



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Безопасность технологических процессов и
производств»

Практикум

для подготовки бакалавров направлений
20.03.01 «Техносферная безопасность»
09.03.02 «Информационные системы и
технологии»

«Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха»

Авторы
Соколова Г.Н., Нихаева А.В.

Ростов-на-Дону, 2018

Аннотация

УДК 502/504

Охрана воздушного бассейна: практикум для подготовки бакалавров направления 20.03.01 «Техносферная безопасность» и 09.03.02 «Информационные системы и технологии».

Предназначено для обучающихся, изучающих дисциплину «Охрана воздушного бассейна» и «Промышленная экология» для разработки домашних заданий по материалам теоретического курса.

Утверждено на заседании кафедры «Безопасность технологических процессов и производств» 22 февраля 2018 года.

Авторы

К.Т.Н., доцент кафедры
«БТПП» Соколова Г.Н.

К.Т.Н., доцент кафедры
«БТПП» Нихаева А.В.





Оглавление

1. Пылеосадительные камеры	4
1.1. Общие сведения. Механическое пылеулавливание ...	4
1.2. Пылеосадительные камеры	5
2. Циклонные аппараты.....	23
2.1. Общие сведения	23
2.2. Устройство и работа циклонов	23
2.3. Конструкции циклонов	26
2.4. Расчёт эффективности циклона	28
3. Скруббер Вентури.....	35
3.1. Общие сведения	35
3.2. Расчет эффективности работы скрубберов Вентури.	43
4. Электрофильтры	48
4.1. Общие сведения	48
4.2. Принцип действия электрофильтров.....	49
4.3. Конструкции электрофильтров	55
4.4. Подбор и расчет электрофильтров	60
Литература.....	71

1. ПЫЛЕОСАДИТЕЛЬНЫЕ КАМЕРЫ

Целью практической работы является изучение конструктивных особенностей и расчет эффективности пылеосадительных камер.

1.1. Общие сведения. Механическое пылеулавливание

Термин «механические осадители» обычно используют для обозначения устройств, в которых частицы осаждаются под действием либо сил тяжести или инерции, либо и тех и других. В гравитационных осадителях частицы осаждаются из потока газа под действием собственного веса. В инерционных осадителях поток частиц, взвешенных в газе, внезапно подвергается изменению направления движения. Возникающие инерционные силы стремятся выбросить частицы из потока. Циклоны-осадители, в которых используется инерция центробежной силы, являются важным частным случаем инерционных осадителей.

Скорость удаления частиц пропорциональна осаждающей силе. Из-за очень малого веса мелких частиц гравитационное осаждение оказывается слишком медленным и малоэффективным процессом для частиц размером менее 100 мкм. При использовании инерционного эффекта скорость улавливания резко повышается. Благодаря этому можно уменьшить размер оборудования и расширить диапазон эффективного улавливания до частиц размером около 20 мкм. Для некоторых циклонов предельный размер улавливаемых частиц составляет 5...10 мкм.

Для осаждения под действием гравитации газ обычно просто медленно пропускают через большую камеру, причем частицы имеют возможность осесть на дно бункера. Расстояние, требуемое для осаждения частиц, можно уменьшить путем разделения пространства камеры несколькими горизонтальными параллельными поддонами.

Гравитационные камеры можно снабжать отражательными перегородками для изменения направления движения газа и привлечения сил инерции для увеличения осадительного действия. В других конструкциях для создания инерционного эффекта используют заслонки, отбойники.

В циклонных осадителях газу сообщают вращательное или вихревое движение, чтобы подвергнуть частицы воздействию центробежной силы. Это достигается или тангенциальным вводом потока в круглую камеру, или пропусканием газа мимо лопастей,

радиально ориентированных по отношению к оси потока.

Устройства всех этих типов характеризуются простотой конструкции и работы. Они относительно дешевы по сравнению с другими типами осадителей, не имеют движущихся частей, а для обеспечения рабочих условий можно использовать любой материал. Затраты энергии на работу также относительно малы, что обусловлено малым перепадом давления при течении газа через устройство.

Осадители рассматриваемого типа используются для первичного удаления грубых частиц газового потока. В большинстве случаев защиты воздуха от загрязнения требуется улавливание гораздо более мелких частиц (размером около 1 мкм), поэтому обычно применяют осадители других типов. Однако механические осадители можно использовать как предварительные, располагая их последовательно с устройствами других типов, чтобы уменьшить нагрузку на последние. Это особенно необходимо при сильно запыленных газовых потоках. Механические осадители могут работать долгое время без обслуживания с малыми энергетическими затратами.

1.2. Пылеосадительные камеры

Простейшим аппаратом для очистки твердых взвешенных частиц является пылеосадительная камера, в которой запыленный газовый поток перемещается с малой скоростью, делающей возможным гравитационное осаждение (седиментацию) транспортируемой взвеси.

Для достижения приемлемой эффективности очистки газов данными устройствами необходимо, чтобы частицы находились в пылеосадительных аппаратах возможно более продолжительное время, а скорость движения пылевого потока была незначительной. Данное оборудование относится к категории экстенсивного оборудования, рабочие объемы таких аппаратов весьма значительны, что требует больших производственных площадей. Однако пылеосадительные камеры и пылевые мешки обладают очень незначительным гидравлическим сопротивлением (50...300 Па).

В промышленности пылеосадительные камеры используются в качестве устройств предварительной обработки газов, например, для отделения крупных частиц и разгрузки аппаратов последующих ступеней. В связи с этим данное оборудование используют только на первых ступенях систем газоочистки для осаждения частиц крупных размеров (более 100 мкм). Обычно средняя расходная скорость движения газов в пылеосадительных ка-

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

мерах составляет $0,2...1$ м/с, а в пылевых мешках – $1...1,5$ м/с.

На рис. 1.1 представлены наиболее распространенные конструкции пылесадительных камер и простейших пылесадителей инерционного действия – пылевых «мешков».

Для равномерного газораспределения по сечению пылесадительные камеры могут снабжаться диффузорами и газораспределительными решетками, а для снижения высоты осаждения частиц – горизонтальными или наклонными полками. Эффективность улавливания частиц с помощью гравитационного осаждения можно повысить, уменьшая требуемый путь (высоту) их падения. Это можно осуществить, помещая в камеру горизонтальные пластины, что превращает ее в группу небольших параллельных камер. В некоторых конструкциях пылесадительных камер для повышения их эффективности предусматривается устройство цепных или проволочных завес и отклоняющихся перегородок. Это позволяет дополнительно к гравитационному эффекту использовать эффект инерционного осаждения частиц при обтекании потоком газов различных препятствий.

Действие силы тяжести может быть увеличено инерционными силами, если к потолку камеры прикрепить вертикальный экран. При обтекании газовым потоком нижней кромки экрана частицы будут увлекаться вниз инерционной силой, возникающей при искривлении линий тока газа.

Турбулентность заметно влияет на ухудшение оседания частиц в камерах с рассекателями, а также в полых осадительных емкостях большой высоты.

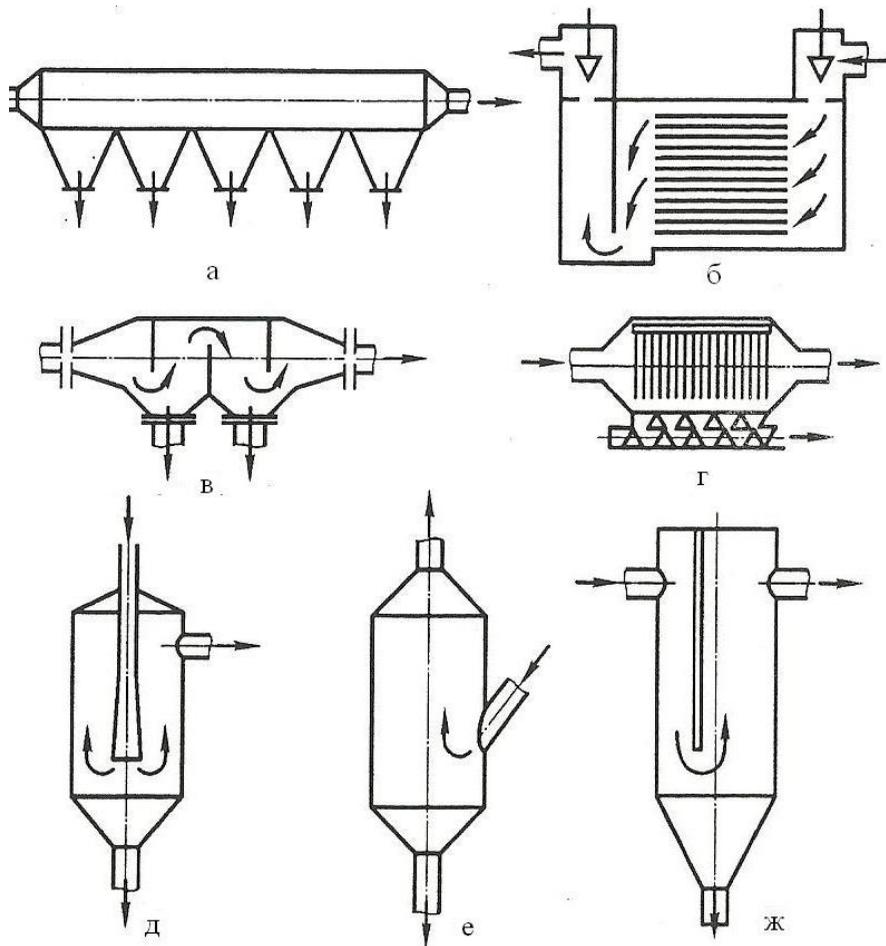


Рис. 1.1. Пылеосадительные камеры и простейшие пылеосадители инерционного действия:

- а* – простейшая пылеосадительная камера; *б* – многополочная камера; *в* – камера с перегородками; *г* – камера с цепными или проволочными завесами; *д* – пылевой мешок с центральным подводом газа; *е* – пылевой мешок с боковым подводом газа; *ж* – пылеосадитель с отражательной перегородкой

Конструирование осадительных камер основано на подсчете сил, действующих на частицу, и скорости ее вертикального дви-

жения вниз под действием результирующей силы. В соответствии с законом Ньютона чистое ускорение вертикального движения частиц определяется результирующим действием силы тяжести, плавучести и сопротивления среды. В случае газов эффектом плавучести можно пренебречь. Силу сопротивления выражают через коэффициент сопротивления ζ , зависящий от числа Рейнольдса Re для движения частицы (1.1-1.2):

$$m \frac{dw_{oc}}{dt} = g \cdot m - \zeta \frac{\rho_c w_{oc}^2}{2} \cdot \pi \cdot r_q^2, \quad (1.1)$$

$$\zeta = \zeta(Re) = \zeta \left(\frac{\rho_c \cdot w_{oc} \cdot d_q}{\mu} \right), \quad (1.2)$$

где m – масса частицы; w_{oc} – скорость движения частицы; t – время; g – ускорение силы тяжести; ρ_c – плотность среды (газа); r_q – радиус частицы.

Функциональную зависимость между ζ и Re берут из стандартных графиков или уравнений, описывающих движение индивидуальной сферической частицы. При $Re < 0,5$ эта зависимость характеризуется законом Стокса $\zeta = 24/Re$. Для больших значений Re можно использовать эмпирическое уравнение Клячко (1.3)

$$\zeta = \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{1/2}}, \quad (1.3)$$

которое применимо в диапазоне $0,5 < Re < 800$. Для маленьких частиц в выражение для силы сопротивления следует вводить поправку Каннингема на скольжение, но в этом случае гравитационное осаждение уже не играет роли.

Из уравнения (1.1) ясно, что вертикальное ускорение частицы продолжается до тех пор, пока сила веса не станет равной силе сопротивления; после этого частица движется с постоянной скоростью. Эта скорость называется стационарной скоростью осаждения частицы. Время, которое необходимо для достижения данной скорости, очень мало. Стационарная скорость может быть найдена приравниванием левой части уравнения (1.1) нулю, за-

меной m на $\frac{(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}) \cdot d_{\text{ч}}^3}{6}$ и представлением в безразмерной форме (1.4):

$$\frac{4g \cdot d_{\text{ч}}^3 \cdot \rho_{\text{с}} \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})}{3\mu^2} = \zeta \cdot \text{Re}^2 = 0. \quad (1.4)$$

Данное выражение определяет число Галилея:

$$Ga = \frac{4g \cdot d_{\text{ч}}^3 \cdot \rho_{\text{с}} \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})}{3\mu^2}. \quad (1.5)$$

Это число пропорционально $d_{\text{ч}}^3$ и независимо от $w_{\text{ос}}$. Условием достижения стационарной скорости является $Ga = \zeta \cdot \text{Re}^2$.

Можно определить другое безразмерное число, которое пропорционально $(w_{\text{ос}})^3$ и независимо от $d_{\text{ч}}$ (1.6):

$$\frac{\text{Re}}{\zeta} = \frac{\text{Re}^2}{Ga} = \frac{3 \cdot \rho_{\text{с}}^2 \cdot w_{\text{ос}}}{4g \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}) \cdot \mu}. \quad (1.6)$$

Прямое соотношение между $d_{\text{ч}}$ и $w_{\text{ос}}$ можно дать через комбинацию $(\text{Re}/\zeta)^{1/3}$ в функции $Ga^{1/3}$. Эта зависимость хорошо выражается эмпирическим соотношением (1.7):

$$\lg(\text{Re}/\zeta)^{1/3} = -1,387 + 2,153 \cdot \lg Ga^{1/3} + 0,548 \cdot \lg^2 Ga^{1/3} + 0,05665 \cdot \lg^2 Ga^{1/3}. \quad (1.7)$$

Таким образом, чтобы рассчитать стационарную скорость осаждения для частиц любого размера $d_{\text{ч}}$ сначала надо найти критерий Ga , как описано выше. Затем по уравнению (1.7) рассчитывают Re/ζ , а затем получают $w_{\text{ос}}$, используя данное выше определение Re/ζ .

В диапазоне применимости закона Стокса скорость находится просто (1.8):

$$w_{oc} = \frac{g(\rho_c - \rho_c)d_c^2}{18\mu} \quad (1.8)$$

Соотношение между размером частицы и стационарной скоростью осаждения показано на рис.1.2.

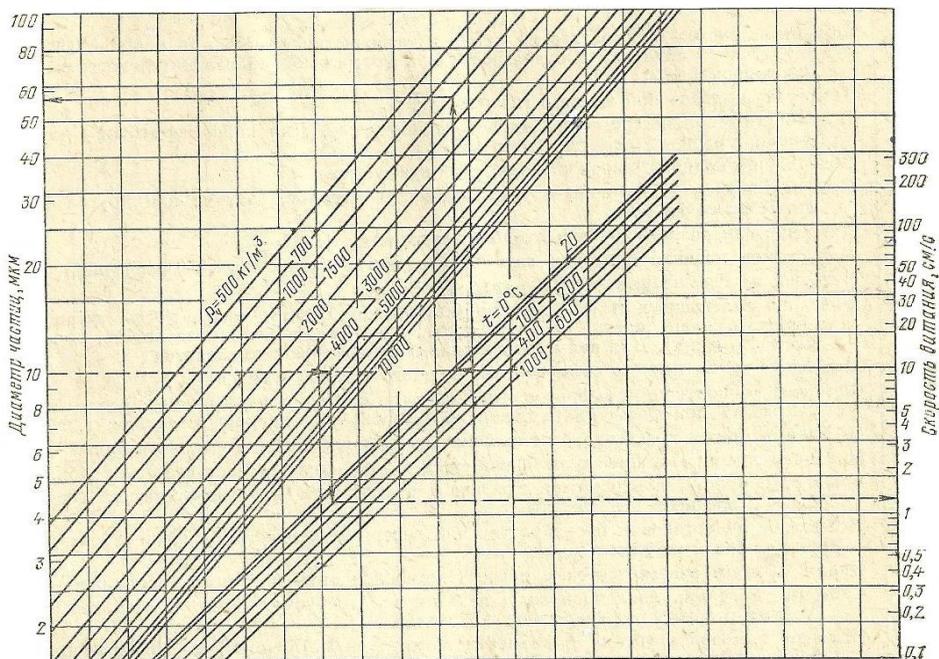


Рис. 1.2. Номограмма для определения скорости витания частиц

Простая модель проектирования осадительной камеры получается на основе предположения о фронтальном характере течения газа через камеру и равномерном расположении частиц в газе. На рис.1.3 схематически показана работа пылесадительной камеры.

Частица, входящая в камеру со скоростью, равной скорости газа v_0 на уровне h_c должна следовать прямолинейной траекторией. Осядет или нет данная частица, определяется из условия $w_{oc} h_c \leq v_0 l$. Осажденная фракция частиц с одной и той же скоростью седиментации w_{oc} определяется соотношением (1.9):

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

$$\frac{h_c}{H} = \frac{v_o \cdot l}{w_{oc}} \quad (1.9)$$

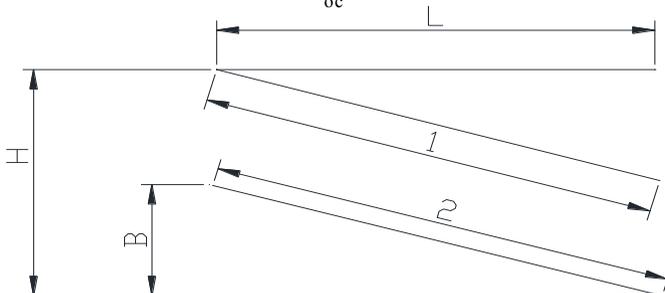


Рис. 1.3. Схема осаждения частиц в камере:
1 – очищенная зона; 2 – предельная траектория

Размеры камеры (H , L , B) определяются размером d_q^* наименьших частиц, которые должны быть осаждены полностью.

Рассчитываем w_{oc}^* , принимаем $\frac{h_c}{H} = 1$, находим $L = \frac{w_{oc}^*}{v}$. Зна-

чение v должно быть меньше скорости, при которой начинается унос частиц, или меньше 3,05 м/с, в зависимости от того, какие из этих значений меньше. Наконец, находим произведение $B \cdot H = K/v$, что позволяет выбрать высоту и ширину камеры. Габаритные размеры камеры, необходимые для гравитационного осаждения частиц крупнее заданного размера частиц d_q , обычно определяются по соотношению (1.10):

$$L = H \frac{v}{w_{oc}}, \quad (1.10)$$

где L – длина камеры, H – высота камеры.

Скорость движения газов в камере v обычно назначается в пределах 0,2...0,8 м/с, а скорость витания частиц с размером d_q может быть рассчитана по зависимости (1.8) или по номограмме на рис. 1.2. Высота и ширина пылеосадительной камеры принимаются из конструктивных соображений, исходя из предельной скорости движения газов в камере.

Следует учитывать, что при движении запыленных газов в

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

камере турбулентность потока нарушает нормальное гравитационное осаждение, в особенности частиц малых размеров, и действительная степень очистки газов оказывается ниже, чем определенная из графика, представленного на рис. 1.2.

Эффективность пылеосадителя можно рассчитать с использованием соотношения фракционной эффективности, дающей зависимость эффективности улавливания от размера частиц. В сочетании с данными о распределении поступающих в пылеосадитель частиц по размерам фракционная эффективность позволяет определить общую эффективность улавливания.

Для пылеосадительных камер с $L/H > 3$ значение парциальных коэффициентов очистки (в %) может быть найдено с достаточной степенью точности на основании расчетов средней концентрации частиц соответствующего размера в выходном сечении пылеосадительной камеры по формуле (1.11):

$$\varepsilon_n = 100 \left(1 - \frac{1}{i} \sum_0^i N_i \right), \quad (1.11)$$

где i – число точек, для которых рассчитывается концентрация частиц; N_i – отношение концентрации частиц данного размера в расчетной точке выходного сечения камеры к их концентрации во входном сечении. Концентрация этих частиц во входном сечении принимается равномерно распределенной по сечению. Предполагается, что распределение частиц по размерам подчиняется нормальному закону распределения, значение величины N определяется по уравнению 1.12:

$$N = \Phi(x_1) + \Phi(x_2) - 1. \quad (1.12)$$

Значения функций $\Phi(x_1)$ и $\Phi(x_2)$ определяются по таблице нормальной функции распределения (табл. 1.1).

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

Таблица 1.1

Значения нормальной функции распределения

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
-2,70	0,0035	-0,70	0,2420	0,72	0,7642
-2,60	0,0047	-0,68	0,2483	0,74	0,7703
-2,50	0,0062	-0,66	0,2546	0,76	0,7764
-2,40	0,0082	-0,64	0,2611	0,78	0,7823
-2,30	0,0107	-0,62	0,2676	0,80	0,7881
-2,20	0,0139	-0,60	0,2743	0,82	0,7939
-2,10	0,0179	-0,58	0,2810	0,84	0,7995
-2,00	0,0228	-0,56	0,2877	0,86	0,8051
-1,98	0,0239	-0,54	0,2946	0,88	0,8106
-1,96	0,0250	-0,52	0,3015	0,90	0,8159
-1,94	0,0262	-0,50	0,3085	0,92	0,8212
-1,92	0,0274	-0,48	0,3156	0,94	0,8264
-1,90	0,0288	-0,46	0,3228	0,96	0,8315
-1,88	0,0301	-0,44	0,3300	0,98	0,8365
-1,86	0,0314	-0,42	0,3372	1,00	0,8413
-1,84	0,0329	-0,40	0,3446	1,02	0,8461
-1,82	0,0344	-0,38	0,3520	1,04	0,8508
-1,80	0,0359	-0,36	0,3594	1,06	0,8554
-1,78	0,0375	-0,34	0,3669	1,08	0,8599
-1,76	0,0392	-0,32	0,3745	1,10	0,8643
-1,74	0,0409	-0,30	0,3821	1,12	0,8686
-1,72	0,0427	-0,28	0,3897	1,14	0,8729
-1,70	0,446	-0,26	0,3974	1,16	0,8770
-1,68	0,0465	-0,24	0,4052	1,18	0,8810
-1,66	0,0485	-0,22	0,4129	1,20	0,8849
-1,64	0,0505	-0,20	0,4207	1,22	0,8888
-1,62	0,0526	-0,18	0,4286	1,24	0,8925
-1,60	0,0548	-0,16	0,4364	1,26	0,8962
-1,58	0,0571	-0,14	0,4443	1,28	0,8997
-1,56	0,0594	-0,12	0,4522	1,30	0,9032
-1,54	0,0618	-0,10	0,4602	1,32	0,9066
-1,52	0,0643	-0,08	0,4681	1,34	0,9099
-1,50	0,0668	-0,06	0,4761	1,36	0,9131
-1,48	0,0694	0,04	0,4840	1,38	0,9162
-1,46	0,0721	-0,02	0,4920	1,40	0,9192
-1,44	0,0749	-0,00	0,5000	1,42	0,9222

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

Продолжение табл. 1.1

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
-1,42	0,0778	0,00	0,5000	1,44	0,9251
-1,40	0,0808	0,02	0,5080	1,46	0,9279
-1,38	0,0838	0,04	0,5160	1,48	0,9306
-1,36	0,0869	0,06	0,5239	1,50	0,9332
-1,34	0,0901	0,08	0,5319	1,52	0,9357
-1,32	0,0934	0,10	0,5398	1,54	0,9382
-1,30	0,0968	0,12	0,5478	1,56	0,9406
-1,28	0,1003	0,14	0,5557	1,58	0,9429
-1,26	0,1038	0,16	0,5636	1,60	0,9452
-1,24	0,1075	0,18	0,5714	1,62	0,9474
-1,22	0,1112	0,20	0,5793	1,64	0,9495
-1,20	0,1151	0,22	0,5871	1,66	0,9515
-1,18	0,1190	0,24	0,5948	1,68	0,9535
-1,16	0,1230	0,26	0,6026	1,70	0,9554
-1,14	0,1271	0,28	0,6103	1,72	0,9573
-1,12	0,1314	0,30	0,6179	1,74	0,9591
-1,10	0,1357	0,32	0,6255	1,76	0,9608
-1,08	0,1401	0,34	0,6331	1,78	0,9625
-1,06	0,1446	0,36	0,6406	1,80	0,9641
-1,04	0,1492	0,38	0,6480	1,82	0,9656
-1,02	0,1539	0,40	0,6554	1,84	0,9671
-1,00	0,1587	0,42	0,6628	1,86	0,9686
-0,98	0,1635	0,44	0,6700	1,88	0,9699
-0,96	0,1685	0,46	0,6772	1,90	0,9713
-0,94	0,1736	0,48	0,6844	1,92	0,9726
-0,92	0,1788	0,50	0,6915	1,94	0,9738
-0,90	0,1841	0,52	0,6985	1,96	0,9750
-0,88	0,1894	0,54	0,7054	1,98	0,9761
-0,86	0,1949	0,56	0,7123	2,00	0,9772
-0,84	0,2005	0,58	0,7190	2,1	0,9821
-0,82	0,2061	0,60	0,7257	2,20	0,9861
-0,80	0,2119	0,62	0,7324	2,30	0,9893

Окончание табл. 1.1

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
-0,78	0,2177	0,64	0,7389	2,4	0,9918
-0,76	0,2236	0,66	0,7454	2,50	0,9938
-0,74	0,2297	0,68	0,7517	2,60	0,9953
-0,72	0,2358	0,70	0,7580	2,70	0,9965

Величины x_1 и x_2 , в свою очередь, определяются из выражений 1.13 и 1.14 соответственно:

$$x_1 = \frac{H + h - L \frac{w_{oc}}{v}}{\sqrt{2D_t \cdot \frac{l}{v}}}, \quad (1.13)$$

$$x_2 = \frac{H - h + L \frac{w_{oc}}{v}}{\sqrt{2D_t \cdot \frac{l}{v}}}, \quad (1.14)$$

где h – расстояние от потолка камеры; D_t – коэффициент турбулентной диффузии частиц.

При выполнении условия $w_{oc} < Lg/v$, что характерно для большинства случаев осаждения в камерах, коэффициент турбулентной диффузии частиц совпадает с коэффициентом турбулентной диффузии газового потока и может быть рассчитан по формуле Шервуда – Вертца 1.15

$$D_t = 0,02\nu H \sqrt{\lambda}, \quad (1.15)$$

где λ – коэффициент трения потока, может быть принят равным 0,03. Тогда выражения (1.13) и (1.14) значительно упрощаются и принимают следующий вид (формулы 1.16 и 1.17):

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

$$x_1 = \frac{1 + \frac{h}{H} - \frac{L}{H} \cdot \frac{w_{oc}}{v}}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{L}{H}}}, \quad (1.16)$$

$$x_2 = \frac{1 - \frac{h}{H} + \frac{L}{H} \cdot \frac{w_{oc}}{v}}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{L}{H}}}, \quad (1.17)$$

а отношение скоростей осаждения частиц и потока газа:

$$\left(\frac{w_{oc}}{v} \right)_{50} \approx 1,5 \frac{H}{L}. \quad (1.18)$$

Дополнительные значения $\frac{w_{oc}}{v}$, необходимые для определения нескольких точек зависимости $\varepsilon_n = f(d_{\text{ч}})$, принимаются больше и меньше значения $\left(\frac{w_{oc}}{v} \right)_{50}$. Полный коэффициент очистки и степень очистки определяют по уравнению:

$$\varepsilon = \sum \varepsilon_n \frac{N_{\text{вх}}}{100} \Delta d_{\text{ч}}, \quad (1.19)$$

где $N_{\text{вх}}$ – плотность распределения, %/мкм; $\Delta d_{\text{ч}}$ – разность граничных размеров выбираемого диапазона частиц из гистограммы, мкм.

Следует иметь в виду, что $\sum N_{\text{вх}} \Delta d_{\text{ч}}$ должна быть равна 100 %.

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

Расчеты пылеосадительных камер выполняют в следующем порядке:

1. Определяют скорость газового потока в рабочем сечении камеры по формуле 1.20:

$$v = \frac{V_r}{H \cdot B}, \quad (1.20)$$

где V_r – расход газов, $\text{м}^3/\text{с}$; H, B – высота и ширина камеры, м .

Чем меньше скорость потока, тем больше степень очистки, но и более громоздкой получится камера. Желательно, чтобы скорость потока не превышала $0,8 \dots 1 \text{ м/с}$, однако для компактных частиц большой плотности ее можно доводить до $2 \dots 3 \text{ м/с}$.

2. Принимают по конструктивным соображениям соотношение длины и высоты камеры L/H . Для конструкций с $L/H < 3$ данная методика расчета не дает необходимой точности.

3. Принимают, что отношение скорости витания частиц w_{oc} , которые будут уловлены в камере на 50 %, к скорости газового потока приблизительно соответствует полутора значениям

$$\left(\frac{w_{oc}}{v} \right)_{50} \approx 1,5 \frac{H}{L} \text{ и находят из этого соотношения величину } w_{oc}.$$

4. Диаметр частиц, оседающих в камере на 50 %, находят в предположении, что оседание происходит в соответствии с законом Стокса по формуле 1.21:

$$d_{50} = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu \cdot w_{oc}}{g \cdot (\rho_q - \rho_c)}}, \text{ м.} \quad (1.21)$$

Для нагретых газов может быть использована формула 1.22:

$$d_{50} = 1,614 \cdot 10^{-3} \cdot (273 + t)^{0,75} \cdot \left[\frac{w_{oc}}{\rho_q \cdot (384 + t)} \right]^{0,5}, \text{ м.} \quad (1.22)$$

5. Выбирают несколько соотношений w_{oc}/v , больших и меньших принятого и определяют соответствующие значения d_i .

6. Определяют среднюю концентрацию частиц на выходе из

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

камеры для каждого принятого соотношения W_{oc}/V или, что то же самое, для каждого принятого значения d_i следующим образом:

а) назначают k точек по высоте сечения, задаваясь величиной h/H , где h – расстояние от потолка камеры до рассматриваемой точки;

б) рассчитывают так называемые параметры очистки x_1 и x_2 (параметры функции парциального распределения $\Phi(x)$) по формулам 1.16 и 1.17;

в) по значениям x_1 и x_2 из табл. 1.1 находят интегралы вероятностей $\Phi(x_1)$ и $\Phi(x_2)$ и подсчитывают значение N_i по формуле 1.12;

г) усредняют значение N по сечению, вычисляя его как среднее арифметическое по высоте сечения по формуле 1.23:

$$N_{cp} = \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{k}; \quad (1.23)$$

д) определяют средний парциальный (фракционный) коэффициент осаждения частиц рассматриваемого размера (с принятой скоростью осаждения – витания) по формуле 1.11;

7. Находят полный коэффициент очистки ε как сумму произведений долей частиц соответствующих фракций на их фракционные (парциальные) коэффициенты очистки по формуле 1.19.

Пример расчета

Определить эффективность осаждения частиц в пылесадительной камере, если она имеет длину $L = 4$ м, высоту $H = 0,2$ м, ширину $B = 0,8$ м. Расход воздуха через камеру $V_r = 300$ м³/ч, плотность частиц цементной пыли $\rho_{\nu} = 700$ кг/м³, вязкость газа при $t = 100$ °С составляет $\mu = 19 \cdot 10^{-6}$.

1. Скорость потока в сечении камеры:

$$v = \frac{V_r}{3600 \cdot H \cdot B}, \text{ м/с,}$$

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

$$v = \frac{300}{3600 \cdot 0,2 \cdot 0,8} = 0,5 \text{ м/с.}$$

2. По уравнению (1.18) находим относительную скорость осаждения частиц, улавливаемых в камере с эффективностью, равной 50%:

$$\left(\frac{w_{oc}}{v} \right)_{50} = 1,5 \frac{0,2}{4} = 0,075.$$

Отсюда скорость осаждения – витания $(w_{oc})_{50} = 0,04 \text{ м/с.}$

3. Тогда по найденной скорости осаждения – витания, заданной плотности и вязкости находим размер частиц, улавливаемых в камере с эффективностью 50%:

$$d_{50} = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu \cdot w_{oc}}{g \cdot (\rho_q - \rho_c)'}}$$

$$d_{50} = \sqrt{\frac{18 \cdot 19 \cdot 10^{-6} \cdot 0,04}{9,8 \cdot (700 - 1,128)}} = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

4. Для определения зависимости $\varepsilon_n = f(d_q)$ выбираем два дополнительных значения (больше и меньше) относительно рассчитанного отношения $\left(\frac{w_{oc}}{v} \right)_{50} : \frac{w_{oc}^1}{v} = 0,05$ и $\frac{w_{oc}^2}{v} = 0,1$.

Этим значениям относительных скоростей витания отвечают диаметры частиц $d_q^1 = 35 \text{ мкм}$ и $d_q^2 = 50 \text{ мкм}$ (d_q может быть рассчитан или по зависимости (1.8), или по номограмме на рис. 1.2).

5. Среднюю концентрацию частиц на выходе из камеры определяем как среднюю из концентраций в 4...5 точках сечения. С этой целью зададимся пятью значениями h/H : 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0.

Результаты расчетов по формулам 1.16 и 1.17 для соотно-

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

шения $\frac{w_{oc}^1}{v} = 0,05$ представлены в табл. 1.2., а для соотношения

$$\frac{w_{oc}^2}{v} = 0,1 \text{ – в табл. 1.3}$$

Таблица 1.2

Результаты расчетов для соотношения $\frac{w_{oc}^1}{v} = 0,05$

h/H	0	0,25	0,5	0,75	1,0
x_1	0	0,68	1,35	2,03	2,7
x_2	5,41	4,73	4,05	3,38	2,7
$\Phi(x_1)$	0,5000	0,7517	0,9115	0,9787	0,9965
$\Phi(x_2)$	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9965
$M = \Phi(x_1) + \Phi(x_2) - 1$	0,5000	0,7517	0,9115	0,9787	0,993

Среднее значение N_{cp} составляет 0,83, а средний парциальный коэффициент очистки газа для частиц с размером $d_4 = 35$ мкм $\varepsilon_n = 100 \cdot (1 - 0,83) = 17 \%$.

Таблица 1.3

Результаты расчетов для соотношения $\frac{w_{oc}^2}{v} = 0,1$

h/H	0	0,25	0,5	0,75	1,0
x_1	-2,7	-2,03	-1,35	-0,68	0
x_2	8,1	7,4	6,8	6,1	5,4
$\Phi(x_1)$	0,0035	0,0205	0,0885	0,2483	0,5000
$\Phi(x_2)$	1	1	1	1	1
$N = \Phi(x_1) + \Phi(x_2) - 1$	0,0035	0,0205	0,0885	0,2483	0,5000

Среднее значение N_{cp} составляет 0,17, а парциальный коэффициент очистки газа для частиц с размером $d_4 = 50$ мкм $\varepsilon_n = 100 \cdot (1 - 0,17) = 83 \%$.

Таким образом, в результате расчета получены три значения парциальных коэффициентов очистки газа (17; 50; 83 %) при

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

трех значениях $\frac{W_{oc}}{v} = 0,05; 0,075$ и $0,1$.

Полный коэффициент очистки газа рассчитывается по формуле 1.19 при наличии гистограммы пыли на входе в камеру.

Задание по работе

Исходные данные для определения эффективности осаждения частиц в пылесадительной камере согласно номеру варианта, который задает преподаватель, принимают по табл. 1.4. Данные о плотности частиц, необходимые для расчета, представлены в табл. 1.5.

Таблица 1.4

Варианты исходных данных для расчёта эффективности осаждения частиц в пылесадительной камере

№ варианта	$L, м$	$H, м$	$B, м$	$V_f, м^3/ч$	$\rho_c, кг/м^3$	$\mu \cdot 10^{-6}, Па \cdot с$	$t, ^\circ C$	Вид ЗВ
1	2	0,3	0,6	350	1,247	17,6	100	Угольная пыль
2	2,1	0,4	0,8	400	1,205	18,1	20	Цементная пыль
3	2,2	0,5	1	450	1,165	18,6	200	Песок (чистый)
4	2,3	0,6	1	500	1,128	19,1	100	Цементная пыль
5	2,4	0,3	0,7	550	1,093	19,6	20	Зола
6	2,5	0,4	0,8	600	1,247	17,6	200	Угольная пыль
7	2	0,5	1	400	1,205	18,1	100	Песок (чистый)
8	2,3	0,7	1,2	700	1,165	18,6	20	Зола
9	2,4	0,3	0,6	500	1,128	19,1	200	Угольная пыль
10	2,5	0,4	0,8	550	1,093	19,6	100	Цементная пыль
11	4	0,2	0,8	300	1,247	17,6	20	Цементная пыль
12	2,1	0,5	0,5	400	1,205	18,1	200	Угольная пыль
13	2,5	0,7	0,6	600	1,165	18,6	100	Зола
14	2,3	0,2	0,3	350	1,128	19,1	20	Зола
15	2,4	0,3	1	450	1,093	19,6	200	Цементная пыль

Таблица 1.5

Исходные данные. Плотность частиц ЗВ

Вид ЗВ	Угольная пыль	Цементная пыль	Песок (чистый)	Опилки	Зола
$\rho_{ч}, \text{ кг/м}^3$	2100	700	2600	300	1200

2. ЦИКЛОННЫЕ АППАРАТЫ

Цель работы: изучение аппарата очистки типа циклон, ознакомление с конструкционными особенностями, освоение методики подбора различных марок циклонных аппаратов и расчета их эффективности.

2.1. Общие сведения

Существует несколько технологий очистки воздуха от пыли:

- механическая очистка происходит за счет осаждения частиц под действием внешних сил, в том числе очистка воздуха в циклонах, под действием центробежных сил;
- мокрая очистка обеспечивает осаждение частиц, за счет их взаимодействия с жидкостью;
- очистка при помощи фильтров осуществляется за счет задерживания частиц в фильтрующем материале;
- очистка под действием электрического поля.

Повсеместно распространенная циклонная очистка промышленных выбросов от взвесей имеет стоимость на порядок ниже их мокрой очистки, а также очистки в рукавных фильтрах и электрофильтрах. Однако используемые в производственных условиях циклоны не всегда обеспечивают требуемое качество очистки и имеют другие недостатки.

История очистки воздуха при помощи циклонов берет свое начало в XIX веке. Этой проблеме посвящено много теоретических и экспериментальных исследований. За полтора века «циклоностроения» в технике газоочистки использовали множество вариантов конструкций циклонов.

2.2. Устройство и работа циклонов

Циклоны характеризуются наибольшим разнообразием видов конструкций и достаточно часто используются на предприятиях. Циклоны могут быть использованы для различных видов пыли, например, для древесной пыли, кремнесодержащей, металлической пыли. Циклоны имеют более высокую эффективность, чем пылеосадительные камеры и при правильной эксплуатации эффективность может достигать 98...99 %.

На практике система улавливания частиц создаётся путём придания запылённому потоку закрученного или вращательного движения, ограниченного цилиндрическими стенками. Частицы осаждаются при отбрасывании на стенки. Такое устройство называется *циклоном*. Широкое распространение циклонов

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

обусловлено простотой их устройства, надежностью в эксплуатации, небольшими капитальными и эксплуатационными затратами.

Неизвестно, кем и когда был создан первый простейший циклон, однако существует предположение, что в России нечто похожее на циклон использовалось еще на знаменитых Демидовских заводах.

Циклон представляет собой инерционный пылеуловитель, в котором выделение частиц пыли из воздушной (газовой) среды происходит в основном под воздействием центробежной силы, возникающей при движении воздушного потока в корпусе аппарата.

Процессы, происходящие в циклонах, весьма сложны и зависят от многих факторов, поэтому для теоретических расчетов приходится делать ряд допущений:

1. Пылевидные частицы, поступающие с воздушным потоком в циклон, имеют сферическую форму.

2. При входе в циклон частицы равномерно распределены по сечению.

3. Частицы, достигшие стенок циклона, осаждаются (в действительности часть этих осажденных частиц будет отброшена от стенки вследствие турбулизации потока газа).

4. Не учитывается коагуляция пылевидных частиц в циклоне.

При разработке конструкций циклонов приходится в значительной мере учитывать экспериментальные данные и опыт эксплуатации циклонов в производственных условиях. Теоретические обоснования процесса очистки пыли в циклонах не полностью изучены и не могут удовлетворять современным требованиям.

Конструктивно циклоны делятся на:

1. Циклоны с тангенциальным входом загрязненного воздуха (рис. 2.1, а).

Запылённый воздух входит в циклон через тангенциальный патрубок и, приобретая вращательное движение, опускается винтообразно вниз вдоль внутренних стенок цилиндра и конуса. Небольшая часть этого потока, в котором сконцентрированы пылевые частицы, движется в непосредственной близости от стенок циклона и поступает через пылеотводящее отверстие в пылесборный бункер, где происходит осаждение и накопление пылевых частиц.

В центральной зоне циклона воздушный поток,

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

освобождённый от пыли, поднимается винтообразно вверх и удаляется через выхлопную трубу наружу. Вследствие вращательного движения воздушного потока в центральной зоне циклона наблюдается пониженное давление.

2. Осевой циклон с возвратным потоком (рис. 2.1, б).

Загрязненный воздух поступает сверху аппарата, воздушный поток закручивается, нижняя часть должна иметь более длинную форму, при этом происходит саморазделение загрязнения и очищение воздуха.

3. Осевой прямоточный циклон (рис. 2.1, в).

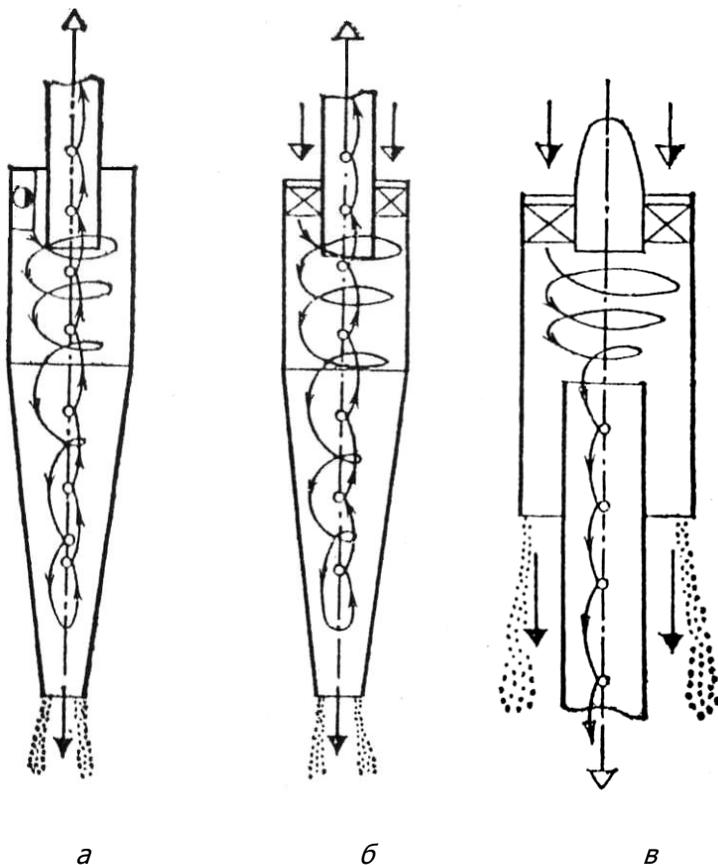


Рис. 2.1. Циклоны: а – с тангенциальным входом загрязненного воздуха; б – осевой с возвратным потоком; в – осевой прямоточный

2.3. Конструкции циклонов

Наиболее распространенные циклоны нормализованы. Любой из размеров каждого типа может быть выражен в долях от диаметра циклона D согласно ГОСТ Р 51708-2001. Конструкциями циклонов у нас в стране занимается ряд научных организаций: институт НИИОГаз (Москва), Свердловский институт охраны труда (г. Екатеринбург), Ростовский государственный строительный университет (г. Ростов н/Д) и др.

В институте НИИОГаз разработан ряд конструкций цилиндрических и конических циклонов (рис. 2.2). Широкое распространение в промышленности получили циклоны ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24. Цифровое обозначение циклона соответствует углу α наклона крышки аппарата и патрубка, подводящего запыленный поток. Эти циклоны можно устанавливать одиночно или компоновать в группы по два, четыре, шесть, восемь циклонов.

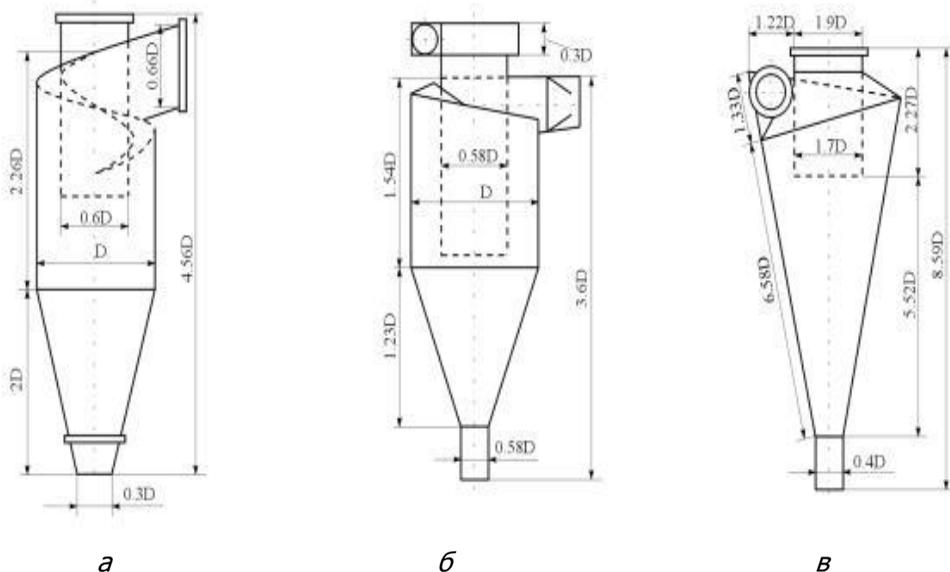


Рис. 2.2. Основные типы циклонов:
 а – конструкции НИИОГаза; б – конструкции ЛИОТ;
 в – конструкции СИОТ

Циклоны СИОТ (Свердловский институт охраны труда) предназначены для очистки газов от сухой, неволокнистой, неслипающейся пыли. Циклоны СИОТ несколько уступают по эффективности очистки циклонам НИИОГаз, но имеют определенные преимущества в виде меньших размеров.

Циклоны ВЦНИООТ применяют для неслипающейся, абразивной пыли, а также для малослипающейся пыли (сажа, тальк).

Циклоны с нижним выводом воздуха (НВГ). Циклоны НВГ разработаны на базе циклонов ЦН-15 и СДК-ЦН-33, и применяются в производстве моющих средств, а также для улавливания пыли кокса в литейном производстве. При улавливании коксовой пыли с медианным диаметром 120 мкм эффективность циклонов данного вида достигала 97...98 %.

Циклон с конусом-коагулятором (ЦКК) предназначается для улавливания волокнистой пыли, выделяющейся при переработке семян хлопчатника. Также ЦКК применяется на деревообрабатывающих предприятиях. Характерной особенностью данного циклона является наличие дополнительного конического элемента – конуса-коагулятора. В коагуляторе пылевые частицы коагулируют, образуя устойчивые агрегаты, в результате эффективность циклона повышается и достигает 99 %.

Регулируемый циклон (РЦ) предназначен для улавливания слипающихся и маслянистых пылей. Это циклон со спиральным подводом воздуха, который закручивается с помощью спирально-винтового закручивающего аппарата. Он снабжен специальным регулирующим устройством, которое позволяет регулировать воздушный режим работы аппарата. Данная конструкция позволяет предотвратить вынос крупных частиц, а также осуществлять коагуляцию пыли.

Циклон с внутренней рециркуляцией (ЦВК) предназначен для улавливания пыли сои и других видов неслипающейся мелкодисперсной пыли. Разработан на базе циклона ЦН-15 и отличается от него тем, что в выхлопной трубе имеется щелевое отверстие и винтообразная направляющая лента. Благодаря этому повышается эффективность циклона, которая достигает 99 %.

Для унификации циклонов Институтом охраны труда (Санкт-Петербург) были проведены сравнительные испытания различных циклонов по единой методике. По результатам проведенных испытаний циклон ЦН-11, как обладающий

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

наибольшей эффективностью, рекомендован для преимущественного применения.

2.4. Расчёт эффективности циклона

Все практические задачи по очистке газов от пыли с успехом решаются с помощью циклонов НИИОГАЗа: цилиндрических серии ЦН и конических серии СК. Избыточное давление газов, поступающих в циклон, не должно превышать 2500 Па. Температура газов во избежание конденсации паров жидкости выбирается на 30...50 °С выше температуры точки росы, а по условиям прочности конструкции – не выше 400 °С.

Производительность циклона зависит от его диаметра, увеличиваясь с ростом последнего. Цилиндрические циклоны серии ЦН предназначены для улавливания сухой пыли аспирационных систем. Их рекомендуется использовать для предварительной очистки газов при начальной запыленности до 400 г/м³ и устанавливать перед фильтрами и электрофильтрами.

Пример расчёта

Исходные данные:

- количество очищаемого газа $Q = 1,4 \text{ м}^3/\text{с}$;
- плотность газа при рабочих условиях $\rho_z = 0,89 \text{ кг/м}^3$;
- вязкость газа $\mu = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2$;
- плотность частиц пыли $\rho_{\text{ч}} = 1750 \text{ кг/м}^3$;
- плотность пыли $d_{\text{п}} = 25 \text{ мкм}$;
- дисперсность пыли $\lg \sigma_{\text{п}} = 0,6$;
- запыленность газа $C_{\text{вх}} = 80 \text{ г/м}^3$;
- требуемая эффективность очистки газа η .

Подобрать циклон, обеспечивающий степень эффективности очистки газа от пыли не менее $\eta = 0,87$.

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

Решение

1. Задаёмся типом циклона и определяем оптимальную скорость газа $\omega_{\text{опт}}$ (табл. 2.1) в сечении циклона диаметром D .

Выберем циклон ЦН-15, оптимальная скорость газа в котором $\omega_{\text{опт}} = 3,5$ м/с.

2. Определяем диаметр циклона по формуле 2.1:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \omega_{\text{опт}}}}, \text{ м}, \quad (2.1)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,4}{3,14 \cdot 3,5}} = 0,713 \text{ м}.$$

Ближайшим стандартным сечением является сечение в 700 мм, так как согласно ГОСТ 9617-67 для одиночных циклонов принят стандартный ряд диаметров, мм: 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400, 3000.

3. По выбранному диаметру находим действительную скорость газа в циклоне, м/с:

$$\omega = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot n \cdot D^2}, \quad (2.2)$$

где n – число циклонов.

$$\omega = \frac{4 \cdot 1,4}{3,14 \cdot 1 \cdot 0,7^2} = 3,6 \text{ м/с}.$$

Действительная скорость газа не должна отличаться от оптимальной более чем на 15 %.

4. Принимаем по табл. 2.2 коэффициент гидравлического сопротивления, соответствующий заданному типу циклона. Для циклонов НИИОГаз (одиночных или групп) вводят уточняющие поправки по формуле 2.3:

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

$$\zeta = K_1 \cdot K_2 \cdot \zeta_4, \quad (2.3)$$

где K_1 – поправочный коэффициент на диаметр циклона, определяемый по табл. 2.3; K_2 – поправочный коэффициент на запыленность газа, определяемый по табл. 2.4.

$$\zeta = 1 \cdot 0,9 \cdot 163 = 146,7.$$

5. Определяем потери давления в циклоне:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho_z \cdot \omega^2}{2}, \quad (2.4)$$

$$\Delta p = 146,7 \cdot \frac{0,89 \cdot 3,6^2}{2} = 846 \text{ Па.}$$

6. По табл. 2.1 определяем два параметра пыли d_{50}^T и $\lg \sigma_{\eta}^T$, характеризующих эффективность выбранного типа циклона, где d_{50}^T – табличное значение диаметра частиц, улавливаемых с эффективностью 50 %.

Для выбранного типа циклона $d_{50}^T = 4,5$ мкм; $\lg \sigma_{\eta}^T = 0,352$.

Ввиду того что значения d_{50}^T , приведенные в табл. 2.1, определены по условиям работы типового циклона ($D_T = 0,6$ м; $\rho_{ч.м.} = 1930$ кг/м³; $\mu_m = 22,2 \cdot 10^{-6}$; $\omega_{опт} = 3,5$ м/с), необходимо учесть влияние отклонений условий работы от типовых на величину d_{50} по формуле 2.5:

$$d_{50} = d_{50}^T \cdot \sqrt{\frac{D}{D_m} \cdot \frac{\rho_{ч.м.}}{\rho_ч} \cdot \frac{\mu_m}{\mu} \cdot \frac{\omega_{опт}}{\omega}}, \quad (2.5)$$

$$d_{50} = 4,5 \cdot \sqrt{\frac{0,7}{0,6} \cdot \frac{1930}{1750} \cdot 1 \cdot \frac{3,5}{3,6}} = 5 \text{ мкм,}$$

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

т.е. размер частиц, улавливаемых в реальных условиях на 50 %, составляет 5 мкм.

7. Рассчитываем параметр x – функцию нормального распределения частиц по формуле 2.6:

$$x = \frac{\lg \frac{d_n}{d_{50}}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta}^T + \lg^2 \sigma_{\Pi}}}, \quad (2.6)$$

$$x = \frac{\lg \frac{25}{5}}{\sqrt{0,352^2 + 0,6^2}} = 1.$$

8. По табл. 1.1 находим значение $\Phi(x)$, представляющее собой полный коэффициент очистки газа, выраженный в долях:

$$\Phi(x) = 0,8413.$$

9.

Определяем степень эффективности очистки газа в циклоне по формуле 2.7:

$$\eta = 0,5 \cdot [1 + \Phi(x)], \quad (2.7)$$

$$\eta = 0,5 \cdot [1 + 0,8413] = 0,92.$$

Расчетное значение $\eta = 0,92$ (92 %), что больше необходимого условия $\eta = 0,87$. Таким образом, циклон выбран верно.

Если расчётное значение эффективности меньше требуемого, то выбирается другой циклон и расчёт производится сначала.

Таблица 2.1

Параметры, определяющие эффективность циклона

Параметры	ЦН-24	ЦН-15у	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34
d_{50}^T , мкм	8,5	6,0	4,5	3,65	2,31	1,13
$\lg \sigma_{\eta}^T$	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,340
ω_{opt} , м/с	4,5	3,5	3,5	3,5	2,0	2,0

Примечание. Значение d_{50}^T в таблице соответствует следующим условиям эксплуатации циклонов: средняя скорость газа в циклоне $\omega = 3,5$ м/с; диаметр циклона $D = 0,6$ м; плотность частиц $\rho_{ch} = 1930$ кг/м³; динамическая вязкость газа $\mu_r = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

Таблица 2.2

Значения коэффициентов сопротивления циклонов

Марка циклона	ζ_4
ЦН-11	250
ЦН-15	163
ЦН-15у	170
ЦН-24	80
СДК-ЦН-33	600
СК-ЦН-34	1150

Примечание. ζ_4 – коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона, работающий без дополнительных устройств и без гидравлической сети, т.е. прямо на выхлоп в атмосферу.

Таблица 2.3

 Поправочный коэффициент K_1 на влияние диаметра циклона

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

Таблица 2.4

 Значения поправочных коэффициентов K_2 на запыленность газов

Марка цик- лона	Запыленность $C_{вх}$ г/м ³						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,85
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-15у	1	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СДК-ЦН-33	1	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СК-ЦН-34	1	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90

Вывод

Очевидной является важность исследований, проводимых в области очистки воздуха от пыли. При анализе данных материалов и разделения аэрозольных потоков с использованием циклонов было выявлено несовершенство существующих методик расчета и оценки эффективности пылеулавливания. В настоящее время расчет эффективности циклонов с винтовым подводом воздуха проводится в основном по формулам, полученным в результате аппроксимации экспериментальных данных, без анализа гидравлической сути процесса. На сегодняшний день проводится теоретический расчет только суммарной (интегральной) эффективности циклона без расчета эффективности очистки по каждой фракции, а также расчет минимального диаметра d_{min} частиц, осажденных в теле циклона полностью тоже без учета частичного осаждения частиц диаметром меньше d_{min} , который вносит значительный вклад в значение эффективности циклона. Таким обра-

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

зом, выявляются задачи настоящей работы:

- создание и исследование математических моделей центростремительного движения частиц, на основе теоретической механики жидкости;
- оценка эффективности циклонов;
- проверка достоверности данной методики расчета эффективности.

Задание по работе

Исходные данные для подбора циклона, обеспечивающего степень эффективности очистки газа от пыли согласно номеру варианта, который задает преподаватель, принимают по табл. 2.5.

Таблица 2.5

Варианты исходных данных для расчета циклонных аппаратов, обеспечивающих заданную степень эффективности очистки газа от пыли

№ варианта	Q , м ³ /с	$\rho_{ч}$, кг/м ³	$\mu \cdot 10^{-6}$, Н·с/м ²	$\rho_{г}$, кг/м ³	$d_{п}$, мкм	$\lg \sigma_{п}$	$C_{вх}$, г/м ³	η
1	1,5	1751	22,20	0,89	25	0,60	80	0,8
2	1,6	1760	21,80		26	0,70	84	0,78
3	1,7	1745	18,37		27	0,80	82	0,82
4	1,8	1740	22,02		28	0,64	79	0,85
5	1,9	1735	18,65		29	0,55	75	0,75
6	2,0	1730	22,40		30	0,50	70	0,73
7	1,45	1769	19,22		24	0,58	67	0,84
8	1,4	1800	22,26		23	0,68	63	0,87
9	1,3	1780	21,84		25	0,73	60	0,9
10	1,65	1785	18,38		26	0,49	73	0,88
11	1,85	1790	22,03		27	0,56	65	0,79
12	1,95	1895	18,65		28	0,72	85	0,70
13	1,55	1725	22,42		29	0,78	83	0,76
14	2,3	1777	22,26		30	0,65	88	0,83
15	2,1	1820	20,60		24	0,54	78	0,84

3. СКРУББЕР ВЕНТУРИ

Цель работы: изучение мокрых аппаратов очистки отходящих газов – скруббера Вентури и расчет его эффективности.

3.1. Общие сведения

Среди мокрых пылеуловителей наибольшей эффективностью очистки газов (воздуха) от мелкодисперсной пыли обладают установки с трубой Вентури (СПУ Вентури).

Более высокая эффективность пылеулавливания по сравнению с полыми газопромывателями достигается в скрубберах Вентури за счет развитой поверхности контакта фаз, что требует также значительно более высоких энергозатрат. Образование тонкодисперсного аэрозоля происходит при этом как за счет механической диспергации промывочной жидкости, так и вследствие интенсивного испарения капель при резком падении давления в горловине. Очевидно, что это приводит также к повышению влажности газа и интенсификации капиллярной конденсации влаги на поверхности частиц пыли. Последняя причина может служить объяснением того, что степень очистки пыли в скрубберах Вентури слабо зависит от ее смачиваемости.

Под СПУ Вентури понимают аппарат, состоящий из трубы распылителя для измельчения жидкости под действием воздушного (газового) потока, движущегося с большой скоростью, и каплеуловителя (рис. 3.1).

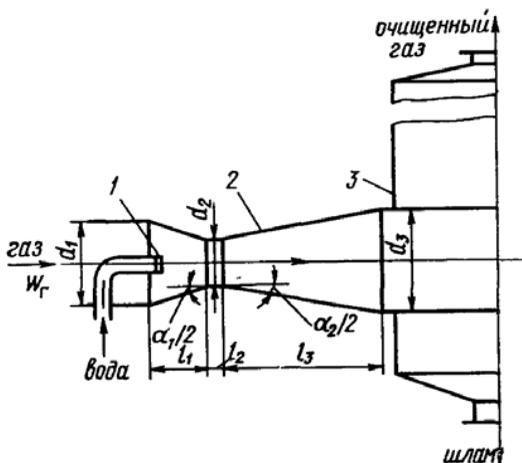


Рис. 25. Скруббер Вентури

Рис. 3.1. Скруббер Вентури

Основная часть скруббера — сопло Вентури 2, в конфузурную часть которого подводится запыленный поток газа и через центробежные форсунки 1 жидкость на орошение. В конфузурной части сопла происходит разгон газа от входной скорости ($w = 15...20$ м/с) до скорости в узком сечении сопла $40...200$ м/с и более. Процесс осаждения частиц пыли на капли жидкости обусловлен массой жидкости, развитой поверхностью капель и высокой относительной скоростью частиц жидкости и пыли в конфузурной части сопла. Эффективность очистки в значительной степени зависит от равномерности распределения жидкости по сечению конфузурной части сопла. В диффузоре трубы происходит рост давления и снижение скорости потока до $15...20$ м/с, что способствует коагуляции мелких частиц. Из диффузора газовый поток выносит капли жидкости с осевшими на них частицами пыли в каплеуловитель 3, где происходит сепарация взвешенных частиц. Для улавливания пыли после трубы Вентури возможно использование скрубберов, циклонов с водяной пленкой и др. В этих аппаратах осуществляется улавливание предварительно скоагулированных пылевых частиц. Каплеуловитель обычно выполняют в виде прямоточного циклона.

Характерным элементом для данного устройства является

труба Вентури (рис. 3.2), где происходит контакт воздушного (газового) потока, содержащего во взвешенном состоянии пылевые частицы, с тонкораспыленной водой.

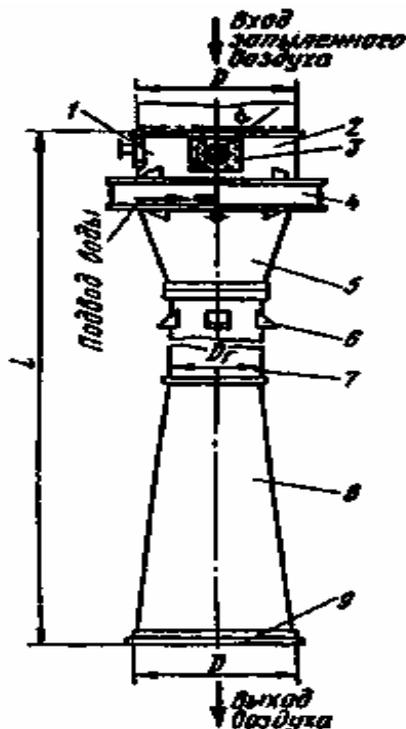


Рис. 3.2. Труба Вентури:

- 1 – лаз герметический; 2 – цилиндр; 3 – смывное приспособление; 4 – камера; 5 – конфузур; 6 – опора;
 7 – горловина; 8 – диффузор; 9 – фланец

По величине гидродинамического сопротивления труб Вентури различают: низконапорные – с сопротивлением распылителя до 5 кПа, применяются для улавливания пыли с размерами частиц более 20 мкм (эффективное улавливание мелких частиц требует более высоких энергозатрат); высоконапорные – могут осаждать частицы размером 0,5 мкм и выше. Скорость потока в высоконапорных трубах приближается к скорости звука, а их сопротивление достигает нескольких десятков кПа.

Для труб Вентури оптимальными считаются следующие геометрические характеристики: угол сужения конфузора $\alpha_1 =$

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

15...28°, длина горловины $h = 0,15d$, угол раскрытия диффузора $\alpha_2 = 6...8^\circ$.

Скрубберы Вентури могут различаться устройством каплеуловителей (выносные или размещаться в одном корпусе с трубой), конструкциями и способами установки труб (могут иметь круглое, кольцевое или прямоугольное (щелевое) сечение горловины), способами подвода жидкости.

Вода в горловину трубы может подаваться через форсунки различных конструкций, установленные центрально или периферийно, или стекать в виде пленки по стенкам конфузора (рис. 3.3, а, б, в). Худшие показатели по дроблению капель и, следовательно, по степени очистки имеют бесфорсуночные трубы Вентури (рис. 3.3, г). В то же время они допускают использование оборотной неочищенной жидкости, что может быть важным при совместном улавливании газообразных и дисперсных примесей (например, при нейтрализации кислых газов известковым молоком).

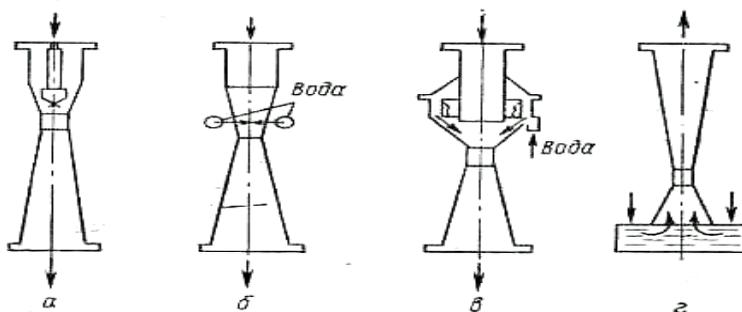


Рис. 3.3. Конструкции труб-распылителей:

- а – центральный (форсуночный) подвод жидкости;
- б – периферийное орошение;
- в – пленочное орошение;
- г – бесфорсуночное орошение

Расход воды, распыляемой в СПУ, колеблется в широких пределах и составляет от 1 до 80 л на 100 м³ очищаемого воздуха. Расход зависит от вида улавливаемой пыли, ее концентрации в очищаемом воздухе, а также от конструкции СПУ. Для распыления воды перед форсунками необходим напор 200...300 кПа.

Эффективность улавливания частиц размером 5 мкм составляет 99,6 %.

СПУ Вентури применяют для улавливания пылей и возгонов

черной и цветной металлургии, пылей пищевых производств, не изменяющих своих свойств при контакте с водой, например, сахарной и др. при начальной концентрации пыли в весьма широком диапазоне – 0,05...100 г/м³.

Главным преимуществом СПУ Вентури является простота устройства и малые габаритные размеры установки.

Среди низконапорных скрубберов Вентури широкое распространение получили так называемые коагуляционные мокрые пылеуловители (КМП), которые представляют собой аппарат с совмещенной трубой – коагулятором и циклоном ЦВП.

За определяющий размер КМП принят диаметр горловины D_r трубы-коагулятора, который в ряду размеров меняется от 250 до 1000 мм. Данные аппараты могут работать в широком диапазоне расходов газа (7...230 тыс.м³/ч) при скорости газа в горловине 40...70 м/с. Гидравлическое сопротивление при этом составляет 12...35 кПа, а удельный расход воды 0,2...0,6 л/м³ газа.

Общую эффективность очистки рассчитывают по уравнению 3.1:

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \sum \Delta R_i \eta_i \quad (3.1)$$

Наибольшее влияние на эффективность улавливания оказывают скорость газов в горловине трубы Вентури и удельное орошение.

Оценка эффективности скруббера Вентури может быть определена с помощью формулы 3.2 по эффективности захвата каплями частиц определенного диаметра, при небольших значениях удельного орошения ($m < 2$ л/м³):

$$\eta = \frac{\Psi^2}{(\Psi + 0,35)^2} \quad (3.2)$$

где Ψ – инерционный параметр, отличающийся от числа Стокса тем, что в него входит числовой коэффициент 1/18 и поправка Кенингема. Определяется по формуле 3.3:

$$\Psi = \frac{d_{\text{ч}}^2 \rho_{\text{ч}} w_{\text{о.г}} C}{18 \mu_{\text{г}} l} \quad (3.3)$$

где $w_{0,г}$ – скорость газов относительно поверхности осаждения, м/с; C – поправка Кенингема; μ_r – динамическая вязкость газа, Па·с; l – определяющий линейный параметр, который соответствует диаметру капли (по формуле 3.5), м.

Поправка Кенингема приобретает существенное значение при диаметре частиц пыли меньше 1 мкм. В табл. 3.1 приведены значения поправок C (для воздуха при нормальных условиях).

Таблица 3.1

Величина поправки Кенингема в зависимости от диаметра частиц пыли

$d_{ч}, \text{мкм}$	0,003	0,01	0,03	0,1	0,3	1,0	3,0	10,0
C	90	24,5	7,9	2,9	1,57	1,16	1,03	1,0

Коэффициент $1/18$ и поправка Кенингема придают параметру Ψ определенный физический смысл – это отношение длины пробега частиц от некоторой начальной скорости до полной остановки в неподвижной газовой среде к характерному для рассматриваемого процесса газоочистки геометрическому размеру l : диаметру капли, газового пузырька, аппарата (для мокрых аппаратов), сопла (для аппаратов ударно-инерционного действия).

Для оценки эффективности скруббера Вентури, при значениях удельного орошения 2 л/м^3 и более ($m \geq 2 \text{ л/м}^3$) можно воспользоваться уравнением 3.4:

$$\eta = 1 - 0,15\Psi^{-1,24} \quad (3.4)$$

Выражение 3.4 действительно при $1 \leq \Psi \leq 170$; при $\Psi > 170$ величина η может быть принята практически равной 1,0.

При расчетах по формулам 3.2 и 3.4 скорость газов относительно капли $w_{0,г}$ принимается равной скорости газов в горловине трубы-распылителя, диаметр капли рассчитывается по формуле (3.5) Таназавы-Нукиямы, характеризующей средний диаметр капель, образующихся при распыле жидкости пневматической форсункой:

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

$$d_k = \frac{585 \cdot 10^{-3} \sqrt{\sigma}}{w_{o.g} \sqrt{\rho_{ж}}} + 53,4 \cdot \left(\frac{\mu_{ж}}{\sqrt{\rho_{ж}^{\sigma}}} \right)^{0,45} \cdot \left(\frac{Q_{ж}}{Q_z} \right)^{1,5}, \quad (3.5)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела фаз газ – жидкость, Н/м (для воды $\sigma = 72,86 \cdot 10^{-3}$ Н/м (Дж/м²)).

Так как отношение $Q_{ж}/Q_z$ обычно мало, величина d_k практически определяется первой частью уравнения, т.е. почти не зависит от вязкости жидкости. Считается, что при скорости газов в горловине трубы-распылителя выше 60 м/с точность формулы (3.5) весьма высока. Ошибка становится значительной при скорости газов ниже 30 м/с.

Гидравлическое сопротивление скрубберов Вентури складывается из гидравлических сопротивлений трубы-распылителя ΔP и каплеуловителя $\Delta P_{ку}$ формула (3.6), причем основная часть потерь энергии приходится на трубу Вентури:

$$\Delta P_{ан} = \Delta P + \Delta P_{ку}, \quad (3.6)$$

где $\Delta P_{ку}$ – гидравлическое сопротивление каплеуловителя, Па.

Гидравлическое сопротивление трубы-распылителя, Па, при подаче в нее орошающей жидкости описывается уравнением 3.7:

$$\Delta P = \Delta P_r + \Delta P_{ж}, \quad (3.7)$$

где ΔP_r – гидравлическое сопротивление трубы-распылителя, обусловленное движением газов (без подачи орошения), Па; $\Delta P_{ж}$ – гидравлическое сопротивление трубы-распылителя, обусловленное вводом орошающей жидкости, Па.

Гидравлическое сопротивление сухой трубы-распылителя, Па, определяется по формуле:

$$\Delta P_r = \xi_c \cdot w_r^2 \cdot \rho_r / 2, \quad (3.8)$$

где ξ_c – коэффициент гидравлического сопротивления сухой трубы-распылителя (рассчитывается по формуле 3.9); w_r – скорость газа в горловине (обычно принимается по температуре и давлению на выходе из трубы-распылителя), м/с; ρ_r – плотность газов (при тех же условиях), кг/м³. При очистке газов (воздуха) прини-

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

маем плотность газов (воздуха) равную $1,125 \text{ кг/м}^3$.

Коэффициент гидравлического сопротивления ξ_c для труб-распылителя с круглой и прямоугольной горловинами длиной $0,15D_3$ (D_3 – эквивалентный диаметр горловины, м) принимают в пределах $0,12 \dots 0,15$. При длине горловины в пределах $0,15D_3 \leq l \leq 10D_3$ этот коэффициент рассчитывают по зависимости 3.9:

$$\xi_c = 0,165 + 0,034 (l/D_3) \cdot [0,06 + 0,028 \cdot (l/D_3)] \cdot M, \quad (3.9)$$

где $M = w_l/w_{зв}$ – число Маха; $w_{зв}$ – скорость звука в газе, м/с. При расчётах принимаем скорость звука в газе равную 330 м/с.

Выражение (3.8) справедливо при скорости газа в горловине до 150 м/с, причем обе скорости берутся по температуре и давлению газов на выходе из трубы-распылителя.

Гидравлическое сопротивление труб-распылителей, Па, обусловленное вводом орошающей жидкости, рассчитывают по формуле 3.10:

$$\Delta P_{ж} = \xi_{ж} \cdot \frac{w_{г}^2 \rho_{ж}}{2} \cdot m, \quad (3.10)$$

где $\xi_{ж}$ – коэффициент гидравлического сопротивления, обусловленный вводом орошающей жидкости; $\rho_{ж}$ – плотность орошающей жидкости, кг/м^3 . Так как в качестве орошающей жидкости мы используем воду, то $\rho_{ж} = 1000 \text{ кг/м}^3$; m – удельный расход орошающей жидкости, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Коэффициент $\xi_{ж}$ определяется по выражению 3.11:

$$\xi_{ж} = A \cdot \xi_c [(w_{ж}/w_l)(\rho_l/\rho_{ж})]^{1+B}, \quad (3.11)$$

где $w_{ж}$ – скорость капель жидкости на выходе из горловины трубы-распылителя (обычно в 1,5...3 раза меньше w_l , меньшие значения берут для высоких скоростей газа), м/с.

Значения коэффициента A и показателя степени $(1 + B)$ в формуле (3.11) приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

 Значения коэффициента A и показателя степени $(1 + B)$

Способ подвода орошающей жидкости в трубу Вентури	Скорость газа в горловине, м/с	Длина горловины $l_г$, м	A	$1 + B$
1	2	3	4	5
Центральный и пленочный подвод	> 80 < 80	$(0,15-12,0)D_3$	$1,68(l_г/D_3)^{0,29}$ $3,49(l_г/D_3)^{0,266}$	$1-1,12(l_г/D_3)^{0,045}$ $1-0,98(l_г/D_3)^{0,026}$
Центральный подвод перед конфузуром или орошение площади над батареей труб Вентури	40...150	$0,15 D_3$	0,215	-0,54
Периферийный подвод в конфузор	> 80 < 80	$0,15 D_3$	13,4 1,4	0,024 -0,316
Центральный подвод в конфузор трубы с кольцевым сечением горловины	30...160	-	0,08	-0,502
Центральный подвод орошения в конфузор трубы Вентури оптимальной конфигурации	40-150	$0,15 D_3$	0,63	-0,3

3.2. Расчет эффективности работы скрубберов Вентури

Определить гидравлическое сопротивление трубы-распылителя, Па, при подаче в нее орошающей жидкости и степень очистки для одиночных труб Вентури с центральными форсунками, установленными перед конфузуром запыленного кварцевой пылью воздуха ($V_г = 10\ 000\ \text{м}^3/\text{ч}$) с конечной температурой $40\ \text{°C}$ и диаметром горловины 300 мм ($D = 0,3\ \text{м}$). Орошение скруббера производится с периферийным подводом воды в конфузор. Дисперсный состав пыли приведен в табл. 3.3 (ΔR – мас-

совая доля фракции).

Таблица 3.3

Дисперсный состав пыли

d , мкм	0–3	3–10	10–15	15–20
ΔR , %	10	16	46	18

1. Находим скорость движения газа в горловине (w_r) по заданному диаметру горловины:

$$w_r = 4V_r/3600D^2, \text{ м/с}, \quad (3.12)$$

$$w_r = 4 \cdot 10\,000/3600 \cdot 0,3^2 = 123,5 \text{ м/с}.$$

2. Определяем гидравлическое сопротивление трубы-распылителя, обусловленное движением газов. Коэффициент гидравлического сопротивления ξ_c примем равным 0,14, т.к. длина горловины равна $0,15D_s$. Тогда в соответствии с формулой 3.8 ΔP_r будет равно:

$$\Delta P_r = \xi_c w_r^2 \rho_r / 2 = 0,14 \cdot 123,5^2 \cdot 1,125 / 2 = 1201 \text{ Па}.$$

3. Потерю напора под действием присутствующих в потоке капель жидкости определяем по формуле 3.10, где $\xi_{ж}$ – коэффициент гидравлического сопротивления, обусловленный вводом жидкости, определяется по формуле 3.11. Для этого из табл. 3.2 находим значения коэффициента $A = 13,4$ и показателя степени $(1 + B) = 0,024$. Скорость капель жидкости принимаем $w_{ж} = w_r / 2 = 123,5 / 2 = 61,75 \text{ м/с}$; плотность орошения жидкости принимаем $m = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3$, тогда:

$$\xi_{ж} = 13,4 \cdot 0,14 \cdot [(61,75/123,5)(1,125/1000)]^{0,024} = 1,57;$$

$$\Delta P_{ж} = (1,57 \cdot 123,5^2 \cdot 1000/2) \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} = 4789 \text{ Па};$$

4. Определяем гидравлическое сопротивление трубы Вентури, Па, при подаче в нее орошающей жидкости:

$$\Delta P = 1201 + 4789 = 5990 \text{ Па}.$$

5. Рассчитываем по формуле Таназавы-Нукиямы (3.5), средний диаметр капель, т.к. он почти не зависит от вязкости

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

жидкости, используем в расчетах только первую частью уравнения:

$$d_{\kappa} = \frac{585 \cdot 10^{-3} \sqrt{72,86 \cdot 10^{-3}}}{123,5 \sqrt{1000}} = 40,5 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

6. По формуле 3.3 определяем инерционный параметр Ψ , с учетом дисперсного состава пыли (табл. 3.3), динамической вязкости газа – $19,3 \cdot 10^{-6}$ (Па·с) и плотности частиц кварца – 2650 кг/м^3 :

– для $d_{\kappa} = 1,5 \text{ мкм}$:

$$\Psi = \frac{(1,5 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2650 \cdot 123,5 \cdot 1,1275}{18 \cdot 19,3 \cdot 10^{-6} \cdot 40,5 \cdot 10^{-6}} = 59 ;$$

– для $d_{\kappa} = 6,5 \text{ мкм}$:

$$\Psi = \frac{(6,5 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2650 \cdot 123,5 \cdot 1,015}{18 \cdot 19,3 \cdot 10^{-6} \cdot 40,5 \cdot 10^{-6}} = 997,5 ;$$

– для $d_{\kappa} = 12,5 \text{ мкм}$:

$$\Psi = \frac{(12,5 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2650 \cdot 123,5 \cdot 1}{18 \cdot 19,3 \cdot 10^{-6} \cdot 40,5 \cdot 10^{-6}} = 3634,5 ;$$

– для $d_{\kappa} = 17,5 \text{ мкм}$:

$$\Psi = \frac{(17,5 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2650 \cdot 123,5 \cdot 1}{18 \cdot 19,3 \cdot 10^{-6} \cdot 40,5 \cdot 10^{-6}} = 7124$$

7. Т.к. значения удельного орошения $m < 2 \text{ л/м}^3$ по формуле 3.2 определяем эффективность захвата каплями частиц диаметром $40,5 \text{ мкм}$. Полученные значения записываем в табличной форме (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Дисперсный состав пыли (расчетный)

d , мкм	1,5	6,5	12,5	17,5
η , %	98,8	99,9	99,9	99,9

8. Определяем общую степень очистки воздуха в скруббере Вентури:

$$\epsilon_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n (\Delta R_i \eta_{\phi i}) / 100 = (10 \cdot 98,8 + 16 \cdot 99,9 + 46 \cdot 99,9 + 18 \cdot 99,9) / 100 = 89,8 \%$$

Задание по работе

Исходные данные для определения гидравлического сопротивления трубы-распылителя и степени очистки одиночных труб Вентури с центральными форсунками, согласно номеру варианта, который задает преподаватель, принимают по табл. 3.5. Орошение скруббера производится с периферийным подводом воды в конфузор. Дисперсный состав пыли приведен в табл. 3.3.

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

Таблица 3.5

 Варианты исходных данных для расчета степени очистки
 одиночных труб Вентури с центральными форсунками

№ варианта	Тип аппарата	V_f , тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$	D , мм	$\rho_{\text{ч}}$, $\text{кг}/\text{м}^3$	$\rho_{\text{г}}$, $\text{кг}/\text{м}^3$	$\mu_{\text{г}} \cdot 10^{-6}$, $\text{Па} \cdot \text{с}$	m , $\text{л}/\text{м}^3$
1	СВ-150/90-800	4	200	2100	1,125	17,6	0,5
2	СВ-400/250-2200	35	600	1760		18,1	3,0
3	СВ-150/90-800	7	250	2600		18,6	1,5
4	СВ-210/120-1200	7	300	1740		19,1	5,0
5	СВ-150/90-800	6	250	2650		19,6	1,0
6	СВ-210/120-1200	10	300	1730		17,6	0,7
7	СВ-300/180-1600	20	400	2750		18,1	2,5
8	СВ-400/250-2200	40	600	1800		18,6	1,9
9	СВ-300/180-1600	15	400	1590		19,1	0,5
10	СВ-210/120-1200	15	350	1785		19,6	2,1
11	СВ-300/180-1600	25	450	1200		17,6	1,0
12	СВ-400/250-2200	45	600	1895		18,1	1,7
13	СВ-150/90-800	3,5	210	2100		18,6	3,0
14	СВ-210/120-1200	13	350	1777		19,1	1,5
15	СВ-300/180-1600	11	300	2650		19,6	2,0

4. ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЫ

Целью практической работы является изучение конструктивных особенностей и расчет эффективности электрофильтров.

4.1. Общие сведения

Под электрической очисткой газа понимают процесс, при котором твердые частицы удаляются из газообразной среды под воздействием электрических сил.

Фундаментальным отличием процесса электростатического осаждения от механических методов сепарации частиц является то, что в этом случае осаждающая сила действует непосредственно на частицы, а не создается косвенно – путем воздействия на поток газа в целом. Это прямое и чрезвычайно эффективное использование силового воздействия и объясняет такие характерные черты электростатического метода, как умеренное потребление энергии и малое сопротивление потоку газа. Даже мельчайшие частицы субмикрометрового диапазона улавливаются эффективно, поскольку и на эти частицы действует достаточно большая сила. Принципиальных ограничений степени очистки нет, так как эффективность может быть повышена путем увеличения продолжительности пребывания частиц в электрофильтре.

Энергия, потребляемая в электрофильтре, складывается из энергии, расходуемой генератором тока высокого напряжения, и энергии, необходимой для преодоления гидравлического сопротивления при прохождении газа через электрофильтр. Гидравлическое сопротивление электрофильтра при его правильной эксплуатации не превышает 100...150 Па, т.е. оно значительно ниже, чем у большинства других пылеуловителей. Энергия, подводимая к обрабатываемым газам при электроосаждении, расходуется преимущественно для непосредственного воздействия на осаждаемые частицы. Этим обусловлены многие преимущества процесса электрофильтрации.

На мощных современных тепловых электростанциях и крупных теплоцентралях для улавливания золы и очистки продуктов сгорания в основном используют электрофильтры. Данный способ очистки основан на том, что при пропуске через электрическое поле высокого напряжения, создаваемого между отрицательным и положительным полюсом, происходит ионизация газового потока. При этом частицы уноса, содержащиеся в продуктах сгорания, получают электрический заряд. Основная масса частиц заряжается отрицательными ионами, переносится к положительному по-

люсу и оседает на нем. Электрофильтры изготавливают вертикальными и горизонтальными.

Электрофильтр относится к наиболее эффективным пылеулавливающим аппаратам. Эффективность очистки достигает 99,9 % в широких пределах концентраций (от нескольких мг до 200 г/м) и дисперсности частиц (до долей мкм) и невысокой затрате электроэнергии (около 0,1...0,5 кВт·ч на 1000 м³ газов). Электрофильтр может обеспыливать влажную и коррозионно-активную газовую среду с температурой до 500 °С. Производительность электрофильтров достигает сотен тысяч м³/ч очищаемого газа.

Достоинствами электрофильтров являются: высокий коэффициент очистки газов и малое гидравлическое сопротивление.

К недостаткам электрофильтров относится их высокая чувствительность к поддержанию параметров очистки, высокая металлоемкость и большие габариты, а также высокая требовательность к уровню монтажа и обслуживания, высокая стоимость в связи с применением устройства для получения постоянного тока высокого напряжения.

Применение электрофильтрации имеет ряд ограничений. Электрофильтр не может быть использован для улавливания пылей, обладающих очень высоким электрическим сопротивлением. Нельзя направлять в электрофильтры взрывоопасные газовые выбросы, в том числе и такие, которые могут стать взрывоопасными в процессе обработки. Не следует использовать электроочистку, если осаждение взвешенных частиц может сопровождаться электрохимическими реакциями с выходом токсичных продуктов и тем более добавлять таковые (например, SO₂, NH₃ и др.) для интенсификации процесса электрофильтрации.

Электрофильтры, как более сложное и дорогостоящее оборудование, обеспечивающее тонкую очистку воздуха, обычно комбинируют с другими пылеулавливающими устройствами, устанавливаемыми на начальных ступенях очистки. В результате повышается экономичность использования электрофильтров и обеспечивается более полная очистка.

4.2. Принцип действия электрофильтров

В электрофильтре очистка газов от твердых и жидких частиц происходит под действием электрических сил. Частицам сообщается электрический заряд, и они под действием электрического поля осаждаются из газового потока.

Общий вид электрофильтра приведен на рис. 4.1.

Процесс обеспыливания в электрофильтре состоит из сле-

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

дующих стадий: пылевые частицы, проходя с потоком газа электрическое поле, получают заряд; заряженные частицы перемещаются к электродам с противоположным знаком; осаждаются на этих электродах; удаляется пыль, осевшая на электродах.

Зарядка частиц – первый основной шаг процесса электростатического осаждения. Большинство частиц, с которыми приходится иметь дело при промышленной газоочистке, сами по себе несут некоторый заряд, приобретенный в процессе их образования, однако эти заряды слишком малы, чтобы обеспечить эффективное осаждение. На практике частицы заряжают, пропуская через корону постоянного тока между электродами электрофильтра. Можно использовать и положительную и отрицательную корону, но для промышленной газоочистки предпочтительнее отрицательная корона из-за большей стабильности и возможности применения больших рабочих значений напряжения и тока, но при очистке воздуха используют только положительную корону, так как она дает меньше озона.

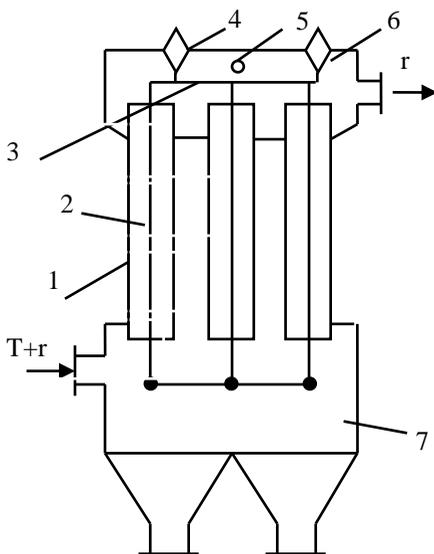


Рис. 4.1. Электрофильтр:

1 – осадительный электрод; 2 – коронирующий электрод;
 3 – рама; 4 – высоковольтный изолятор; 5 – встряхивающее устройство; 6 – верхняя камера; 7 – сборник пыли

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

Основными элементами электрофильтра являются коронирующий и осадительный электроды. Первый электрод в простейшем виде представляет собой проволоку, натянутую в трубке или между пластинами, второй – поверхность трубки или пластины, окружающей коронирующий электрод (рис. 4.2).

На коронирующие электроды подается постоянный ток высокого напряжения 30...60 кВ. Коронирующий электрод обычно имеет отрицательную полярность, осадительный электрод заземлен. Это объясняется тем, что корона при такой полярности более устойчива, подвижность отрицательных ионов выше, чем положительных. Последнее обстоятельство связано с ускорением зарядки пылевых частиц.

После распределительных устройств обрабатываемые газы попадают в проходы, образованные коронирующими и осадительными электродами, называемые межэлектродными промежутками. Сходящие с поверхности коронирующих электродов электроны разгоняются в электрическом поле высокой напряженности и приобретают энергию, достаточную для ионизации молекул газа. Сталкивающиеся с электронами молекулы газов ионизируются и начинают ускоренно двигаться в направлении электродов противоположного заряда, при соударении с которыми выбивают новые порции электронов. В результате между электродами появляется электрический ток, а при некоторой величине напряжения образуется коронный разряд, интенсифицирующий процесс ионизации газов. Взвешенные частицы, перемещаясь в зоне ионизации и сорбируя на своей поверхности ионы, приобретают в конечном итоге положительный или отрицательный заряд и начинают под влиянием электрических сил двигаться к электроду противоположного знака. Частицы сильно заряжаются на первых 100...200 мм пути и смещаются к заземленным осадительным электродам под воздействием интенсивного поля короны. Процесс в целом протекает очень быстро, на полное осаждение частиц требуется всего несколько секунд. По мере накопления частиц на электродах их стряхивают или смывают.

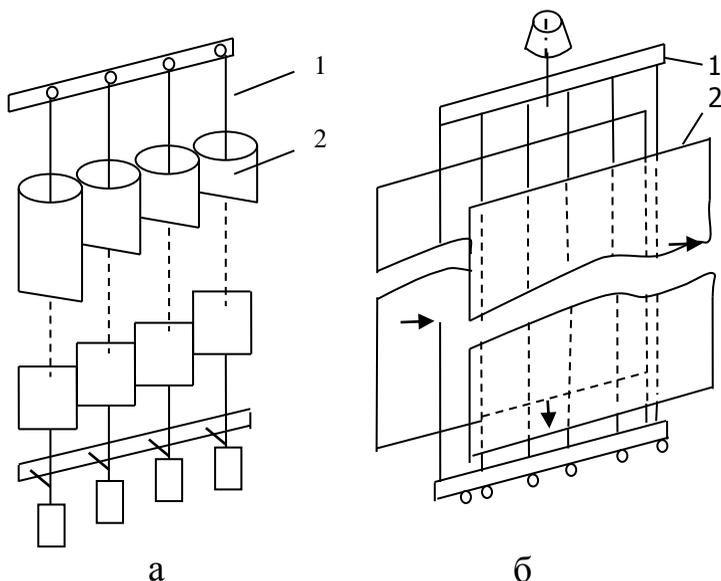


Рис. 4.2. Конструктивная схема электродов:
а – электрофильтр с трубчатыми электродами; *б* – электрофильтр с пластинчатыми электродами;
 1 – коронирующие электроды; 2 – осадительные электроды

Коронный разряд характерен для неоднородных электрических полей. Для их создания в электрофильтрах применяют системы электродов типа точка (острие) – плоскость, линия (острая кромка, тонкая проволока) – плоскость или цилиндр.

В поле короны электрофильтра реализуются два различных механизма зарядки частиц. Наиболее важна зарядка ионами, которые движутся к частицам под действием внешнего электрического поля. Вторичный процесс зарядки обусловлен диффузией ионов, скорость которой зависит от энергии теплового движения ионов, но не от электрического поля. Зарядка в поле преобладает для частиц диаметром более 0,5 мкм, а диффузионная – для частиц мельче 0,2 мкм; в промежуточном диапазоне (0,2...0,5 мкм) важны оба механизма.

Заряд частицы, достигаемый за время t , определяется следующим уравнением:

$$Q = 12 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot E_0 \cdot r_c^2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \left[\frac{t}{t + \frac{4\varepsilon_0}{N_0 e K}} \right], \quad (4.1)$$

где ε – относительная диэлектрическая постоянная частицы по отношению к диэлектрической постоянной вакуума: ε_0 – проницаемость вакуума, равная $8,55 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; E_0 – напряженность электрического поля; r_c – радиус частицы; t – время; N_0 – ионная плотность; e – заряд электрона; K – подвижность газовых ионов.

Уравнение (4.1) может быть переписано в более краткой форме, если учесть, что заряд достигает предельного значения Q_s , определяемого как:

$$Q_s = 12 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot E_0 \cdot r_c^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right), \quad (4.2)$$

и что величина $\frac{4 \cdot \varepsilon_0}{N_0 \cdot e \cdot K}$ имеет размерность времени. Эта величина называется временной постоянной зарядки и обозначается символом t_0 . Подставляя в (4.1) Q_s и t_0 получаем упрощенное выражение:

$$Q = Q_s \cdot \frac{t}{t + t_0}. \quad (4.3)$$

Около 90 % заряда частица получает через отрезок времени, равный $10 \cdot t_0$.

На практике напряженность поля обычно лежит в пределах 300...600 кВ/м, но может превышать 1000 кВ/м в специальных си-

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

стемах. Ионная плотность имеет порядок $10^{13} \dots 10^{14} \text{ м}^{-3}$, но в специальных случаях может быть значительно выше.

Временная постоянная зарядки t_0 составляет 0,11 с при относительно малой ионной плотности 10^{13} м^{-3} и уменьшается до 0,001 с при высоком значении плотности, равном 10^{15} м^{-3} . Если принять время для практически полного завершения зарядки, то при умеренной плотности ионов, равной 10^{14} м^{-3} время зарядки составит 0,1 с. Это время соответствует длине пути газа в осадителе, равной 0,1...0,2 м, так что зарядка протекает на незначительном расстоянии от входа в электрофильтр.

Скорость дрейфа (перемещения) взвешенных частиц возрастает с напряженностью поля, однако при определенном значении напряжения на электродах наступает пробой газового промежутка и возникает дуга. Поэтому оптимальным значением напряжения на электродах считается максимально близкое к пробойному.

В наибольшей мере процесс улавливания пыли в электрофильтре зависит от электрического сопротивления пыли. По величине сопротивления пыли делят на три группы:

- пыль с малым удельным электрическим сопротивлением. УЭС $< 104 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- пыли с УЭС в пределах $104 \dots 1010 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ без каких-либо осложнений осаждаются на электродах и удаляются;
- пыли со значительным УЭС $> 1010 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Улавливание этих пылей в электрофильтре представляет наибольшую сложность. Пыли данной группы часто образуют на электродах прочный изолирующий слой, трудно поддающийся удалению. Высоким удельным электрическим сопротивлением обладают пыли магнетита, гипса, оксиды свинца и цинка (PbO , ZnO), сульфид свинца (PbS).

Снижение УЭС пыли достигается добавкой к газу ряда реагентов, например, сернистого ангидрида, аммиака, хлоридов кальция и натрия и др.

Высокое сопротивление ряда пылей может быть понижено охлаждением пылегазового потока ниже $130 \text{ }^\circ\text{C}$ или его нагреванием свыше $350 \text{ }^\circ\text{C}$.

Определенное влияние на степень осаждения частиц оказывают их концентрация и дисперсный состав. Скорость дрейфа частиц в электрическом поле в значительной мере зависит от размеров частиц. Данная зависимость имеет сложный характер ввиду различия механизмов перемещения частиц разных размеров. Считается, что в диапазоне размеров менее $0,1 \dots 0,3 \text{ мкм}$

скорость перемещения частиц в электрическом поле уменьшается с их укрупнением, в диапазоне от 0,3 до 20 мкм – увеличивается с увеличением диаметра и затем вновь несколько снижается.

Из параметров газового потока наибольшее влияние на осаждение оказывают влажность и температура. Со снижением температуры уменьшается вязкость газов, вследствие чего они оказывают меньшее сопротивление перемещению взвешенной частицы к электроду. С понижением температуры растет устойчивость коронного разряда, что позволяет работать при более высокой напряженности электрического поля. Кроме того, с охлаждением обрабатываемого потока растет его относительная влажность, что ведет к понижению УЭС частиц вследствие их увлажнения.

Очень важным фактором, связанным практически со всем процессом электроосаждения, является скорость газового потока. От нее непосредственно зависят время пребывания частиц в аппарате и его габариты.

При слабом течении газа, слишком большой скорости газа или плохих условиях удержания может происходить унос осажденных частиц. Частицы, унесенные с осадительного электрода, в случае отрицательной короны приобретут положительный заряд вследствие эмиссии. Эти частицы могут не подвергаться перезарядке или перезарядиться только частично. В любом случае частицы будут вынесены из электрофильтра, что существенно снижает эффективность улавливания. При скоростях потока более (1...1,5) м/с резко растет вторичный унос пыли с электродов. Очень важно в связи с этим обеспечить равномерное распределение потока по сечению аппарата, с тем чтобы локальные скорости в межэлектродных промежутках ненамного отличались от средней скорости.

Определенное влияние на эффективность обработки газов оказывают конструктивные особенности тех или иных типов электрофильтров.

Электрофильтры работают как под разрежением, так и под избыточным давлением. Система пылеулавливания, в которой применен электрофильтр, может быть полностью автоматизирована.

4.3. Конструкции электрофильтров

Аппараты для очистки газов данным методом называют электрофильтрами. Основными элементами электрофильтров являются: газоплотный корпус с размещенными в нем коронирую-

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

щими электродами, к которым подводится выпрямленный ток высокого напряжения, и осадительными заземленными электродами, изоляторы электродов, устройства для равномерного распределения потока по сечению электрофильтра, бункера для сбора уловленных частиц, системы регенерации электродов и электропитания.

Конструктивно электрофильтры могут быть с корпусом прямоугольной или цилиндрической формы. Внутри корпусов смонтированы осадительные и коронирующие электроды, а также механизмы встряхивания электродов, изоляторные узлы, газораспределительные устройства.

Часть электрофильтра, в которой размещены электроды, называют активной зоной. В зависимости от числа активных зон известны электрофильтры однозонные и двухзонные. В однозонных электрофильтрах коронирующие и осадительные электроды в пространственном отношении конструктивно не разделены, в двухзонных электрофильтрах имеется четкое разделение. Для санитарной очистки запыленных выбросов используют однозонные конструкции с размещением коронирующих и осадительных электродов в одном рабочем объеме. Двухзонные электрофильтры с отдельными зонами для ионизации и осаждения взвешенных частиц применяют в основном при очистке приточного воздуха. Связано это с тем, что в ионизационной зоне происходит выделение озона, поступление которого не допускается в воздух, подаваемый в помещения.

В зависимости от направления движения газа электрофильтры подразделяют на горизонтальные и вертикальные. Вертикальные аппараты занимают в плане значительно меньше места, но при прочих равных условиях коэффициенты очистки в них ниже. Активная длина поля вертикального электрофильтра совпадает с активной высотой его электродов.

По мере осаждения пыли на электродах понижается эффективность пылеулавливания. Во избежание этого явления и поддержания оптимальной эффективности электрофильтров электроды периодически очищают от пыли встряхиванием или промывкой. Соответственно электрофильтры подразделяются на сухие и мокрые.

К мокрым относят аппараты, улавливающие жидкие или значительно увлажненные твердые частицы, а также электрофильтры, электроды которых очищаются самотеком (конденсатом уловленного жидкого аэрозоля) или посредством смывки осевших частиц жидкостью. К сухим относят электрофильтры, улавливаю-

щие сухие твердые частицы, которые удаляют с электродов посредством встряхивания через определенные промежутки времени.

Все мокрые электрофильтры, нашедшие применение в промышленности, имеют вертикальную компоновку. Сухие аппараты могут быть как вертикальными, так и горизонтальными. Преимущественное применение среди сухих электрофильтров имеют аппараты с горизонтальным ходом газа – горизонтальные многопольные аппараты, в которых очищаемый газ проходит последовательно через несколько электрических полей.

В зависимости от формы осадительных электродов известны электрофильтры трубчатые и пластинчатые (рис. 4.2). Трубчатые электрофильтры состоят из большого числа элементов, имеющих круглое или сотообразное сечение. По оси трубчатого элемента расположен коронирующий электрод. В пластинчатом электроfiltре имеется большое количество параллельных пластин. Между ними находятся натянутые коронирующие электроды.

Формы осадительных и коронирующих электродов могут быть самыми разнообразными. Коронирующие электроды могут набираться из тонких круглых или толстых шестигранных стержней, стальных пилообразных полос, профилированных лент с игольчатой выштамповкой. Иногда применяются и другие формы. Осадительные электроды сухих фильтров выполняют в виде профилированных пластин, желобов, реже в виде коробок с круглыми или сложными вырезами для лучшего удержания осажденной пыли от вторичного уноса. В мокрых электрофильтрах проблема вторичного уноса незначительна, поэтому электроды выполняют в виде наборов прутков и гладких пластин, что позволяет легко смывать осадок.

Электроды сухих фильтров встряхивают соударением или при помощи специальных ударно-молотковых механизмов. Соударения применяют в основном для встряхивания коробчатых электродов. Остальные типы коронирующих и осадительных электродов встряхивают ударами вращающихся молотковых механизмов по наковальням, прикрепленным к этим электродам.

Промывка электродов в мокрых электрофильтрах может производиться периодически или непрерывно. Для периодической промывки подают большое количество воды или другой промывной жидкости на электроды (в активную зону) при отключенном напряжении. На время промывки секции подачу газа прекращают.

Переток неочищенного газа мимо активной зоны даже в не-

большом количестве может заметно ухудшить степень очистки. В горизонтальных фильтрах неактивные зоны расположены над и под электродной системой (включая бункера), а также в промежутках между крайними осадительными электродами и корпусом. В вертикальных пластинчатых фильтрах неактивны промежутки между осадительными электродами и корпусом. В вертикальных трубчатых аппаратах неактивные зоны можно устранить полностью. В пластинчатых конструкциях зазоры необходимы для встряхивания электродов и соблюдения пробойных промежутков, поэтому в таких электрофильтрах предусматривают клапаны (щитки), создающие лабиринтное уплотнение и снижающие перепады газа.

Скорость очищаемого газа в активной зоне является одной из основных характеристик электрофильтра. Наибольшую величину электрического заряда частицы размером до 1 мкм получают за время нахождения в электрическом поле около 1 с. Скорость принимают в зависимости от конструкции электрофильтра. Так, в сухих электрофильтрах ее значение находится обычно в пределах 0,8...1,7 м/с. Должно быть обеспечено равномерное распределение скорости очищаемого газа по сечению аппарата. Для выравнивания скоростного поля в электрофильтре устанавливают решетки, направляющие лопатки, перфорированные пластины.

Широкое распространение в промышленности получили электрофильтры типа УГ (унифицированный горизонтальный), ЭГА (электрофильтр горизонтальный, модификации А, рис. 4.3) и др. Эти аппараты применяют на тепловых электростанциях, в черной и цветной металлургии, химической промышленности, на предприятиях строительных материалов.

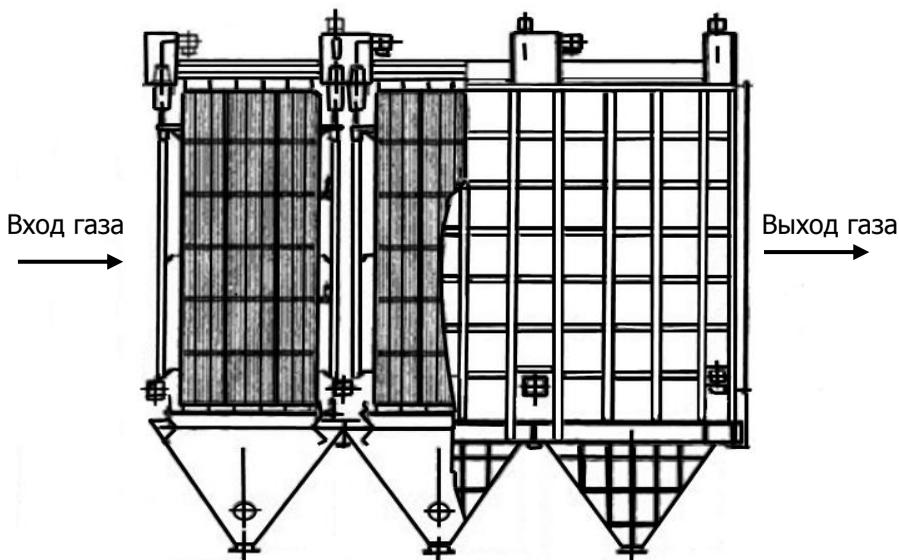


Рис. 4.3. Электрофильтры типа ЭГА

Для промышленной газоочистки из аппаратов отечественного производства могут быть рекомендованы электрофильтры общего назначения типов ЭГА, ЭГТ (горизонтальные сухие), УВ (рис.4.4), ЭВВ (вертикальные сухие), а также ряд специализированных типов электрофильтров.

Электрофильтры марки ЭГ2-2-4-37 СРК предназначены для очистки газов содорегенерационных котлоагрегатов. Данные электрофильтры односекционные, с двумя последовательными по ходу газа электрическими полями. Коронирующие электроды представляют собой трубчатые рамы, в которых закреплены коронирующие элементы; осадительные электроды выполнены в виде плоских полотен, набранных из пластинчатых элементов специального профиля. Расстояние между соседними осадительными электродами 300 мм, высота электродов 7200 мм, ширина поля 6000 мм

Маркировка электрофильтра означает: электрофильтр горизонтальный; первое число обозначает номер типоразмера (габарит) осадительного электрода, второе – количество полей, третье – активную длину поля, м; четвертое – площадь активного сечения, м^2 .

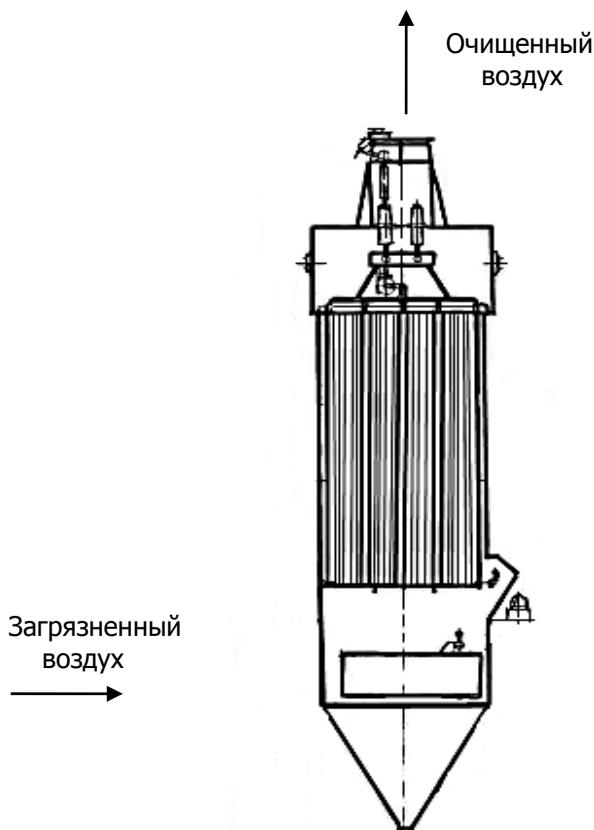


Рис. 4.4. Электрофильтры типа УВ

Гидравлическое сопротивление фильтра 200 Па, разрежение в электрофильтре 3000 Па, пропускная способность по газу при скорости 1 м/с – 37 м³/с, температура очищаемых газов 130...250 °С, ориентировочная степень очистки газов содорегенерационных котлоагрегатов 98 %.

4.4. Подбор и расчет электрофильтров

При выборе типа электрофильтра исходят из расхода, физико-химических параметров газа и дисперсной примеси, а также условий размещения фильтра. Основные рекомендации могут быть сведены к следующему. Мокрые аппараты имеют более высокие коэффициенты очистки из-за уменьшения вторичного уноса, однако им присущи и общие недостатки мокрых способов:

необходимость обработки или удаления загрязненных стоков и шлама, коррозия металлических узлов аппаратов, усложнение эксплуатации очистного устройства и т.д. Следовательно, для осаждения твердых примесей сухие аппараты предпочтительнее мокрых. Из конструкций сухих электрофильтров вертикальную компоновку применяют при недостатке производственной площади, низкой начальной запыленности и не слишком мелкодисперсной пыли, так как время пребывания запыленного воздуха в них намного меньше, чем в горизонтальных.

Осаждение частиц в электрофильтрах происходит под действием кулоновских или электрических сил на частицы. Эти силы заставляют частицы двигаться к осадительным электродам со скоростью, определяемой равенством электрической силы и силы гидродинамического сопротивления. Скорость осаждения возрастает вместе со скоростью миграции частиц, поэтому последняя должна иметь максимальное значение.

Рекомендуемые скорости движения газов для отечественных марок электрофильтров находятся в пределах 1...1,3 м/с и указаны в каталогах, так же как и размеры осадительных электродов. Если известен интервал времени между встряхиваниями, то можно по расходу газов и начальной запыленности оценить пылеемкость электродов. Действительные значения интервалов между регенерациями и пылеемкостью электродов можно установить лишь опытным путем при эксплуатации электрофильтра. Неточность их оценки является одной из основных причин снижения надежности расчетов.

Погрешность по проскоку ε , т.е. по уносу пыли из электрофильтра, не превышает 20 %. Она может быть представлена в виде:

$$\varepsilon = 1 - \exp\left(-K_y \cdot A \cdot \beta^{0,42}\right), \quad (4.4)$$

где K_y – параметр вторичного уноса; A – безразмерный параметр, величина которого зависит от соотношения площадей активной и неактивной зон электрофильтра; β – безразмерный параметр, зависящий от соотношения электрических и аэродинамических сил.

Пример расчета

Определить эффективность электрофилтрации отхо-

дящих газов содорегенерационного котлоагрегата (СРКА) целлюлозно-бумажного комбината и параметры работы электрофильтра. Количество газов $V = 5,5 \text{ м}^3/\text{с}$, исходная запыленность $C_{\text{вх}} = 4,3 \text{ г}/\text{м}^3$, рабочая температура газов $t = 145 \text{ °C}$ ($t = 418 \text{ K}$), динамическая вязкость газов при рабочей температуре $\mu = 6,47 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Выбираем из действующих каталогов электрофильтр ЭГ2-2-4-37 СРК, специально предназначенный для очистки выбросов СРКА. По маркировке определяем некоторые из необходимых конструктивных параметров: количество полей – 2 (вторая цифра), активная длина каждого поля 4 м (третья цифра), площадь активного сечения $f = 37 \text{ м}^2$. Общую площадь осаждения (2256 м^2) и габариты электрофильтра ($12,6 \times 9,55 \times 14,84 \text{ м}$) принимаем по табл. 4.1. По каталожному описанию скорость газов – до $1 \text{ м}/\text{с}$, температура $130 \dots 250 \text{ °C}$, запыленность на входе – до $7 \text{ г}/\text{м}^3$, разрежение – до 3 кПа , гидравлическое сопротивление аппарата 200 Па . Степень очистки при этих условиях предположительно может достигать 98% .

Осадительные электроды электрофильтра плоские, коронирующие выполнены в виде трубчатых рам с ленточно-игольчатыми или зубчатыми элементами. Высота электродов $h = 7200 \text{ мм}$, расстояние между осадительными электродами 300 мм . Регенерация производится механическим встряхиванием. Ввиду отсутствия других сведений об интервале между встряхиваниями, принимаем интервал в 4 ч , исходя из данных табл.4.1.

Таблица 4.1

Технические данные электрофильтра ЭГ2-2-4-37

Наименование показателя	Единица измерения	Величина показателя
Количество полей (вторая цифра)	шт.	2
Активная длина каждого поля (третья цифра)	м	4
Площадь активного сечения	f , м ²	37
Общая площадь осаждения	м ²	2256
Габариты электрофильтра	м	12,6×9,55×14,84
Скорость газов	м/с	1
Температура	°С	130...250
Засыпленность на входе	г/м ³	7
Разряжение	Па	до 3000
Гидравлическое сопротивление	Па	200
Степень отчистки	%	0,98
Относительная длина электрода	h , м	0,9
Расстояние между осадительными электродами	$a (D_1)$, м	0,3
Интервал между встряхиваниями	с	14400
Интервал между встряхиваниями	ч	4
Расстояние между концами игл	$B (D_2)$, м	0,03
Расстояние от конца иглы до осадительного электрода	δ , м	0,135
Высота электрода	h , мм	7200
Дисперсия	σ	1,7

Предполагая, что по габаритам аппарат можно разместить на производственной площадке, сопоставим его характеристики с заданными параметрами обрабатываемых газов. Исходная запыленность $C_{\text{вх}}$ составляет 4,3 г/м³, а количество газов $V = 5,5$ м³/с, что находится в пределах допустимого для выбранного типа электрофильтра. Заданная температура газов (145 °С) также соответствует показателям аппарата. В данном случае важен не только верхний, но и нижний температурный предел вследствие повышенной влажности обрабатываемых газов и возможной конденса-

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

ции паров при температурах ниже 130 °С. Можно констатировать, что по техническим параметрам выбранный тип аппарата удовлетворяет заданным условиям, это позволяет перейти к расчету полного коэффициента очистки.

1. Подсчитываем скорость газов в активном сечении по формуле 4.5:

$$v = \frac{V}{f}, \quad (4.5)$$

где V – количество газов, $\text{м}^3/\text{с}$; f – площадь активного сечения, м^2 .

$$v = \frac{5,5}{37} = 0,149 \text{ м/с.}$$

2. Определим ориентировочную величину пылеемкости электродов, как количество пыли, осевшее на площади $F = 2256 \text{ м}^2$ за время между регенерациями $t_{\text{вр}} = 14400 \text{ с}$ (4 ч) при расходе газа $V = 5,5 \text{ м}^3/\text{с}$, начальной запыленности $C_{\text{вх}} = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ и степени улавливания 98 % по формуле 4.6

$$m = \frac{V \cdot C_{\text{вх}} \cdot t_{\text{вр}} \cdot 0,98}{F}; \quad (4.6)$$

$$m = \frac{5,5 \cdot 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 14400 \cdot 0,98}{2256} = 0,148 \text{ кг/м}^2.$$

Тогда относительная пылеемкость m_3 , кг/м^2 , составит:

$$m_3 = \frac{m}{1}. \quad (4.7)$$

3. Вычисляем величину коэффициента вторичного уноса по формуле 4.8

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

$$K_y = 1 - 0,275 \cdot v^{0,35} \cdot h^{0,54} \cdot \exp(-1,72 \cdot m_s), \quad (4.8)$$

где v , h , – относительная скорость газа и относительная длина электрода.

$$K_y = 1 - 0,275 \cdot 0,513 \cdot 0,945 \cdot 0,775258 = 0,897.$$

4. Напряженность поля у осадительного электрода E , В/м, вычисляем по формуле 4.9:

$$E = \frac{U}{\delta \cdot \ln \frac{D_1}{D_2}}, \quad (4.9)$$

где U – разность потенциалов на электродах, В; D_1 , D_2 – соответственно внутренний диаметр осадительного и диаметр коронирующего электродов, м; δ – расстояние от поверхности коронирующего электрода до внутренней поверхности осадительного элект-

рода, равное $\frac{D_1 - D_2}{2}$, м.

Внося в формулу 4.9 необходимые поправки на геометрические характеристики электродов (рис. 4.5), принимаем за D_1 шаг между осадительными электродами $a = 0,3$ м; за D_2 – расстояние между концами игл или зубьев коронирующих электродов $b \sim 0,03$ м; за δ – расстояние от конца иглы до осадительного электрода (

$$\delta = \frac{0,3 - 0,03}{2} = 0,135 \text{ м}).$$

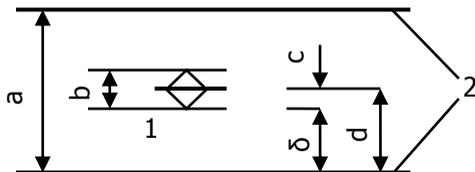


Рис. 4.5. Схема расположения электродов:
1 – ленточно-игольчатый или зубчатый; 2 – осадительный

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

Расчет ведем на максимальное напряжение $U = 50$ кВ:

$$E = \frac{5 \cdot 10^4}{0,135 \cdot \ln \frac{0,3}{0,03}} = 160,85 \cdot 10^3 \quad \text{В/м.}$$

Вычисленное значение E близко к характеристикам поля в электрофильтрах с игольчатыми коронирующими электродами. Относительную скорость газов определяем по формуле 4.10:

$$V_0 = \frac{v}{1}; \quad (4.10)$$

$$V_0 = \frac{0,149}{1} = 0,149 \quad \text{м/с.}$$

5. Подсчитываем коэффициент k по формуле 4.11:

$$k = 0,55 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot \frac{1}{d_m} \cdot \frac{10}{E}, \quad (4.11)$$

где T – температура газового потока, К; P – давление газового потока, Па (абс.), определяется как разность атмосферного давления и разряжения, создаваемого в электрофильтре $P = P_{\text{атм}} - P_{\text{разр}}$; d_m – медианный диаметр частиц загрязнителя, м; E – напряженность электрического поля у осадительного электрода, В/м.

При температуре газа $T = 145 + 273 = 418$ К, абсолютном давлении в электрофильтре $p = 101\,325 - 3000 = 98\,325$ Па и среднем размере дисперсных частиц $d_m = 1,1 \cdot 10^{-6}$ м:

$$k = 0,55 \cdot 10^{-4} \cdot 418 \cdot \frac{\frac{1}{98325} + \frac{10}{160850}}{1,1 \cdot 10^{-6}} = 1,46$$

Принимаем величину отношения площади активной зоны к площади поперечного сечения корпуса $f_{\text{омн}} = 0,9$ (для фильтров марок ЭГА, ЭГТ и подобных им горизонтальных конструкций) из табл.4.1 при заданной $\sigma = 1,7$ и максимальном значении k , которое имеется в таблице, находим параметр $A = 2,452$.

Аппарат ЭГ2-2-4-37 СРК имеет порядка 20 газовых проходов (ширина активной зоны 6000 мм, расстояние между осадительными электродами 300 мм).

6. Определяем параметр β по формуле 4.12:

$$\beta = \frac{\varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot d_m \cdot l}{v \cdot k_p \cdot \mu \cdot \delta}, \quad (4.12)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная; E – напряженность поля у осадительного электрода, В/м; l – активная длина электрофильтра, равна 8м, т.к. активная длина каждого поля – 4 м., а полей всего 2; δ – расстояние между коронирующим и осадительными электродами, м; k_p – коэффициент неравномерности газового потока, $k_p = 0,93$.

$$\beta = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (160850)^2 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6} \cdot 8}{0,149 \cdot 0,93 \cdot 6,48 \cdot 10^{-6} \cdot 0,135} = 16,6$$

7. Используя формулу (4.4), подсчитываем коэффициент очистки:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-0,897 \cdot 2,452 \cdot 16,6^{0,42}) = 0,9992.$$

Вывод: Величина полного коэффициента очистки, найденная расчетным путем, оказалась достаточно близкой к представленной в каталоге.

Задание по работе

Исходные данные для определения эффективности электрофiltrации отходящих газов и параметров работы электрофилтра, согласно номеру варианта, который задает преподаватель, принимают по табл. 4.2. Данные значений параметра A в зависимости от параметра k , необходимые для расчета, представлены в табл. 4.3. Технические данные электрофилтра ЭГ2-2-4-37, необходимые для расчета, приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.2

Исходные данные для расчёта эффективности электрофильтра ЭГ2-2-4-37

№ варианта	Количество газов V , м ³ /с	Исходная запыленность $C_{вх}$, 10 ⁻³ кг/м ³	Рабочая температура газов t , °С	Динамическая вязкость газов μ , 10 ⁻⁶ Па·с	Средний размер дисперсных частиц d_m , 10 ⁻⁶ м	$P_{атм}$, мм.рт.ст.
1	5	4,1	140	6,48	0,7	755
2	5,5	4,3	145	6,47	1,0	750
3	6	4,5	150	6,46	1,1	760
4	6,5	4,7	155	6,45	1,5	755
5	7	4,9	160	6,44	3,0	750
6	7,5	5,1	165	6,43	6,5	760
7	8	5,3	170	6,42	12,5	755
8	8,5	5,5	175	6,41	0,7	750
9	9	5,7	180	6,4	1,0	760
10	9,5	5,9	185	6,39	1,1	755
11	10	6,1	190	6,38	1,5	750
12	10,5	6,3	195	6,37	3,0	760
13	11	6,5	200	6,36	6,5	755
14	11,5	6,7	205	6,35	12,5	750
15	12	6,9	210	6,34	17,5	760

Расчет эффективности аппаратов очистки воздуха

Таблица 4.3

Значения параметра A в зависимости от параметра k

Коэффициент k	A
1,494	2,452
1,512	2,448
1,530	2,446
1,548	2,444
1,566	2,442
1,584	2,439
1,602	2,437
1,620	2,435
1,639	2,433
1,657	2,431

ЛИТЕРАТУРА

Основная литература

1. Справочник по пыле- и золоулавливанию / под ред. Русанова А.А. М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты защиты окружающей среды: Учебное пособие для вузов М.: Высш. шк., 2008. 639 с.
3. Тимонин А.С. Инженерно-экологический справочник. В 3-х т. Т.1. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. 917 с.

Дополнительная литература

4. Очистка промышленных газов от пыли / В.Н. Ужов [и др.]. М.: Химия, 1985.
5. Зиганшин М.Г., Колесник А.А., Посохин В.Н. Проектирование аппаратов пылегазоочистки. М.: «Экопресс – ЗМ», 1998.
6. Балабеков О.С., Балтабаев Л.Ш. Очистка газов в химической промышленности. Процессы и аппараты. М.: Химия, 1991. 256 с.