижние открытые отверстия рукавов. Проходя через поры ткани, газ очищается, оставляя пыль на внутренних стенках рукавов. Очищенный газ собирается в верхней части металлического кожуха, затем отводится через трубу 5 в общий трубопровод 6. Через матерчатые фильтры газ просасывается с помощью вентиляторов, которые могут нагнетать их в фильтр или отсасывать.

В первом случае установка работает под давлением, во втором – под разрежением. Фильтр на нашем рисунке работает под разрежением.

Для того чтобы частицы пыли, оседающие на внутренней поверхности рукавов, не загрязняли ткани, рукава периодически встряхивают. Пыль при этом падает в нижнюю часть кожуха, из которого отводится винтовым транспортером 7. Рукава каждой секции подвешены к планке 8, которая соединена со встряхивающим механизмом 9, работающим от электродвигателя. В момент встряхивания рукавов камера отсоединяется от сборного трубопровода 6 заслонкой 10 (иногда применяют клапан), действующей от механизма встряхивания. Для лучшей очистки ткань продувают воздухом в направлении, противоположном основному движению газов. Рукава каждой секции встряхивают в течение 18...20 с, затем клапаны продувочного воздуха закрывают, а заслонку 10 открывают, и секция вновь включается в работу.

Диаметр рукавов обычно равен 180...210 мм, длина 2...3,5 м. Степень очистки газа 97...99 %. Сопротивление рукавного фильтра в среднем составляет 250...350 Па, но при увеличении остаточной запыленности ткани может возрасти в 2...3 раза.

2.2. Методика расчета фильтров

Технологические расчеты фильтровальных аппаратов сводятся к определению площади фильтровальной перегородки, гидравлического сопротивления фильтровальной перегородки и аппарата в целом, частоты и продолжительности циклов регенерации фильтровальных элементов [8].

Фильтрующая поверхность аппарата или группы аппаратов F_{ϕ} , м^2 , определяется из выражения

$$F_{\phi} = \frac{V_{\text{п}} + V_{\text{р}}}{60q} + F_{\text{р}},$$

где $V_{\text{п}}$ - объем газа, поступающего на очистку, $\text{м}^3/\text{ч}$;

$V_{\text{р}}$ - объем газа или воздуха, расходуемого на обратную продувку, $\text{м}^3/\text{ч}$;

q - удельная газовая нагрузка при фильтровании, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$;

$F_{\text{р}}$ - фильтрующая поверхность, отключаемая на регенерации в течение 1 ч, м^2 , определяется из выражения

$$F_{\phi} = \frac{N_{\text{с}} F_{\text{с}} \tau'_{\text{р}} m_{\text{р}}}{3600},$$

где $N_{\text{с}}$ – число секций;

F – фильтрующая поверхность секции, м^2 ;

$\tau'_{\text{р}}$ – время отключения секции на регенерацию, с;

$m_{\text{р}}$ – число регенераций в течение 1 ч.

Для фильтров с импульсной продувкой, в связи с кратковременностью процесса регенерации, поверхностью фильтра, выводимой из процесса фильтрации на время регенерации, и объемом газа, расходуемого на обратную продувку, можно пренебречь.

Удельная газовая нагрузка на фильтровальную перегородку колеблется для рукавных фильтров от 0,3 до 6 м³/(м²·мин). Внутри этого диапазона выбор оптимального значения зависит от многих факторов, к которым в первую очередь относятся свойства улавливаемой пыли, способ регенерации фильтровальных элементов, концентрация пыли в газе, структура фильтровального материала, температура очищаемого газа, требуемая степень очистки. Зависимости, характеризующие процесс фильтрования с качественной стороны, не в состоянии учесть всего многообразия действующих факторов, и поэтому при расчетах приходится прибегать к зависимостям, выведенным на основании многолетнего опыта эксплуатации фильтровальных аппаратов.

С достаточной для практических расчетов точностью удельная газовая нагрузка в рукавных фильтрах может определяться из следующего выражения:

$$q = q_n \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5,$$

где q_n — нормативная удельная нагрузка, зависящая от вида пыли и ее склонности к агломерации, м³/(м²·мин):

$q_n = 3,5$ — комбикорн, мука, зерно, пыль кожи, опилки, табак, картонная пыль;

$q_n = 2,6$ — асбест, волокнистые и целлюлозные материалы, гипс, известь, соль, песок, тальк, сода;

$q_n = 2$ — глинозем, цемент, уголь, резина, каолин, известняк, сахар, пыль горных пород;

$q_n = 1,7$ — кокс, летучая зола, металлопорошки, пластмассы, красители, силикаты, крахмал, химикаты из нефтесырья;

$q_n = 1,2$ — активированный уголь, технический углерод, моющие вещества, возгоны цветных и черных металлов;

C_1 — коэффициент, характеризующий особенность регенерации фильтровальных элементов. Для коэффициента, учитывающего влияние особенностей регенерации фильтровальных элементов, в качестве базового варианта принимается фильтр с импульсной продувкой сжатым воздухом с рукавами из ткани.

Для этого аппарата коэффициент $C_1 = 1$. При использовании рукавов из нетканых материалов значение коэффициента может увеличиваться на 5...10 %.

Для фильтров с регенерацией путем обратной продувки и одновременного встряхивания или покачивания рукавов принимается коэффициент $C_1 = 0,70...0,85$. Меньшее значение принимается для фильтров с рукавами из плотной ткани и с элементами, выполненными в виде конвертов.

Для фильтров с регенерацией путем обратной продувки коэффициент $C_1 = 0,55...0,70$. Меньшее из этих значений принимается для рукавов из стеклоткани и фильтров, снабженных фильтровальными элементами, выполненными в виде конвертов;

C_2 — коэффициент, учитывающий влияние концентрации пыли на удельную газовую нагрузку (рис. 2.2). Концентрация пыли сказывается на продолжительности цикла фильтрования. При увеличении концентрации пыли возрастает частота регенераций, а удельная нагрузка снижается. Однако зависимость удельной нагрузки от концентрации пыли не является линейной функцией. Наиболее заметно изменение концентрации проявляет себя в интервале концентраций 1...30 г/м³. При более высоких значениях усиливается влияние коагуляции частиц пыли. Часть пыли в виде агломератов падает в бункер до ее осаждения на фильтровальных элементах;

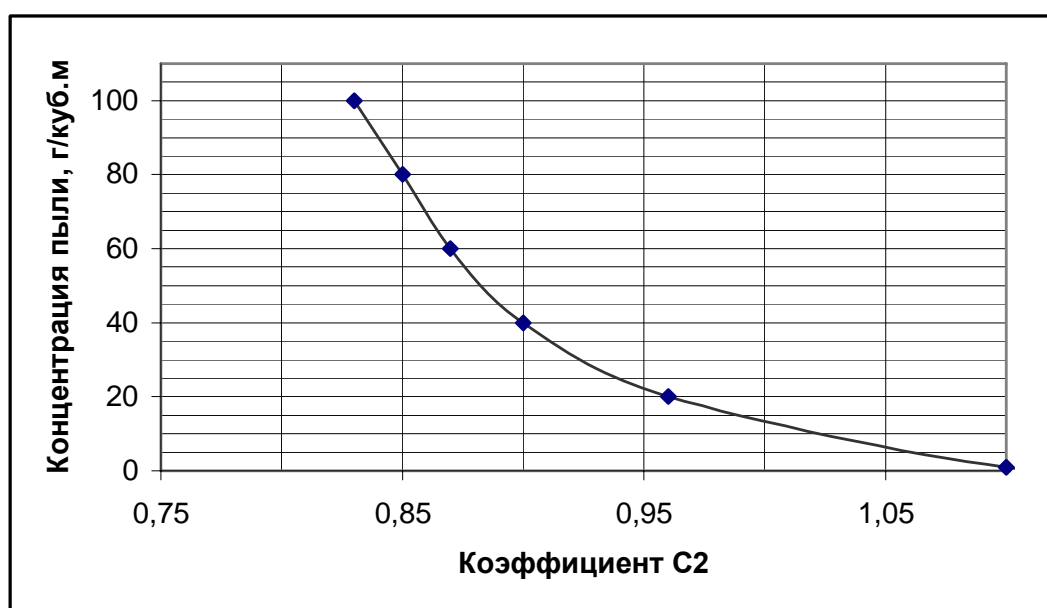


Рис. 2.2 Зависимость коэффициента C_2 от концентрации пыли

C_3 — коэффициент, учитывающий влияние дисперсного состава пыли в газе. Оценка влияния дисперсного состава пыли на выбор удельной нагрузки должна проводиться на основе анализа пробы, взятой во взвешенном состоянии. Пыль, осажденная из потока в виде слоя, укрупняется, из-за чего в процессе жидкостной седиментации получают искаженные результаты. Особенно заметно это явление при анализе субмикронных частиц. Экспериментальные значения коэффициента зависят от медианного размера частиц пыли:

$$C_3 = 1,2 \dots 1,4, \text{ при } d_m > 100 \text{ мкм};$$

$$C_3 = 1,1, \text{ при } d_m = 50 \dots 100 \text{ мкм};$$

$$C_3 = 1,0, \text{ при } d_m = 10 \dots 50 \text{ мкм};$$

$$C_3 = 0,9, \text{ при } d_m = 3 \dots 10 \text{ мкм};$$

$$C_3 = 0,7 \dots 0,9, \text{ при } d_m < 3 \text{ мкм};$$

C_4 — коэффициент, учитывающий влияние температуры газа. Температура оказывает непосредственное влияние на вязкость газов, от которой, в свою очередь, зависит удельная нагрузка:

$t, ^\circ\text{C} \dots$	20	40	60	80	100	120	140	160
$C_4 \dots$	1,0	0,90	0,84	0,78	0,75	0,73	0,72	0,70

C_5 — коэффициент, учитывающий требования к качеству очистки оценивается по концентрации пыли в очищенном газе. Как показывают эксперименты, с увеличением скорости фильтрования концентрация пыли в очищенных газах увеличивается. Принято считать, что в исправно действующем фильтре концентрация пыли на выходе из фильтра не должна превышать 30 мг/м^3 ; для этих условий принимается значение $C_5 = 1$. Если к качеству очистки предъявляются более жесткие требования, коэффициент C_5 снижается. В случае, если концентрация пыли в очищенных газах не должна превышать 10 мг/м^3 , коэффициент принимается равным 0,95.

С помощью приведенной методики расчета могут быть получены предварительные сведения о выборе оптимальной газовой удельной нагрузки. В процессе проведения наладки оборудования удельная нагрузка должна устанавливаться с учетом особенности технологического процесса, свойств пыли, эконо-

мических показателей, стоимости электрической энергии, сжатого воздуха, объема очищаемого газа.

Для технологических процессов, разрабатываемых впервые, удельная газовая нагрузка выбирается на основании результатов экспериментов, проводимых в промышленных условиях на пилотном фильтре, снабженном рукавами из материалов, которые предполагается использовать в промышленных аппаратах.

Для предварительных расчетов удельную газовую нагрузку с достаточной точностью можно определить, пользуясь номограммой (рис. 2.3).

В основу построения номограммы положены результаты исследований, учитывающих влияние мелких фракций, плотности и концентрации пыли на степень очистки и гидравлическое сопротивление. По оси ординат, в верхней части номограммы, на участке *A* откладывается содержание массы пыли с медианным размером частиц меньше 10 мкм в процентах к общей массе улавливаемой пыли.

В нижней части номограммы на участке *B* откладывается концентрация пыли (г/м^3) на входе в фильтр. Наклонные линии характеризуют влияние плотности пыли.

По оси абсцисс в средней части номограммы откладывается удельная газовая нагрузка. Для определения удельной газовой нагрузки на шкале *A* от точки, соответствующей заданной дисперсности пыли, проводят горизонтальную линию до пересечения с наклонной линией *D*; от точки заданной входной запыленности на шкале *B* проводят горизонтальную линию до пересечения с наклонными линиями, соответствующими плотности улавливаемой пыли.

Соединив полученные точки прямой линией, получаем в месте пересечения прямой с осью абсцисс в средней части диаграммы удельную газовую нагрузку при температуре очищаемых газов 20 °С. При более высоких температурах следует ввести поправку в соответствии с приведенными на с. 34 значениями коэффициента C_4 .

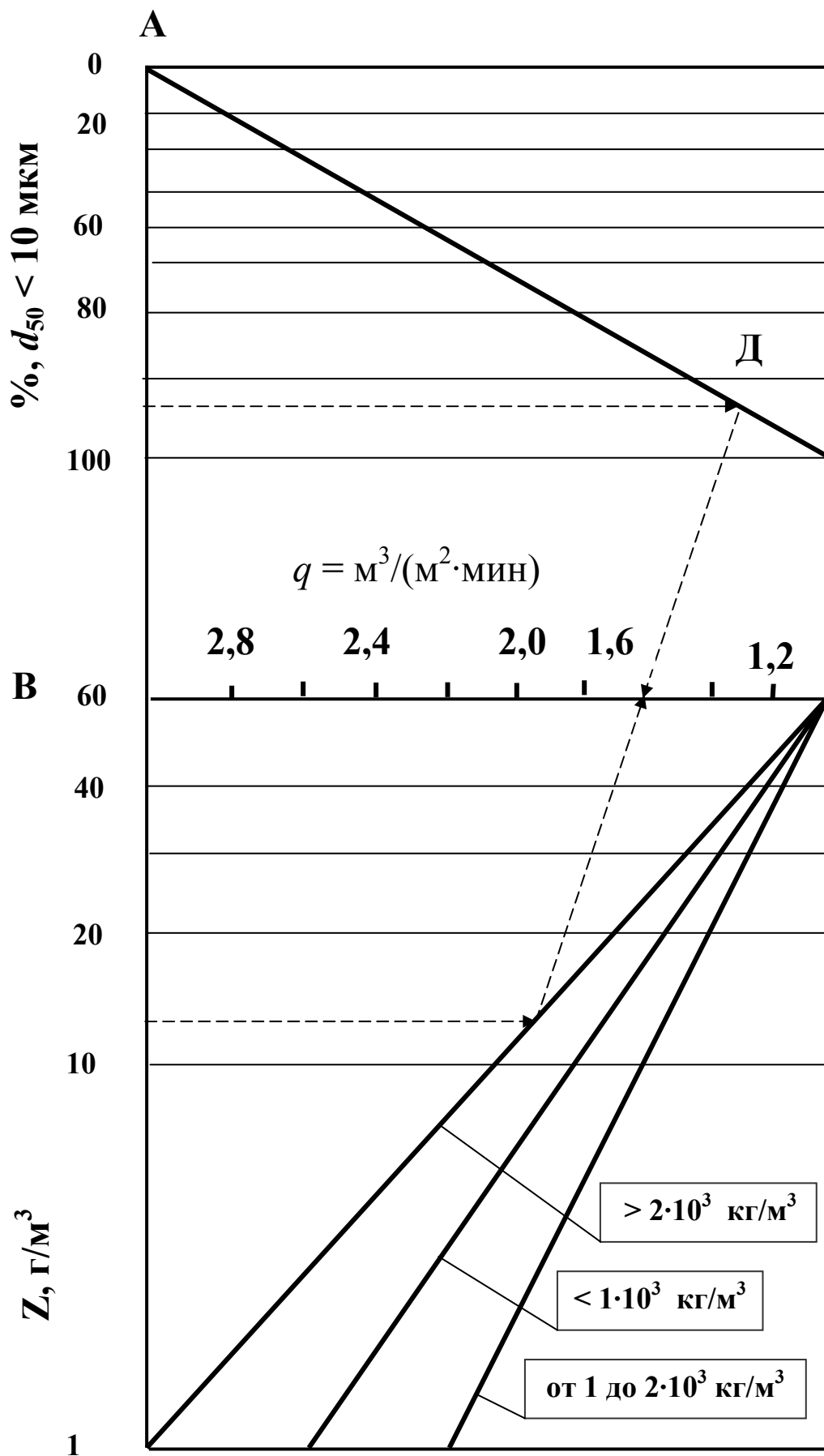


Рис. 2.3. Номограмма для определения удельной нагрузки для пылей $d_{50} = 2 \dots 10 \text{ мкм}$

При подборе рукавных фильтров важным является оценка ожидаемого гидравлического сопротивления, определяющего энергетические затраты на фильтрование. Гидравлическое сопротивление рукавных фильтров ΔP_{ϕ} складывается из сопротивления корпуса аппаратов $\Delta P_{к}$ и сопротивления фильтровальной перегородки $\Delta P_{п}$:

$$\Delta P_{\phi} = \Delta P_{к} + \Delta P_{п}.$$

Гидравлическое сопротивление корпуса аппарата определяется величиной местных сопротивлений, возникающих на входе и выходе из аппарата и при раздаче потока по фильтровальным элементам. В общем виде гидравлическое сопротивление корпуса аппарата может быть оценено коэффициентом сопротивления корпуса аппарата, отнесенным к скорости газа во входном патрубке:

$$\zeta = \frac{\Delta P_{к} 2}{W_{вх}^2 \rho_{г}},$$

где $W_{вх}$ — скорость газового потока во входном патрубке, м/с.

Для правильно сконструированных рукавных фильтров коэффициент гидравлического сопротивления корпуса обычно составляет 1,5...2,0. Для рукавных фильтров с обратной продувкой, снабженных тарельчатыми клапанами на входе и выходе газа из каждой секции, коэффициенты гидравлического сопротивления принимают более высокие значения. Гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки $\Delta P_{п}$ в значительной степени зависит от массы и свойств осевшей на ней пыли и образуется двумя составляющими: постоянной $\Delta P'$ и переменной $\Delta P''$:

$$\Delta P_{п} = \Delta P' + \Delta P''.$$

Постоянная составляющая гидравлического сопротивления $\Delta P'$ создается самой фильтровальной перегородкой и оставшимся на ней после регенерации слоем пыли. Постоянную составляющую удобно вычислить по выражению

$$\Delta P' = K_{\Pi} \mu W^n,$$

где K_{Π} – коэффициент, характеризующий сопротивление фильтровальной перегородки с оставшимся на ней слоем пыли, м^{-1} ;

W – скорость фильтрования, м/с ;

n – показатель степени, зависящий от режима течения потока (для расчетов можно принимать $n = 1$; при турбулентном течении $n > 1$);

μ – вязкость газа, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Исследования показывают, что чем мельче частицы улавливаемой пыли и меньше размер пор фильтровального материала, тем выше коэффициент K_{Π} . Коэффициент K_{Π} для волокнистых материалов является функцией следующих величин:

$$K_{\Pi} = f\left(\frac{H}{K_T}; \frac{G_k}{\rho_n F_{\Phi}}\right),$$

где H – толщина фильтровального материала, м ;

K_T – проницаемость волокнистого материала с оставшимся после регенерации слоем пыли, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

G_k/F_{Φ} – масса пыли, оставшаяся после регенерации, г/м^2 .

Путем обработки экспериментального материала были получены следующие значения K_{Π} : для фильтровальных тканей из лавсана арт. 136 и 217, улавливающих цементную или кварцевую пыль с медианным диаметром в пределах $10 \dots 20$ $\mu\text{км}$ $K_{\Pi} = (1100 \dots 1500) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$; для тех же материалов при улавливании возгонов от сталеплавильных дуговых печей с медианным диаметром частиц $2,5 \dots 3,0$ $\mu\text{км}$ $K_{\Pi} = (2300 \dots 2400) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. Для более плотных тканей (лавсан арт.

86013, стеклоткани) на тех же пылях коэффициент сопротивления фильтровальной перегородки увеличивается в 1,2...1,3 раза.

При улавливании пылей с медианным размером частиц меньше 1 мкм коэффициент сопротивления фильтровальной перегородки увеличивается в несколько раз и для ткани типа артикул 86013 при улавливании возгонов кремния с медианным диаметром частиц 0,6 мкм $K_{\text{п}} = 13\ 000 \dots 15\ 000) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$.

Приведенные значения коэффициентов $K_{\text{п}}$ могут быть использованы при расчетах гидравлического сопротивления фильтров с импульсной продувкой. В рукавных фильтрах с обратной продувкой после регенерации на фильтровальном материале остается больше пыли, в этом случае значение коэффициентов следует увеличивать на 15...25 %. Приведенные значения коэффициентов не учитывают возможное увеличение гидравлического сопротивления от наличия влаги. Применительно к эксплуатации рукавных фильтров важное значение имеет переменная составляющая гидравлического сопротивления фильтровальной перегородки, которое создается слоем пыли, накапливающимся в процессе фильтрования в период между регенерациями рукавов. Для расчетов переменной величины гидравлического сопротивления $\Delta P''$ можно пользоваться зависимостью

$$\Delta P'' = \frac{\mu \tau Z_{\text{вх}} W^2 K_{\text{пс}}}{d_{50}^2 \rho_{\text{п}}},$$

где $K_{\text{пс}}$ - коэффициент сопротивления слоя пыли (зависит от формы частиц пыли).

Поскольку $\rho_{\text{п}}$, d_{50} , $K_{\text{пс}}$ являются величинами, характеризующими только свойства пыли, удобно их объединить одним параметром сопротивления слоя пыли K_1 (м/кг):

$$K_1 = \frac{K_{\text{пс}}}{d_{50}^2 \rho_{\text{п}}},$$

Тогда для расчета $\Delta P''$ удобнее использовать выражение

$$\Delta P'' = \mu \tau Z_{\text{вх}} W^2 K_1, \quad (2.1)$$

Параметр сопротивления слоя пыли K_1 для цемента с медианным диаметром частиц 12...20 мкм составляет $(6,5...16) \cdot 10^9$ м/кг.

Большие значения параметров относятся к более мелкой пыли. Для возгонов сталеплавильной дуговой печи с медианным диаметром частиц $d_{50} = 3$ мкм $K_1 = 80 \cdot 10^9$ м/кг. Для возгонов руднотермических печей плавки кремния с медианным диаметром частиц $d_{50} = 0,7$ мкм $K_1 = 330 \cdot 10^9$ м/кг. Таким образом, в зависимости от вида улавливаемой пыли гидравлическое сопротивление фильтра для одной и той же скорости фильтрования может принимать различные значения в очень широких пределах. Однако при больших перепадах давления на фильтровальной перегородке в фильтрах с импульсной продувкой резко ухудшается встряхиваемость уловленной пыли с фильтровальных рукавов. Поэтому при улавливании тонкой пыли скорость фильтрования необходимо снижать до такого предела, при котором гидравлическое сопротивление фильтра не должно превышать нормативные данные более чем на 30 %, т. е. должно быть не выше 2800 Па.

Пользуясь формулой (2.1) и задаваясь переменной величиной гидравлического сопротивления фильтровальной перегородки, можно определить продолжительность фильтровального цикла τ , с:

$$\tau = \frac{\Delta P''}{\mu Z_{\text{вх}} W^2 K_1}.$$

Для мелких пылей переменную величину гидравлического сопротивления фильтровальной перегородки принимают в пределах 600...800 Па, для крупных пылей с медианным диаметром частиц более 20 мкм – 250...350 Па.

При улавливании волокнистой пыли и пуха переменная величина гидравлического сопротивления может быть в пределах 200...250 Па. При улавливании грубых пылей, близких по своей форме к шару, при расчете переменной составляющей гидравлического сопротивления фильтровальной перегородки можно пользоваться формулой, предложенной А.С. Мандрико и И.Л. Пейсаховым:

$$\Delta P'' = \frac{817\mu W^2 Z_{\text{вх}} (1 - m_{\text{п}}) \tau}{d_{50}^2 m_{\text{п}}^3 \rho_{\text{п}}},$$

где $m_{\text{п}}$ — пористость слоя пыли; определяется из отношения

$$m_{\text{п}} = \frac{\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{т}}}.$$

Пользуясь приведенной зависимостью, можно определить длительность цикла фильтрования по выражению

$$\tau = \frac{\Delta P'' d_{50}^2 m_{\text{п}}^3 \rho_{\text{п}}}{817\mu W^2 Z_{\text{вх}} (1 - m_{\text{п}})}.$$

Пористость пыли в основном определяется ее дисперсностью. В первом приближении пористость может быть определена из выражения

$$1 - m_{\text{п}} = 79 d_{50}^{0,47}.$$

Недостатком приведенной методики расчетов гидравлического сопротивления пылевого слоя и времени фильтровального цикла является трудность оценки эффективной пористости слоя, т. е. доли пор, через которые протекает газ. Как показали специальные исследования, при отклонении формы частиц от формы шара значительная часть пор оказывается закрытой.

В любом случае продолжительность фильтровального цикла любой секции (рукавов) должна быть всегда больше продолжительности регенераций всех остальных секций (рукавов) аппарата:

$$\tau \geq \tau_p(n - 1) + (150 - 200).$$

Мощность электродвигателя вентилятора, необходимого для транспортирования очищаемых газов через фильтр, подсчитывается по выражению

$$N_B = \frac{K' V_{\text{п}} \Delta P}{3600 \cdot 1000 \eta_M \eta_B},$$

где K' — коэффициент запаса мощности электродвигателя на пусковой момент (принимается 1,1...1,15);

ΔP — гидравлическое сопротивление фильтра (подводящих и отводящих участков), Па;

η_M — КПД передачи (для клинопеременной передачи принимается 0,92...0,95);

η_B — КПД вентилятора (принимается 0,65...0,8).

Расход электроэнергии подсчитывается без учета коэффициента K' .

2.3. Примеры расчета рукавного фильтра

Пример 1

Необходимо определить фильтрующую поверхность, гидравлическое сопротивление, мощность электродвигателя вентилятора при транспортировании газов через фильтр и продолжительность цикла фильтрования аппарата для очистки газов, поступающих от групповых циклонов СЦН–40–650х4.

Исходные данные:

- расход очищаемых газов 40 тыс. м³/ч;
- температура пыли в очищаемых газах 24 °С;
- концентрация пыли в очищаемых газах 0,083 г/м³;
- плотность пыли 3,8·10³ кг/м³;
- медианный диаметр частиц пыли 17,7 мкм;
- фильтровальный материал – лавсан артикул 86033;
- требование к очищенному газу: содержание пыли не должно превышать 10 мг/м³;
- КПД вентилятора 0,75;
- передача к вентилятору – клиноременная.

Решение. Определяем удельную газовую нагрузку, пользуясь выражением:

$$q = q_n \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5,$$

где C_1 – коэффициент, учитывающий способ регенерации фильтра;

C_2 – коэффициент, учитывающий концентрацию пыли;

C_3 – коэффициент, учитывающий влияние дисперсного состава пыли;

C_4 – коэффициент, учитывающий влияние температуры пыли;

C_5 – коэффициент, учитывающий тип фильтроткани.

Принимаем $q_n = 1,2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$.

Для фильтра с импульсной продувкой $C_1 = 1$; $C_2 = 1,15$; $C_3 = 1$; $C_4 = 1$.

С учетом повышенных требований к очищенному газу $C_5 = 0,95$.

Подставляя эти значения в формулу, получим

$$q = 1,2 \cdot 1 \cdot 1,15 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,95 = 1,311 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин}).$$

Определяем фильтровальную площадь:

$$F = \frac{V}{60q} = \frac{40000}{60 \cdot 1,311} = 508,5 \text{ м}^2.$$

Принимаем для приведенных условий 2 фильтра с импульсной продувкой ФРКИ-240М1.

Фильтровальная площадь 2 фильтров с импульсной продувкой ФРКИ-240М1 равна 480 м².

Скорость газа через фильтровальную поверхность:

$$W = \frac{40000}{480 \cdot 3600} = 0,023 \text{ м/с.}$$

Определяем гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки, предварительно оценивая длительность цикла фильтрования $\tau = 600$ с:

$$\Delta P_{\text{п}} = K_{\text{п}}\mu W + K_1\mu\tau Z_{\text{вх}} W^2.$$

Принимаем $K_{\text{п}} = 1700 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$; $K_1 = 11 \cdot 10^9 \text{ м/кг}$; $\mu = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$;
 $W = 0,023 \text{ м/с}$.

Подставляя эти значения в формулу, получим

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{п}} &= 1700 \cdot 10^6 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \cdot 0,023 + 11 \cdot 10^9 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \cdot 600 \cdot 0,083 \cdot 10^{-3} \cdot 0,023^2 = \\ &= 782 + 6 = 788 \text{ Па.} \end{aligned}$$

Определяем гидравлическое сопротивление аппарата в целом, пользуясь выражением

$$\Delta P_{\text{ф}} = \Delta P_{\text{к}} + \Delta P_{\text{п}}.$$

Гидравлическое сопротивление корпуса аппарата ΔP_k определяем, задаваясь коэффициентом гидравлического сопротивления корпуса, приведенного к скорости во входном патрубке, $\zeta_k = 2,5$. Скорость во входном патрубке определяем из соотношения

$$W = \frac{V}{F_{\text{вх}}} = \frac{40000}{3600 \cdot 1,32} = 8,4 \text{ м/с.}$$

Тогда

$$\Delta P_k = \zeta_k \cdot \frac{W_{\text{вх}}^2 \rho_{\Gamma}}{2} = 2,5 \cdot \frac{8,4^2 \cdot 1,15}{2} = 102 \text{ Па,}$$

где: $\rho_{\Gamma} = 1,15 \text{ кг/м}^3$ – плотность газа.

Общее гидравлическое сопротивление аппарата

$$\Delta P_{\phi} = 788 + 102 = 890 \text{ Па.}$$

Гидравлическое сопротивление циклона и сети равно 1994 Па.

Гидравлическое сопротивление циклона, сети и фильтра равно

$$\Delta P_{\Sigma} = 1994 + 890 = 2884 \text{ Па.}$$

Определим мощность электродвигателя вентилятора при транспортировании газа через пылеулавливающую установку после модернизации:

$$N = \frac{V \cdot \Delta P_{\Sigma}}{3600 \cdot 1000 \eta_M \eta_B} = \frac{40000 \cdot 2884}{3600 \cdot 1000 \cdot 0,75 \cdot 0,92} = 46,4 \text{ кВт.}$$

Пример 2

Определить фильтрующую поверхность, гидравлическое сопротивление, мощность электродвигателя вентилятора при транспортировании газов через фильтр и продолжительность цикла фильтрования аппарата для очистки газов, поступающих от дуговых сталеплавильных печей.

Исходные данные:

- расход очищаемых газов $V = 64\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- температура пыли в очищаемых газах $t_r = 150 \text{ °С}$;
- концентрация пыли в очищаемых газах $C_n = 1,0 \text{ г/м}^3$;
- плотность пыли $\rho_n = 2,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$;
- медианный диаметр частиц пыли $d_m = 3,2 \text{ мкм}$;
- фильтровальный материал — лавсан артикул 86033;
- требование к очищенному газу: содержание: пыли не должно превышать $C_k = 10 \text{ мг/м}^3$;
- КПД вентилятора $\eta = 0,75$;
- передача к вентилятору – клиноременная .

Решение. Определяем удельную газовую нагрузку, пользуясь выражением

$$q = q_n \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5,$$

где $q_n = 2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ – нормативная удельная нагрузка, зависящая от вида пыли и её склонности к агломерации. (см. с. 32) [1];

$C_1 = 1$ – коэффициент для фильтров с импульсной продувкой и рукавами из лавсана;

$C_2 = 1,1$ – коэффициент, учитывающий влияние концентрации пыли на удельную газовую нагрузку (см. рис. 2.2) [1];

$C_3 = 0,9$ – коэффициент, учитывающий влияние дисперсного состава пыли (см. с. 34) [1];

$C_4 = 0,71$ – коэффициент, учитывающий влияние температуры (см. с. 34) [1];

$C_5 = 0,95$ – коэффициент, учитывающий требования к качеству очистки, так как концентрация пыли в очищенном газе не должна превышать 10 мг/м^3 .

Подставляя значения в формулу, получаем

$$q = 2 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 0,9 \cdot 0,71 \cdot 0,95 = 1,336 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин}).$$

Определяем фильтровальную площадь

$$F = \frac{V}{60q} = \frac{64000}{60 \cdot 1,336} = 798,4 \approx 800 \text{ м}^2.$$

Принимаем для приведённых условий фильтр - ФРКДИ-1100.

Определяем гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки, предварительно оценивая длительность цикла фильтрования $\tau = 600 \text{ с}$:

$$\Delta P_{\text{п}} = K_{\text{п}} \cdot \mu \cdot \omega + K_1 \cdot \mu \cdot \tau \cdot Z_{\text{вх}} \cdot \omega^2,$$

где $K_{\text{п}} = 3700 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ – коэффициент, характеризующий сопротивление фильтровальной перегородки с оставшимся на ней слоем пыли;

$\mu = 24 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – динамическая вязкость газа;

$\omega = 0,016 \text{ м/с}$ – скорость фильтрации;

$K_1 = 80 \cdot 10^9 \text{ м/кг}$ – параметр сопротивления слоя пыли от сталеплавильной дуговой печи [1, с. 147];

$\tau = 600 \text{ с}$ – длительность цикла фильтрования.

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{п}} &= 3700 \cdot 10^6 \cdot 24 \cdot 10^{-6} \cdot 0,016 + 80 \cdot 10^9 \cdot 24 \cdot 10^{-6} \cdot 600 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,016^2 = \\ &= 1421 + 295 = 1716 \text{ Па}. \end{aligned}$$

Определяем гидравлическое сопротивление аппарата в целом

$$\Delta P_{\phi} = \Delta P_{к} + \Delta P_{п}.$$

Гидравлическое сопротивление корпуса аппарата $\Delta P_{п}$ определяем, задаваясь коэффициентом гидравлического сопротивления корпуса, приведенного к скорости во входном патрубке, $\xi_{к} = 2,5$. Скорость во входном патрубке определяем из соотношения

$$W_{вх} = \frac{V}{3600 F_{вх}} = \frac{64000}{3600 \cdot 1,32} = 13,5 \text{ м/с}.$$

Тогда

$$\Delta P_{к} = \xi_{к} \cdot W_{вх}^2 \cdot \rho_{г} / 2 = 2,5 \cdot 13,5^2 \cdot 1,15 / 2 = 261 \text{ Па},$$

где $\rho_{г} = 1,15 \text{ кг/м}^3$ – плотность газа.

Общее гидравлическое сопротивление аппарата

$$\Delta P_{\phi} = 261 + 1716 = 1977 \text{ Па}.$$

Определяем мощность электродвигателя вентилятора при транспортировании газа через фильтр:

$$N_{в} = \frac{V \Delta P}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta_{м} \eta_{в}} = \frac{64000 \cdot 1977}{3600 \cdot 1000 \cdot 0,75 \cdot 0,92} = 50,9 \text{ кВт}.$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ровенский А.И. Защита атмосферы от пылегазовых выбросов при производстве основных видов огнеупоров / А.И. Ровенский, А.М. Касимов, А.Н. Почтман. М. : Metallurgy, 1992. 80 с.
2. Балтренаc П.Б. Обеспыливание воздуха на предприятиях стройматериалов / П.Б. Балтренаc. М. : Стройиздат, 1990. 180 с.
3. Очистка промышленных газов от пыли / В. Н. Ужов [и др.]. М. : Химия, 1981. 392 с.
4. Старк С.Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве : учебник для вузов / С.Б. Старк. Изд. 2-е, перераб. и доп. М. : Metallurgy, 1990. 400 с.
5. Справочник по пыле- и золоулавливаю / под общ. ред. А.А. Русанова. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
6. Алиев Г.М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов : справочник / Г.М. Алиев. М. : Metallurgy, 1986. 544 с.
7. Минко В.А. Обеспыливание технологических процессов производства строительных материалов / В.А. Минко. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1981. 176 с.
8. Мазус М.Г. Фильтры для улавливания промышленных пылей / М.Г. Мазус, А.Д. Малыгин, М.Л. Моргулис. М. : Машиностроение, 1985. 240 с.

РАСЧЕТ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ

Составители Замураев Александр Евгеньевич
Пономарев Владимир Борисович

Редактор *И.В.Коршунова*

ИД № 06263 от 12.11.2001 г.

Подписано в печать	22.11.2006	Формат 60x84 1/16
Бумага писчая	Плоская печать	Усл. печ. л. 2,79
Уч.-изд. л. 2,73	Тираж 100	Заказ Цена «С»

Редакционно-издательский отдел ГОУ ВПО УГТУ-УПИ
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
Ризография НИЧ ГОУ ВПО УГТУ-УПИ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19