

Расчет и проектирование систем механического пылеулавливания

Введение

- 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.

Введение

- Для осаждения под действием гравитации газ обычно просто медленно пропускают через большую камеру, причем частицы имеют возможность осесть в бункер на дне. 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.

Введение

- Устройства всех этих типов характеризуются простотой конструкции и работы. Они относительно дешевы по сравнению с другими типами осадителей. В общем они 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 необходимо применять 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.

Пылеосадительные камеры

- Простейшим сепаратором 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.
- Поэтому 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).

Пылеосадительные камеры

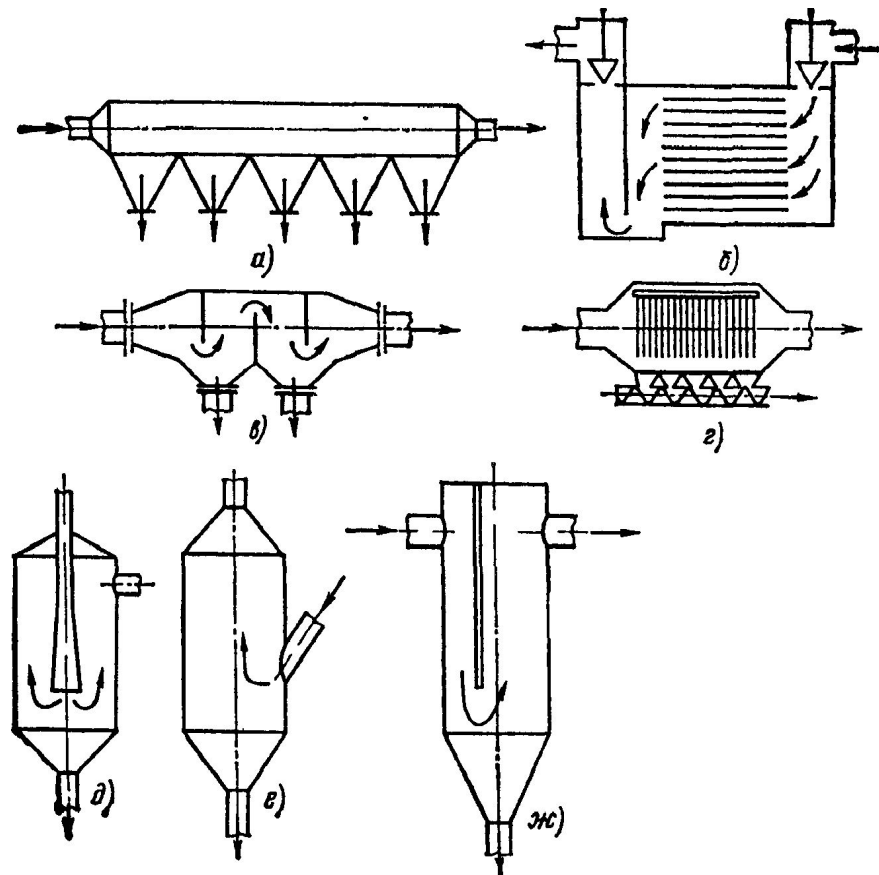
- В пылеосадительных камерах используется гравитационное осаждение частиц из потока газов. Для достижения эффективной очистки газов необходимо, чтобы частицы находились в камере продолжительное время. Поэтому пылеосадительные камеры достаточно громоздкие сооружения. Основные материалы для их изготовления - кирпич, сборный железобетон, а иногда используется сталь либо дерево.
- Габаритные размеры камеры, необходимые для седиментационного осаждения частиц подбирают по отношению
- $L = HW_p/W_v$, (1)
- где L - длина камеры, м; H - высота камеры, м; W_p - скорость движения газов в камере (0,2-0,8 м/с); W_v - скорость витания частиц определенного размера.

Использование

- 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 камерах составляет 0,2-1 м/с, а в пылевых мешках – 1-1,5 м/с.

Разновидности пылеосадительных камер

- Рис. 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.



Эксплуатация

- Для равномерного газораспределения по сечению пылеосадительные 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 их падения. Это можно осуществить, помещая в камеру горизонтальные пластины, что превращает ее в группу небольших параллельных камер.
- В некоторых конструкциях пылеосадительных 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.

Основы расчета

- Целью расчета пылеосадительных камер является подбор их габаритных размеров и определение коэффициента очистки.
- В общем случае коэффициенты очистки могут быть найдены опытным путем, так как процесс седиментации сопровождается турбулентной диффузией.
- Особенно заметно влияет турбулентность на ухудшение оседания частиц в камерах с рассекателями, а также в полых осадительных емкостях большой высоты.
-

- Конструирование осадительных камер основано на подсчете сил, действующих на частицу, и скорости вертикального движения 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 Z , зависящий от числа Рейнольдса **Re** для движения частицы:
-

$$m \frac{dw_{oc}}{dt} = g \cdot m - \zeta \frac{\rho_c w_{oc}^2}{2} \pi r_q^2, \quad (4.1)$$

где $\zeta = \zeta(Re) = \zeta\left(\frac{\rho_c w_{oc} d_{\text{ч}}}{\mu}\right)$; m – масса частицы; w_{oc} – скорость движения частицы; t – время; g – ускорение силы тяжести; ρ_c – плотность среды (газа); $r_{\text{ч}}$ – 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 Re можно использовать эмпирическое уравнение Клячко:

$$\zeta = 24/Re + 4/Re^{1/2},$$

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

Из уравнения (4.1) 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 этой скорости, очень мало. Стационарная скорость может быть найдена приравниванием левой части уравнения (4.1) нулю, заменой m на $(\rho_{\text{ч}} - \rho_c)d_{\text{ч}}^3/6$ и представлением в безразмерной форме

$$4g d_{\text{ч}}^3 \rho_c (\rho_{\text{ч}} - \rho_c) / 3\mu^2 = \zeta \cdot Re^2 = 0.$$

Это выражение определяет число Галилея

$$Ga = 4g d_{\text{ч}}^3 \rho_c (\rho_{\text{ч}} - \rho_c) / 3\mu^2.$$

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

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

$$\frac{Re}{\zeta} = \frac{Re^2}{Ga} = \frac{3\rho_c^2 w_{oc}}{4g(\rho_{\text{ч}} - \rho_c)\mu}.$$

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

$$\lg(Re/\zeta)^{1/3} = -1,387 + 2,153 \lg Ga^{1/3} + 0,548 \lg^2 Ga^{1/3} + 0,05665 \lg^2 Ga^{1/3}. \quad (4.2)$$

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 (4.2) рассчитывают Re/ζ , а затем получают w_{oc} , используя данное выше определение Re/ζ .

В диапазоне применимости закона Стокса скорость находится просто:

$$w_{oc} = \frac{g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})d_{\text{ч}}^2}{18\mu}. \quad (4.3)$$

Соотношение между размером частицы и стационарной скоростью осаждения показано на рис. 4.2.

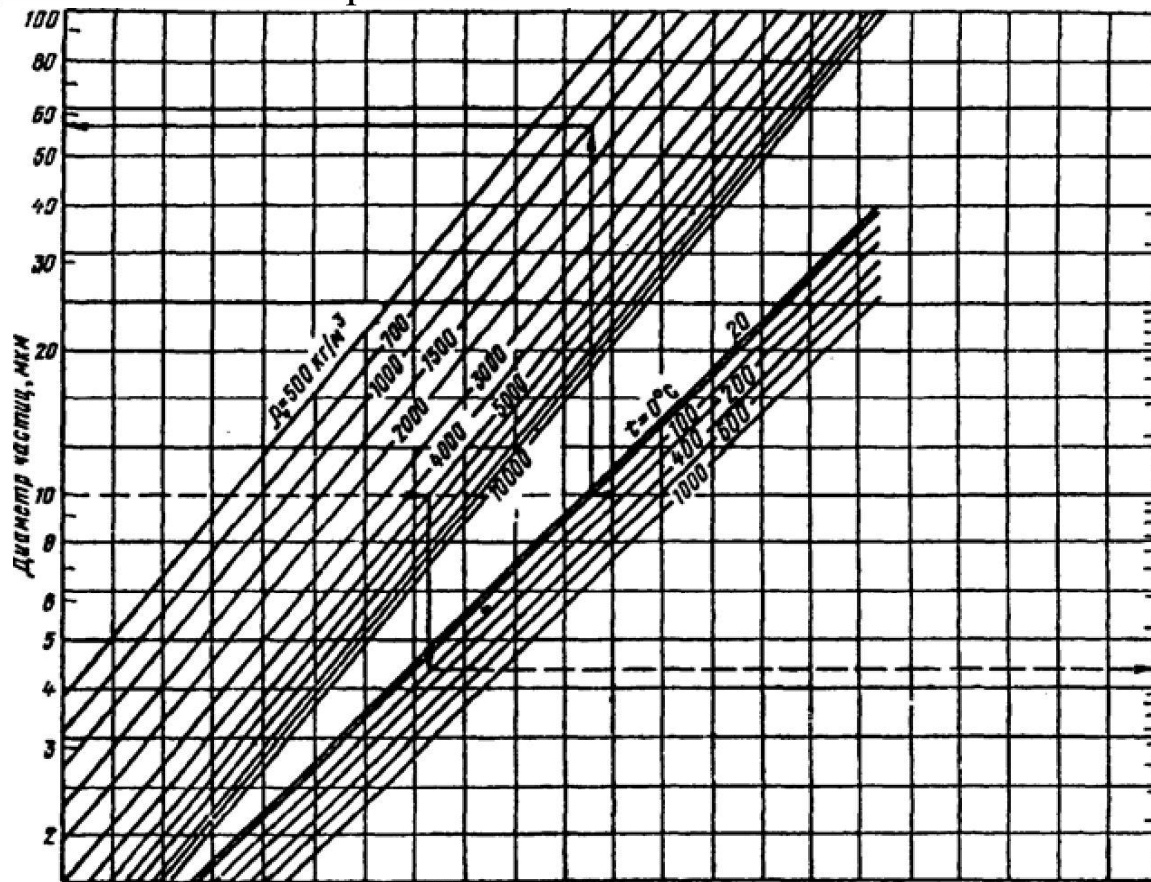


Рис. 4.2. Скорость осаждения в функции размера частиц.

- Простая модель проектирования осадительной камеры получается на основе предположения о фронтальном характере течения газа через камеру и равномерном расположении частиц в газе.
- На рис. 4.3 схематически показано сечение камеры.
- Частица, входящая в камеру со скоростью, равной скорости газа v_0 на уровне h_c должна следовать прямолинейной траектории. Осядет или нет данная частица, определяется из условия $w_{oc}h_c < v_0 l$. Осажденная фракция частиц с одной и той же скоростью седиментации w_{oc} определяется соотношением $h_c/h = v_0/w_{oc}$.

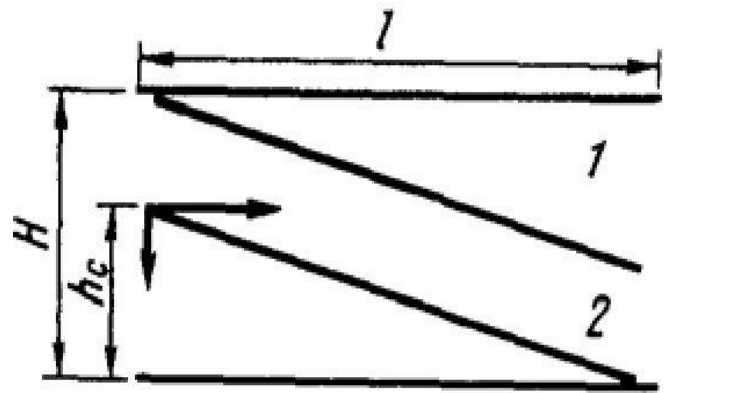


Рис. 4.3. Схема осаждения частиц в камере: 1 - очищенная зона;
2 - предельная траектория

Размеры камеры (H, L, B) определяются размером $d_{\text{ч}}^*$ наименьших частиц, которые должны быть осаждены полностью. Рассчитываем $w_{\text{ос}}^*$, принимаем $h_{\text{с}}/H = 1$, находим $L = w_{\text{ос}}^*/v$. Значение 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 $BH = Q_{\text{Г}}/v$, что позволяет выбрать высоту и ширину.

Габаритные размеры камеры, необходимые для гравитационного осаждения частиц крупнее заданного размера частиц $d_{\text{ч}}$, обычно определяются по соотношению:

$$L = H \frac{v}{w_{\text{ос}}}, \quad (4.4)$$

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_4 может быть рассчитана по зависимости (4.3) или по графику 4.2.
- 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 камере турбулентность потока нарушает нормальное гравитационное осаждение, в особенности частиц малых размеров, и действительная степень очистки газов оказывается ниже, чем определенная из уравнения (4.4).
- 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 (%):

$$\varepsilon_{\Pi} = 100 \left(1 - \frac{1}{i} \sum_0^i N_i \right) \quad (4.5)$$

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:
- **$N = \Phi(x_1) + \Phi(x_2) - 1$** . (4.6)
- Значения функций $\Phi(x_1)$ и $\Phi(x_2)$ определяются из таблицы нормальной функции распределения (табл. 4.1).
- Величины **x_1** и **x_2** , в свою очередь, определяются из выражений

$$x_1 = \frac{H + h - L \frac{w_{oc}}{v}}{\sqrt{2D_t - l/v}}; \quad (4.7)$$

$$x_2 = \frac{H - h + L \frac{w_{oc}}{v}}{\sqrt{2D_t - l/v}}; \quad (4.8)$$

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:

$$D_t = 0,02 v H \sqrt{\lambda}, \quad (4.9)$$

где λ - коэффициент трения потока, может быть принят равным 0,03.

Тогда выражения (4.7) и (4.8) значительно упрощаются и принимают вид:

$$x_1 = \frac{1 + h/H - L/H(w_{oc}/v)}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \cdot L/H}}, \quad (4.10)$$

$$x_2 = \frac{1 - h/H + L/H(w_{oc}/v)}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \cdot L/H}}, \quad (4.11)$$

$$(w_{oc}/v)_{50} \approx 1,5 \cdot H/L. \quad (4.12)$$

Дополнительные значения w_{oc}/v , необходимые для определения нескольких точек зависимости $\varepsilon_{\Pi} = f(d_u)$, принимаются больше и меньше значения $(w_{oc}/v)_{50}$. Полный коэффициент очистки и степень очистки определяются по уравнению:

$$\varepsilon = \sum \varepsilon_{\Pi} \frac{N_{ex}}{100} \Delta d_u, \quad (4.13)$$

где N_{ex} - плотность распределения, %/мкм; Δd_u - разность граничных размеров выбираемого диапазона частиц из гистограммы, мкм.

Порядок расчета

- Расчеты пылеосадительных камер выполняют в следующем порядке.
- 1. Определяют скорость газового потока в рабочем сечении камеры. Чем меньше скорость потока, тем больше степень очистки, но и более громоздкой получится камера. Желательно, чтобы скорость потока не превышала 0,8...1 м/с, однако для компактных частиц большой плотности ее можно доводить до 2...3 м/с.
- 2. Принимают по конструктивным соображениям соотношение длины и высоты камеры L / H . Для конструкций с L / H больше 3 данная методика расчета не дает необходимой точности.
- 3. Принимают, что отношение скорости витания частиц w , которые будут уловлены в камере на 50 %, к скорости газового потока приблизительно соответствует полутора значениям $(w_{oc} / v)_{50} = 1,5 H/L$ 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:

$$d_{50} = \sqrt{\frac{18 \mu w_{oc}}{g(\rho_p - \rho_c)}}, \text{ м.} \quad (4.15)$$

- 5. Выбирают несколько соотношений w_{oc} / v , больших и меньших принятого и определяют соответствующие значения d .
- 6. Определяют среднюю концентрацию частиц на выходе из камеры для каждого принятого соотношения w_{oc} / v или, что то же самое, для каждого принятого значения d следующим образом:
 - а) назначают "к" 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:

$$x_1 = \frac{1 + \frac{n}{H} - \frac{L}{H} \cdot \frac{w_{oc}}{v}}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \frac{L}{H}}}; \quad (4.17)$$

$$x_1 = \frac{1 - \frac{h}{H} + \frac{L}{H} \cdot \frac{w_{oc}}{v}}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \frac{L}{H}}}; \quad (4.18)$$

в) по значениям x_1 и x_2 из таблицы 4.1 находят интегралы вероятностей $\Phi(x_1)$ и $\Phi(x_2)$ и подсчитывают значение N_i :

$$N_i = \Phi(x_1) + \Phi(x_2) - 100; \quad (4.19)$$

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

$$N_{cp} = \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{k}; \quad (4.20)$$

д) определяют средний парциальный коэффициент осаждения частиц рассматриваемого размера (с принятой скоростью осаждения-витания):

$$\varepsilon_{n,cp} = 100 - N_{cp}. \quad (4.21)$$

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

$$\varepsilon = \sum \varepsilon_n \frac{N_{ex}}{100} \Delta d_n.$$

Пример 4.1. Определить эффективность осаждения частиц в пылеосадительной камере, если она имеет длину $L = 10$ м, высоту $H = 1$ м, ширину $B = 2$ м. Расход воздуха через камеру $V = 3600$ м³/ч, плотность частиц $\rho_q = 500$ кг/м³, вязкость газа $\mu = 18 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

Скорость потока в сечении камеры

$$v = \frac{V}{3600 H B} = \frac{3600}{3600 \cdot 12} = 0,5 \text{ м/с.}$$

По уравнению (4.12) находим относительную скорость осаждения частиц, улавливаемых в камере с эффективностью, равной 50 %:

$$\left(\frac{w_{oc}}{v} \right)_{50} = 1,5 \frac{H}{L} = 1,5 \frac{1}{10} = 0,15.$$

Отсюда скорость осаждения-витания $(w_{oc})_{50} = 0,075 \text{ м/с.}$

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

$$d_{50} = \sqrt{\frac{18 \mu w_{oc}}{g(\rho_q - \rho_c)}} = \sqrt{\frac{18 \cdot 18 \cdot 10^{-6} \cdot 0,075}{9,8(500 - 1,25)}} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 70 \text{ мкм.}$$

Для определения зависимости $\eta_n = f(d_q)$ выбираем несколько дополнительных относительных скоростей витания:

$$\left(\frac{w_{oc}^1}{v} \right)_{50} = 0,1 \text{ и } \left(\frac{w_{oc}^2}{v} \right)_{50} = 0,2.$$

Этим значениям относительных скоростей витания соответствуют диаметры частиц $d_q^1 = 60 \text{ мкм}$ и $d_q^2 = 90 \text{ мкм}$.

Средняя концентрация частиц на выходе из камеры определяется как средняя величина в 4...5 точках сечения. С этой целью зададимся пятью значениями h/H : 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0.

Результаты расчетов представим в следующем виде:

- для $(w_{oc}/v) = 0,1$

- Среднее значение $N_{ср}$ составляет 0,14, а парциальный коэффициент очистки газа для частиц с размером $d_H = 90$ мкм $s_H = 100(1 - 0,14) = 86$ %.
- Таким образом, в результате расчета получены три значения парциальных коэффициентов очистки газа (14, 50 и 86 %) при трех значениях $(w_j v) = 0,1; 0,15; 0,2$.
- Полный коэффициент очистки газа рассчитывается по уравнению (4.13) при наличии гистограммы пыли на входе в камеру.