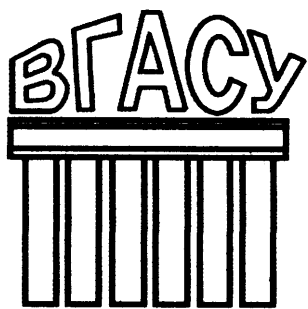
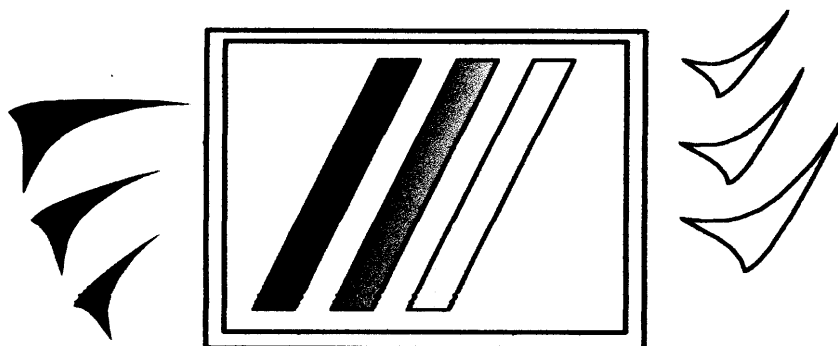




А.И. Скрыпник

**Расчет характеристик
пылеулавливающих
установок вентиляционных
систем**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



ВОРОНЕЖ 2004

Министерство образования и науки Российской Федерации

**Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования. Воронежский государствен-
ный
архитектурно – строительный университет**

А. И. СКРЫПНИК

**РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПЫЛЕУЛАВЛИВАЮЩИХ
УСТАНОВОК ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Учебное пособие

Воронеж 2004

УДК 62.784.431
С.

Расчет характеристик пылеулавливающих установок вентиляционных систем: Учебное пособие / **А.И. Скрыпник**; Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т. Воронеж, 2004, - 126 с.

В учебном пособии представлен методический материал по расчету основных параметров и выбору параметров очистного пылеулавливающего оборудования вентиляционных систем. Значительное внимание уделено вопросам по очистке выбросов от наиболее опасной для человека мелкодисперсной пыли. Для удобства определения характеристик пылеулавливающего оборудования в учебном пособии помимо расчетных зависимостей представлены номограммы, графики и таблицы. Приведены примеры расчета характеристик основных типов очистного оборудования, рассмотрены подходы к определению наиболее рационального решения.

Табл. 34. Ил.64. Библиогр.:44 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного архитектурно-строительного университета.

Рецензенты : кафедра промышленной экологии Воронежской государственной технологической академии;

В.С. Маликов – руководитель Главного управления природных ресурсов и охраны окружающей среды МПР России по Воронежской области.

© Скрыпник А.И.

Доктор технических наук, профессор

Алексей Иванович Скрыпник

**Расчет характеристик пылеулавливающих
установок вентиляционных систем**

Учебное издание

Редактор Акритова Е.В..

Подписано в печать 04. Формат 60x84 1/16
Уч.- изд.л.7,7. Усл.- печ.л.7,8. Бумага писчая. Тираж 200 экз. Заказ №

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии ВГАСУ
394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Предисловие

Очистка вентиляционного воздуха и дымовых газов от пылевых выбросов в очистных аппаратах производится с целью защиты атмосферного воздуха от воздействия на его природные качества и, как следствие, защиты здоровья человека и природной среды.

В организм человека основным способом проникновения вредных веществ является вдыхание воздуха, так как на поверхности легочных альвеол площадью $90...100\text{ м}^2$ их мембраны толщиной $0,001...0,004\text{ мм}$ являются самыми уязвимыми для проникновения вредных веществ в кровь.

Пыль размером менее 5 мкм способна легко проникать в легкие, и чем меньше размеры частиц пыли, тем они являются более опасными для здоровья человека.

Тяжелые последствия может вызвать пыль с содержанием диоксида кремния, пыль угольная, асбестовая и т.д. Большей опасностью обладает пыль с содержанием кремния более 70% , менее опасной – с содержанием кремния менее 20% , в связи с этим и предельно допустимая концентрация их в воздухе различается в два раза (см. табл. П.1.1). Значительная группа аэрозольных частиц металла оседает в организме человека, вызывая различные по тяжести заболевания. Так, свинец нарушает работу систем кровообращения, пищеварения, центральной нервной системы; хром вызывает болезнь поджелудочной железы, поражение органов дыхания; марганец воздействует на центральную нервную систему человека; цианиды калия и натрия нарушают систему кровообращения; канцерогенами являются хром, асбест, никель, мышьяк, сажа, бериллий, смола и ряд других веществ.

Ряд видов мелкодисперсной пыли, находящейся во взвешенном состоянии в воздухе помещений, образует взрывоопасные и пожароопасные смеси. К примеру, алюминиевая пыль имеет значение нижнего предела взрываемости 58 г/м^3 , сахарная, табачная, торфяная, сенная – $9...10\text{ г/м}^3$, эбонитовая – $7,6\text{ г/м}^3$, мучная, хлопковая – $25...30\text{ г/м}^3$.

. В городах солнечная радиация из-за запыленности атмосферы снижается в среднем на 15% .

Экологический ущерб окружающей среде от выбросов пыли в городах с развитой строительной и металлургической промышленностью доходит до 50% от общего ущерба.

Главенствующую роль в нанесении ущерба от пылевых выбросов играет мелкодисперсная пыль, мигрирующая на большие расстояния и плохо осаждаемая.

Учитывая значительное негативное влияние мелкодисперсной пыли на организм человека и природные процессы, при выборе очистного устройства недостаточным является достижение требуемой общей эффективности очистки вентиляционного воздуха от пыли. Необходимо учитывать степень

осаждения очистным аппаратом мелкодисперсной пыли, особенно с размерами частиц менее 5 *мкм*.

При определении параметров очистного оборудования необходимо знание фракционного состава пыли и на его основе установление полного коэффициента осаждения пыли, учитывающего парциальные (или фракционные) коэффициенты осаждения, что позволяет более достоверно установить степень осаждения наиболее опасной мелкодисперсной фракции пыли.

Основой, положенной в предлагаемые методы расчета режимов очистки газов от пыли, является достижение максимального удаления пылевых частиц из вентиляционного воздуха различными физическими способами.

Аэрозоли в виде мельчайших твердых или жидких частиц являются и носителями микроорганизмов, в том числе и болезнетворных, большинство которых движутся в воздухе по тем же физическим законам, что и аэрозольные частицы. Поэтому процессы эффективного осаждения мелкодисперсной пыли способствуют улучшению санитарно-гигиенического состояния помещений и окружающей среды.

Основным эффективным способом стерилизации воздуха является высокоэффективная фильтрация воздуха, поступающего в помещения через фильтры тонкой очистки.

Достижение приземных концентраций пылевых выбросов, не превышающих нормативных значений, возможно за счет сочетания процессов очистки их в очистном аппарате и выбора высоты выбросной вентиляционной трубы. Однако при возникновении в атмосфере неблагоприятных условий для рассеивания выбросов (инверсия, штиль, туман) приземные концентрации могут превысить ПДК. В связи с этим при назначении эффективности очистки выбросов следует учитывать возникновение неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) и особенно при наличии в выбросах значительной доли мелкодисперсной пыли.

В учебном пособии изложены методы расчета основных характеристик очистного оборудования приточных и вытяжных вентиляционных систем, поэтому в нем приведены принципиальные схемы этого оборудования и основные методы расчета параметров наиболее используемых типов.

В пособии отсутствуют данные по конструктивным и компоновочным решениям этого оборудования, которые достаточно полно представлены во многих учебных изданиях [1,5,6,10,25,27,30,32, 38, 40 и др.].

Представленные методы расчета – итог аналитического обобщения разработок ряда авторов, учет последних достижений в области очистки вентиляционного воздуха от пыли и преобразования ряда известных зависимостей для удобства их практического использования при определении параметров очистного оборудования.

Учебное пособие будет полезным студентам высших технических учебных заведений, а также инженерно-техническим работникам, работающим в области охраны атмосферного воздуха от загрязнения пылегазовыми выбросами.

1. Основные сведения о пыли и пылеочистке воздуха

Эффективность очистки воздуха от пыли зависит как от принципа работы очистного оборудования, так и от физико-химического состава частиц пыли и параметров газопылевых потоков.

Промышленные газопылевые выбросы имеют различный физико-химический состав и разные технологические условия их образования. Поэтому для эффективной очистки газов от пыли следовало бы производить соответствующую обработку пыли перед подачей ее в очистной аппарат для достижения оптимального режима по эффективности и рентабельности. Подготовка эта может заключаться в укрупнении частиц механизмами коагуляции, охлаждения и увлажнения запыленных газов. Однако это связано со значительными материальными затратами, поэтому предлагаемые решения преимущественно ориентированы на эффективную очистку газов от пыли различного физико-химического состава с учетом назначения наиболее экономически рационального способа очистки.

Пылью называют твердые частицы измельченных тел. *Аэрозолями* называют твердые частицы, находящиеся во взвешенном состоянии в воздушной среде.

К основным характеристикам пыли относятся плотность частиц, насыпная плотность пыли, дисперсность, адгезионные (оседающие на поверхностях) и аутогенные (сцепляющиеся между собой), электрические, химические, абразивные (высокотвердые) свойства.

Истинная плотность частиц $\rho_{\text{ч}}$ представляет массу единицы объема, не имеющей пор. Насыпная плотность $\rho_{\text{нас}}$ учитывает воздушные зазоры между частицами свеженасыпанной пыли. Кажущаяся плотность учитывает кроме воздушных включений и объемы пор материала.

Дисперсность пыли – это характеристика размера (степени раздробленности) частиц, их совокупность. Дисперсность разделяется на фракции, задаваемые долями или процентами от общей массы пыли, размеры частиц в которых находятся в определенном интервале значений, принятых в качестве нижнего и верхнего пределов (рис.1.1, а). Сумму содержащихся процентов или долей отдельных фракций пылевых частиц, сгруппированных по размерам, называют содержанием фракций по *полным проходам* $D(d_{\text{ч}})$ или по *остаткам* $R(d_{\text{ч}})$, представленных на рис.1.1, б.

Дисперсность пыли удобнее представлять в вероятностно-логарифмической системе координат (рис.1.1, в), кривую логарифмически нормального распределения пыли по составу удобно задать двумя параметрами – логарифмами среднего диаметра и стандартного отклонения от него.

Размеры частиц пыли характеризуются: $d_{\text{ч}}$ – текущим размером частицы, мкм; d_{50} (d_m)- *медианным* (средним) размером частиц, при котором масса всех частиц пыли меньше или крупнее величины d_{50} составляет 50%.

Дисперсность пыли представляется в виде таблиц или графически в виде прямой линии в логарифмически вероятностной прямоугольной системе координат.

В табл.1.1 в качестве примера приведены данные дисперсности пыли, представленные по полным проходам.

Таблица 1.1

Размер частиц, мкм	<5	5...10	10...20	20...30	30...40	40...60	>60
Содержание фракций по массе δ_i , % масс.	12	20	30	11	8	5	14
Содержание фракций по полным проходам $D(d_q)$, %	12	32	62	73	81	86	100

Для выполнения расчетов распределения частиц по размерам используется аналитическое описание в виде зависимости

$$D(d_x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \lg \sigma_q} \cdot \exp\left[-\frac{\lg^2(d_q/d_{50})}{2 \lg^2 \sigma_q}\right], \quad (1.1)$$

где $D(d_q)$ - распределение дисперсности частиц с размерами d_q по полным проходам;

$\lg(d_q/d_{50})$ - логарифм отношения размера частиц d_q к медианному (среднему) размеру d_{50} (d_m); $\lg \sigma_q$ - стандартное отклонение величины d_q , $\lg^2 \sigma_q$ - дисперсия, т.е. отклонение от среднего. Стандартное отклонение равно

$$\lg \sigma_q = \lg d_{15,9} - \lg d_{50} = \lg d_{50} - \lg d_{84,1}, \quad (1.2)$$

где $d_{84,1}$, $d_{15,9}$ - размеры частиц, соответствующих их процентному содержанию 84,1 и 15,9 %, соответственно, в содержании фракций по полным проходам – $D(d_q)$, определяемых по табл.1.1 или представленных графически на рис.1.1, б или рис.1.1, в.

Распределения частиц пыли по размерам, близкие к логарифмически нормальным, аппроксимируются прямыми линиями, которые однозначно определяются параметрами стандартного отклонения частиц от среднего значения σ и средним диаметром частиц d_{50} (d_m).

Для представления дисперсности пыли в вероятностно-логарифмической сетке координат при допущении, что ее дисперсный состав подчиняется нормальному Гауссовскому распределению, необходимо по оси абсцисс откладывать $\lg d_q$, а проставлять d_q ; по оси ординат откладывать ве-

личины $x = \frac{\lg d_q - \lg d_{50}}{\lg \sigma}$, а проставлять соответствующие величине d_q их значения полных проходов $D(d_q)$ или остатков $R(d_q)$.

При знании содержания дисперсного состава пыли определяются значения d_{50} , $d_{15,9}$ и $d_{84,1}$, построив кривую зависимости распределения дисперсности по полным проходам или остаткам от содержания фракций. Знание этих величин позволяет определить стандартное отклонение и дисперсию, по которым определяется фракционная (или парциальная) степень улавливания частиц η_i очистным аппаратом, что будет проиллюстрировано в соответствующих разделах при определении характеристик различных видов очистных аппаратов.

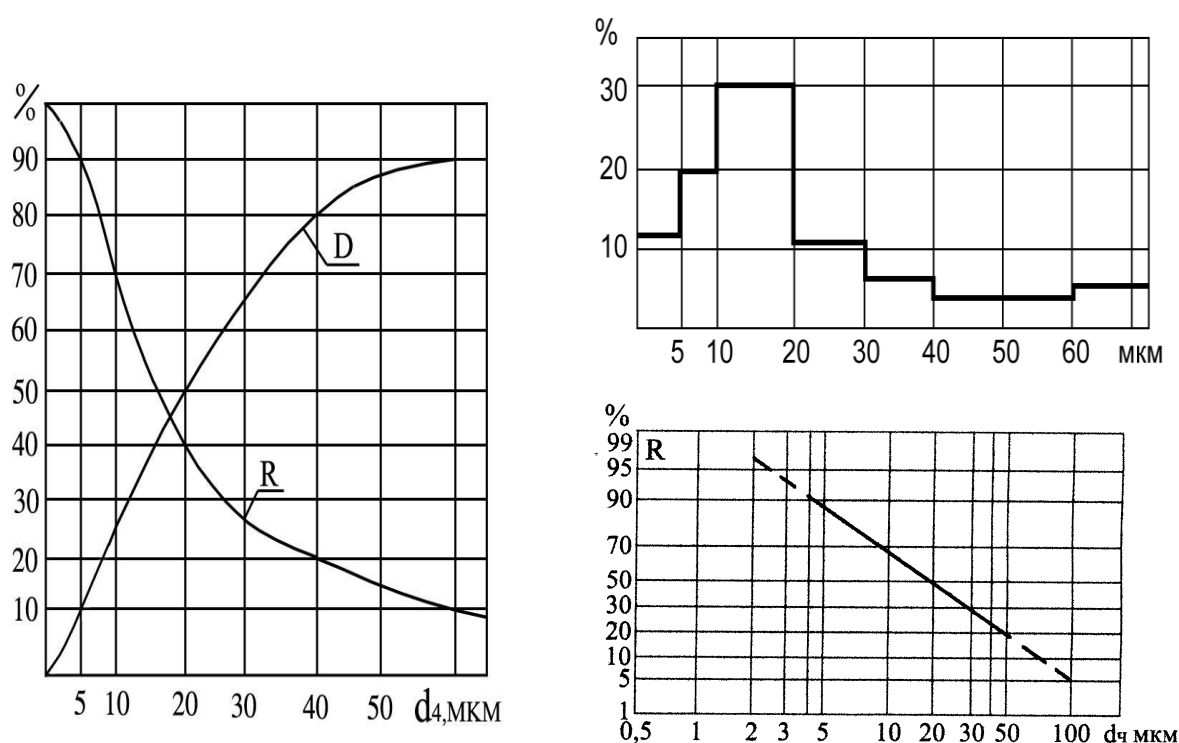


Рис.1.1. Интегральные кривые дисперсности пыли

Абразивность пыли, то есть твердость её частиц, оказывает влияние на интенсивность износа стенок очистного аппарата, величина абразивности колеблется в довольно широких пределах. Износ металла очистного аппарата при одинаковых скоростях газа и концентрациях частиц пыли зависит не только от твердости частиц, но и от их формы, размера и плотности. Максимальный износ металла вызывают частицы пыли размером 90 ± 2 мкм.

К абразивным материалам относится пыль кремния, наждака, пемзы, корунда, алмаза и др. Частицы, имеющие острые грани, разрушают стенки аппарата более чем в 10 раз быстрее, чем частицы округлой формы. Для осаждения абразивной пыли применяют аппараты с облицовочным прочным материалом, с утолщенными стенками пылесадительной камеры или рассчитывают их на пониженные скорости газопылевого потока.

Плотность материала пылевых частиц $\rho_{\text{ч}}$ и их насыпная плотность $\rho_{\text{нас}}$ оказывают влияние на гидравлическое сопротивление очистного аппарата и на длительность работы его без регенерации. В табл.1.2 для некоторых видов производственной пыли приведены значения плотностей.

Таблица 1.2

Вид плотности	Плотность материала						
	Гипс	Глина	Кварц	Мел	Бетонит	Песок	Доломит
$\rho_{\text{ч}}, \text{кг/м}^3$	2460	2520	2480	2240	2410	2700	2600
$\rho_{\text{нас}}, \text{кг/м}^3$	1470	1470	1500	1370	1250	1520	1200

Смачиваемость частиц пыли оказывает влияние на работу аппаратов. Промышленная пыль разделяется на три группы: плохо смачиваемая – от 0 до 30%, средне - смачиваемая – от 30 до 80%, хорошо смачиваемая – от 80 до 100%. К хорошо смачиваемой (*гидрофильной*) пыли относится пыль стекла, кварца, кальция, большинство оксидов, галогениды щелочных металлов и др. Однако их частицы с размером менее 5 мкм становятся плохо смачиваемыми. К плохо смачиваемым (*гидрофобным*) частицам следует отнести пыль парафина, талька, серы, угля, графита и т.п. Гидрофобной становится пыль гидрофильных материалов вследствие образования на поверхности частиц электрического заряда одноименного с зарядом частички воды.

Мелко распыленная вода имеет отрицательный заряд, крупные частицы воды – положительный. К положительно заряженной пыли относятся мелкие частицы угля, серы, хлористый натрий, хлористый кальций и т.п.; к отрицательно заряженной – пыль карбоната кальция (CaCO_3), окиси алюминия (Al_2O_3), окиси железа (Fe_2O_3), карбоната магния (MgCO_3) и т.п. Чем выше показатель смачиваемости пыли, тем более эффективно улавливается более мелкая пыль [1].

При назначении способа осаждения пыли необходимо учитывать *адгезионные* свойства пыли, то есть прочность сцепления частиц с различными поверхностями, и *аутогенные* её свойства, то есть прочность сцепления частиц друг с другом. Адгезионные свойства пыли проявляются на стадии начального её осаждения в очистном устройстве, образуя трудно регенерируемый прочный монослой. Повышенная слипаемость частиц (аутогезия) может привести к забиванию пылеулавливающих аппаратов.

По степени слипаемости пыль разделяется на неслипающуюся (сухой песок, сухая глина); слабослипающуюся (коксовая, колошниковая, магниевая пыль, сланцевая зола); среднеслипающуюся (торфяная, мучная, металлическая пыль, сухой цемент, окись свинца, пыль с размерами частиц более 25 мкм); сильнослипающуюся (влажная пыль цемента, гипса, алебаstra, асбеста, хлопка, шерсти, пыль с размерами частиц до 10 мкм).

Многие виды пыли из-за развитой поверхности частиц способны гореть, самовоспламеняться, образовывать с воздухом взрывоопасные смеси, что необходимо учитывать при выборе способа их осаждения при очистке вентиляционных выбросов.

Пыли угля, торфа, сажи, древесины, алюминия, эбонита могут самовозгораться при взаимодействии с горячим воздухом. Если у пыли температура самовоспламенения ниже температуры окружающей среды, она представляет значительную пожарную опасность.

Пыль калия, натрия, негашеной извести, карбидов щелочных металлов при взаимодействии с водой выделяют водород и тепло, в результате чего водород самовоспламеняется в среде воздуха.

Наиболее взрывоопасные аэрозоли имеют нижний предел взрываемости при концентрации их в воздухе 15 г/м^3 (аэрозоли сахара, эбонита, торфа, серы, канифоля и т.д.). У аэрозолей алюминия, льна, муки, крахмала предел взрываемости - $16 \dots 65 \text{ г/м}^3$. Вещества с нижним пределом взрываемости более 65 г/м^3 относятся к пожароопасным, способны гореть, не взрываясь.

Вентиляционный воздух при поступлении его в очистной аппарат может иметь давление $P_{абс}$, плотность ρ_z и динамическую вязкость μ_z , отличающиеся от их значений при температуре $t = 0^\circ\text{C}$ и вычисляются по зависимостям

$$P_{абс} = 101325 \mp p, \text{ Па}, \quad (1.3)$$

где p – избыточное давление или разрежение,

$$\rho_z = 1,293 \cdot \frac{101325 \cdot (273 + t)}{273 \cdot P_{абс}}, \text{ кг/м}^3, \quad (1.4)$$

$$\mu_z = 17,3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{397}{397 + t} \cdot \left(\frac{273 + t}{273} \right)^{3/2}, \text{ Па} \cdot \text{с}. \quad (1.5)$$

Аппараты, имеющие широкое применение, по механизму очистки газов разделяются на гравитационные, инерционные, жалюзийные, центробежные (циклоны, вихревые аппараты, циклоны - электрофилтры), мокрые пылеуловители, пористые фильтры (волоконистые, воздушные, масляные, фильтры-туманоуловители), тканевые фильтры, зернистые фильтры, электрофилтры.

При выборе способа или устройства очистки газов от пыли следует исходить из знания фракционного состава очищаемой пыли, выброса пыли M , г/с , высоты источника выброса H , м , и диаметра трубы выброса D , м , фоновой концентрации пыли в воздухе c_ϕ , мг/м^3 .

Для холодного выброса пыли с расходом M , г/с , и предельно допустимой максимально разовой концентрацией $\text{ПДК}_{м.р.}$, мг/м^3 , в соответствии с [18] величина предельно допустимого выброса (ПДВ), составит, г/с

$$\text{ПДВ} = \frac{8 \cdot (\text{ПДК}_{м.р.} - c_\phi) \cdot H^{4/3} \cdot L}{A \cdot M \cdot F \cdot D \cdot n} \quad (1.6)$$

и для нагретого выброса

$$\text{ПДВ} = \frac{(\text{ПДК}_{м.р.} - c_\phi) \cdot H^2 \cdot (L \cdot \Delta T)^{1/3}}{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n}, \quad (1.7)$$

где L – расход газа, $\text{м}^3/\text{с}$, A – коэффициент температурной стратификации атмосферы, изменяющийся для различных регионов России от 140 до 250; F – коэффициент, равный 1 для очищаемой мелкодисперсной пыли с эффективностью 90%, 2,2 – с эффективностью от 75 до 90% и 3 – менее 75%;

$m = \frac{1}{0,67 + 0,1 \cdot f^{0,5} + 0,34 \cdot f^{0,33}}$ при $f = \frac{1,6 \cdot L^2}{D^3 \cdot \Delta T} < 100$ – для нагретого выброса; $m = 1,47 f^{0,33}$ при $f_e \leq 100$ – для холодного выброса при

$f_e = 3596 \cdot \frac{L^3}{D^6}$; $n=1$ при $f < 100$ и $V_m \geq 2$, где $V_m = 0,65 \cdot \left(\frac{L \cdot \Delta T}{H} \right)^{0,33}$,
 $n = 0,532 \cdot V_m^2 - 2,13 \cdot V_m + 3,13$ при $0,5 \leq V_m < 2$ и $n = 4,4 V_m$ при $V_m < 0,5$; значение n для нагретого выброса определяется по вышеприведенным зависимостям для значения $f_e \leq 100$; c_ϕ – фоновая концентрация пыли в воздухе, $мг/м^3$.

Определив значение ПДВ, устанавливается требуемая полная эффективность очистки газа от пыли с учетом её фракционного состава:

$$\eta_n = 1 - \frac{ПДВ}{M}. \quad (1.8)$$

Значение полной эффективности очистки газа от пыли зависит от степени очистки каждой фракции пыли, которая определяется принятым способом улавливания или осаждения частиц пыли различного размера.

При определении величины ПДВ следует учитывать высоту и ширину производственного здания, из которого осуществляется выброс, а также принимаемую высоту выбросной трубы. Ориентировочно источники выброса с трубой $H > 50 м$ следует отнести к высоким, $H = 10 \dots 50 м$ – к средним и $H = 2 \dots 10 м$ – к низким. Для низких и средних источников выбросов труба с факельным выбросом должна иметь высоту, исключающую попадание остаточных концентраций пыли после очистного устройства в наветренную циркуляционную зону здания. Зависимости между размерами здания и требуемой высотой выброса изложены в [9,16,25].

Следует также учитывать увеличение приземной концентрации пыли при возникновении НМУ в z раз, при этом повышенная эффективность очистки η_o^* будет равна [28]

$$\eta_o^* = 1 - (1/z) \cdot (1 - \eta_n) \quad (1.9)$$

На рис.1.2 представлены диапазоны изменения дисперсного состава разных видов пыли, образуемой при различных производственных процессах, и виды очистных аппаратов, обеспечивающих эффективное улавливание соответствующих фракций пыли. Определяется и диапазон допустимых скоростей газа для различных типов очистных аппаратов.

На рис.1.3 приведена номограмма зависимости эффективности улавливания пыли η от величины частиц пыли d_v , d_{50} , дисперсного состава $\lg \sigma_v$, отклонения в функции распределения парциальных коэффициентов очистки $\lg \sigma_\eta = \lg d_{\eta 84,1} - \lg d_{\eta 50}$, где $d_{\eta 84,1}$, $d_{\eta 50}$ – размеры частиц пыли, осаждаемых на 84,1 % и 50 % соответственно.

Номограмма построена в логарифмически вероятностной прямоугольной системе координат.

По данным, представленным на рис.1.3, определяются предварительные параметры улавливания пыли, уточненные данные определяются в процессе

выполнения расчетов режима улавливания пыли, приведенных в соответствующих разделах учебного пособия.

Степень совершенства пылеулавливающего оборудования характеризуется достигаемыми с его помощью фракционными (или парциальными) коэффициентами очистки.

Фракционный коэффициент η_f равен отношению количества уловленной пыли данной фракции к количеству вошедшей фракции пыли в очистной аппарат.

Парциальный коэффициент η_n равен отношению количества частиц данного размера, уловленных очистным аппаратом, к вошедшему количеству частиц данного размера в очистной аппарат.

Полный коэффициент очистки η_o равен

$$\eta_o = (1/100) \cdot \sum \eta_f \cdot \delta_i, \quad (1.10)$$

где δ_i – процентное содержание i -ой фракции пыли (см. табл.1.1).

Вопросы завершенности нейтрализации или утилизации уловленной токсичной и нетоксичной пыли заслуживают особого внимания, так как их выброс в окружающую природную среду может нанести значительный экологический ущерб, а предприятиям и экономический ущерб. Следует выбирать способ очистки воздуха от пыли, комплексно решающий экологические проблемы.

Предотвращенный экологический ущерб в совокупности с полезным использованием уловленной пыли должен превышать затраты на создание и эксплуатацию очистной установки, включающих в себя кроме стоимости очистного аппарата также средства энергетического и материального обеспечения.

Кроме этого, любой процесс очистки воздуха от вредных веществ должен быть полностью завершенным, а принимаемый способ и степень очистки должны быть такими, чтобы обеспечивались санитарно-гигиенические условия в жилых и производственных помещениях, и остаточные выбросы в итоге должны быть совместимы с происходящими в природе процессами.

В связи с этим в учебном пособии для некоторых очистных аппаратов приведены сведения, касающиеся утилизации и обезвреживания загрязненного воздуха, содержащего пыль и газообразные вещества.

Однако принятый способ очистки вентиляционного воздуха для достижения экологических и санитарно-гигиенических нормативных требований может оказаться весьма затратным. Для выбора наиболее рационального способа очистки следует провести оценку различных вариантов решений.

Рассмотренные в учебном пособии способы очистки воздуха от загрязнителей иллюстрированы расчетами по определению наиболее предпочтительного решения.

Эффективность принимаемого решения по назначению типа очистного оборудования может быть оценена только при экономических затратах на его создание и эксплуатацию, определяемых требуемой производственной площадью на размещение оборудования, потребными материальными, энергетическими и трудовыми ресурсами.

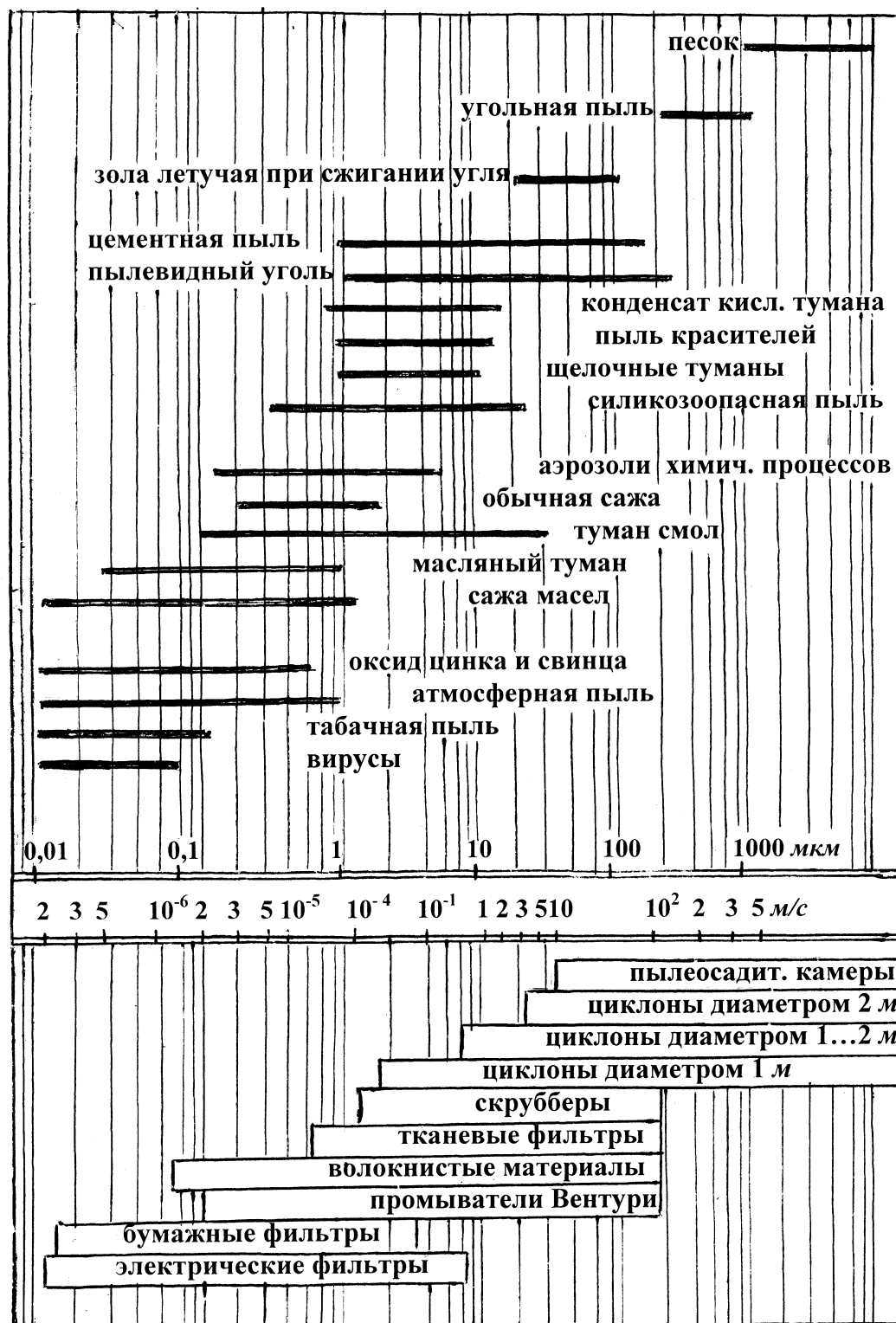


Рис.1.2. Области применения пылеулавливающих установок [30]

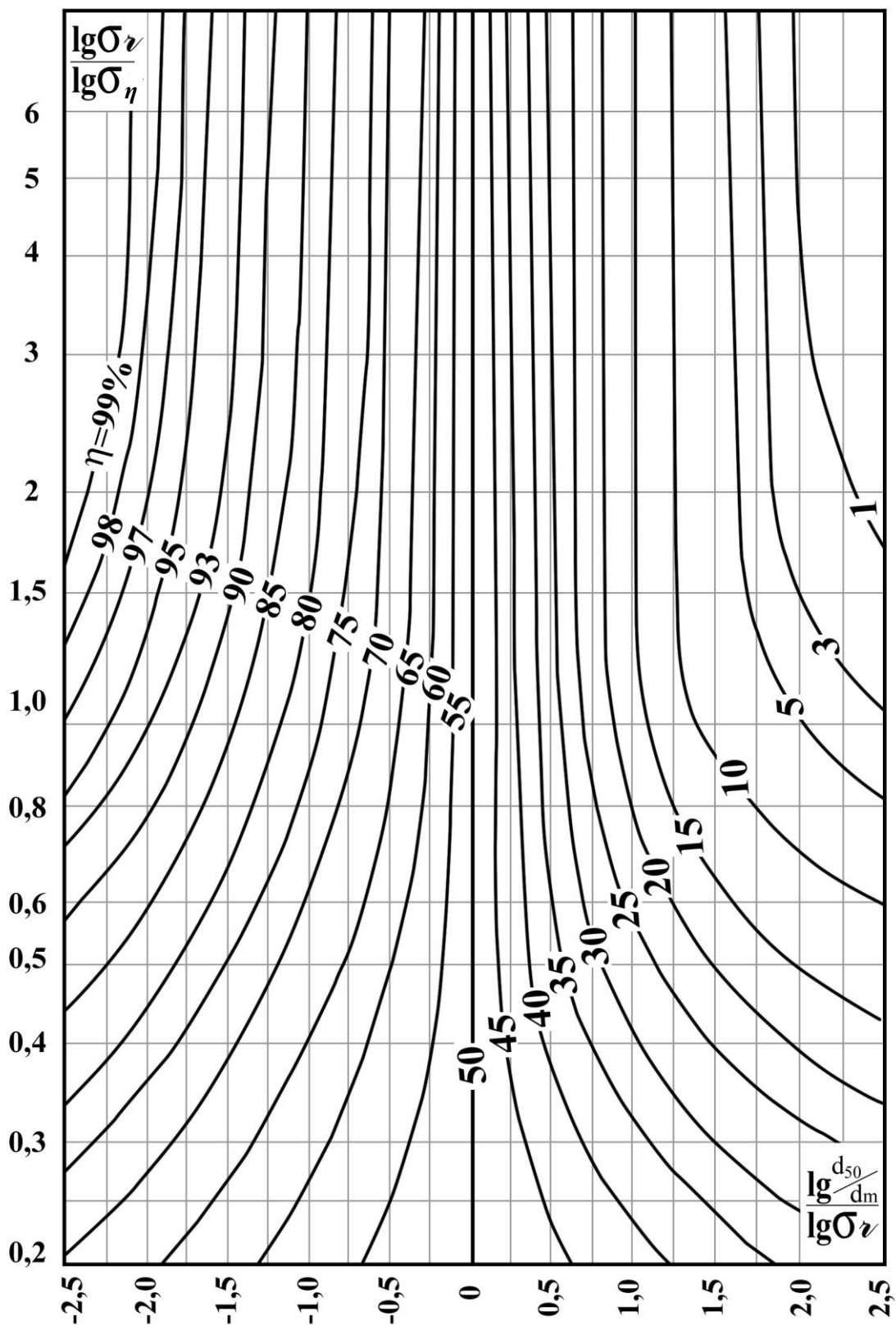


Рис. 1.3. Номограмма зависимости эффективности очистки выбросов пыли от величины частиц пыли η для различных отношений $\lg \sigma_v / \lg \sigma_\eta$ и $\lg d_{50} / d_m : \lg \sigma_v$ [30]

2. Пылеосадительные камеры и инерционные пылеосадители

Пылеосадительные камеры и инерционные пылеосадители наиболее простые по конструкции и применяются главным образом в качестве первой ступени очистки газов перед более эффективными пылеуловителями, они эффективно осаждают частицы размерами более 40 ... 50 мкм.

К ним относятся: гравитационные полые пылеосадители (рис.2.1), гравитационные полочные пылеосадители (рис.2.2), камеры с перегородками (рис.2.3), камеры с цепными или проволочными завесами (рис.2.4), пылеосадители в воздуховодах (рис.2.5), жалюзийные пылеосадители (рис.2.6).

Представленные расчетные схемы пылеосадительных камер с гравитационным осаждением частиц пыли являются наиболее простыми по устройству.

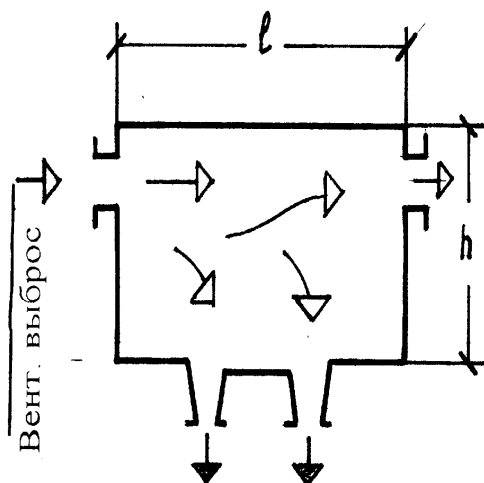


Рис.2.1. Гравитационный пылеосадитель

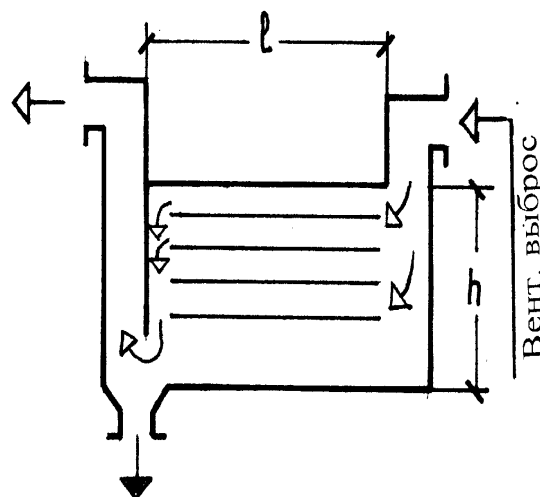


Рис.2.2. Гравитационный полочный пылеосадитель

Для достижения приемлемой эффективности очистки газов требуется продолжительное время нахождения частиц в камере, поэтому эти аппараты являются громоздкими для седиментационного (гравитационного) их осаждения.

Длина камеры l_k и её высота h_k при скорости газа V_z и скорости осаждения частиц пыли V_s размером d_q определяются зависимостью

$$l_k \leq h_k \cdot \frac{V_z}{V_s}, \quad (2.1)$$

где V_s – скорость осаждения пыли, определяемая уравнением Стокса

$$V_s = \frac{d_q^2 \cdot \rho_q \cdot g}{18 \cdot \mu_z}, \quad (2.2)$$

ρ_q – плотность частицы пыли, кг/м³, μ_z – динамическая вязкость газа, Па·с.

Инерционные пылеосадители, схемы которых приведены на рис.2.3 и рис.2.4, для повышения эффективности очистки газа от пыли оборудованы

перегородками или висящими цепями, что позволяет дополнительно к гравитационному осаждению использовать эффект инерционного осаждения частиц при обтекании пылегазового потока различных преград. В этих камерах скорость газа выше, чем у гравитационных пылеуловителей.

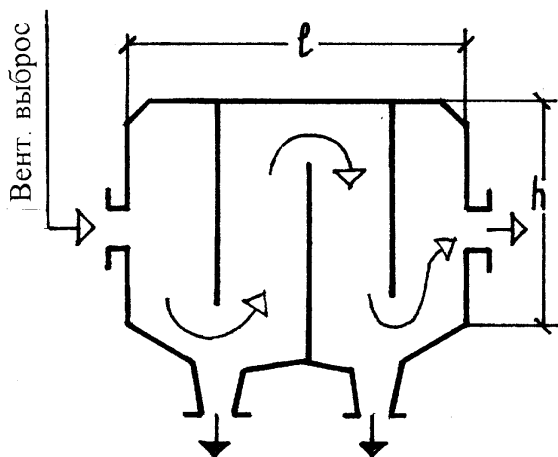


Рис. 2.3. Камера с перегородками

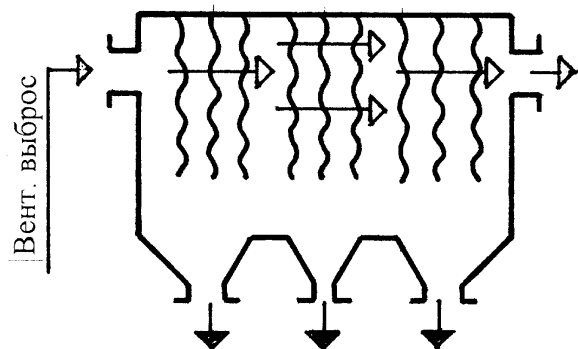


Рис. 2.4. Камера с цепными или проволочными завесами

Инерционные пылеуловители, встраиваемые в воздуховоды, применяются для осаждения крупных частиц пыли.

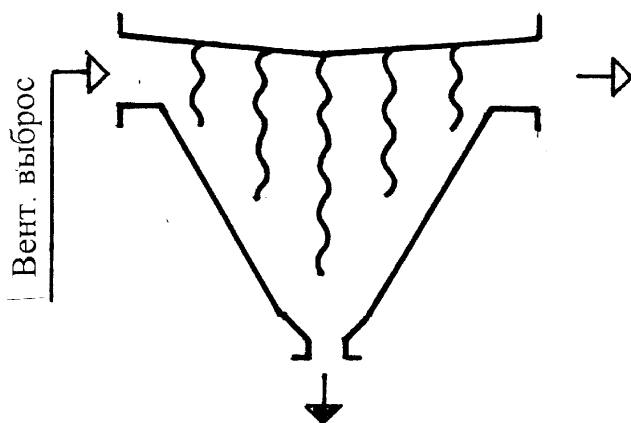


Рис. 2.5. Цепной пылеуловитель в воздуховоде

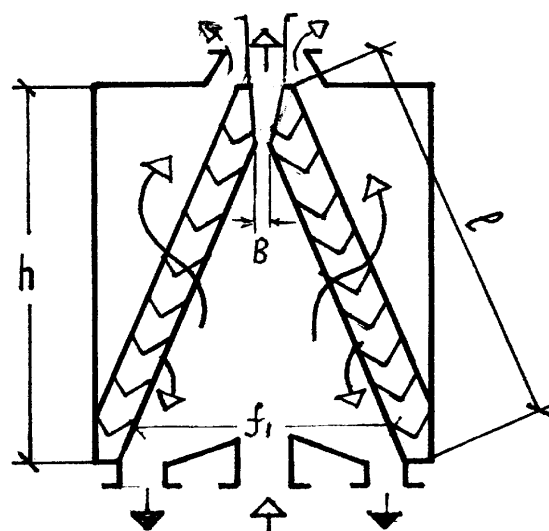


Рис. 2.6. Жалюзийный пылеуловитель

Данные типы пылеуловителей эффективно работают при очистке воздуха от неслипающейся или слабо слипающейся пыли, кроме цепных пылеуловителей, которые эффективно сбрасывают осевшую пыль при встряхивании цепей. Для удаления пыли со стенок камеры с цепями необходимо применять периферийные цепи со звеньями существенно меньшими, чем основные. Используется в качестве элемента улавливания пыли уложенный в периодиче-

ски встряхиваемую раму слой из цепей (цепной фильтр ФЦГМ [34]), который работоспособен и для улавливания слипающейся цементной пыли.

Жалюзийные пылеуловители в отличие от гравитационных работают при более высоких скоростях газа, имеют меньшие габариты, простые по конструкции и имеют небольшое гидравлическое сопротивление, поэтому находят более широкое применение. При индивидуальном их применении имеют невысокую общую эффективность очистки, улавливают только крупные частицы пыли и поэтому для повышения эффективности они используются совместно с циклонами. В этом случае жалюзийная решетка, уловив крупные частицы пыли, концентрирует мелкие частицы в своей центральной части, из которой эта часть пыли отсасывается циклоном. После циклона очищенный от мелкой пыли газ возвращается в воздухопровод. В табл.П.1.2 приведены геометрические размеры выпускаемых промышленностью жалюзийных пылеуловителей с 10 - процентным отбором запыленного воздуха в циклон.

2.1. Расчет пылеосадительных камер

Скорость пылегазового потока в камере V_z должна быть невысокой и равной 0,2...1 м/с, при этом произведение ширины камеры b на её высоту h_k для заданного расхода газопылевого потока L составляет величину $b \cdot h_k = L/V_z$. Меньшей скорости соответствует осаждение более мелких частиц, однако это требует повышенной высоты h_k камеры, которая связана с длиной камеры известным соотношением [30] $\frac{V_s}{V_z} \leq \frac{h_k}{l_k}$. Размер d_u , м, осаждаемых частиц равен:

$$d_u = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu_z \cdot V_s}{g \cdot (\rho_u - \rho_z)}}, \quad (2.3)$$

где μ_z - динамическая вязкость газового потока, Па·с; ρ_u, ρ_z - плотность частиц пыли и газа соответственно, кг/м³.

Основными критериями, определяющими параметры пылеосадительных камер, являются критерий Рейнольдса Re , критерий Архимеда Ar и критерий Лященко Ly , равные:

$$Re = \frac{d_u \cdot V_z \cdot \rho_z}{\mu_z}, \quad (2.4)$$

$$Ar = \frac{d_u^3 \cdot \rho_z \cdot (\rho_u - \rho_z) \cdot g}{\mu_z^2}, \quad (2.5)$$

$$Ly = \frac{V_s^3 \cdot \rho_z^2}{\mu_z \cdot \rho_u \cdot g}. \quad (2.6)$$

Для размера частицы пыли d_u , требуемой эффективного осаждения, определяется критерий Архимеда по зависимости (2.5) при известных величинах ρ_z, ρ_u, μ_z .

Экспериментально установленная зависимость между критериями Архимеда и Рейнольдса, равна:

$$Re = 0,048 \cdot Ar - 0,08. \quad (2.7)$$

По этой зависимости определяется допустимость использования гравитационного осаждения пыли, при режиме потока $Re \leq 2$.

Используя зависимости (2.4) и (2.7), определяется допустимая скорость газопылевого потока в камере V_z при значении критерия Рейнольдса $Re \leq 2$.

По экспериментально установленной зависимости между критериями Архимеда и Лященко для значений $Ar \leq 20$, равной

$$Ar = 7,35 \cdot Ly^{0,15} \quad (2.8)$$

определяется величина критерия Лященко, по зависимости (2.6) - граничная величина осаждения пыли V_s размером d_{qi} .

При известном расходе газопылевого потока L , m^3/c , высоте h_k и ширине b камеры осаждения скорость газопылевого потока равна, m/c

$$V_z = L / h_k \cdot b. \quad (2.9)$$

Для определения парциальной (или фракционной) эффективности осаждения частиц с размером d_{qi} по высоте сечения камеры назначают пять точек от верха камеры на расстоянии x и, задаваясь отношением x/h_k , рассчитывают параметры x_{1i} и x_{2i} функции нормального распределения интеграла вероятности $\Phi(x_i)$ по зависимостям

$$x_{1i} = \frac{1 + \frac{x}{h} - \frac{l_k}{h_k} \cdot \frac{V_s}{V_z}}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{l_k}{h_k}}}; \quad (2.10)$$

$$x_{2i} = \frac{1 - \frac{x}{h} + \frac{l_k}{h_k} \cdot \frac{V_s}{V_z}}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{l_k}{h_k}}}. \quad (2.11)$$

Значения x_{1i} и x_{2i} и соответствующие им интегралы вероятности находят по табл.2.1 (более полный ряд представлен в [8], [30]).

Таблица 2.1

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
-2,7	0,0035	-0,8	0,212	0,5	0,69	1,8	0,96
-2,5	0,0062	-0,6	0,274	0,6	0,726	1,9	0,97
-2,3	0,0107	-0,4	0,375	0,7	0,76	2,0	0,977
-2,1	0,018	-0,2	0,421	0,8	0,79	2,1	0,982
-2,0	0,023	-0,1	0,46	0,9	0,816	2,2	0,986
-1,8	0,035	0	0,5	1,0	0,84	2,3	0,989
-1,6	0,055	0,1	0,54	1,2	0,885	2,4	0,992
-1,4	0,081	0,2	0,58	1,4	0,92	2,5	0,994
-1,2	0,115	0,3	0,62	1,5	0,93	2,6	0,995
-1,0	0,159	0,4	0,655	1,6	0,945	2,7	0,9965

По значениям интегралов вероятности находят пять значений

$$N_i = \Phi(x_{1i}) + \Phi(x_{2i}) - 100 \quad (2.12)$$

и усредненное значение

$$N_{cp} = \sum_{i=1}^5 N_i / 5. \quad (2.13)$$

Определяется средний фракционный коэффициент осаждения частиц диаметром d_{qi} по зависимости

$$\eta_i = 100 - N_{cp}. \quad (2.14)$$

Для принятых двух значений размеров частиц пыли d_{qi} по зависимостям (2.4)... (2.14) определяют фракционный коэффициент их осаждения.

По этим двум значениям строится график функциональной зависимости $\eta_i = f(d_{qi})$ в вероятностно-логарифмической сетке координат, с помощью которого определяется полный коэффициент осаждения пыли:

$$\eta_o = \sum \frac{\eta_i \cdot \delta_i}{100}, \quad (2.15)$$

где δ_i - процентная доля заданной фракции частиц в составе пыли.

На рис.2.7 приведены значения показателей парциальной эффективности осаждения пыли для различных способов очистки газа.

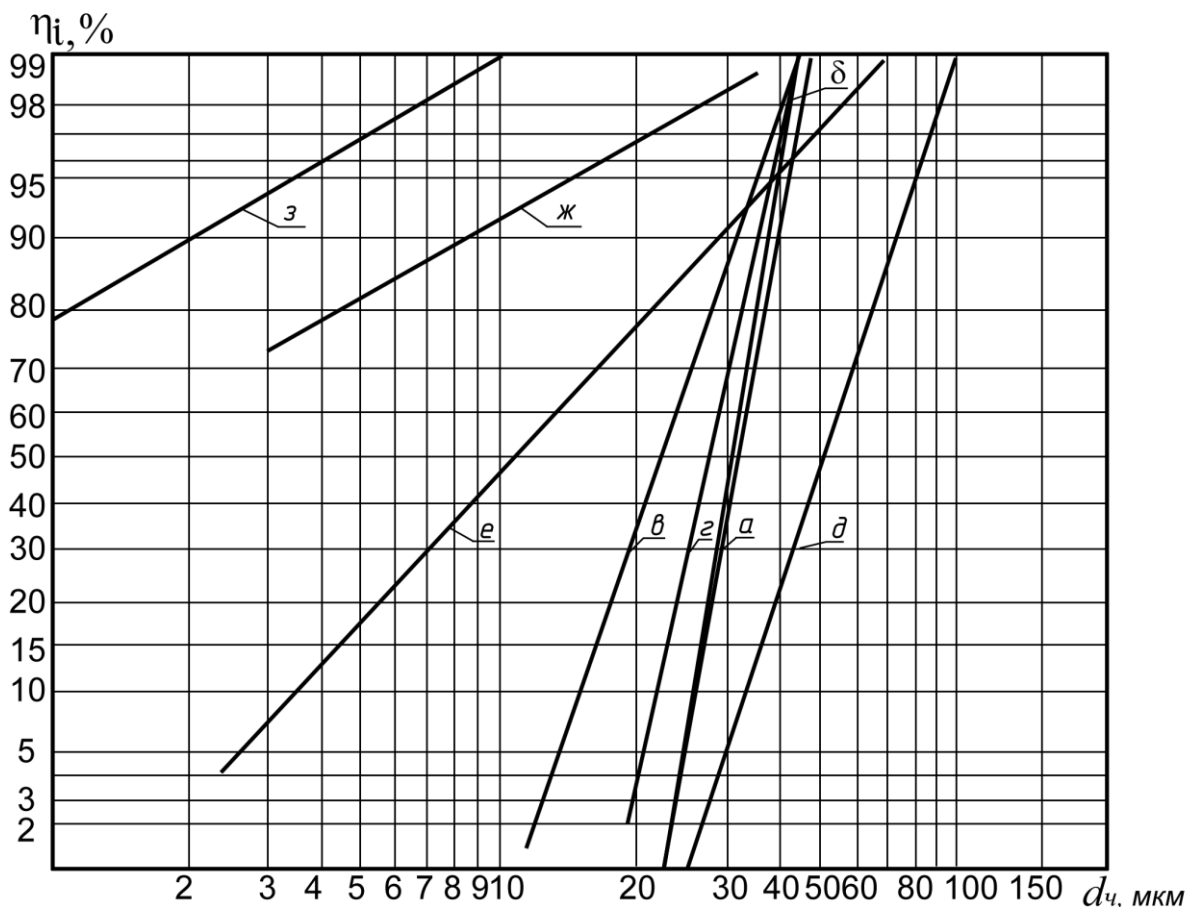


Рис. 2.7. Зависимость парциального коэффициента осаждения пыли η_i от размера улавливаемых частиц различных типов пылеуловителей

Гидравлическое сопротивление камерных пылеуловителей при скорости газа в них не более 0,5 м/с с учетом коэффициента местных потерь в местах входа и выхода газа из камеры $\zeta = 0,8...1$ примерно равно

$$\Delta P \cong \rho_z \cdot V_z^2 / 2. \quad (2.16)$$

Гидравлическое сопротивление камеры с перегородками увеличивается пропорционально количеству перегородок.

При расчете цепных пылеуловителей необходимо знание параметров цепей, которые представлены в табл.2.2.

Таблица 2.2

Размер звена, мм	Пористость слоя ε , м ³ /м ³	Объем звена V_0 , м ³	Удельная поверхность f , м ² /м ³	Эквивалентный диаметр d_3 , м	Диаметр фильтрующего элемента $d_{3\phi}$, м
4•28	0,72	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$2,78 \cdot 10^2$	$1,03 \cdot 10^{-2}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$
3•20	0,72	$0,44 \cdot 10^{-6}$	$3,73 \cdot 10^2$	$7,7 \cdot 10^{-3}$	$5,65 \cdot 10^{-3}$

Гидравлическое сопротивление цепных пылеуловителей определяется по зависимости с учетом данных, представленных в табл.2.2:

$$\Delta P_{\text{ц}} = \left[\frac{150 \cdot V_z \cdot \mu_z \cdot (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3 \cdot d_{3\phi}^2} + \frac{1,75 \cdot V_z^2 \cdot (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 \cdot d_{3\phi}} \right] \cdot h, \quad (2.17)$$

где V_z – скорость газопылевого потока в свободном сечении камеры, м/с; μ_z – динамическая вязкость газа, Па·с; ρ_z – плотность газа, кг/м³.

Гидравлическое сопротивление жалюзийных пылеуловителей зависит от угла входа газа в лопатки жалюзей и выхода газа из них. Коэффициент местного сопротивления лопаток по данным [5] составляет $\xi = 5...6$.

Пример 2.1. Определить наиболее рациональную степень осаждения пыли в камере из вентиляционного воздуха расходом $L = 3600 \text{ м}^3/\text{ч}$ с содержанием в нем пыли следующего дисперсного состава:

$d_{\text{ч}}$, мкм	< 5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	> 60
δ , %	5	15	20	20	15	10	10	5
$D(d_{\text{ч}})$, %	5	20	40	60	75	85	95	100

Плотность частиц пыли $\rho_{\text{ч}} = 3000 \text{ кг/м}^3$, плотность газа $\rho_z = 1,2 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость газа $\mu_z = 18 \cdot 10^{-6} \text{ Па·с}$. Производственное помещение для организации камеры осаждения имеет длину $l_k = 3,5 \text{ м}$, высоту $h_k = 1,5 \text{ м}$ и ширину $b = 1,66 \text{ м}$.

Скорость газа в камере равна $V_z = L / (h_k \cdot b) = 1 / (1,5 \cdot 1,66) = 0,4 \text{ м/с}$.

Для представления зависимости парциальной эффективности осаждения различных размеров частичек пыли в вероятностно-логарифмической сетке

координат достаточно принять два диаметра частиц пыли. Принимаем $d_q = 30 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ и $d_q = 50 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Определяются величины критериев Архимеда по

$$\text{зависимости (2.5): } Ar_1 = \frac{27000 \cdot 10^{-18} \cdot 3000 \cdot 1,2 \cdot 9,81}{331 \cdot 10^{-12}} = 2,94,$$

$$Ar_2 = \frac{125000 \cdot 10^{-18} \cdot 3000 \cdot 1,2 \cdot 9,81}{331 \cdot 10^{-12}} = 4,9.$$

Определяются критерии Лященко по зависимости (2.8) $Ar = 7,35 \cdot Ly^{0,15}$; $Ly_1 = 0,0027$, $Ly_2 = 0,06$.

Используя значения критериев Лященко, определяются скорости осаждения принятых к расчету частиц пыли

$$V_{s1} = \sqrt[3]{\frac{Ly_1 \cdot \mu_z \cdot \rho_q \cdot g}{\rho_z^2}} = \sqrt[3]{\frac{0,0027 \cdot 18 \cdot 10^{-6} \cdot 3000 \cdot 9,81}{1,44}} = 0,1 \text{ м/с}, \quad V_{s2} = 0,28 \text{ м/с}.$$

Определяются отношения $V_{s1}/V_z = 0,25$; $V_{s2}/V_z = 0,7$.

Принимается ряд отношений $x/h_k = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$.

По зависимостям (2.10) – (2.14) определяются параметры x_1 , x_2 , $\Phi(x_1)$, $\Phi(x_2)$, N_i , N_{cp} , η_i для каждого значения частицы пыли. Расчеты сведены в таблицу 2.4.

Таблица 2.4

Диаметр частиц, мкм	Параметры	x / h_k				
		0	0,25	0,5	0,75	1,0
30	x_1	3,3	5,3	7,2	9,2	11,2
	x_2	12,4	10,5	8,5	6,5	4,5
	$\Phi(x_1)$	100	100	100	100	100
	$\Phi(x_2)$	100	100	100	100	100
	N_i	100	100	100	100	100
	$N_{cp} = (100+100+100+100+100)100\% = 5 :$					
	$\eta_i = 100 \% - 100 \% = 0 \%$					
50	x_1	-4,9	-3,0	-1,02	0,94	2,9
	x_2	20,7	18,7	16,8	14,8	12,8
	$\Phi(x_1)$	0	0	15,4	82,6	100
	$\Phi(x_2)$	100	100	100	100	100
	N_i	0	0	15,4	82,6	100
	$N_{cp} = (0+0+15,4+82,6+100) : 5 = 39,6 \%$					
	$\eta_i = 100 - 39,6 = 60,4\%$					

Приняв средние значения фракции частиц пыли исходного дисперсного состава, для каждого из них на рис 2.7 определяется по графику парциальная степень её осаждения и рассчитывается полный коэффициент осаждения

$$\eta_n^1 = \frac{1}{100} (0 \cdot 5 + 0 \cdot 15 + 0 \cdot 20 + 0 \cdot 20 + 55 \cdot 15 + 60 \cdot 10 + 100 \cdot 10 + 100 \cdot 5) = 29,25\%.$$

Вариант 2. Принимается скорость газа в камере $V_z = 0,4 \text{ м/с}$, $h_k = 1,5 \text{ м}$, $l_k = 3,5 \text{ м}$, $b = 2,5 \text{ м}$, тогда $l_k / h_k = 3,5$, $(V_s/V_z)_1 = 0,25$ и $(V_s/V_z)_2 = 0,7$. Аналогично первому варианту для пяти отношений x/h определяются параметры x_1 ,

x_2 , $\Phi(x_1)$, $\Phi(x_2)$, N_i , парциальная степень осаждения пыли с размерами частиц 30 и 50 мкм, (табл.2.4) и наносится линия b на рис.2.7.

Для средних значений частиц пыли исходного дисперсного состава по аналогии с вариантом 1 определяются парциальные степени их осаждения и рассчитывается полный коэффициент осаждения пыли:

$$\eta_n^2 = \frac{1}{100} (0 \cdot 10 + 0 \cdot 15 + 0 \cdot 20 + 3,2 \cdot 20 + 55 \cdot 15 + 100 \cdot 10 + 100 \cdot 10 + 100 \cdot 5) = 33,9\%.$$

Варианты 3 и 4. При геометрических размерах камеры $h_k = 1,0$ м, $l_k = 5$ м, $b = 2,5$ м и скоростях газового потока $V_z = 0,4$ м/с и $V_z = 0,3$ м/с нанесены прямые линии v и z на рис. 2.7. Для этих вариантов расчетные параметры сведены в табл.2.6, и табл.2.7 и полные коэффициенты осаждения пыли равны

$$\eta_n^3 = \frac{1}{100} (0 \cdot 10 + 0 \cdot 15 + 0 \cdot 20 + 30 \cdot 20 + 68 \cdot 15 + 100 \cdot 10 + 100 \cdot 10 + 100 \cdot 5) = 41,2\%,$$

$$\eta_n^4 = \frac{1}{100} (0 \cdot 10 + 0 \cdot 15 + 50 \cdot 20 + 72 \cdot 20 + 85 \cdot 15 + 100 \cdot 10 + 100 \cdot 10 + 100 \cdot 5) = 62,2\%.$$

Таблица 2.5

Диаметр частиц, мкм	Параметры	x / h_k				
		0	0,25	0,5	0,75	1,0
30	x_1	-1,97	0	1,97	3,9	5,9
	x_2	17,7	15,7	13,8	11,8	9,8
	$\Phi(x_1)$	2,45	50	97,5	100	100
	$\Phi(x_2)$	100	100	100	100	100
	N_i	2,45	50	97,5	100	100
	$N_{cp} = (2,45+50+97,5+100+100) 70\% = 5 :$					
	$\eta_i = 100 - 70 = 30 \%$					
50	x_1	-19,7	-17,7	-15,7	-13,8	-11,8
	x_2	35,4	33,5	31,5	29,5	27,5
	$\Phi(x_1)$	0	0	0	0	0
	$\Phi(x_2)$	100	100	100	100	3
	N_i	0	0	0	0	0
	$N_{cp} = 0 \%$					
	$\eta_i = 100 - 0 = 100 \%$					

Таблица 2.6

Диаметр частиц, мкм	Параметры	x / h_k				
		0	0,25	0,5	0,75	1,0

30	x_1	-1,97	0	1,97	3,9	5,9
	x_2	17,7	15,7	13,8	11,8	9,8
	$\Phi(x_1)$	2,45	50	97,5	100	100
	$\Phi(x_2)$	100	100	100	100	100
	N_i	2,45	50	97,5	100	100
	$N_{cp} = (2,45+50+97,5+100 + 100)70 = 5 : \%$					
	$\eta_i = 100 - 70 = 30 \%$					
50	x_1	-19,7	-17,7	-15,7	-13,8	-11,8
	x_2	35,4	33,5	31,5	29,8	27,5
	$\Phi(x_1)$	0	0	0	0	0
	$\Phi(x_2)$	100	100	100	100	100
	N_i	0	0	0	0	0
	$N_{cp} = 0 \%$					
	$\eta_i = 100 - 0 = 100 \%$					

Таблица 2.7

Диаметр частиц, мкм	Пара- метры	x / h_k				
		0	0,25	0,5	0,75	1,0
30	x_1	-3,9	-1,97	0	1,97	3,9
	x_2	19,7	17,7	15,8	13,8	11,8
	$\Phi(x_1)$	0	2,45	50	97,5	100
	$\Phi(x_2)$	100	100	100	100	100
	N_i	2,45	50	97,5	100	100
	$N_{cp} = (2,45+50+97,5+100 + 100)50 = 5 : \%$					
	$\eta_i = 100 - 50 = 50 \%$					
50	x_1	-28,7	-26,7	-24,8	-22,8	-20,8
	x_2	44,5	42,5	40,5	38,5	36,6
	$\Phi(x_1)$	0	0	0	0	0
	$\Phi(x_2)$	100	100	100	100	100
	N_i	0	0	0	0	0
	$N_{cp} = 0 \%$					
	$\eta_i = 100 - 0 = 100 \%$					

Из анализа рассмотренных вариантов следует, что при малой скорости газового потока ($V_z = 0,2 \text{ м/с}$) и большой величине отношения длины камеры к её высоте обеспечивается лучшее осаждение пыли по сравнению с другими вариантами. Худшее осаждение пыли отмечено при увеличении скорости газового потока и уменьшении отношения длины камеры к её высоте.

2.2. Расчет жалюзийных пылеуловителей

В жалюзийных пылеуловителях (рис.2.6) основным его элементом является лопаточная решетка, зазор между лопатками составляет 4... 6 мм.

Как правило, они работают совместно с циклоном в качестве первой ступени очистки с созданием в центре обогащенного мелкой пылью газа и подачи его в циклон. Коническая конструкция лопаточной решетки способствует концентрации пыли в выходной части решетки. Отбор из этой части решетки газа через щель (см. размер "в" на рис.2.6) в количестве 10...20 % от общего количества способствует увеличению эффективности улавливания мелкой пыли в циклоне.

Наибольшее распространение получили жалюзийные пылеуловители конструкции ВТИ с гидравлическим сопротивлением $\Delta P_1 = 400 \dots 500 \text{ Па}$, представленные в табл.2.8, для которых экспериментально определены парциальные коэффициенты осаждения частиц пыли при относительном отборе газо - пылевого потока $\varphi = 10 \%$. Увеличение отбора газа до 20 % увеличивает эффективность осаждения пыли не более чем на 2,5 % [8].

Таблица 2.8

Диаметр частиц пыли, мкм	5	10	15	20	25	30	40	50	60	100
Коэффициент осаждения η_i , %	25	47	63	76	86,5	91,3	94,8	96,5	97,7	100

На рис.2.8 представлен вмонтированный в воздуховод жалюзийный пылеуловитель и отсосной циклон.

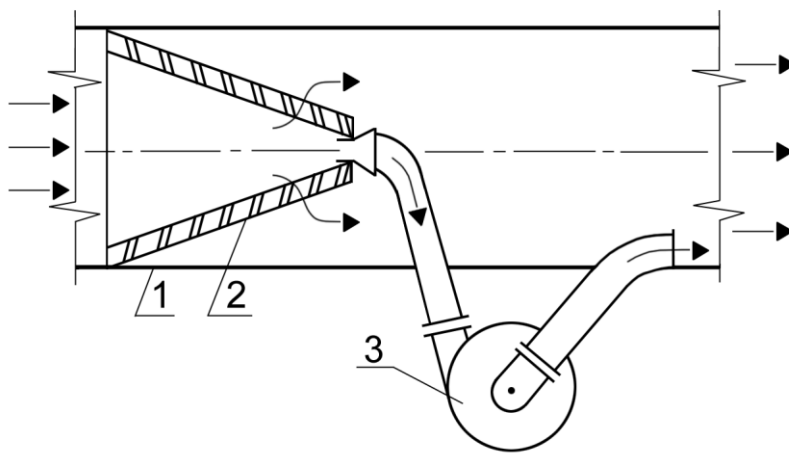


Рис.2.8. Жалюзийный пылеуловитель в горизонтальном воздуховоде:
1- воздуховод, 2 – жалюзийный пылеуловитель, 3 – циклон.

Во входном сечении пылеуловителя площадью f_1 скорость газа равна, м/с:

$$V_i = \sqrt{\frac{2\Delta P_i}{\xi \cdot \rho_g}}, \quad (2.18)$$

где ΔP_1 - гидравлическое сопротивление решетки, при отсутствии данных принимают равными 200...500 Па, при этом большему сопротивлению соответствует более высокий коэффициент осаждения; $\xi = 4 \dots 6$ - местный коэффициент гидравлического сопротивления; ρ_g - плотность газа, кг/м³.

При объемном расходе газопылевого потока L , $\text{м}^3/\text{с}$ площадь входного сечения решетки равна, м^2 :

$$f_i = \frac{L}{V_i}. \quad (2.19)$$

Диаметр циклона, отсасывающего сконцентрированную пыль из решетки, при относительном отсосе газа из решетки $\varphi=10\%$ равен:

$$D_y = 0,775 \sqrt{\frac{\Delta P_1 \cdot f_1}{\Delta P_2}}, \quad (2.20)$$

где ΔP_2 - гидравлическое сопротивление циклона, порядок расчета которого изложен в разделе 3, для предварительного расчета принимают равным 400...600 Па.

При конструировании жалюзийного пылеуловителя при $\varphi=10\%$ соотношения числа лопаток n , высоты решетки h , её длины l , диаметра (ширины) отсосного канала v и диаметра входного сечения решетки d_1 по данным ВТИ [8] представлены в табл.2.9.

Таблица 2.9

n	22	25	30	40	50	60	70	75
$d_1, \text{мм}$	396	450	540	720	900	1080	1260	1350
$h_1, \text{мм}$	1166	1325	1588	1212	2635	3158	3681	3943
$l_1, \text{мм}$	1170	1328	1590	1220	2650	3180	3710	3975
$v, \text{мм}$	20	22	27	36	45	54	63	67

Развиваемое вентилятором давление, необходимое для преодоления общего сопротивления, равно, Па:

$$P = \Delta P_2 + 21,5(C_1 + C_2) - \Delta P_1 \left(0,19 + \frac{0,17 \cdot f_1^2}{f_3} \right), \quad (2.21)$$

где f_3 - площадь сечения воздуховода выхода очищаемого газа из жалюзийной решетки, равная при скорости газа $V_3 \leq 10 \text{ м/с}$

$$f_3 = \frac{0,9 \cdot L}{V_3}. \quad (2.22)$$

Коэффициенты C_1 и C_2 представлены в табл.2.10.

Таблица 2.10

Коэффициенты	Отношение длины воздуховода к его диаметру									
	5	10	15	20	25	30	40	50	60	80
C_1	1,7	2,2	2,7	3,2	3,7	4,2	5,2	6,2	7,2	10,4
C_2	1,47	1,65	1,82	2,0	2,17	2,35	2,7	3,1	3,4	4,8

Полная степень очистки газопылевого потока при степени очистки газа в циклоне η_y и степени осаждения газа в решетке η_p равна [30]:

$$\eta_n = \eta_y [1 - (1 - \varphi)(1 - \eta_p)]. \quad (2.23)$$

Используя экспериментальные данные табл.2.8 и построив по ним на рис.2.7 зависимость в виде прямой δ парциальной эффективности очистки пыли, определяем величину полной степени очистки пыли аналогично методике, изложенной в подразделе 2.1.

Пример 2.2. Рассчитать степень очистки в жалюзийном пылеуловителе газа расходом $6,9 \text{ м}^3/\text{с}$ со степенью отвода из решетки обогащенного пылью газа $\varphi = 10\%$ в циклон типа ЦН-11 при гидравлическом сопротивлении решетки $\Delta P_1 = 400 \text{ Па}$, $\xi = 5,65$, плотности газа $\rho_g = 1,2 \text{ кг/м}^3$, плотности частиц $\rho_{\text{ч}} = 2000 \text{ кг/м}^3$ и при дисперсном составе пыли, представленном в таблице

$d_{\text{ч}}, \text{ мкм}$	<10	20	30	40	63	100	>160
$\delta, \%$ (масс.)	5	10	15	15	20	25	10

Решение. Скорость газа во входном сечении решетки по зависимости (2.14) равна $V_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot 400}{5,65 \cdot 1,2}} = 10,8 \text{ м/с}$. Площадь и диаметр входного сечения

решетки равны: $f_1 = \frac{L}{V_1} = 6,9/10,8 = 0,64 \text{ м}^2$, $d_1 = \sqrt{\frac{3,14 \cdot f_1}{4}} = \sqrt{1,27 \cdot 0,64} = 0,9 \text{ м}$.

По табл. 2.9 диаметру $0,9 \text{ м}$ может соответствовать решетка с 50 лопатками, тогда принимаем $h=2,63 \text{ м}$, $l=2,65 \text{ м}$, $b=45 \text{ мм}$, $d_l=0,9 \text{ м}$.

Уточненная площадь входного сечения решетки $f_1 = 0,785 \cdot 0,9^2 = 0,64 \text{ м}^2$.

При требуемой производительности циклона $L_{\text{ц}} = 0,1 \cdot 25000 = 2500 \text{ м}^3/\text{ч}$ по его характеристикам из [10] принимаем диаметр циклона равный 700 мм , при этом его гидравлическое сопротивление составит 500 Па . Обеспечение эффективности отсоса обогащенного пылью газа проверяется правильность назначения гидравлических сопротивлений решетки и циклона с использованием зависимости (2.20).

$$D_{\text{ц}} = 0,775 \sqrt{\frac{300 \cdot 0,77}{500}} = 0,67 \text{ м}, \text{ то есть разница между расчетным и принятым диаметром циклона не превышает } 5\%, \text{ что вполне допустимо.}$$

На логарифмическую сетку рис.2.7 наносятся экспериментальные данные (табл.2.8) эффективности осаждения пыли в решетке ВТИ и, построив линию e , определяются величины парциальной эффективности осаждения пыли, заданной в примере дисперсности. В табл.2.11 приведены соответствующие парциальные эффективности различных частиц пыли в циклоне и для примера расчета эффективности улавливания пыли дано содержание фракций пыли. Указанная парциальная эффективность соответствует гидравлическому сопротивлению $\Delta P = 400 \dots 500 \text{ Па}$ при плотности частиц $\rho_{\text{ч}} = 2000 \text{ кг/м}^3$. Повышенная концентрация крупных частиц пыли, отсасываемых циклоном, требует принятия мер по защите его стенок от эрозии.

Полный коэффициент очистки газопылевого потока в жалюзийной решетке составит с учетом данных табл.2.7 равен:

$$\eta_n = \frac{1}{100} (17 \cdot 5 + 47 \cdot 10 + 76 \cdot 10 + 92 \cdot 15 + 95 \cdot 25 + 100 \cdot 20 + 100 \cdot 15) = 85,7\%.$$

Таблица 2.11

$d_{\text{ч}},$ мкм	5	10	20	30	40	60	>100
δ_i %	5	10	10	15	20	25	10
η_i , %	17	47	76	92	95	100	100

Определив по зависимости (1.2) значение дисперсии $\sigma_{\text{ч}}=1,7$ и используя номограмму 3.11, на рис.2.7 строится линия *ж*. По результатам определения парциальных коэффициентов очистки выбросов определяется общий коэффициент очистки по зависимости (2.11):

$$\eta_n^{\text{цн-11}} = \frac{1}{100} (92 \cdot 5 + 98 \cdot 10 + 99,6 \cdot 15 + 99,8 \cdot 15 + 100 \cdot 20 + 100 \cdot 25 + 100 \cdot 10) = 84,3\%$$

Расчетный коэффициент осаждения пыли в жалюзийном пылеуловителе является завышенным относительно реально достижимой величины на 10...15 % и это следует учитывать.

Гидравлическое сопротивление жалюзийной решетки при $\xi=6$ равно $\Delta P = \xi \cdot \rho_{\text{г}} \cdot V_{\text{г}}^2 / 2 = 6 \cdot 1,2 \cdot 10,8^2 / 2 = 420 \text{ Па}$.

Для определения эффективности осаждения пыли при значении φ отличном от рассмотренного необходимо подобрать циклон соответствующей производительности.

2.3. Расчет гравитационно-инерционных пылеуловителей

Расчет параметров гравитационного полочного пылеуловителя (рис.2.3) проводится аналогично расчету осадительной камеры. Отличительной особенностью является разделение общего газопылевого потока на n раз меньших потоков для количества образованных полками камер и расчет проводится камеры с n раз меньшей высотой. Так как увеличение отношения длины камеры осаждения к высоте увеличивает осаждение пыли, полочный пылеуловитель имеет повышенный показатель осаждения пыли по сравнению с камерным пылеуловителем.

В камерах с перегородками (рис.2.3) и с цепными или проволочными завесами (рис.2.4 и рис.2.5) осаждение пыли происходит за счет совместного действия гравитационного и инерционного эффектов, поэтому в них полная эффективность осаждения пыли выше по сравнению с эффективностью в камерном пылеуловителе. При средней эффективности $\eta = 70...80\%$ осаждения частиц размером более 40 мкм в пылеосадительной камере установка цепных завес в ней по опытным данным повышает на 10...15 % общую эффективность осаждения пыли.

Пылеуловители гравитационного и инерционного типа преимущественно применяются для очистки воздуха с высокой концентрацией пыли, с со-

держанием крупнодисперсной пыли, для очистки дымовых газов от крупных фракций золы при сжигании угля, для улавливания абразивной пыли. Используются они преимущественно в качестве первой ступени очистки для снижения нагрузки на работу второй ступени очистного оборудования. Такая двухступенчатая схема очистки позволяет обеспечить эффективную очистку вентиляционного воздуха, в том числе и от мелкодисперсной пыли.

Расчет характеристик гравитационно-инерционных пылеуловителей затруднителен из-за отсутствия достаточных экспериментальных данных. Примерная их оценка может быть выполнена при определении эффективности гравитационного осаждения пыли по зависимостям (2.6) – (2.11), инерционная часть осаждения может быть учтена коэффициентом $\kappa = 1,2 \dots 1,5$, тогда общая эффективность будет равна

$$\eta_o = \kappa \cdot \sum \frac{\eta_i \cdot \delta_i}{100}. \quad (2.20)$$

Учитывая неточность определения общей эффективности гравитационно-инерционных пылеуловителей допустимо гравитационную эффективность определять по менее точной, но более простой зависимости

$$\eta_i = (V_s \cdot l_k) / (V_z \cdot h_k), \quad (2.21)$$

где V_s – скорость оседания частиц пыли данной фракции, м/с; l_k – длина камеры, м; h_k – высота камеры, м; V_z – скорость газа в свободном поперечном сечении камеры, м/с.

Для частиц пыли размером $d_q < 70$ мкм скорость оседания пыли может быть определена по зависимости

$$V_s = [d_q^2 \cdot (\rho_q - \rho_z)] / 18 \cdot \mu_z \quad (2.22)$$

и при размере частиц пыли $d_q > 70$ мкм – по зависимости

$$V_s = \sqrt{\frac{4 \cdot d_q (\rho_q - \rho_z) \cdot g}{3 \cdot \rho_z \cdot \psi}}, \quad (2.23)$$

где $\psi = 0,4$ – коэффициент лобового сопротивления частицы пыли в реальных условиях.

Для исключения вторичного уноса пыли из осадительных камер скорость газа не должна быть выше 2 м/с.

Гидравлическое сопротивление, создаваемое цепями $\Delta P_{ц}$, рассчитывается по зависимости (2.12), гидравлическое сопротивление камеры по зависимости (2.13).

В гравитационно-инерционных пылеосадительных камерах рациональным соотношением длины и высоты считается $l_k / h_k = 1,5$.

Эти аппараты находят применение для защиты вентиляторов от загрязненного крупными частицами вентиляционного воздуха.

Расчет параметров многокамерных аппаратов (рис.2.3 и рис.2.4) производится путем последовательного их определения.

3. Циклоны сухой очистки пылевых выбросов

Циклоны являются наиболее характерными представителями сухих инерционных пылеуловителей, имеющие простую конструкцию, обладают большой пропускной способностью и несложны в эксплуатации. Принцип действия циклона основан на выделении частиц пыли из газового потока под воздействием центробежных сил, возникающих вследствие вращения потока в корпусе циклона. Вследствие интенсивного вращения газа в корпусе циклона по нисходящей спирали понижается статическое давление от периферии к центру, оно снижается и в пылесборном бункере, присоединенном к корпусу циклона. Поэтому для снижения выхода пыли из циклона требуется высокая герметичность бункера и его соединения с пылеотводным отверстием. На рис.3.1 приведена схема осевых и радиальных течений газопылевых потоков в корпусе и бункере циклона. Пыль отделяется от воздуха в основном при переходе потока в восходящий центральный поток.

Закрученный газовый поток в циклоне диаметром цилиндрической части $D_{\text{ц}}$ продолжает вращательное движение в выхлопной трубе, поэтому для снижения гидравлического сопротивления циклона на выходе целесообразно устанавливать раскручиватель потока.

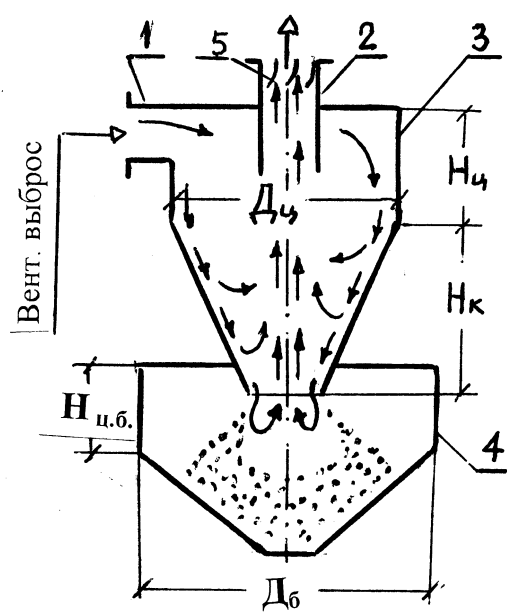


Рис. 3.1. Схема течений пылегазовых потоков в корпусе и бункере циклона: 1 – входной патрубок, 2 – отводящий патрубок, 3 – корпус циклона, 4 – пылесборный бункер, 5 – раскручиватель потока

3.1. Типы циклонов, их применение, схемные особенности

По схемным и конструктивным особенностям циклоны разделяются на цилиндрические ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24 (рис.3.2); конические СДК-ЦН-33, СДК-ЦН-34, СК-ЦН-34, СИОТ, типа "Ц", "УЦ" (рис.3.3; 3.4; 3.5); с обратным конусом ЦОК (рис.3.6). типа "К" - Клайпеда (рис.3.7), вихревые (рис. 3.8), инерционно-центробежные (рис.3.9), комбинированные "Циклон - электрофильтр" (рис.3.20).

Циклоны типа "К" занимают промежуточное положение между цилиндрическими и коническими циклонами. Сравнительно недавно нашли применение циклоны со встречными закрученными потоками (рис.3.8), центробеж-

но-инерционные (рис.3.9) и комбинированные пылеуловители "циклон- — электрофильтр".

Циклоны цилиндрические ЦН (разработчик — НИИОГаз) являются высокопроизводительными, занимают промежуточное положение между аппаратами грубой и тонкой очистки газовых выбросов от сухой неслипающейся, неволокнистой и абразивной пыли, обеспечивают осаждение частиц размером до 10 мкм с эффективностью не выше 80% . Имеют примерно равные высоты цилиндрической и конической частей (табл. 3.3)

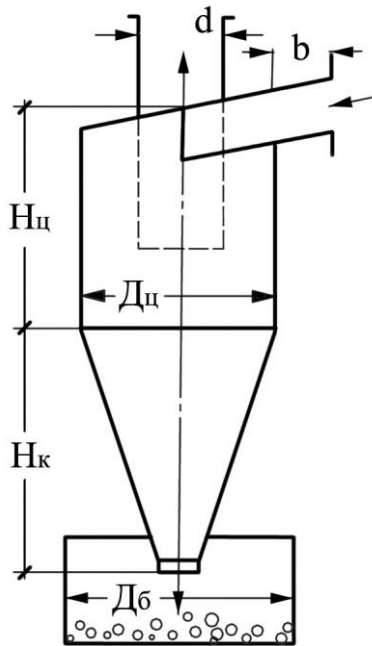


Рис.3.2. Циклон типа ЦН

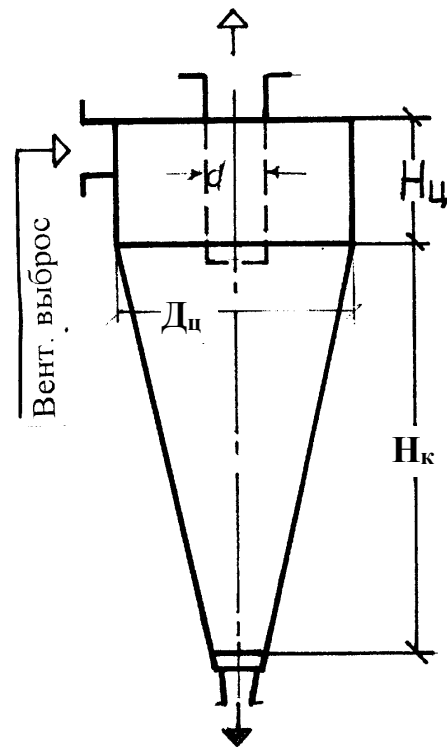


Рис.3.3. Циклон конический типа СК - ЦН и СДК - ЦН

Циклоны типа СК-ЦН, СДК-ЦН с длинной конической частью, в 1,5...5 раз превышающей высоту цилиндрической части, обладают значительным гидравлическим сопротивлением, однако они способны улавливать частицы размером 10 мкм и ниже с эффективностью в среднем до 90%, и чем выше коническая часть, тем эффективнее очистка газа от мелкодисперсной пыли.

Циклоны ЦР и УЦ с улиточным входом и скоростью газа на входе 14...18 м/с занимают промежуточное положение между циклонами типа ЦН и СК-ЦН.

Циклоны типа "К" применяются преимущественно при очистке выбросов от пыли, обладающей высокой парусностью (древесная, табачная пыль и др.), устанавливаются на нагнетательной стороне вентилятора, улавливают частицы размером до 10 мкм с эффективностью ниже 90%.

Циклоны типа "Ц" (Маркушева) имеют в выхлопной трубе лопастной сепаратор, который изменяет направление вращения потока. Не рекомендуется применять их для улавливания древесной пыли, так как она забивает лопатки сепараторов.

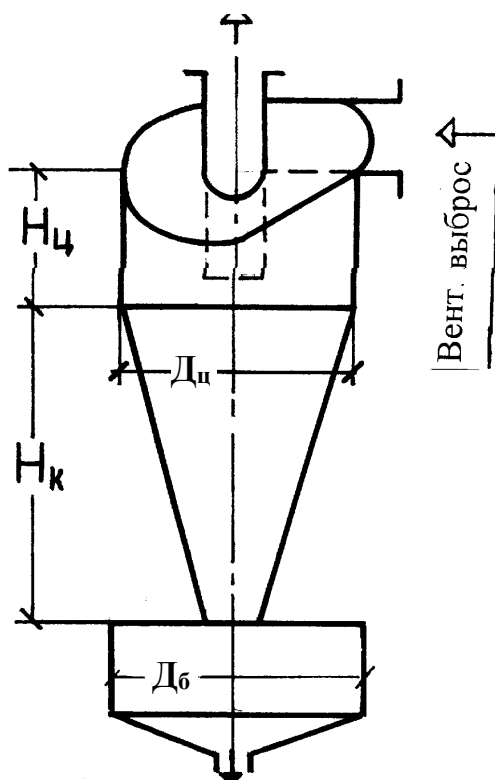


Рис.3.4. Циклон типа Ц

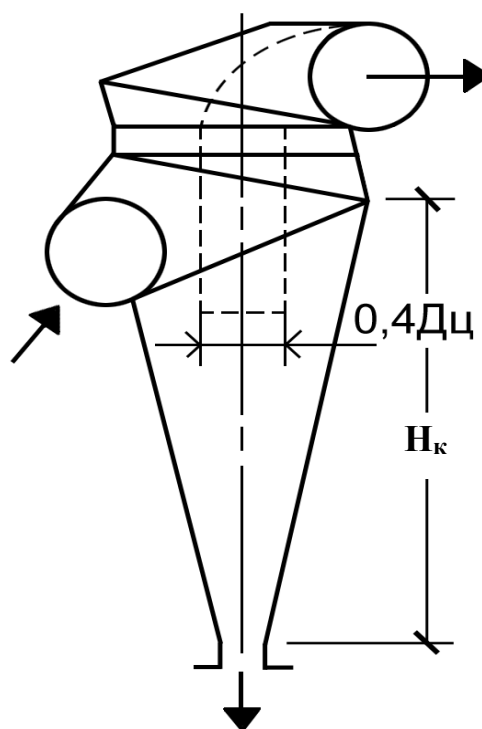


Рис.3.5. Циклон СИОТ

При работе циклонов типа "Ц" и "К" в группах существенно снижается общая эффективность очистки от мелкодисперсной пыли из-за различий в них давлений газа, изменяющихся в пределах 500...1000 Па.

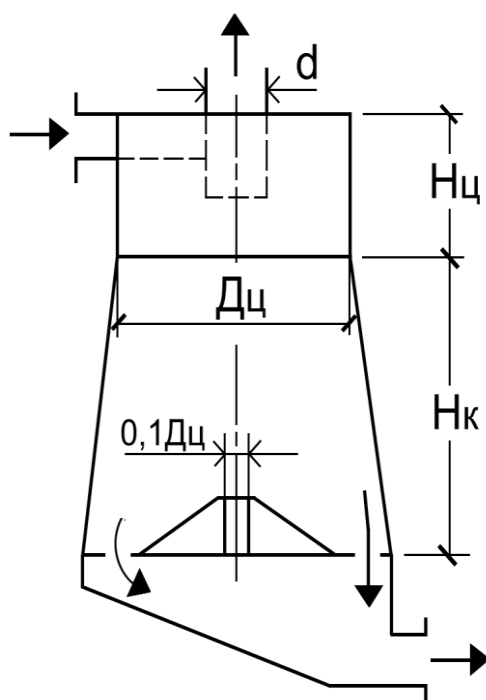


Рис. 3.6. Циклон ЦОК

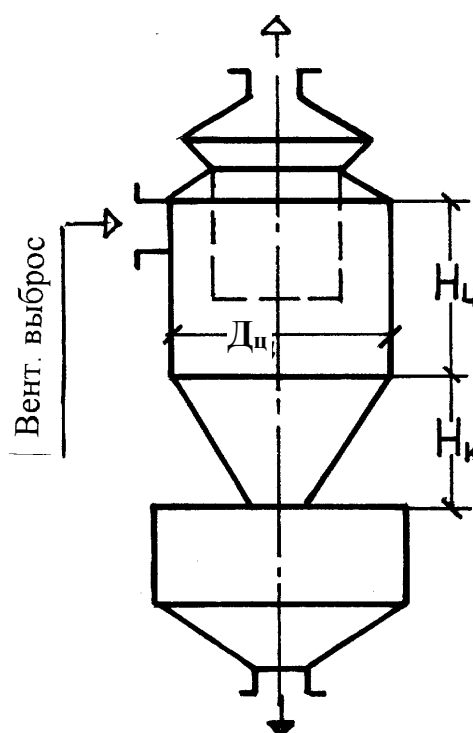


Рис.3.7. Циклон типа К (ОЭКДМ)

Циклоны СИОТ находят ограниченное применение, используются для средней очистки выбросов от малоабразивной, сухой, не слипающейся,

не волокнистой пыли; ряд деталей имеют сложную конфигурацию разверток, что усложняет их изготовление; они плохо компонуются в группы.

Циклоны ЦОК с обратным конусом используются для улавливания абразивной пыли, сажи и пыли, обладающей высокой твердостью. Наличие в выходном конусе внутреннего отверстия позволяет освободившемуся в бункере газу от пыли возвращаться в циклон и далее уходить в атмосферу.

Независимо от конструкции всех типов циклонов, чем выше скорость газа на входе в циклон и чем меньше его диаметр, тем с большей эффективностью улавливаются мелкие частицы пыли.

При требуемой эффективности очистки газа от мелкодисперсной пыли, превышающей достижимую циклоном эффективность, он часто используется в качестве первой ступени очистки перед аппаратом, эффективно улавливающую мелкодисперсную пыль.

Осаждение пыли в названных выше типах циклонов происходит при вращательно-поступательном движении газопылевого потока, а очищенный газ изменяет и направление движения.

Конструктивные и габаритные характеристики этих циклонов, кроме центробежно-инерционного пылеуловителя приведены в изданиях [5,10,25, 30, 40].

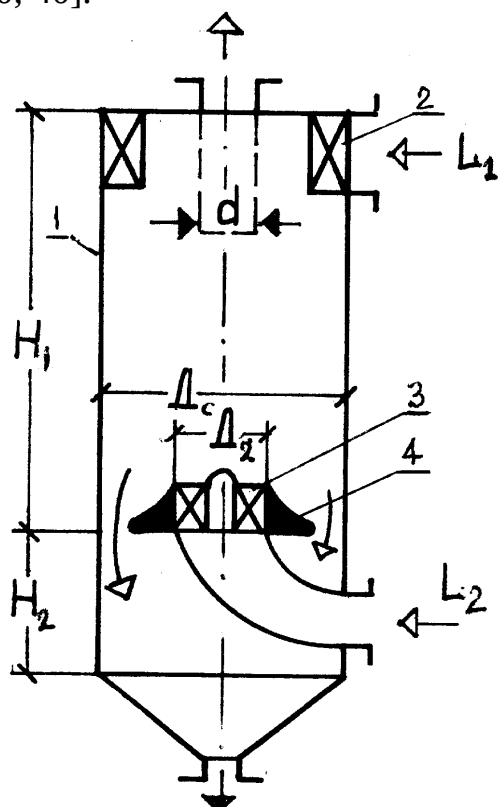


Рис.3.8. Пылеуловитель вихревой (ВЗП):

1- корпус, 2 – завихритель верхний, 3 – завихритель лопаточный нижний, 4 – шайба отбойная

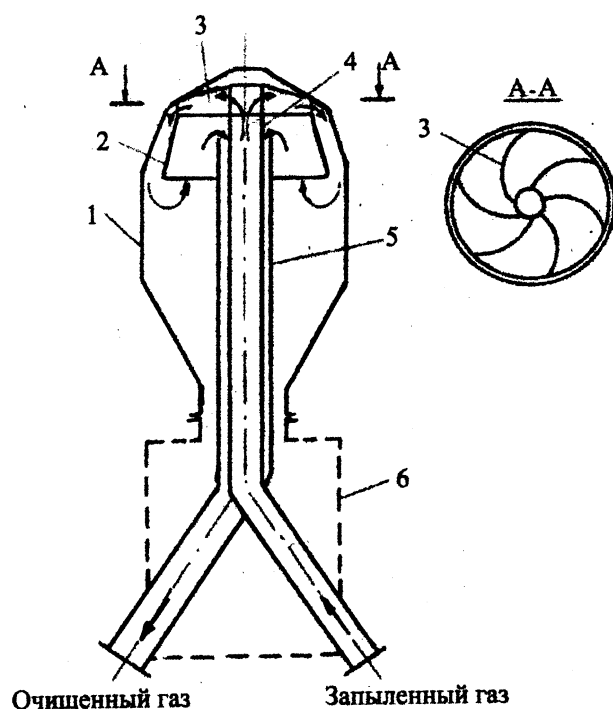


Рис.3.9. Центробежно-инерционный пылеуловитель:

1 – корпус, 2 – конус, 3 - лопаточный завихритель, 4 – воздуховод входной, 5 – воздуховод выпускной, 6 - бункер

Пылеуловитель со встречными закрученными потоками (ВЗП), основанный на очистке газа за счет совместного действия встречных закрученных

потоков; в нем наиболее эффективно очищается газ от мелкодисперсной пыли и осаждаются частицы размером до 10 мкм на 95%. Пылегазовый поток разделяется на основной - L_1 , который поступает через верхний завихритель, и дополнительный поток – через нижний завихритель - L_2 , выполненный в виде винта или розетки для усиления закручивания потока и отбрасывания мелкой пыли от центра к периферии аппарата. Опускающийся закрученный поток отводит частицы пыли в нижнюю часть аппарата.

Распределение расходов между основным и дополнительным потоками зависит от исходной концентрации пыли в воздухе, при высоких концентрациях расход газа L_2 снижается до 35% от общего расхода.

Значительное влияние на эффективность очистки газа от мелкодисперсной пыли оказывает соотношение между радиусами корпуса аппарата и выхлопной трубы. Определение наиболее рационального их соотношения приведено в подразделе 3.3.

Циклоны ВЗП могут иметь производительность по очищаемому воздуху 200...1500 м³/ч, гидравлическое сопротивление 2...3 кПа, эффективность очистки пыли диаметром частиц более 10 мкм составляет не менее 99%. При высокой производительности до 20000 м³/ч, то есть при большом внутреннем диаметре аппарата, эффективность очистки снижается до 93 %.

В центробежно-инерционном пылеуловителе степень улавливания мелкодисперсной пыли достигает 98 % за счет снижения вторичного уноса пыли. Это обеспечивается за счет применения лопаток с определенным профилем в лопаточном завихрителе, создания скорости газа на выходе из входного патрубка 15...20 м/с в отличие от обычных циклонов, где в зоне закручивания очищаемого потока скорость падает до 3...4 м/с, и применения экрана, препятствующего попаданию отскочивших от корпуса частиц пыли в поток очищенного газа. Оптимальное соотношение высоты экрана и диаметра корпуса равно 0,5 при высоте экрана до 175 мм. Степень очистки пыли в нем размером частиц менее 20 мкм в два раза выше, чем в циклоне ЦН-11.

Выходная концентрация пыли в очищенном газе зависит от величины её входной концентрации и количественный выход мелкодисперсной пыли определяется дисперсным составом исходной пыли.

При выборе циклона помимо достижимой эффективности очистки газа необходимо учитывать температуру, влажность, дисперсный состав пыли, плотность материала частиц, агрессивность среды.

При групповом или батарейном применении циклонов (рис.3.10) для очистки значительных по объему газов эффективность одиночных циклонов падает на 5...10 %. Количество циклонов при групповой их компоновке – не более 8, при батарейной – несколько десятков.

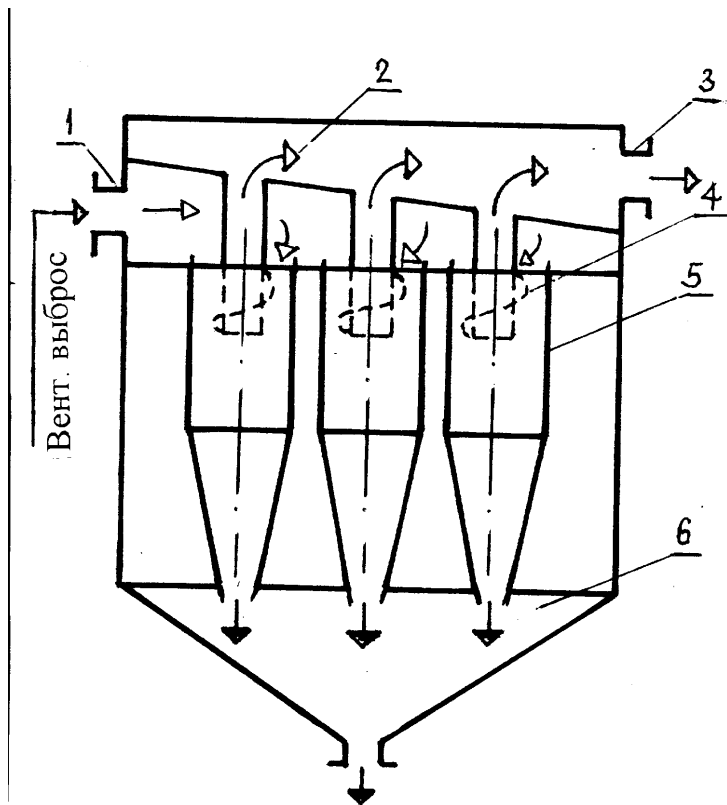


Рис.3.10. Групповые (батарейные) циклоны:

- 1 – входной патрубок,
- 2 – очищенный газ,
- 3 – выходной патрубок,
- 4 – завихритель газа,
- 5 – циклон,
- 6 – бункер

3.2. Расчет параметров циклона

Основными исходными данными, определяющими параметры и режим работы циклона, являются:

- количество пыли, поступающей на очистку M , г/с, равного $M = L \cdot c$, где L – расход вентиляционного выброса, $\text{м}^3/\text{с}$, c – концентрация пыли в вентиляционном выбросе, г/м³;
- требуемая эффективность очистки вентиляционных выбросов с учетом ранее определенной величины предельно допустимого выброса пыли (ПДВ) в соответствии с методикой ОНД-86 [17] по зависимости (1.8);
- дисперсный состав пыли, при отсутствии фактических данных допустимо использовать данные из близкого аналога, приведенного в табл. 3.2.

Используя данные табл.3.1 оптимальных значений скоростей газа в циклонах V_z , м/с, предварительно определяется диаметр циклона, м :

$$D_{\text{ц}} = \sqrt{\frac{1,27 \cdot L}{V_z}} \quad (3.1)$$

Таблица 3.1

Оптим- альная скорость	Тип циклона										
	ЦН- 11	ЦН- 15м	Ц Н- 2 4	СДК- ЦН- 34	СДК- ЦН- 33	СК- ЦН- 34	"К"	"Ц"	СИОТ	ЦОК	ВЗП
V_z , м/с	3,5	3,5	4,5	3,3	2	1,7	1,1	3,3	1,0	4,0	≤10

Таблица 3.1

Тип пыли	Состав пыли, % по массе при размере фракции, <u>мкм</u>					
	< 5	5...10	10...20	20...40	40...60	> 60
Горелой земли	3,4	4,0	17,4	21,8	8,4	45
Молотого угля	8,6	11,5	43,1	29,2	4,0	3,7
Чугуна	7,5	5,5	8,0	16,5	17,5	45
Стали	1,8	1,5	2,7	8,0	13	73
Сварочная	13	12	23	23	22	7,0
Известковая	52	18	18	9,0	3,0	-
Глиняная	43	35	7,5	6,5	5,0	4,0
Содовая	23	11,5	11,5	13	13	28
Песчаная	0,5	0,5	2,0	3,0	8,0	86
Стекольная	0,5	2,0	3,5	6,0	4,5	83,5
Кварцевая	15	6,5	20,7	11,8	11	35
Доломитовая	7,5	14	22	29	18,5	9,0
Меловая	8,4	12,5	15	54	7,4	2,7
Талька	57,4	10,2	14,5	16	1,9	-
Золы при сжигании угля	19	11	14	9	9	38
Золы при сжигании торфа	13	19	18	12	8	30
Атмосферного воздуха	70	20	7	2	1	-

По найденному значению диаметра циклона $D_{\text{ц}}$ определяются геометрические параметры принятого типа циклона в долях от $D_{\text{ц}}$, представленные в табл.3.3.

Размеры бункера для сбора пыли определяются его внутренним диаметром, равным для цилиндрических циклонов $1,5 D_{\text{ц}}$, для конических от $1,1$ до $1,2 D_{\text{ц}}$ при высоте цилиндрической части равной $0,25$ или $0,5 \text{ м}$.

По справочным данным (табл. П.1.3 и П.1.6) определяется плотность материала пыли $\rho_{\text{ч}}$, кг/м^3 , динамическая вязкость газа $\mu_{\text{г}}$, $\text{Па}\cdot\text{с}$, с учетом температуры газа, определяемой зависимостью (1.5).

Для рассчитанного диаметра цилиндрической части циклона по зависимости (3.1) принимается его значение из стандартного ряда: $0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,4; 3,0$.

Потери давления в циклоне определяются по зависимости, Па :

$$\Delta P = \xi \cdot \rho_{\text{г}} \cdot V^2 / 2. \quad (3.2)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления циклона равен

$$\xi = \xi_{500} \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2, \quad (3.2)$$

где ξ_{500} - коэффициент гидравлического сопротивления базового циклона

диаметром $D_{\text{ц}}^T = 500 \text{ мм}$ при скорости газа $V_2^T = 3 \text{ м/с}$; значения коэффициентов ξ_{500} представлены в табл.3.4.

Таблица 3.3

Параметр	Обозначение	Тип циклона								
		ЦН-11	ЦН-15	ЦН-15У	ЦН-24	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34, "УЦ"	ЦОК	СИОТ	типа "К"
1. Ширина вход – ного патрубка	b	0,2	0,2	0,2	0,2	0,26	0,21	0,25	0,23	0,19
2. Высота цилиндрической части	$H_{\text{ц}}$	2,1	2,26	1,51	2,11	0,54	0,5 - 0,3	2,0	-	0,71
3. Высота конической части	$H_{\text{к}}$	2,0	2,0	1,5	1,75	3,0	2,1-2,3	3,0	1,21	1,23
4. Диаметр выходной трубы	d_m	0,59	0,59	0,59	0,59	0,33	0,34	0,5	0,23	0,59
5. Угол наклона входного патрубка	α , град	11	15	15	24	-	-	0	0	0

Таблица 3.4

Коэф-фици-ент	Тип циклона									
	ЦН-11	ЦН-15У	ЦН-24	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34м, УЦ	"К"	"Ц"	СИОТ	ЦОК
ξ_{500}	250	150	70	550	1100	2000	1300	210	1400	75

При скорости газа, отличной от базовой более чем на 15 %, коэффициент ξ_{500} умножается на величину $(V_2 / V_2^T)^2$.

Значения коэффициентов k_1 представлены в табл.3.5

Таблица 3.5

Коэффици-ент	Тип циклона					
	ЦН-11 при $D_{\text{ц}} = 0,15 \dots 0,3 \text{ м}$	ЦН-11 при $D_{\text{ц}} \geq 0,5 \text{ м}$	ЦН-15, ЦН-24 при $D_{\text{ц}} = 0,15 \dots 0,3 \text{ м}$	ЦН-15, ЦН-24 при $D_{\text{ц}} = 0,5 \text{ м}$	СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34м	"К", "Ц", "УЦ", СИОТ, ЦОК

κ_1	0,95	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0
------------	------	-----	-----	-----	-----	-----

Значения коэффициентов κ_2 представлены в табл.3.6.

Таблица 3.6

Коэф- фици- ент	Тип циклона						
	ЦН-11, ЦН-15м, ЦН-24 при $C_{BX}=10..20$ $г/м^3$	ЦН-11, ЦН-15м, ЦН-24 при $C_{BX}=40..80$ $г/м^3$	ЦН-11, ЦН-15м, ЦН-24 при $C_{BX}=100..120$ $г/м^3$	СДК- ЦН- -33 при $C_{BX}=10..40$ $г/м^3$	СДК- ЦН- -33 при $C_{BX}=80..150$ $г/м^3$	СК-ЦН- -34, СК- -ЦН-34м при $C_{BX}=10..40$ $г/м^3$	"К", "Ц", "УЦ", СИОТ, ЦОК
κ_2	0,94	0,9	0,87	0,8	0,76	0,96	1,0

Параметрами, определяющими эффективность циклонов, являются: $d_{\eta 50}$ - размеры частиц пыли, улавливаемые на 50 %; $\lg \sigma_{\eta}$ – логарифм дисперсии частиц пыли, улавливаемых с данной эффективностью, и $\lg \sigma_{\chi}$ – логарифм стандартного отклонения частиц от среднего (медианного) значения. Величины $d_{\eta 50}$ и $\lg \sigma_{\eta}$ определены экспериментально и приведены в табл.3.7 при исходных данных: диаметре циклона $D_{\chi}^T = 0,6$ м, скорости газа в нем $V_{\epsilon}^T = 3,5$ м/с, плотности частиц пыли $\rho_{\chi}^T = 1930$ кг/м³, динамической вязкости газа $\mu_{\epsilon}^T = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с. Логарифм стандартного отклонения, равный

$$\lg \sigma_{\chi} = \lg d_{84,1} - \lg d_{50}, \quad (3.4)$$

определяется дисперсным составом пыли (см. рис.1.1), d_{50} представляет медианный (средний) размер частицы пыли. Указанные выше параметры полностью характеризуют дисперсный состав пыли и определяют параметр осаждения пыли x равный

$$x = \lg \left(\frac{d_{50}}{d_{\eta 50}} \right) : \sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta} + \lg^2 \sigma_{\chi}}, \quad (3.5)$$

где $d_{\eta 50}$ – средний диаметр частиц, улавливаемых на 50%, равный

$$d_{\eta 50} = d_{\eta 50}^T \sqrt{\frac{D_{\chi}^T \cdot \rho_{\chi}^T \cdot \mu_{\epsilon}^T \cdot V_{\epsilon}^T}{D_{\chi}^T \cdot \rho_{\chi}^T \cdot \mu_{\epsilon}^T \cdot V_{\epsilon}^T}}. \quad (3.6)$$

Таблица 3.7

Показатели дисперсии пыли	Тип циклона										
	ЦН-11	ЦН-15м	ЦН-24	СДК ЦН-33	СК- ЦН-34	СК- ЦН-34м	"К"	ВЗП	"Ц"	СИОТ	ЦОК
$d_{\eta 50}^T, мкм$	3,65	4,5	8,5	2,3	1,9	1,3	3,1	2,6	4,12	2,6	9,2

$\lg \sigma_n$	0,35	0,35	0,3	0,36	0,3	0,34	0,25	0,28	0,34	0,28	0,3
----------------	------	------	-----	------	-----	------	------	------	------	------	-----

По параметру x в табл. 2.1 находится соответствующее ему значение нормальной функции распределения $\Phi(x)$ как интеграла вероятности, представляющее собой полный коэффициент очистки газа, то есть

$$\Phi(x) \approx \eta_{\text{общ.}} \quad (3.7)$$

Менее точно, но при определении наиболее рационального варианта среди сравниваемых, определяются характеристики циклонов с использованием номограмм, представленных на рис. 3.11 – 3.14.

На рис.3.11 приведены данные фракционной эффективности базового циклона диаметром $D_{\text{ц}}^T = 300$ мм при плотности частиц $\rho_{\text{ч}}^T = 2670$ кг/м³, скорости газа в циклоне $V_2 = 3,5$ м/с, динамической вязкости газа $\mu_2^T = 18 \cdot 10^{-6}$ Па·с при температуре 20 °С. Значение σ_n характеризует отношение $d_{50} / d_{15,9}$, то есть дисперсный состав пыли. По найденным значениям d_{50} и σ_n при знании исходного состава пыли и пересчете значения d_{50} на фактические параметры циклона по зависимости (3.6) определяется эффективность циклона.

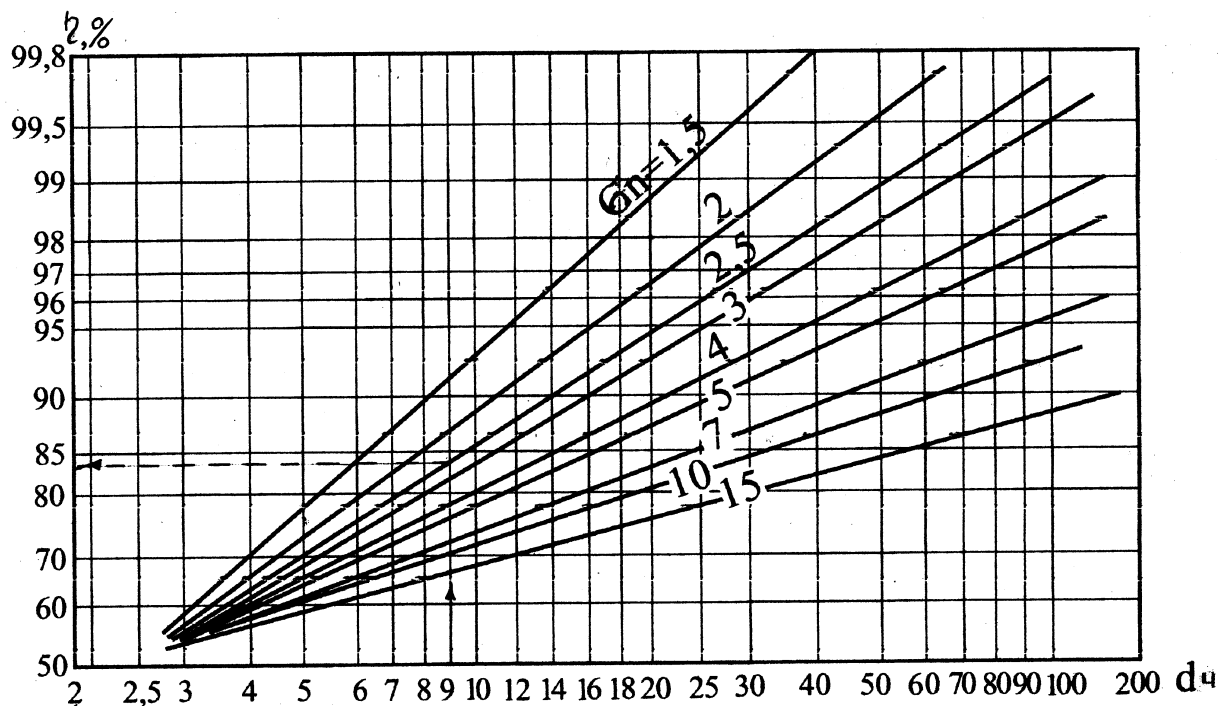


Рис.3.11. Фракционная эффективность базового циклона ЦН-11

Для иных значений диаметра циклона $D_{\text{ц}}$, плотности материала частиц $\rho_{\text{ч}}$, и скорости газового потока V_2 медианное значение d_{50} и дисперсия σ_n определяются при построении графической зависимости распределения частиц пыли по полным проходам (см. рис.1.1). Значение дисперсии характеризует фракционный состав осаждаемой пыли и по графикам на рис.3.11 устанавливается, какая фракция пыли может оказаться определяющей при санитарно-гигиенической оценке окружающей среды и потребуется ли использование второй ступени очистки для ее осаждения.

На рис. 3.12 представлена номограмма, по которой при рассчитанном по зависимости (3.1) диаметре циклона определяется размер частиц, улавливаемых на 50 % для соответствующего типа циклона.

Гидравлическое сопротивление циклона определяется по зависимостям (3.2) и (3.3), динамическая вязкость и плотность газа при соответствующей температуре определяется по зависимостям (1.4) и (1.5).

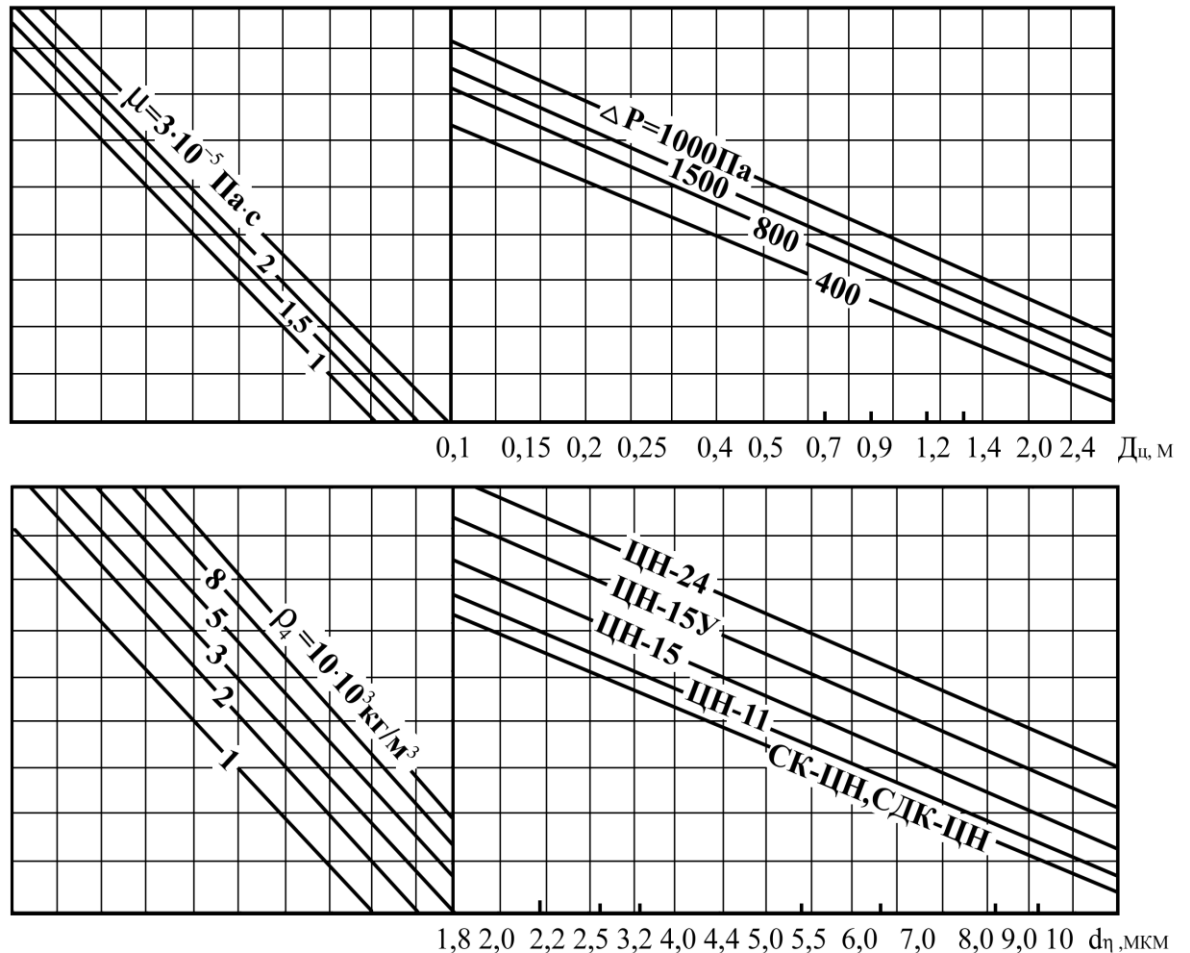


Рис.3.12. Номограмма для определения размеров частиц, улавливаемых в циклонах на 50 % - $d_{\eta 50}$. [5]

Из представленных на рис.3.12 данных следует, что при одинаковом диаметре циклона чем больше его гидравлическое сопротивление, то есть чем больше скорость газа на входе в циклон, тем мельче будут частицы, улавливаемые с эффективностью 50 %.

Уменьшение диаметра циклона при одинаковом расходе очищаемого газа в более значительной степени будет способствовать осаждению мелкодисперсной пыли, так как при этом увеличится скорость газа и гидравлическое сопротивление циклона, однако при этом увеличится потребляемая вентилятором мощность привода.

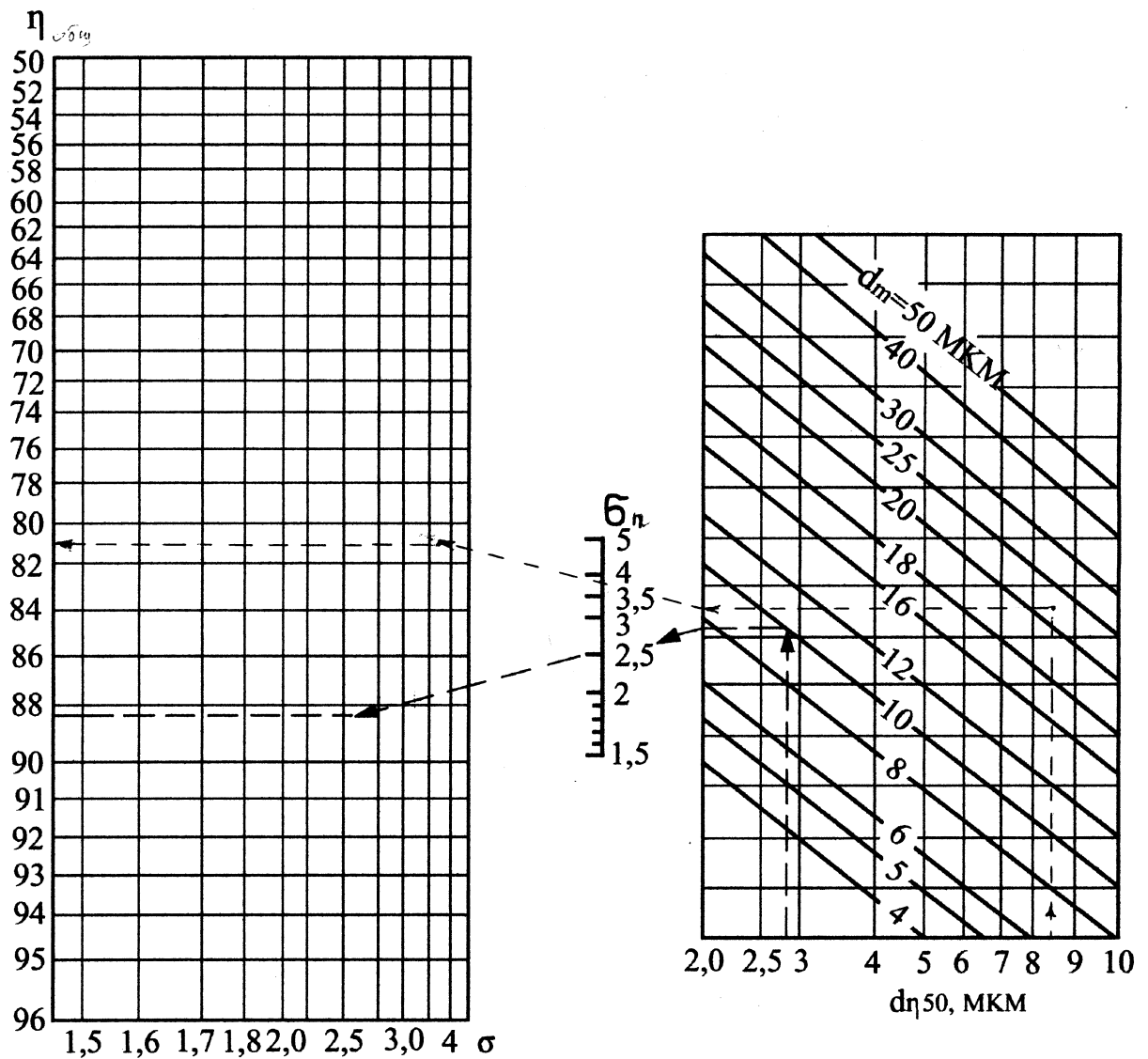


Рис.3.13. Номограмма для определения общей эффективности циклона в зависимости от показателя улавливаемых частиц пыли на 50 %

Номограмма на рис. 3.13 позволяет по размерам частиц, улавливаемых в циклоне на 50% - $d_{\eta=50}$, и медианному диаметру d_m определять ожидаемую полную эффективность улавливания. Такой подход определения эффективности очистки выбросов от пыли экологически верен при условии установления с использованием номограммы на рис.3.12 допустимости степени улавливания на 50 % данной мелкодисперсной пыли с учетом класса ее опасности, сведения о которых приведены в табл.П.1.1.

Зависимость (3.6) позволяет по графикам на рис.3.12 и рис.3.13 определить параметры для иного диаметра циклона при знании медианного распределения частиц d_{50} .

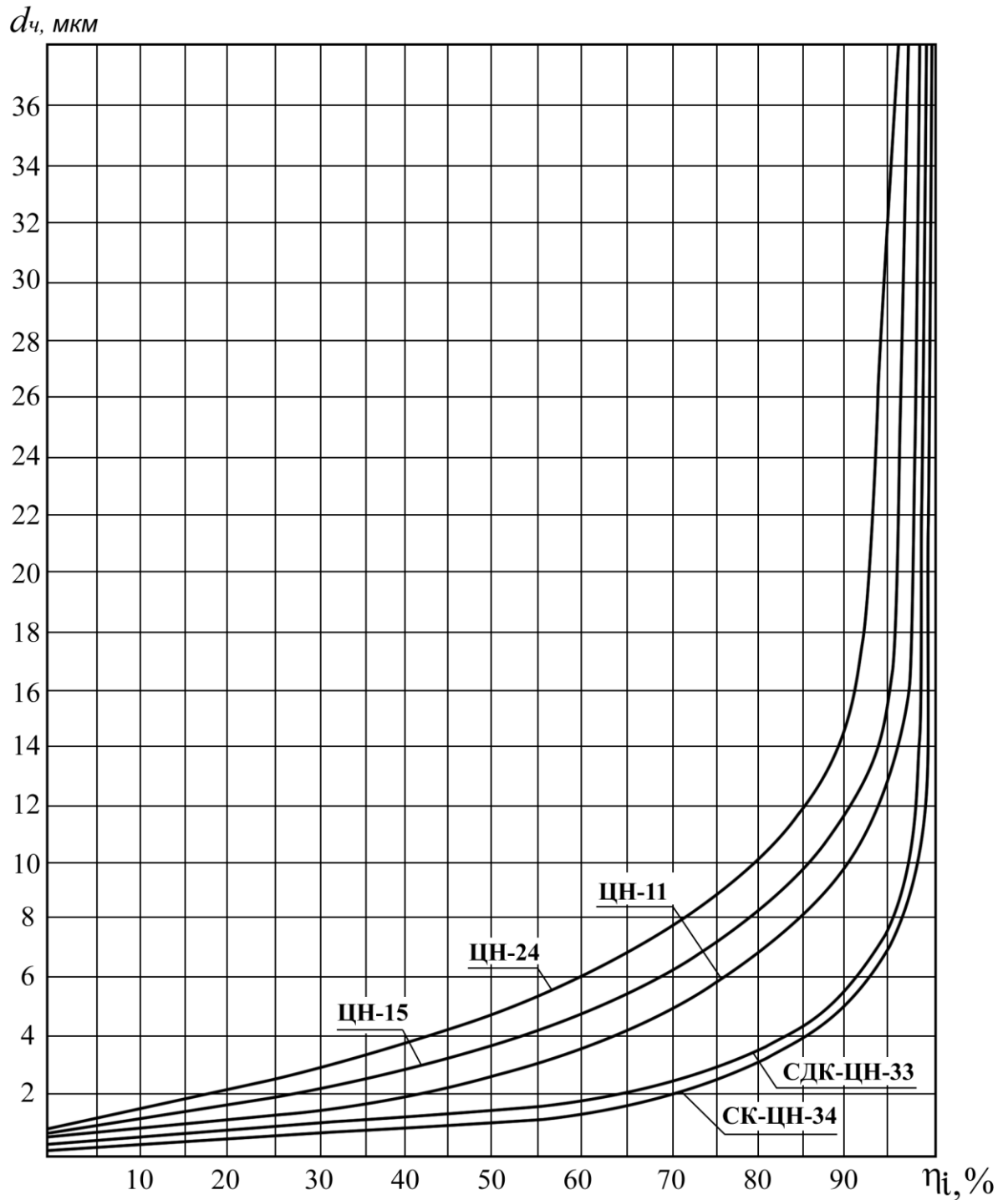


Рис.3.14. Зависимость определения парциальной эффективности улавливания пыли в базовом циклоне $D_{ц}^т = 300$ мм

На рис.3.14 приведены зависимости парциальной эффективности улавливания пыли с плотностью частиц $\rho_{ч} = 2670 \text{ кг/м}^3$ в базовом циклоне диаметром $D_{ц} = 300$ мм при скоростях газа в циклоне, представленной в табл. 3.2.

Номограмма позволяет определить парциальную или фракционную эффективность улавливания пыли с последующим определением по зависимости (2.15) общей эффективности $\eta_{общ}$, предварительно выполнив приведение размера частиц пыли к параметрам циклона по зависимости (3.6).

).

В табл.3.8 приведены сравнительные показатели циклонов НИИОГаза диаметром 300 мм при эффективности $\eta=86\%$ для $d_{50} = 13$ мкм [1].

Таблица 3.8

Показатели	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-15У	ЦН-24	СК-ЦН-33	СК-ЦН-34
Скорость газа, м/с	2,7	3,6	4,4	4,5	1,6	1,45
Сопротивление, Па	1130	1300	2100	970	1020	1500
Относительный расход энергии на очистку 1000 м ³ газа	1	1,15	1,9	0,86	0,90	1,35
Относительные затраты металла на очистку 1000 м ³ газа	1	0,92	0,95	0,73	1,36	1,40
Относительный абразивный износ	1	0,92	1,70	0,4	0,09	0,095

Примечание. Для циклона ЦН-24 показатели определены для $\eta = 78\%$.

3.3. Особенности расчета параметров аппарата ВЗП

Диаметр аппарата определяется по зависимости (3.1).

Высота зоны осаждения пыли в аппарате принимается равной $H_{p.з.} = 3 D_u$.

Приняв отношения угловой скорости первичного (нижнего) закрученного потока к верхнему потоку $\gamma = \frac{\omega_1}{\omega_2} = 2$ и отношение площади проходного сечения патрубков верхнего и нижнего потоков $\alpha = \frac{F_2}{F_1} = 2$ (изменяется в пределах 2...4), определяют диаметр ввода нижнего потока:

$$D_1 = \sqrt{\frac{1}{\gamma(1+\alpha)}} \cdot D_u, \quad (3.9)$$

диаметр патрубка вывода очищенного газа:

$$d_e = \sqrt{1 - \frac{2\gamma}{1+\alpha}} \cdot D_u, \quad (3.10)$$

площади ввода нижнего и верхнего потоков газа:

$$F_1 = \frac{3,14 \cdot D_1^2}{4}, \quad (3.11)$$

$$F_2 = \frac{3,14(D_u^2 - d_e^2)}{4}. \quad (3.12)$$

Определяется фактическое значение величины $\alpha_\phi = \frac{F_2}{F_1}$.

Диаметр отбойной (нижней) шайбы принимается равным $D_{ш} = 0,9 D_u$, диаметр выходящего потока - $d_e = 0,1 D_u$.

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

Параметр интенсивности крутки потоков равен

$$n = \frac{8 \cdot D_1 \cdot (D_1^3 - d_g^3)}{3\pi \cdot (D_1^2 - d_g^2)} \cdot \beta. \quad (3.13)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления нижнего потока

$$\zeta_1 = 5,5 + n + [260 + 4,8 \cdot (n - 3,8)] \cdot \left(\frac{L_2}{L} - 0,3 \right)^3. \quad (3.14)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления верхнего потока

$$\zeta_2 = 266 + 1,58 \cdot \left(0,6 - \frac{L_2}{L} \right)^3. \quad (3.15)$$

Общий коэффициент гидравлического сопротивления

$$\zeta = \zeta_1 \cdot \left(1 - \frac{L_2}{L} \right)^3 \cdot \left(\frac{F}{F_1} \right) + \zeta_2 \cdot \left(\frac{L_2}{L} \right)^3 \cdot \left(\frac{F}{F_2} \right), \quad (3.16)$$

где F – площадь свободного сечения аппарата, L_2 – расход газа через нижний завихритель газового потока.

Гидравлическое сопротивление аппарата, $Па$:

$$\Delta P = \zeta \cdot \frac{\rho_z \cdot V^2}{2}. \quad (3.17)$$

Предельный размер улавливаемых частиц пыли, $мкм$:

$$d_q = \sqrt{\frac{18 \cdot V \cdot \mu_z \cdot \lg \sqrt{\frac{F}{F_1}}}{H_o \cdot (\rho_q - \rho_z) \cdot \omega^2}}, \quad (3.18)$$

где $\omega = \frac{2 \cdot L_1}{F_1 \cdot D_1}$ – угловая скорость нижнего потока, D_1 – диаметр нижнего завихрителя.

Нанеся размер улавливаемых частиц пыли на график зависимости $\eta = f(d_q)$ (рис.3.14), определяют парциальную эффективность улавливания частиц пыли, По зависимости (2.15) определяют общую эффективность, которая должна быть не меньше требуемой эффективности очистки для обеспечения предельно допустимых выбросов (ПДВ), рассчитываемых по зависимости (1.6) или (1.7).

По данным [29] величина предельного улавливаемого зерна пыли при определении границы R_1^* разделения циркуляционного и ротационного движения газопылевого потока более достоверно определяется по зависимости

$$d_q^{np} = \sqrt{\frac{9 \cdot U_z \cdot [(R_2)^4 - (R_1^*)^4]}{2 \cdot H_o \cdot (\rho_q - \rho_z) \cdot C^2}}, \quad (3.19)$$

где U_z – скорость нисходящего потока, равная

$$U_z = \frac{L_0 - L_{блхл}}{\pi \cdot [(R_2)^2 - (R_1^*)^2]}, \quad (3.20)$$

$$L_{\text{вхл}} = \frac{H_0 \cdot C}{2} . \quad (3.21)$$

Для определения постоянной величины C , соответствующей цилиндру стока пыли радиусом R_1^* , введены функции относительного радиуса $r_o = R_1^*/R_2$

$$f_1(r_o) = \frac{1 - \frac{2}{3} \cdot r_o}{0,5 - \ln r_o} = \frac{M_0}{L_0 \cdot R_2} , \quad (3.22)$$

$$f_2(r_o) = \frac{1}{0,5 - \ln r_o} = \frac{C \cdot H_0}{L_0} , \quad (3.23)$$

$$C = \frac{L_0}{H_0} \cdot f_2(r_o) , \quad (3.24)$$

где $M_0 = L_1 \cdot R_1^* + L_2 \cdot R_2$ - момент количества движений, L_1, L_2 – расходы запыленных газов в верхний и нижний завихритель соответственно. Значения функций (3.22) и (3.23) при различных значениях r_o представлены в табл.3.9

Таблица 3.9

$\ddot{e}$	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
$f_1(r_o)$	0,67	0,66	0,645	0,623	0,594	0,56	0,52	0,47	0,41	0,33
$f_2(r_o)$	2	1,65	1,38	1,167	0,99	0,84	0,71	0,59	0,47	0,37

Распределение расходов L_1 и L_2 зависит от исходной концентрации пыли в воздухе, поступающего на очистку. При высокой концентрации вторичный газ верхней зоны аппарата L_1 составляет 25...35 % от общего расхода, при малых концентрациях его расход доходит до 60 %.

Зависимость (3.19) позволяет установить геометрические размеры аппарата ВЗП для определения предельного размера частиц улавливаемой мелкодисперсной пыли, являющейся наиболее опасной для здоровья человека.

В примере 3.1 приведены результаты определения наиболее рациональных параметров циклона методами, изложенными выше.

Пример 3.1. Определить наиболее рациональные параметры циклона для очистки вентиляционных выбросов от пыли при исходных данных: $L = 18330 \text{ м}^3/\text{ч}$, $V_z = 3,3 \text{ м/с}$, $\mu_r = 17 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\rho_z = 1,25 \text{ кг/м}^3$, $\rho_q = 1450 \text{ кг/м}^3$, дисперсный состав пыли с содержанием фракций δ , %, и их значений по полным проходам $D(\eta)$, % приведен ниже

d_q , мкм	≤ 5	5...10	10...20	20...40	40...60	>60
δ , % мас.	10	16	24	22	12	16
$D(\eta)$, %	10	20	50	72	84	100

Для обеспечения требуемой величины предельно допустимых пылевых выбросов эффективность очистки выбросов от пыли, содержащей менее 70 % окислов кремния, должна составлять 80 %.

Решение.

Вариант 1 Принимаем циклон ЦН-24. Из табл. 3.2 скорость газа равна $V_2 = 4,5 \text{ м/с}$, из табл. 3.7 принимаем размер частиц пыли, улавливаемых на 50 %, - $d_{\eta 50} = 8,5 \text{ мкм}$ и среднеквадратичное отклонение дисперсии пыли, улавливаемой на 50 %, - $\lg \sigma_{\eta} = 0,31$ для стандартного циклона с параметрами $D_{\text{ц}}^T = 0,6 \text{ м}$, $\rho_{\text{ч}}^T = 1930 \text{ кг/м}^3$, $\mu_{\text{г}}^T = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $V_{\text{г}}^T = 3,5 \text{ м/с}$.

Определяем диаметр циклона $D_{\text{ц}} = \sqrt{\frac{1,27 \cdot 18330}{3600 \cdot 4,5}} = 1,2 \text{ м}$.

По зависимости (3.6) определяем для данных параметров циклона значение $d_{\eta 50} = 8,5 \sqrt{\frac{1,2 \cdot 1930 \cdot 17 \cdot 10^{-6} \cdot 3,5}{0,6 \cdot 1450 \cdot 22,2 \cdot 10^{-6} \cdot 4,5}} = 8,5 \cdot 1,26 = 10,7 \text{ мкм}$.

Рассчитываем параметр осаждения пыли x по зависимости (3.5), определив медианный диаметр частиц пыли d_{50} и дисперсию $\sigma_{\text{ч}} = d_{84,1} / d_{50}$ из интегральной зависимости дисперсности пыли (см. рис.1.1), $d_{50} = 22 \text{ мкм}$, $\sigma_{\text{ч}} = 85/22 = 3,86$

$$x = \frac{\lg \frac{22}{10,7}}{\sqrt{\lg^2 3,86 + 0,31^2}} = \frac{\lg 2,05}{\sqrt{0,344 + 0,096}} = \frac{0,312}{0,66} = 0,47. \text{ По параметру } x \text{ в табл.2.1}$$

находится интеграл вероятности равный $\Phi(x) = 0,68$, выражающий полный коэффициент очистки газа в долях, тогда $\eta_{\text{общ}} = 68\%$.

Гидравлическое сопротивление с использованием данных табл.3.4 –3.6 равно $\Delta P = 70 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 1,25 \cdot 4,5^2 / 2 = 320 \text{ Па}$.

Используя данные табл.3.3, высота цилиндрической части циклона равна $h = 2,11 \times 1,2 = 2,5 \text{ м}$, высота конической части - $h_{\text{к}} = 1,75 \times 1,2 = 2,1 \text{ м}$, общая высота циклона составит значение $H_o = 2,5 + 2,1 = 4,6 \text{ м}$.

Вариант 2. Принимаем циклон ЦН-11. Из таблицы 3.7 находим $d_{\eta 50}^T = 3,65 \text{ мкм}$, $\lg \sigma_{\eta} = 0,352$.

Определяем размер частиц пыли, улавливаемых на 50 %, для представленных исходных данных задачи $d_{\eta 50} = 3,65 \cdot 1,26 = 4,6 \text{ мкм}$.

Определяем параметр осаждения пыли x

$$x = \frac{\lg \frac{22}{4,6}}{\sqrt{\lg^2 3,86 + 0,352^2}} = \frac{0,68}{\sqrt{0,468}} = 0,994.$$

Из табл.2.1 находим значение $\Phi(x) = 0,84$, тогда общая эффективность очистки составит $\eta_{\text{общ}} = 84\%$.

Следовательно, в циклоне ЦН-11 будет очищаться пыль с медианным размером частиц пыли $d_{50} = 22 \text{ мкм}$ лучше, чем в циклоне ЦН-24, на 19 %.

Гидравлическое сопротивление циклона с использованием данных табл.3.4 – 3.6 равно $\Delta P = 250 \cdot 0,95 \cdot 0,94 \cdot 1,25 \cdot 4,5^2 / 2 = 2260 \text{ Па}$.

Из данных табл.3.3 следует, что высота цилиндрической части циклона будет равна $2,1 \cdot 1,2 = 2,52 \text{ м}$, высота конической части $2 \cdot 1,2 = 2,4 \text{ м}$ и общая высота циклона будет равна $H_o = 4,92 \text{ м}$.

Эффективность циклона ЦН-11 на 19 % выше, чем циклона ЦН-24, и размер частиц, улавливаемых на 50 %, будет в 2,3 раза меньше. Однако потребляемая мощность привода вентилятора на преодоление гидравлического сопротивления увеличится в 7 раз, общая высота его будет на 6,5 % больше. Выбор наиболее рационального решения зависит от класса вредности пылевых выбросов и требуемой степени их очистки. Так как требуется степень очистки 80 %, то необходимо использовать циклон ЦН-11.

Пример 3.2. Определить достаточность степени очистки в батарейном циклоне газопылевых выбросов с расходом $10000 \text{ м}^3/\text{ч}$ при температуре газа $t_2 = 10^\circ\text{C}$. Начальное содержание пыли в газе $c_n = 10 \text{ г}/\text{м}^3$ с плотностью материала частиц $\rho_{\text{ч}} = 2500 \text{ кг}/\text{м}^3$, плотность газа $\rho_{\text{г}} = 1,25 \text{ кг}/\text{м}^3$, динамическая вязкость газа $\mu_{\text{г}} = 17 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$, требуется общая степень очистки $\eta_o = 90 \%$.

Дисперсный состав пыли:

$d_{\text{ч}}, \text{ мкм}$	0...5	5...10	10...20	20...40	40...60	>60
$\delta, \%$	10	20	24	22	12	16

Решение.

В качестве очистного аппарата принимается циклон ЦН=11.

Для достижения требуемой степени очистки оптимальное значение скорости газа в одном циклоне (см. табл.3.2) равно $V_{\text{г}} = 3,5 \text{ м}/\text{с}$.

Принимается диаметр циклона $D_{\text{ц}} = 0,3 \text{ м}$.

Расход газа через один циклон равен $L_{\text{г}} = 0,785 \cdot (0,3)^2 \cdot 3,5 = 0,246 \text{ м}^3/\text{с}$.

Количество циклонов в батарее $n = 10000/3600 \cdot 0,246 = 11,3$ шт. Принимается 12 шт. циклонов.

Уточняется расход газа через циклон $L_{\text{г}} = 10000/3600 \cdot 12 = 0,231 \text{ м}^3/\text{с}$ и скорость газа в циклоне при диаметре $D_{\text{ц}} = 0,3 \text{ м}$ будет равна $V_{\text{г}} = 0,231/0,785 \cdot 0,3^2 = 3,27 \text{ м}/\text{с}$.

По табл.3.3 определяются основные геометрические размеры циклона: высота цилиндрической части $h_{\text{ц}} = 2,1 \cdot 0,3 = 0,63 \text{ м}$, конической части $h_{\text{к}} = 2 \cdot 0,3 = 0,6 \text{ м}$, общая высота $H_o = 1,23 \text{ м}$.

Используя данные табл.3.4 и табл.3.5, определяется коэффициент гидравлического сопротивления циклона $\xi = 250 \cdot 0,95 \cdot 0,94 = 223$. Гидравлическое сопротивление циклона составит $\Delta P = 223 \cdot 1,25 \cdot 10,7/2 = 1490 \text{ Па}$.

Дисперсный состав пыли аналогичен составу пыли, указанному в примере 3.1, поэтому для него $d_{50} = 22 \text{ мкм}$ и $\sigma_{\text{ч}} = 3,86$.

Из данных табл. 3.7 определяется для циклона ЦН-11 диаметром $D_{\text{ц}}^T = 0,6 \text{ м}$ значения $d_{\eta 50}^T = 3,65 \text{ мкм}$ и $\lg \sigma_{\eta} = 0,352$ и по зависимости (3.6) определяется средний диаметр частиц, улавливаемых на 50% для циклона диаметром $D_{\text{ц}} = 0,3 \text{ м}$

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\frac{D_{\text{ц}} \cdot \rho_{\text{г}}^T \cdot V_{\text{г}}^T \cdot \mu_{\text{г}}}{D_{\text{ц}}^T \cdot \rho_{\text{г}} \cdot V_{\text{г}} \cdot \mu_{\text{г}}^T}} = 3,65 \sqrt{\frac{0,3 \cdot 1930 \cdot 3,5 \cdot 17 \cdot 10^{-6}}{0,6 \cdot 2500 \cdot 3,5 \cdot 22,2 \cdot 10^{-6}}} = 2,0 \text{ мкм}.$$

Определяется параметр осаждения пыли по зависимости (3.5)

$$x=(d_{50}/d_{\eta 50}): \sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta} + \lg^2 \sigma_p} = (\lg 22/2,0):0,684= 1,52. \sqrt{0,352^2 + \lg^2 3} = 1,04:$$

Параметр $\Phi(x)$, выражающий общую эффективность очистки вентиляционных выбросов от пыли, определяется по табл.2.1 и равен $\Phi(x)= 0,938$.

Следовательно, общая эффективность очистки выбросов от пыли заданного фракционного состава одиночного циклона составит 93,8 %. С учетом неравномерности очистки выбросов в циклонах общую эффективность очистки пыли в батарейном циклоне необходимо снизить на 5...10 %, при этом общая эффективность составит $\eta_o = 85...89 \%$.

Для достижения требуемой степени очистки выбросов следует применить двухступенчатую очистку, установив перед циклонами инерционный, гравитационный или жалюзийный пылеуловитель.

Эффективность дополнительной ступени очистки должна составлять не более $\eta_2 = (\eta_o - \eta_1)I) : - \eta_1) = (0,9 - 0,85) :)1 - 0,85(= 0,33$.

Из рассмотренных примеров в разделе 2 следует, что пылеосадительные камеры не обеспечивают требуемую эффективность очистки газа с размерами частиц до $d_{\eta 50} = 2,0$ мкм, поэтому в качестве второй ступени предпочтительней принять жалюзийный пылеуловитель с циклоном ЦН-11, отсасывающий сконцентрированную пыль из центральной части жалюзийного пылеуловителя, эффективность которого при отсосе 10 % газопылевого потока составляет не менее 70 %. Вторым направлением достижения столь высокой степени очистки пылевых выбросов является уменьшение диаметра циклона до нестандартного размера $D_{\text{ц}} = 0,25$ м. В этом случае количество циклонов в батарее увеличится с 12 до 16 шт., размер частиц пыли, улавливаемых на 50%, будет равен $d_{\eta 50} = 2,0 \sqrt{0,25/0,3} = 1,82$ мкм, параметр осаждения равен

$x = \lg (22/1,82): 0,684 = 1,582$. Этому значению соответствует параметр $\Phi(x) = 0,944$ и с учетом неравномерности работы всех циклонов в батарее общая эффективность будет соответствовать требуемой.

Вторым направлением достижения требуемой эффективности является увеличение скорости газа в цилиндрической части циклонов в 1,2 раза при диаметре циклона $D_{\text{ц}} = 0,3$ м, при этом произойдет увеличение гидравлического сопротивления циклона на 44 % и составит 2200 Па.

3.4. Расчет параметров центробежно-инерционного пылеуловителя (ПЦИ)

Расчет параметров выполняется с учетом полученных опытных данных, поскольку установить динамику осаждения мелкодисперсной пыли при сложной траектории движения частиц пыли в аппарате, представленном на рис.3.9, возможно на базе выполнения значительного объема экспериментов [36].

Основными конструктивно – технологическими параметрами аппарата являются:

- диаметр входного патрубка $d_{\text{вх}}$ в лопаточный завихритель;
- диаметр патрубка выхода очищенного газа $d_{\text{вых}}$;

- выходной диаметр лопаточного завихрителя потока d_3 , высота лопаток и их количество;
- высота конуса – экрана $h_э$;
- гидравлическое сопротивление аппарата;
- эффективность очистки пылевых выбросов для различных режимов их подачи.

На рис.3.15 представлены зависимости степени очистки газопылевого потока от скорости газа во входном патрубке для пыли с различными характеристиками. Из графиков следует, что наиболее рациональными скоростями газа являются скорости в диапазоне 15...22 м/с. За счет входа газа в завихритель с лопатками, обеспечивающими плавную закрутку потока, достигается его высокая скорость и, как следствие, повышенная центробежная сила по сравнению с центробежной силой в циклоне типа ЦН.

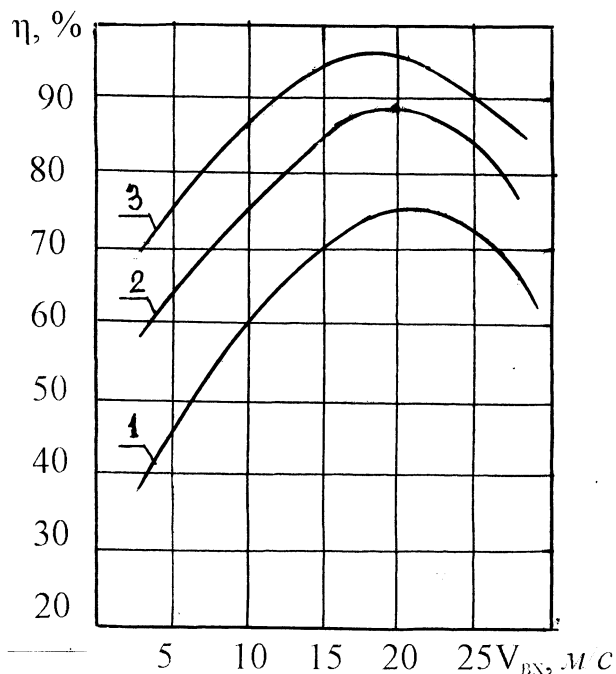


Рис.3.15. Зависимость степени очистки газа от скорости газа на входе в аппарат:
1- пыль белой сажи, 2 - пыль моющего порошка, 3 – меловая пыль

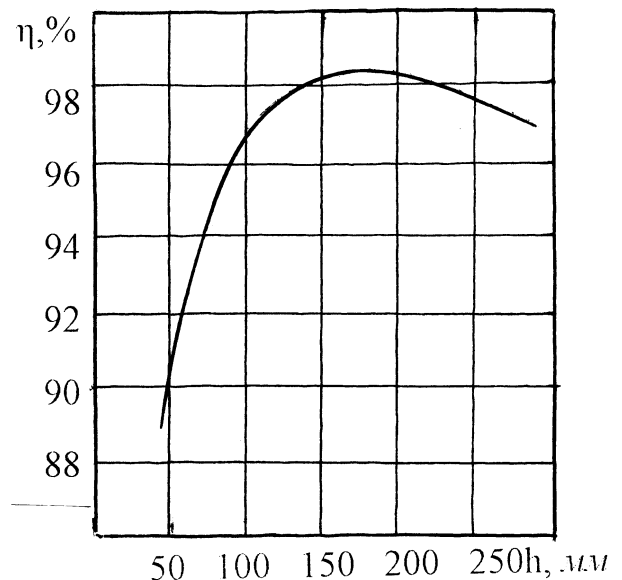


Рис. 3.16. Зависимость степени очистки газа от высоты конуса-экрана для ПЦИ диаметром корпуса $D_ц = 0,35 \text{ м}$

Внутренний диаметр входного патрубка определяется при известном расходе газа L , $\text{м}^3/\text{с}$, по зависимости:

$$d_{вх} = 1,127 \sqrt{\frac{L}{V_{вх}}} \quad (3.25)$$

Диаметр выходного патрубка определяется при назначении скорости выхода очищенного газа $V_{вых} = 5...10 \text{ м/с}$:

$$d_{вых} = \sqrt{1,27 \cdot L \left(\frac{1}{V_{вых}} - \frac{1}{V_{вх}} \right)} \quad (3.26)$$

На рис.3.16 представлена экспериментально установленная зависимость эффективности осаждения пыли от высоты конуса-экрана, из которой следует, что максимальная эффективность достигается при отношении высоты к диаметру корпуса $h / D_{\text{ц}} = 0,5$.

В качестве завихрителя потока на выходе из входного патрубка может быть принято профилированное лопаточное устройство, схема которого представлено на рис.3.17

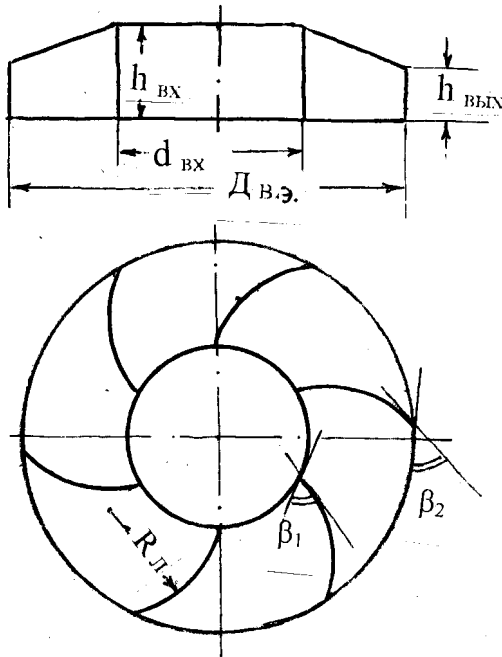


Рис.3.17. Завихритель потока:

$R_{\text{л}}$ – радиус дуги лопатки,

β_1 – входной угол лопатки,

β_2 – выходной угол лопатки,

$h_{\text{вх}}$ – входная высота лопатки,

$h_{\text{вых}}$ – выходная высота лопатки,

$D_{\text{в.э.}}$ – выходной диаметр
закручивателя потока,

$d_{\text{вх}}$ – диаметр входного патрубка

Для плавного течения закручиваемого потока применяют листовые криволинейные лопатки, у которых $\beta_1 = \beta_2 = \beta = 45 \dots 60^\circ$, длина дуги которых равна

$$l = \frac{0,5(D_{\text{в.э.}} - d_{\text{вх}})}{\sin \beta} \quad (3.27)$$

Радиус дуги лопатки определяется по зависимости

$$R_{\text{л}} = \frac{D_{\text{в.э.}}^2 - d_{\text{вх}}^2}{4 \cos \beta (D_{\text{в.э.}} - d_{\text{вх}})} \quad (3.28)$$

Число лопаток определяется по зависимости

$$n_{\text{л}} = 3,14 \cdot d_{\text{вх}} \cdot \sin \beta \cdot V_{\text{вх}} \cdot h_{\text{сп}} / L \quad (3.29)$$

Высота лопатки $h_{\text{вх}}$ при относительно малой ее ширине равна

$$h_{\text{вх}} = \frac{L}{3,14 \cdot d_{\text{вх}} \cdot V_{\text{вх}}} \quad (3.30)$$

По аналогии с циклонами типа ЦН, где условная скорость газа в свободном сечении аппарата $V_c = 3,5 \dots 4,5 \text{ м/с}$, диаметр цилиндрической части корпуса аппарата равен

$$D_{\text{ц}} = \sqrt{L/V_c}. \quad (3.31)$$

При скорости газа между цилиндрической частью корпуса и выходной частью конуса-экрана $V_{\text{вх}}$ его диаметр равен

$$D_{\text{э}} = \sqrt{D_{\text{ц}}^2 - 1,27 \cdot L/V_{\text{вх}}}. \quad (3.32)$$

Приняв по конструктивным соображениям угол конуса $\alpha = 15 \dots 25^\circ$ и высоту конуса, равную $h_k = 0,5 D_{\text{ц}}$ (смотри рис. 3.18), диаметр входной части конуса, примерно равный диаметру завихрителя, определяют из зависимости

$$D_{\text{вх.э.}} = D_{\text{э}} - 0,35 \sin \alpha. \quad (3.33)$$

Высота выходной части лопатки равна

$$h_{\text{вх.э.}} = \frac{L}{3,14 \cdot V_{\text{вх}} \cdot D_{\text{вх.э.}}}. \quad (3.34)$$

Гидравлическое сопротивление аппарата оценивают, используя зависимость, представленную на рис. 3.18.

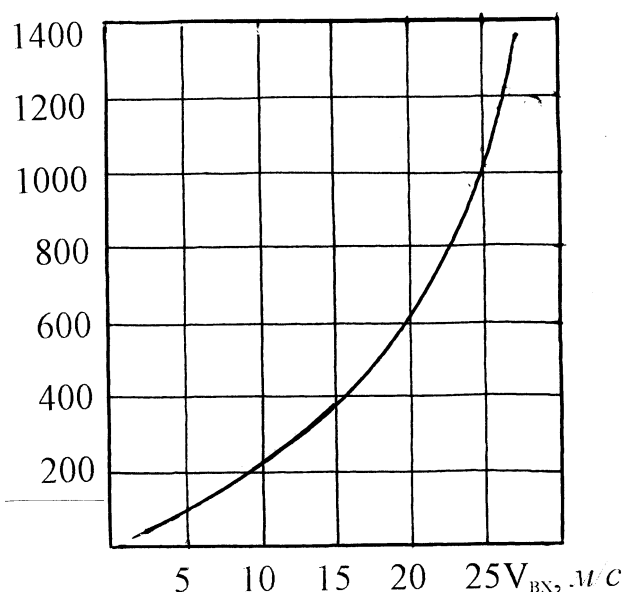


Рис. 3.18. Зависимость гидравлического сопротивления аппарата от скорости газа на входе

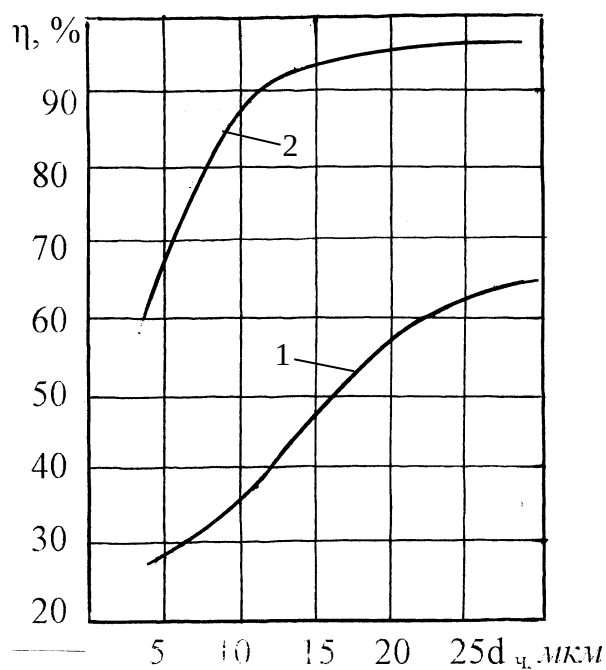


Рис. 3.19. Парциальная эффективность аппарата улавливания частиц пыли: 1 – циклон, 2 – ПЦИ

Общая эффективность очистки выбросов от пыли определяется по зависимости (2.11) при известной дисперсности пыли и использовании экспериментальной зависимости, приведенной на рис. 3.19.

3.5. Комбинированный пылеуловитель "циклон – электрофильтр"

Для устранения основного недостатка аппаратов циклонного типа – выброса мелкодисперсной пыли (вследствие ее движения к центру вращения потока) в образуемую разреженную область и, как следствие, в выбросной патрубок, все более широко используется комбинированный пылеуловитель, представленный на рис.3.20.

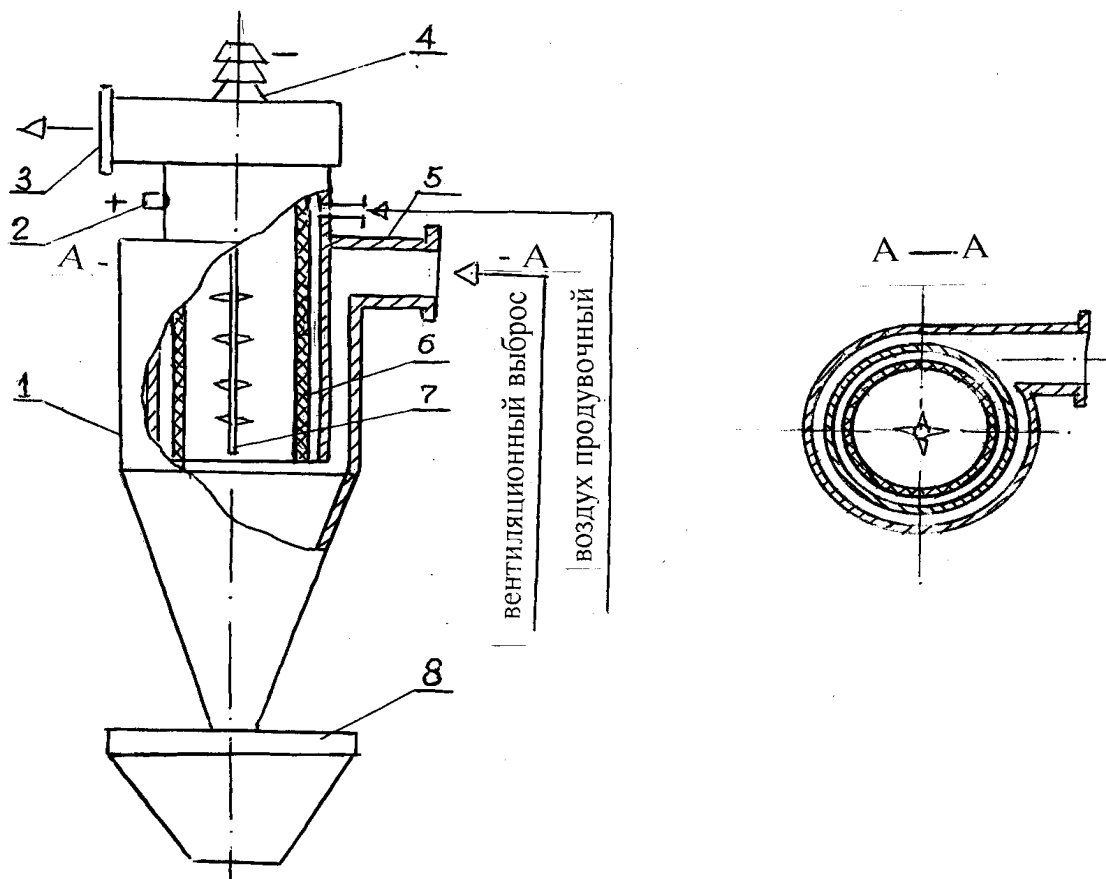


Рис. 3.20. Комбинированный пылеуловитель:

1 – корпус циклона, 2 – осадительный электрод, 3 – выходной патрубок, 4 – изолятор, 5 – входной патрубок, 6 – пористый материал осадительного электрода, 7 – коронирующий электрод, 8 – бункер

Создаваемое в центральной части циклона силовое электростатическое поле осаждает на пористом материале осадительного электрода мелкодисперсную пыль, которая периодически обратной импульсной продувкой воздуха давлением $(2...3) \cdot \text{кПа}$ сбрасывается в бункер.

Расчет параметров пылеосаждения в циклоне проводится по зависимостям, представленным в разделе 3.2.

Расчет режима осаждения пыли на осадительном электроде приведен в разделе 6.2. Сила тока коронного разряда составляет $10...50 \text{ мА}$.

В данном пылеуловителе общая эффективность очистки выбросов достигает до $99,5 \%$ при медианном размере частиц пыли 5 мкм .

Комбинированные пылеуловители позволяют очищать газы от пыли с температурой до 200°C , общее гидравлическое сопротивление при использовании циклона ЦН-11 не превышает 500 Па .

4. Мокрые пылегазоуловители

Мокрые пылегазоуловители – устройства с приспособлениями для создания контакта обрабатываемых пылегазовых выбросов с промывочными жидкостями, сопровождаемого процессом абсорбции и пылеулавливания.

Мокрые газоочистные аппараты используются в ряде случаев для одновременного пылеулавливания и абсорбции вредных химических веществ. При химической очистке газов, сопровождаемой процессами их растворения в поглотителе и химическими реакциями реагирующих веществ, используются кислотные или щелочные растворы в зависимости от вида выброса. При пылеулавливании в качестве промывочной жидкости чаще всего используется вода. Вопросы абсорбции газов изложены в [28].

Эти аппараты обладают высокой эффективностью улавливания пыли, в том числе и мелкодисперсной, однако при этом образуются загрязненные сточные воды и поэтому необходимо решение по их очистке.

Из многообразия конструкций мокрых пылеуловителей наиболее характерными представителями, нашедшими применение на практике и с проверенной их работоспособностью, являются пылеуловители:

- полые форсуночные (рис. 4.1);
- пенные тарельчатые (рис.4.2; 4.3);
- с неподвижной (пакетной) насадкой (рис.4.7; 4.8; 4.9);
- с подвижной насадкой (рис.4.10);
- ударно-инерционного действия типа ПВМ (рис.4.11);
- центробежного действия типа ЦВП (рис.4.12);
- центробежные скоростные СИОТ (рис. 4.14);
- скруббер с трубой Вентури (рис.4.18);
- коагуляционный пылеуловитель КЦМП (рис.4.19).

4.1. Полые форсуночные пылеуловители

Это наиболее простые по конструкции и с относительно небольшим гидравлическим сопротивлением аппараты мокрой очистки газа от пыли во многих случаях с приемлемой эффективностью, представленные на схеме рис.4.1.

Эффективность пылеулавливания зависит от плотности и равномерности орошения газа водой и степени её распыла, определяемой выбором типа форсунки и срабатываемым перепадом давления в ней $\Delta P = 0,2 \dots 0,4 \text{ МПа}$. Диаметр капель жидкости d_k в среднем приближении можно определить по зависимости из [5] или [35, стр. 79]

$$d_k = d_c \cdot \frac{18,3}{\text{Re}^{0,59}}, \quad (4.1)$$

где d_c – диаметр сопла форсунки, м, $\text{Re} = \frac{V_{жс} \cdot d_c}{\nu_{жс}}$, $V_{жс} = \sqrt{\frac{\Delta P}{2\rho_{жс}}}$ – скорость

истечения жидкости из сопла, м/с, $\rho_{жс}$ – плотность жидкости, кг/м³, $\nu_{жс}$ – кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

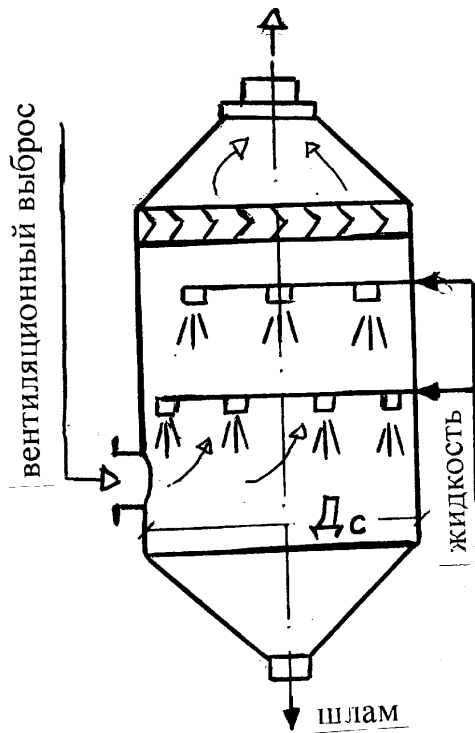


Рис.4.1. Полный форсуночный пылеуловитель:

скорость газа $0,8 \dots 1,2 \text{ м/с}$,
 плотность орошения $> 2 \text{ л/м}^3$,
 эффективность улавливания частиц пыли
 размером $d_q > 10 \text{ мкм}$ 95% ,
 гидравлическое сопротивление $< 250 \text{ Па}$.

Если принять допустимую скорость газа в свободном сечении скруббера $V_c < 3 \text{ м/с}$ (по условиям минимизации уноса капель жидкости), при объемном расходе газового потока $L, \text{ м}^3/\text{с}$ площадь сечения скруббера равна

$$F_c = \frac{L}{V_c}. \quad (4.2)$$

Скорость газа в скруббере может быть увеличена до 5 м/с при установке высокоэффективного каплеуловителя с большим гидравлическим сопротивлением. При малоэффективном каплеуловителе скорость газа не должна превышать величину $1,2 \text{ м/с}$. При росте скорости газа возрастет потребляемая мощность вентилятора пропорционально росту сопротивления. При диаметре скруббера $D_c = 1,13 \sqrt{F_c}$ его высота принимается равной $H_o = 2,5 D_c$. и назначается плотность орошения газа жидкостью $l_{жс} = \frac{Q_{жс} \cdot \rho_{жс}}{L_g \cdot \rho_g}$ в диапазоне её изменения от $0,5$ до 5 кг/кг воздуха, при этом большему орошению соответствует большая степень очистки выбросов. Увеличение удельного орошения более 5 кг/кг незначительно увеличивает эффективность осаждения пыли.

Так как доминирующим механизмом осаждения пыли является инерционный, эффективность мокрого пылеулавливания зависит от инерционного параметра ψ , который равен

$$\psi = \frac{d_q^2 \cdot \rho_q \cdot V_o \cdot C}{18 \cdot \mu_g \cdot D_c}, \quad (4.3)$$

где d_q – диаметр улавливаемых частиц пыли, м ; μ_g – динамическая вязкость газа, $\text{Па} \cdot \text{с}$, V_o – скорость газа относительно поверхности

осаждения частиц, $м/с$; C – поправка Кенингема, представленная в табл.4.1.

Таблица 4.1

d_{ψ} , $мкм$	0,01	0,03	0,1	0,3	1,0	3	10
C	24,5	7,9	2,9	1,57	1,16	1,03	1,0

В полном пылеуловителе парциальная степень очистки газа превышает 95% при улавливании частиц пыли более 10 $мкм$ и резко снижается при размере их менее 5 $мкм$. Зависимость парциальной эффективности осаждения пыли от параметра ψ , определяемого диаметром частицы d_{ψ} , представлена в табл.4.2 в зависимости от удельного орошения газа жидкостью $l_{жс}$, $л/м^3$.

Таблица 4.2

Степень очистки газа	Значение параметра ψ						
	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10	20
η_i при $l_{жс} < 2$, %	6	25	55	72	87	93	96
η_i при $l_{жс} > 2$, %	-	60	78	90	98	99,5	100

Парциальную степень очистки газа можно определить по зависимости

$$\eta_i = 1 - \exp \left[- \frac{3 \cdot Q_{жс} \cdot \eta_3 \cdot (V_c + V_k) \cdot H}{2 \cdot L_z \cdot d_k \cdot V_k} \right], \quad (4.4)$$

где $Q_{жс}$ – объемный расход жидкости, $м^3/с$; L_z – расход газа, $м^3/с$; V_z – скорость газа в свободном сечении скруббера, $м/с$; η_3 – эффективность захвата жидкостью частиц пыли $\eta_3 = 1 - 0,15\psi^{-1,24}$ при удельном орошении $l_{жс} \geq 2 л/м^3$; V_k – скорость осаждения капель, определяемая из табл.4.3 в зависимости от диаметра капель жидкости d_k ; высота скруббера $H = 2,5D_c$.

Таблица 4.3

$V_k, м/с$	0,001	0,007	0,015	0,5	0,8	1,1	1,3
$d_k, мкм$	6	10	20	100	200	400	1000

Полный коэффициент очистки газа от пыли определяется по зависимости (2.9).

В полых скрубберах вода часто циркулирует до появления значительной концентрации пыли в ней, доводя её до 50...100 $г/л$.

При малой плотности орошения газа гидравлическое сопротивление скруббера не превышает 100 $Па$, при значительной плотности орошения и скорости газа более 5 $м/с$ – превышает величину 200 $Па$.

4.2. Пенные тарельчатые пылеуловители

Пенный тарельчатый пылеуловитель (рис.4.2) представляет колонну с провальными или ситчатыми тарелками. На тарелку может быть установлена сотовая решетка – стабилизатор пены из вертикально расположенных пластин высотой до 60 $мм$ и площадью сот 35х35 $мм$ для улучшения процесса улавливания пыли за счет более высококачественной структуры пены (аппа-

раты ПГП-И). Увеличение числа тарелок и плотности орошения приводит к улучшению осаждения мелкодисперсной пыли. Отверстия тарелок изменяются в диапазоне $d_o = 3 \dots 10$ мм, при этом меньший диаметр способствует улучшенной очистке мелкодисперсной пыли за счет лучших условий коагуляции их частиц, однако их проходное сечение более склонно к забивке пылью. Пенные пылеуловители чаще применяют для улавливания плохо смачиваемой пыли.

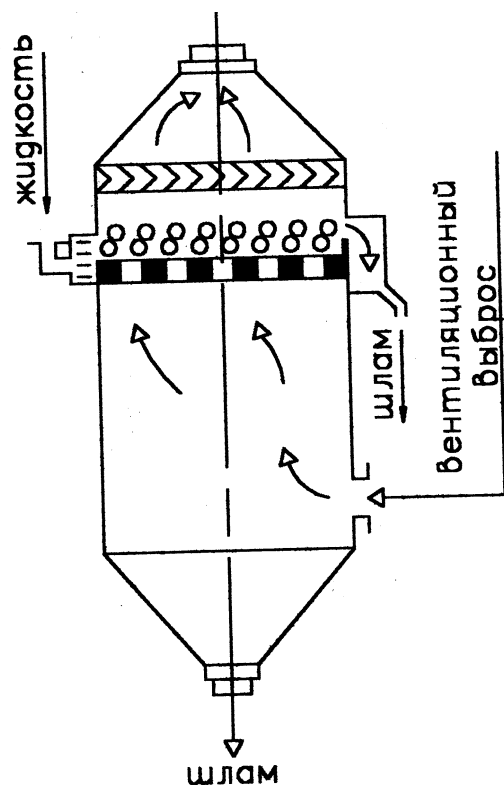


Рис.4.2. Пенный пылеуловитель с переливной тарелкой:

скорость газа в свободном сечении $V_c = 1 \dots 1,5$ м/с,
расход жидкости $0,4 \dots 0,6$ л/м³,
высота слоя жидкости на тарелке – до 100 мм,
эффективность улавливания частиц пыли $d_p > 4$ мкм $\eta = 95\%$,
гидравлическое сопротивление – до 1500 Па

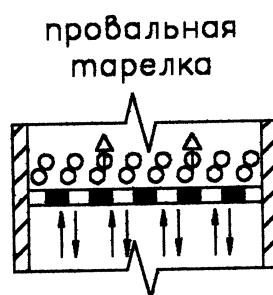
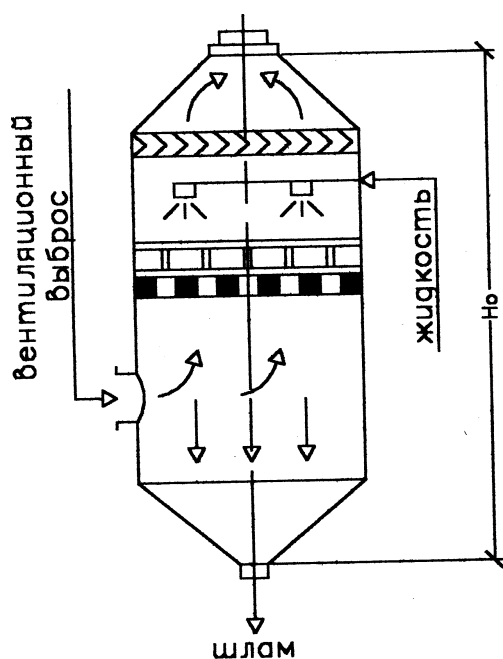


Рис.4.3. Пенный тарельчатый аппарат:
скорость газа $1 \dots 1,5$ м/с, плотность орошения $0,4 \dots 0,6$ л/м³, эффективность улавливания частиц $d_p > 4$ мкм $\eta = 95\%$, гидравлическое сопротивление - до 1500 Па

Отличительной особенностью работы тарельчатых колонн является ограниченный диапазон допустимых скоростей газа с устойчивым режимом их работы, при этом более устойчиво работают колонны с ситчатыми тарелками по сравнению с провальными, поскольку они имеют переливной порог для слива жидкости. В провальных тарелках через отверстия навстречу друг другу движутся и газ и жидкость.

При скорости газа $V_o < 6 \text{ м/с}$ в отверстиях диаметром $d_o > 7 \text{ мм}$ часть жидкости проваливается через них, при скорости выше 15 м/с жидкость задерживается на тарелках. Отношение площади отверстий в тарелке к площади свободного сечения колонны F_c изменяется в пределах $\phi = 0,15 \dots 0,4$. Шаг между отверстиями тарелки δ определяется из соотношения, м [8]:

$$\delta = d_o \sqrt{0,91 / \phi} . \quad (4.5)$$

Высота пены на тарелке равна, м:

$$h_n = 4 \cdot d_o \left(\frac{V_c^2}{d_o \cdot \phi^2} \right)^{0,2} , \quad (4.6)$$

где V_c – скорость газа в свободном сечении колонны, м/с.

Скорость газа в свободном сечении колонны должна выбираться между ее максимальным и минимальным значением по зависимостям [28]

$$\lg \frac{V_{\max}^2}{\phi^2 \cdot d_o} = 4,9 - 0,75 \cdot l_{\text{жс}}^{0,25} ; \quad (4.7)$$

$$\lg \frac{V_{\min}^2}{\phi^2 \cdot d_o} = 4,4 - 0,75 \cdot l_{\text{жс}}^{0,25} , \quad (4.8)$$

где $l_{\text{жс}} = G_{\text{жс}} / L \cdot \rho_c$ – удельная плотность орошения газа жидкостью, кг/кг.

Не следует проектировать колонны большого диаметра D_c , так как при этом усложняется достижение равномерной плотности орошения газа жидкостью и осаждение мелкодисперсной пыли.

$$D_c = 1,13 \sqrt{L / V_c} . \quad (4.9)$$

В табл.4.4 приведены наиболее рациональные соотношения между параметрами d_o , δ , ϕ

Таблица 4.4

$d_o, \text{мм}$	4	4	5	6	7	7	8
$\delta, \text{мм}$	8	9	10	11	13	16	18
ϕ , $\text{м}^2/\text{м}^2$	0,2 3	0,1 8	0,2 7	0,2 7	0,2 6	0,1 7	0,1 8

Полное гидравлическое сопротивление колонны равно, Па:

$$\Delta P = \left(\frac{1,2 \cdot V_c^2}{\phi^2} + 6500 \cdot h_n + \frac{4 \cdot \sigma}{d_o} \right) \cdot N_m , \quad (4.10)$$

где N_m - количество тарелок, σ - поверхностное натяжение жидкости, Н/м.

На рис. 4.4 и 4.5 приведены номограммы для определения параметров пенных аппаратов с провальными тарелками, позволяющие при выбранной скорости газа в свободном сечении аппарата V_c , диаметре отверстий в провальной тарелке d_o , относительной площади отверстий φ определить ожидаемое гидравлическое сопротивление одной тарелки и высоту пены на ней.

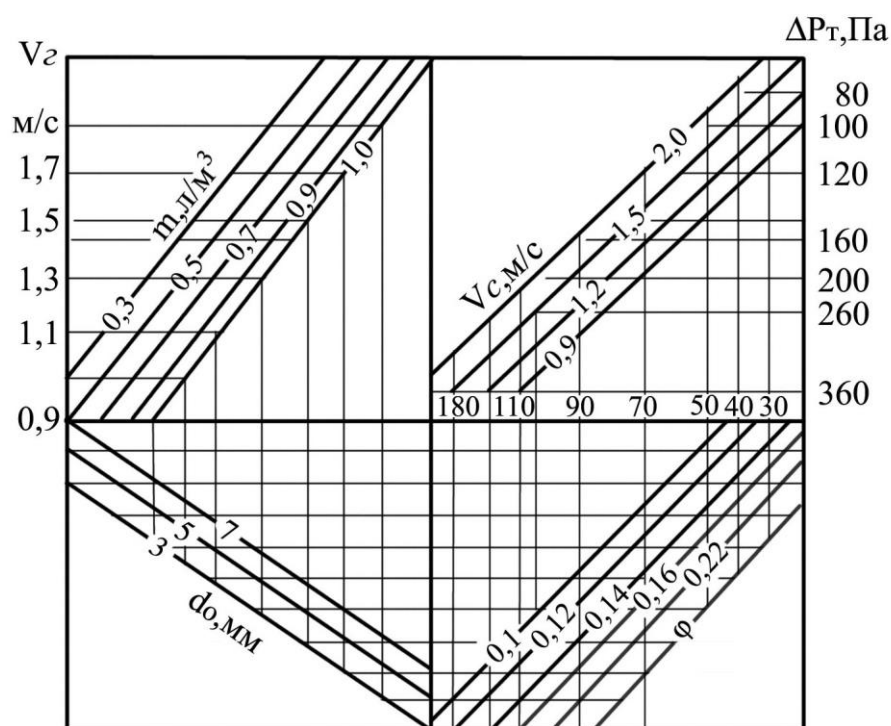


Рис.4.4. Номограмма для определения параметров пенных аппаратов с провальными тарелками

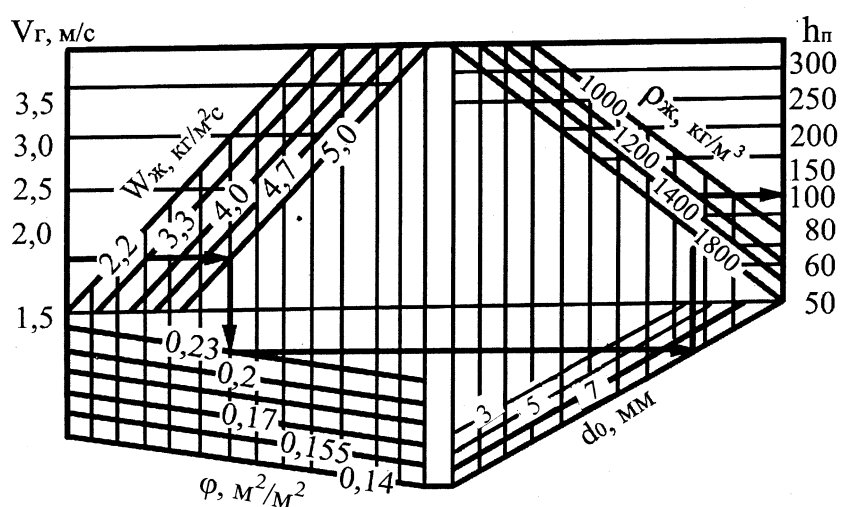


Рис.4.5. Номограмма для определения высоты пенного слоя на тарелке - h_n

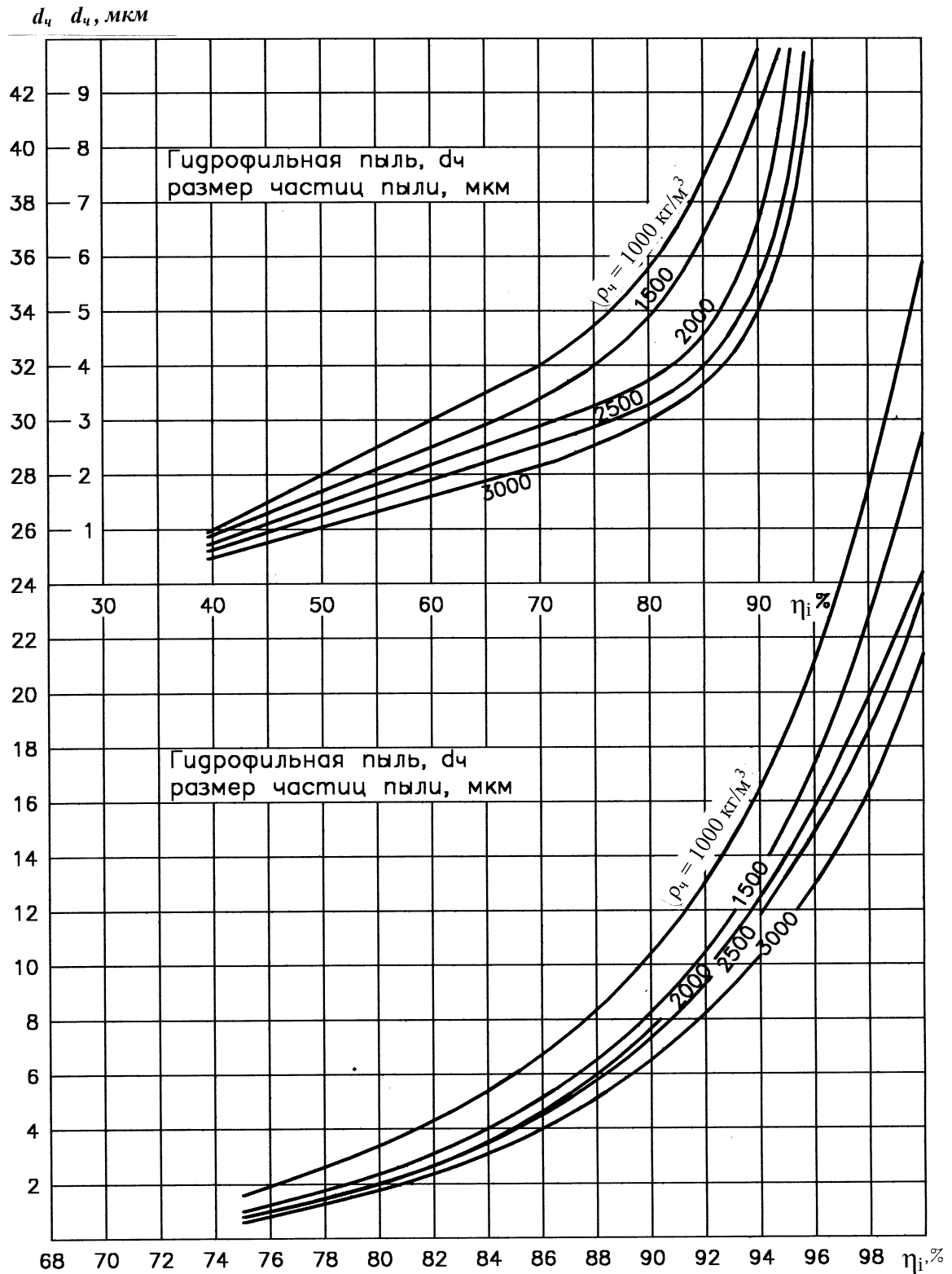


Рис.4.6. Фракционная степень очистки газа η_i от размера частиц $d_{\text{ч}}$ и их плотности $\rho_{\text{ч}}$

На рис.4.6 представлена зависимость фракционной степени очистки пыли в пенном аппарате от фракционного состава пыли для гидрофобной и гидрофильной пыли с учетом плотности частиц пыли.

Знание высоты пены h_n позволяет определить наиболее рациональное расстояние между тарелками h_T , обеспечивая минимальный вынос капель жидкости e , кг/кг воздуха, который должен быть менее относительного массового содержания пыли в воде x_1 , кг/кг [28]:

$$e = 2,58 \cdot 10^{-5} \left(\frac{V_c}{h_T - 2,5h_n} \right)^{3,2} \leq x_1 \quad (4.11)$$

4.3. Пылеуловители с неподвижной и подвижной насадкой

Пылеуловители с орошающейся насадкой представляют значительную группу, различаются конструктивными особенностями, но основаны на едином способе очистки газов от пыли – совмещении фильтрационных качеств насадочного материала и осаждение пыли за счет капель жидкости.

Пылеуловители с неподвижной насадкой имеют развитую поверхность в единице объема в виде колец Рашига, других фигур или пластин (рис.4.7; 4.8).

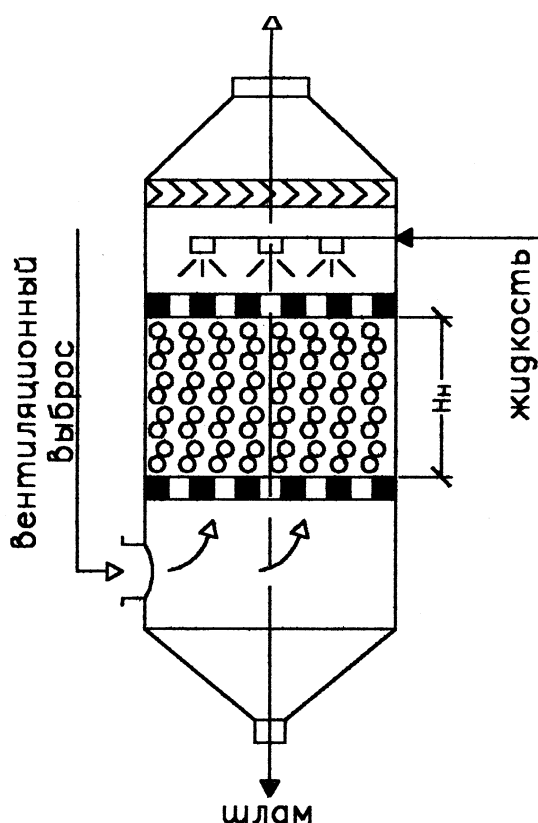


Рис. 4.7. Насадочный аппарат с неподвижной насадкой:
нах:

скорость газа 1...1,5 м/с, плотность орошения 1,3...2,6 л /м³, эффективность улавливания частиц пыли

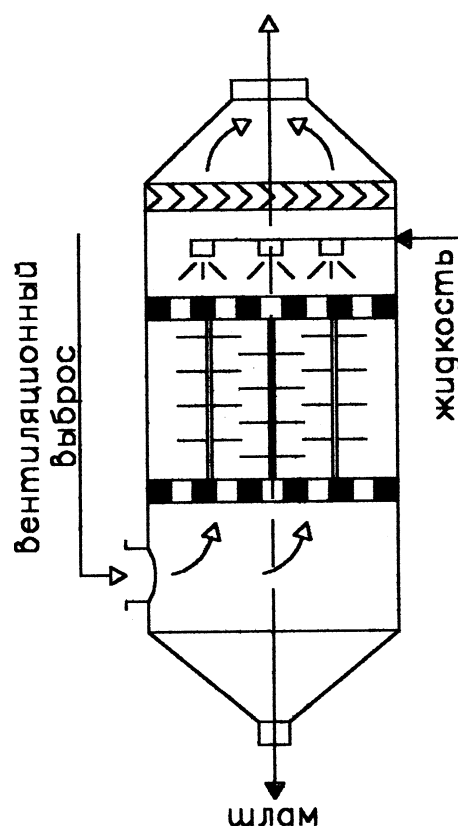


Рис.4.8. Насадочный аппарат из пластин на струнах

скорость газа 3...4 м/с, плотность орошения 0,3...0,5 л /м³, эффективность улавливания частиц пыли

$d_q = 2 \text{ мкм}$ - $\eta = 95 \%$, гидравлическое сопротивление до 400 Па/м

$d_q = 4 \text{ мкм}$ равна $\eta = 98 \%$, гидравлическое сопротивление до 400 Па/м

Пылеуловители с насадкой находят ограниченное применение из-за частого забивания каналов в насадке слипающейся пылью. Они неплохо себя зарекомендовали при улавливании туманов, хорошо растворимой пыли и при необходимости организации процесса одновременного улавливания не слипающейся пыли и абсорбции химически вредного газа. Использование в качестве насадки металлической стружки позволяет производить частую смену забившейся пылью насадки при небольших экономических издержках. Плотность орошения насадки жидкостью изменяется в пределах $l_{жс} = 0,3 \dots 2,6 \text{ кг/кг газа}$.

Аппараты с неподвижной насадкой улавливают пыль размером более 10 мкм с эффективностью до 100% . На рис.2.7, используя прямую линию "жс", определяют парциальную эффективность различных фракций пыли. Опорные тарелки, на которые насыпается или укладывается насадка, выполняются чаще щелевыми, с шириной щелей $4 \dots 6 \text{ мм}$, ее живое сечение составляет величину $\varphi = 0,4 \dots 0,6 \text{ м}^2/\text{м}^2$.

Недостатком этих очистных аппаратов является малая допустимая скорость газа и поэтому при очистке больших по объему газопылевых потоков требуются большие площади сечения колонны.

Основными характеристиками насадок являются: f - удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{м}^3$; ε - свободная поверхность (порозность), $\text{м}^3/\text{м}^3$; $\rho_{нас}$ - насыпная плотность, кг/м^3 ; $d_э$ - эквивалентный диаметр насадки, м.

Для неподвижной насадки минимально допустимая скорость газа равна

$$V_c^{\min} = 10 \cdot \frac{d_э^{1,7} \cdot f}{l_{жс}^{0,43}}. \quad (4.12)$$

Увеличение этой скорости допускается не более чем на 40% , при больших скоростях наступает режим подвисания жидкости и вынос ее из колонны. Наиболее приемлемые скорости газа в свободном сечении колонны при различных плотностях орошения представлены в табл.4.5.

Таблица 4.5

Размер насадки, $\text{мм} \bullet \text{мм} \bullet \text{мм}$	Скорость газа V_c , м/с, при плотности орошения $l_{жс}$, кг/кг:			
	1	2	5	10
20•20•2,2	1,3	1,0	0,7	0,5
30•30•3,5	1,8	1,3	0,9	0,7

50•50•5	2,0	1,5	1,0	0,8
60•60•8	3,0	2,2	1,5	1,1

Гидравлическое сопротивление неподвижной насадки равно, Па [6]:

$$\Delta P = 10 \cdot \xi \cdot V_c^2 \cdot \rho_c \cdot h_c, \quad (4.13)$$

где h_c – высота слоя насадки, м ; ξ – коэффициент местного гидравлического сопротивления насадки, который составляет для колец Рашига: 50•50•5 мм $\xi = 12$; для 80•80•8 мм $\xi = 2$; для 100•100•10 мм $\xi = 1$.

Для увеличения пропускной способности очистного аппарата, не снижая его эффективности, применяют пакетные насадки с различной удельной поверхностью, представленные на рис.4.9.

Режим псевдоожижения подвижной насадки обеспечивает осаждение всех видов пыли за исключением схватывающейся. Удельное орошение принимается в пределах $l_{жс} = 0,5 \dots 0,7 \text{ кг/кг}$ ($Q_{ж}/L_c \cong 0,0004 \dots 0,0006 \text{ м}^3/\text{м}^3$) при доле живого сечения опорной тарелки $\varphi = 0,4 \text{ м}^2/\text{м}^2$. В качестве подвижной насадки применяются шарики из полиэтилена, полипропилена или стекла диаметром $d_{ш} = 20 \dots 40 \text{ мм}$. Характеристики насадок представлены в табл. 4.6.

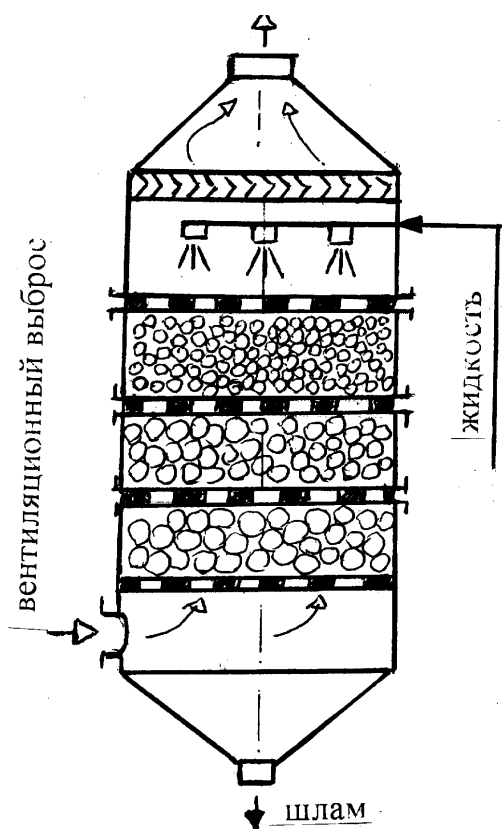


Рис.4.9. Аппарат с пакетной насадкой:

скорость газа $3 \dots 5 \text{ м/с}$, плотность орошения $0,5 \dots 0,8 \text{ л/м}^3$, эффективность улавливания частиц $d_{ч}$ до

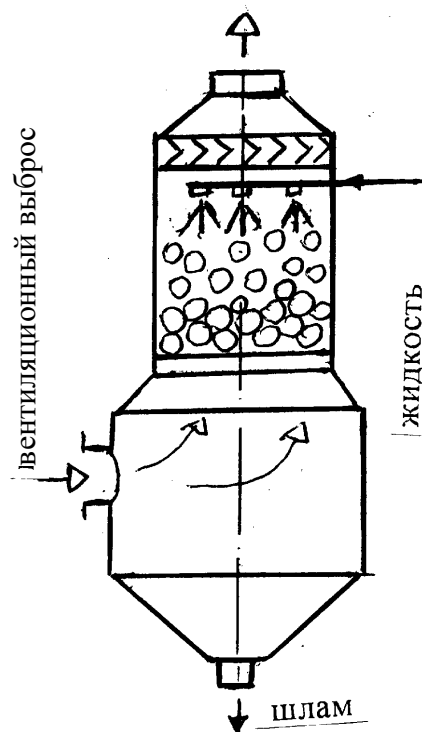


Рис.4.10. Аппарат с подвижной насадкой:

скорость газа $2 \dots 4 \text{ м/с}$, плотность орошения $0,5 \dots 0,7 \text{ л/м}^3$, эффективность улавливания частиц $d_{ч}$ до

2 мм $\eta=99\%$, гидравлическое сопротивление 400..600 Па на 1м высоты насадки.

2 мм более 99%, гидравлическое сопротивление до 2000 Па

Режим начала псевдооживления происходит при скорости газа в свободном сечении колонны при ширине щели в опорной тарелке более 2 мм:

$$V_c^n = 210 \cdot \sqrt{d_{ш} \cdot \varphi \cdot \exp \left[-12,6 \left(\frac{Q_{жс}}{L_z} \right)^{0,25} \right]} . \quad (4.14)$$

Скорость газа в насадке определяется по зависимости

$$V_n = \frac{V_c}{\varepsilon_{сзв}} . \quad (4.15)$$

Таблица 4.6

Тип насадки	Удельная поверхность $f, м^2/м^3$	Свободный объем $\varepsilon, м^3/м^3$	Насыпная плотность $\rho_{нас}, кг/м^3$	Эквивалентный диаметр $d_э, м$
Кольца керамические Рашига мм·мм·мм:				
20•20•2,2	240	0,73	650	0,012
30•30•3,5	165	0,76	570	0,018
50•50•5	95	0,79	500	0,027
60•60•8	78	0,74	630	0,038
Шаровая насадка из полипропилена:				
$d_{ш}=20 мм$	165	0,6	198	0,02
$d_{ш}=30 мм$	110	0,6	204	0,03
$d_{ш}=40 мм$	82,5	0,6	206	0,04

Свободный объем взвешенного слоя определяется по зависимости

$$\varepsilon_{сзв} = \left(\frac{18 \cdot Re + 0,36 \cdot Re^2}{Ar} \right)^{0,21} , \quad (4.16)$$

где $Ar = \frac{10 \cdot d_{ш}^3 \cdot \rho_{ш}}{\nu_c^2 \cdot \rho_c}$ - критерий Архимеда, $Re = \frac{V_c \cdot d_{ш}}{\nu_c}$ - критерий

Рейнольдса, ν_c - кинематическая вязкость газа, m^2/c .

Предельно допустимая скорость газа в свободном сечении колонны равна

$$V_c^{\max} = 2,9 \cdot \varphi^{0,4} \left(\frac{Q_{жс}}{L_c} \right)^{-0,15} . \quad (4.17)$$

Перепад давления для газопылевого потока, проходящего через взвешенную насадку, определяется по зависимости, $Па$:

$$\Delta P_{взв} = \rho_{ш} \cdot g \cdot h (1 - \varepsilon_{взв}) , \quad (4.18)$$

где h – высота неподвижного слоя шариков, m .

В верхней части колонны устанавливается решетка, распределяющая жидкость орошения и ограничивающая движение шариков вверх. Ее живое сечение принимается равным $\varphi = 0,8 \dots 0,9 m^2/m^2$.

Перепад давления на решетке определяется по зависимости [22], $Па$:

$$\Delta P_{реш} = 0,5 \cdot \left(\frac{V_c}{\varphi} \right)^2 \cdot \frac{1}{C} , \quad (4.19)$$

где $C = (0,84 \dots 0,024) \cdot d_o / \delta$; d_o – диаметр или ширина щели тарелки, m ; δ – толщина тарелки, m .

Общее гидравлическое сопротивление колонны при взвешенной насадке равно

$$\Delta P_o = \Delta P_{взв} + \Delta P_{реш}^{низ} + \Delta P_{реш}^{верх} + \Delta P_{\sigma} , \quad (4.20)$$

где $\Delta P_{\sigma} = \frac{4 \cdot \sigma}{d_{ш}}$ - гидравлическое сопротивление, определяемое поверхностным натяжением жидкости, $Па$; для воды $\sigma = (0,074 \dots 0,06) H/m$ при изменении температуры от 10 до 90° С.

Максимальная насыпная высота шариков $h_{стат}$ не должна превышать диаметра колонны $h_{стат} \leq D_c$, а минимальная высота – не более $8 d_{ш}$ [30].

Для более устойчивого движения шариков часть колонны, в которой размещаются шарики, выполняется конической к опорной тарелке с углом конуса от 10 до 60 °.

Колонны с пакетной насадкой (рис.4.9) могут иметь несколько опорных тарелок с шариками. Для них расстояние между опорными тарелками определяют по эмпирической зависимости [30]

$$H_n = 0,45 \cdot W_{жс}^{0,3} \cdot d_{ш}^{0,6} \cdot \left(\frac{V_c}{\varphi} \right)^{0,93} , \quad (4.21)$$

где $W_{жс} = \frac{Q_{жс}}{L_c} \cdot V_c \cdot \rho_{жс}$ - удельная плотность орошения, $\frac{кг}{с \cdot m^2}$.

Высота свободной части между тарелками при статическом состоянии шариков (высота сепарационной части) принимается равной $(0,1 \dots 0,2) H_n$.

В насадочных пылеуловителях параметры фракционной эффективности имеют значения [5]: $d_{50} = 0,97 \text{ мкм}$; $lg\sigma_\eta = 0,29$, которые необходимо знать при определении эффективности очистки пылевых выбросов по зависимостям (3.4) и (3.5).

4.4. Пылеуловители ударного и ударно-инерционного типа

К этой группе относятся пылеуловители, в которых контакт пылегазового потока с жидкостью осуществляется за счет соударения с поверхностью жидкости и пропусканием образованной газожидкостной взвеси через щели различной конструкции.

Представителями пылеуловителей ударного типа являются пылеуловители ПВМ, ПВМСА, "Ротоклон N", "Дойля", принцип устройства изображен на рис.4.11.

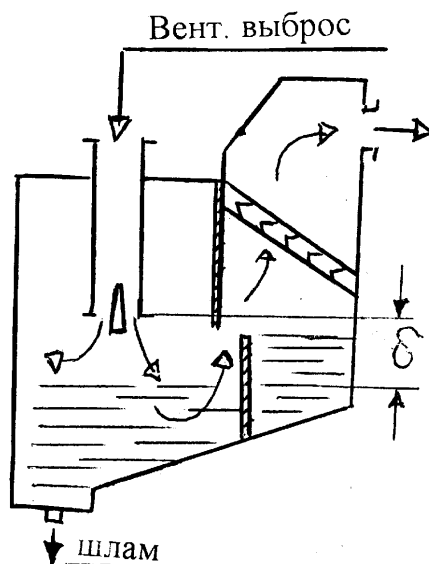


Рис. 4.11. Ударно-инерционные аппараты типа ПВМ

При резком повороте газопылевого потока мелкие твердые частицы стремятся сохранить прямолинейное движение за счет сил инерции и, ударяясь о жидкость, образуют укрупненные капли размером 300...400 мкм. Эти аппараты преимущественно используются для очистки холодных газов.

Для увеличения эффективности осаждения плохо смачиваемой мелкодисперсной пыли необходимо в соответствии с законом Стокса увеличивать скорость газа по отношению к капле жидкости и улучшать процесс коагуляции пыли. Достигается это улучшением распыла жидкости с одновременным увеличением плотности орошения. При этих условиях эффективно улавливаются частицы пыли размером $d_p \geq 1 \text{ мкм}$, а образующиеся капли имеют размер 300...400 мкм.

В "Ротоклоне N" скорость газа при подходе к поверхности жидкости должна быть примерно равна 15 м/с, при проходе через щель увеличивается до 35...55 м/с. Плотность орошения газа жидкостью составляет не менее 0,2 кг/м³ газа, гидравлическое сопротивление из-за большой скорости газа со-

ставляет около 1500 Па. Общая степень улавливания пыли составляет 96...99%, увеличение степени улавливания достигается при большей плотности орошения газа жидкостью. Технические характеристики пылеуловителей ПВМ приведены в [8, 30].

Пылеуловители оборудованы устройством, автоматически поддерживающим уровень воды в его ванне. Настройка уровня воды относительно перегородки (размер δ , рис.4.11) определяет степень улавливания мелкодисперсной пыли и чем меньше этот размер, тем больше значение величины $\lg \sigma_\eta$, которая при $d_{50}=1,5$ мкм равна: при $\delta=40$ мм - 0,3; при $\delta=80$ мм - 0,24; при $\delta=150$ мм - 0,2; при $\delta=200$ мм - 0,17.

Загрязненная вода со шламом периодически сливается с бункера. Время, в течение которого допускается накопление пыли, определяется зависимостью

$$\tau = \frac{q \cdot W}{c_{нач} \cdot L}, \quad (4.22)$$

где q – допустимая концентрация твердых веществ в шламе, г/м³ (не более 50000 г/м³); W - объем воды в бункере, м³; $c_{нач}$ – начальная концентрация пыли в очищаемом воздухе, г/м³; L – производительность пылеочистителя, м³/ч.

Гидравлическое сопротивление, Па пылеуловителя данного типа зависит от величины размера δ и расхода газа, приходящегося на 1 м длины перегородки L_c^* [8]

$$\Delta P = 10^4 \cdot \delta + 880 \sqrt{L_c^*}. \quad (4.23)$$

Увеличение высоты насадки увеличивает эффективность очистки выбросов [30]. За исходные величины можно принять: при скорости газа в свободном сечении аппарата $V_c=1,5$ м/с и высоте насадки $h_c=1$ м размер частиц, улавливаемых на 50 %, равен $d_{50}=1,25$ мкм, при этой же скорости, но при $h_c=2$ м $d=0,8$ мкм. При увеличении скорости газа на 20 % и изменении высоты насадки в диапазоне 1...2 м размер частиц d_{50} увеличивается на 40%.

4.5. Пылеуловители центробежного действия

Наибольшее распространение получили центробежные циклоны с боковым тангенциальным или улиточным подводом газа (рис.4.12), при этом большинство из них имеют коэффициент гидравлического сопротивления при скорости газа в свободном сечении циклона $V_c=2...5$ м/с $\xi=25...35$. Орошение газопылевого потока осуществляется распылителями жидкости, устанавливаемые в центральной части циклона или в верхней части с центробежным подводом воды вдоль стенок.

В пылеуловителе ЦВП (рис.4.12) осаждение мелкодисперсной пыли в значительной степени зависит от скорости газа в циклоне, следовательно, от гидравлического сопротивления. При гидравлическом сопротивлении $\Delta P=400$ Па осаждаемые минимальные частицы составляют 1,4 мкм, а при $\Delta P=1400$ Па – 0,2 мкм. Пылеуловитель рассчитан на очистку любых видов не цементирующейся пыли.

Тангенциально вводимая жидкость в верхнюю часть циклона, эффективно смывает осевшую пыль со стенок циклона.

Общая эффективность пылеуловителя ЦВП рассчитывается при $\lg \sigma_\eta = 0,84$ и определении диаметра частиц $d_{\eta=50}$ по графикам на рис.4.13 с последующим выполнением расчета параметров x и $\Phi(x)$ по зависимостям (2.4) - (2.9).

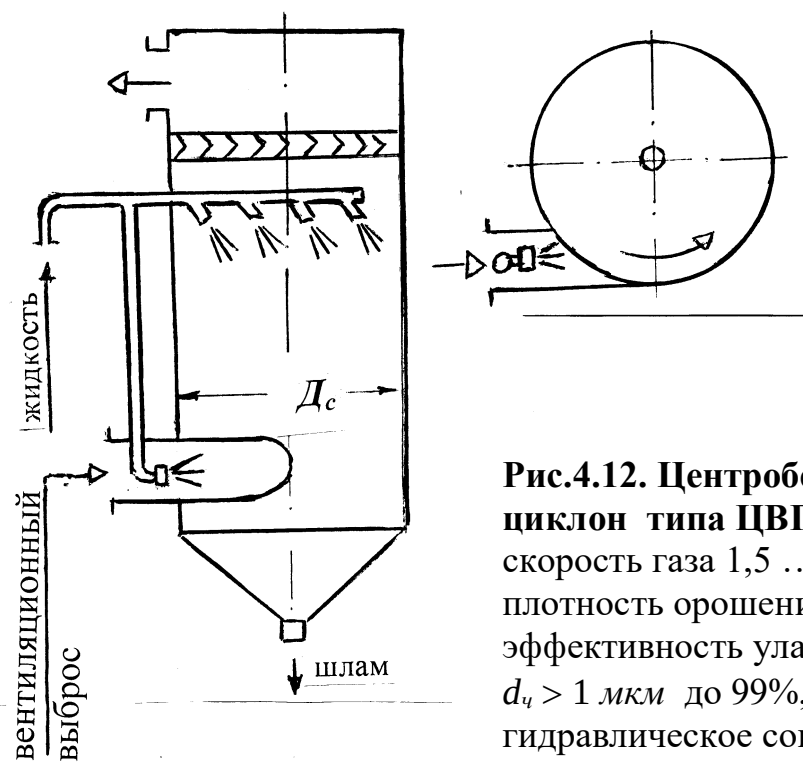


Рис.4.12. Центробежный мокрый циклон типа ЦВП:

скорость газа 1,5 ... 5 м/с,
плотность орошения 0,3...1 л/м³,
эффективность улавливания частиц $d_{\eta} > 1$ мкм до 99%,
гидравлическое сопротивление до 1 кПа.

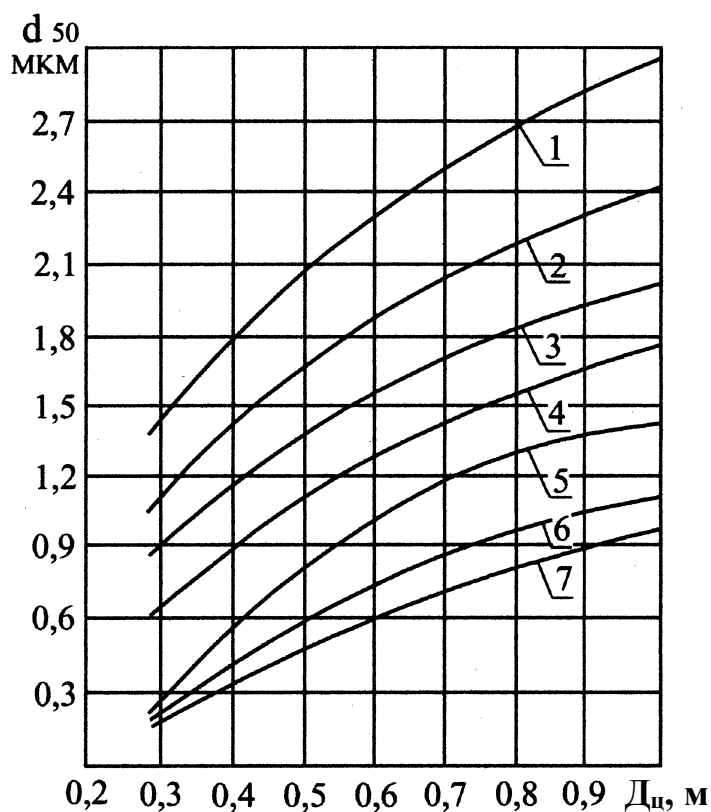


Рис.4.13. Зависимость диаметра частиц, улавливаемых на 50%, от гидравлического сопротивления ΔP и диаметра корпуса D_c циклона ЦВП:

- 1 - $\Delta P = 400$ Па
- 2 - $\Delta P = 500$ Па
- 3 - $\Delta P = 600$ Па
- 4 - $\Delta P = 800$ Па
- 5 - $\Delta P = 900$ Па
- 6 - $\Delta P = 1000$ Па
- 7 - $\Delta P = 1400$ Па

В скоростном пылеуловителе СИОТ (рис.4.14) орошение газа жидкостью осуществляется в верхней части циклона и во входной, куда подается до

30% от общего расхода жидкости. Сток из циклона СИОТ организован таким образом, чтобы в нижней его части было некоторое количество жидкости, захватываемой закрученным входным потоком и расстилающегося вдоль стенок циклона.

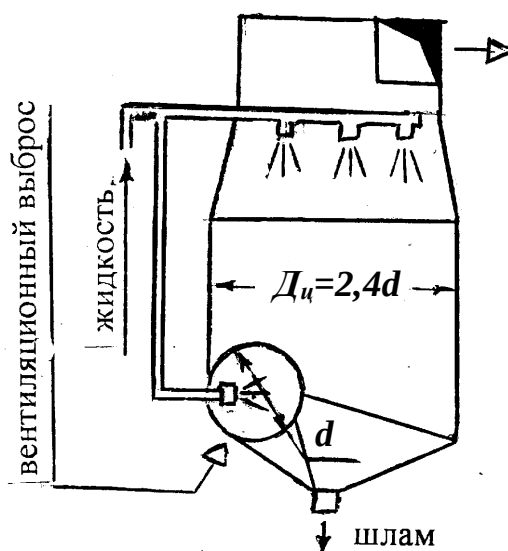


Рис. 4.14. Скоростной мокрый циклон СИОТ:

скорость газа 3...5 м/с, плотность орошения 0,15...0,2 л/м³,
эффективность улавливания частиц $d_p > 1$ мкм до 99 %,
гидравлическое сопротивление доходит до 2 кПа.

Расчет общей эффективности очистки газа от пыли циклона СИОТ определяется при $\lg \sigma_\eta = 0,716$ и диаметре частиц, улавливаемых на 50%, представленных на рис.4.15 в зависимости от величины гидравлического сопротивления аппарата ΔP , его диаметра входного отверстия и при использовании зависимостей (2.4)...(2.9) .

Циклоны этого типа предназначены для очистки запыленного вентиляционного воздуха от любых видов не цементирующейся и не волокнистой пыли. При начальной концентрации пыли в воздухе выше 5 г/м³ следует устанавливать перед ним пылеочиститель для улавливания крупных частиц для снижения концентрации пыли. Производительность этих аппаратов изменяется в пределах от 12 до 280 тыс. м³/ч.

Рекомендуемая скорость газа во входном патрубке циклона $V_{ex} = 15...20$ м/с. Гидравлическое сопротивление пылеуловителя, Π_a , определяется по зависимости

$$\Delta P = 147 \cdot V_{ex} - 980. \quad (4.24)$$

Характеристики аппаратов СИОТ приведены в [25].

Аппарат СИОТ обладает значительной эффективностью осаждения мелкодисперсной пыли, так как сечение циклона плотно орошается жидкостью практически во всем объеме циклона. В циклоне СИОТ удельный расход жидкости в два раза меньше по сравнению с циклоном ЦВП при несколько большем гидравлическом сопротивлении.

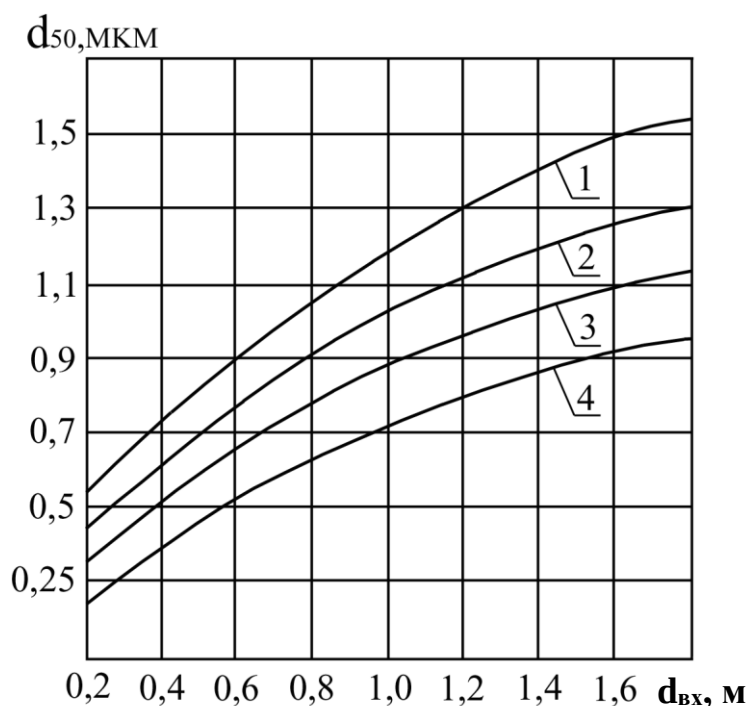


Рис.4.15. Зависимость диаметра частиц, улавливаемых на 50%, от гидравлического сопротивления ΔP и диаметра входа $d_{вх}$ циклона СИОТ:

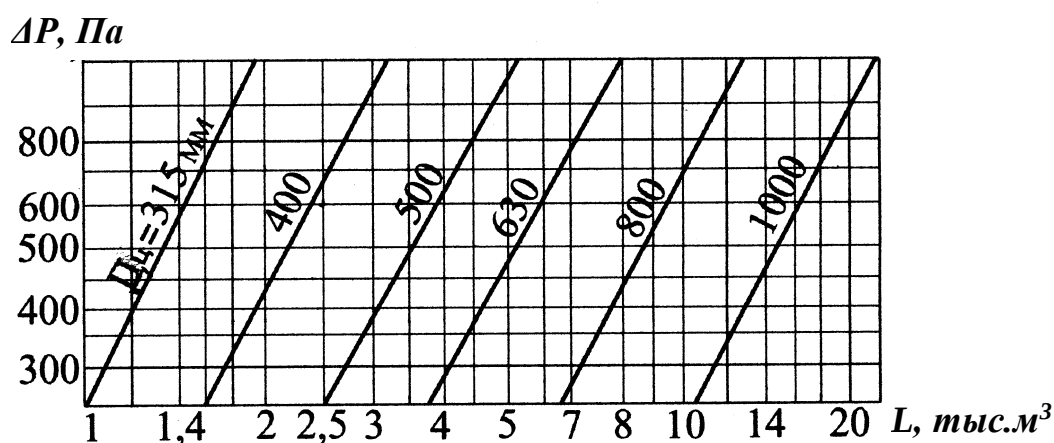


Рис.4.16. Номограмма для определения гидравлического сопротивления мокрых циклонов ЦВП и СИОТ

На рис.4.17 представлен графический способ определения степени очистки пылевых выбросов в циклонах типа ЦВП [10].

На логарифмически вероятностной координатной сетке (рис.4.17) наносят горизонтальную линию, соответствующую требуемой степени очистки выбросов от пыли. Из точки d_{50} (см. рис.4.17) восстанавливают перпендикуляр до пересечения с горизонтальной линией η . Из полученной точки проводят при помощи транспортира наклонную линию, соответствующую значению $\sigma_{\eta} = d_{50} / d_{15,9}$ до пересечения с осью абсцисс. Точка пересечения укажет диаметр частиц, улавливаемых на 50% при заданном режиме циклона. При невозможности обеспечить требуемые параметры данного типа циклона, соответствующие данному значению

$d_{\eta=50}$, выбираются параметры (преимущественно гидравлическое сопротивление) другого типа мокрого пылеуловителя, например, КМП.

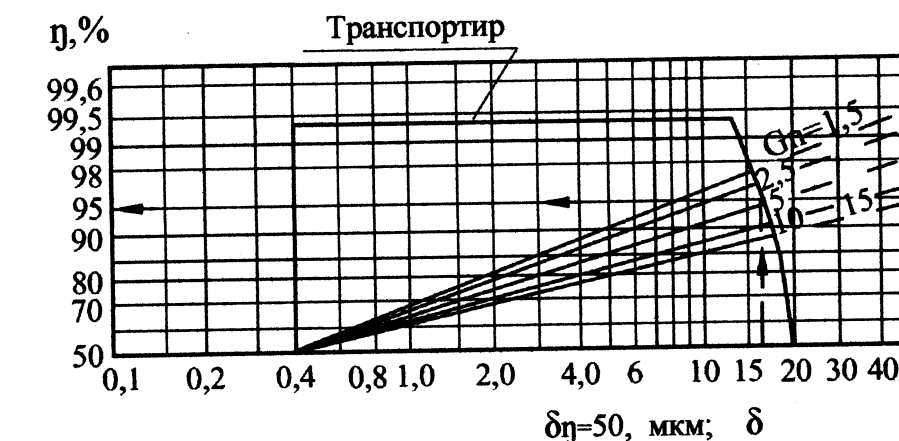


Рис. 4.17. Определение степени очистки пыли графическим способом

4.6. Скоростные пылеуловители с трубой Вентури

Среди мокрых пылеуловителей наибольшей эффективностью очистки воздуха от мелкодисперсной пыли обладают установки с трубой Вентури. (рис.4.18). В трубе Вентури происходит контакт газопылевого потока с тонкораспыленной жидкостью, поступающей в скруббер в виде скоагулированных частиц в газожидкостном потоке. Скорость в горловине трубы Вентури достигает величин $V_2 = 30 \dots 120 \text{ м/с}$. Подача жидкости в трубу Вентури осуществляется с помощью распылителя, из которого скоагулированные частицы поступают в скруббер.

Расход воды колеблется от 1 до 80 л на 100 м^3 очищаемого воздуха, больший расход соответствует большей исходной концентрации пыли в воздухе. Высокая скорость газожидкостного потока вызывает большую потерю давления, доходящую до $2000 \dots 3000 \text{ Па}$. Гидравлическое сопротивление трубы Вентури равно сумме гидравлического сопротивления сухой трубы ΔP_c и гидравлического сопротивления $\Delta P_{жс}$, обусловленного подачей в нее жидкости.

По величине гидравлического сопротивления труб Вентури различают низконапорные и высоконапорные скрубберы. Низконапорные скрубберы с сопротивлением до $2 \dots 3 \text{ кПа}$ эффективно улавливают пыль с размером частиц более 10 мкм , высоконапорные — с размером частиц до $0,5 \text{ мкм}$.

Наиболее эффективно контакт между газопылевым потоком и жидкостью происходит при оптимальных геометрических параметрах труб Вентури.

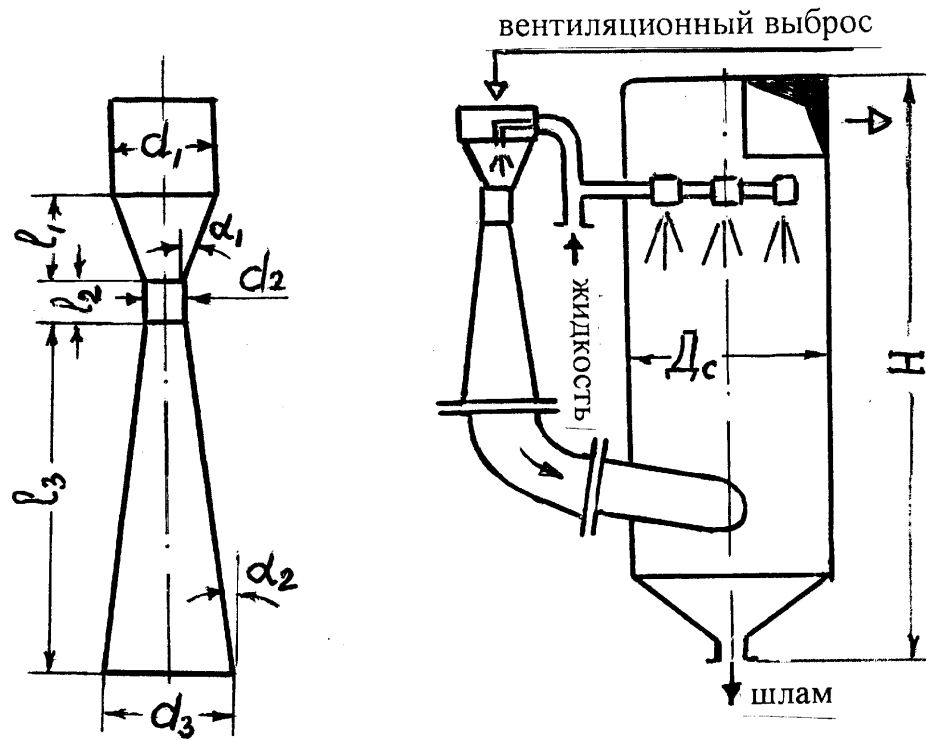


Рис.4.18. Скруббер с трубой Вентури

. К ним следует отнести (см. рис.4.18): $\alpha_1=15...28^\circ$; $\alpha_2=6...8^\circ$; $l_2 = 1,5 D_c$;
 $l_1 = \frac{d_1 - d_2}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2}}$; $l_3 = \frac{d_3 - d_2}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_2}{2}}$. Диаметр сопла, м, рассчитывают по зависимости [5]

$$d_2 = 1,88 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{L}{V_2}}, \quad (4.25)$$

где L – объемный расход газопылевого потока, $\text{м}^3/\text{ч}$, V_2 – скорость газа в горловине, $\text{м}/\text{с}$, равная

$$V_2 = \sqrt{\frac{\Delta P_m \cdot 2g}{\rho_2 \left(\xi_{\text{сyx}} + \xi_{\text{жс}} \cdot \frac{m \cdot \rho_{\text{жс}}}{\rho_2} \right)}}, \quad (4.26)$$

где $\xi_{\text{сyx}} = 0,165 + 0,034 l_2 / [d_2 (0,06 + 0,028 l_2 / d_2)] V_2 / V_{3\text{в}}$, $V_{3\text{в}}$ – скорость звука, $\text{м}/\text{с}$, $\xi_{\text{жс}} = 1,4 \xi_{\text{сyx}} \cdot m^{-0,316}$; $\rho_2, \rho_{\text{жс}}$ – плотность газа и жидкости соответственно, $\text{кг}/\text{м}^3$; m – удельный расход подаваемой жидкости в трубу Вентури, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Обычно принимают скорость газа в горловине не выше $80 \text{ м}/\text{с}$, удельный расход жидкости до $0,0006 \text{ м}^3/\text{м}^3$, при этом гидравлическое сопротивление доходит до величины 4 кПа .

В скрубберах с трубой Вентури эффективность улавливания пыли слабо зависит от её смачиваемости.

В газоуловителях типа КМП вода используется многократно до содержания пыли в воде 0,5 г/л. Их производительность изменяется от 7000 м³/ч до 140000 м³/ч.

Фракционная эффективность улавливания пыли в трубах Вентури определяется по зависимости [7]

$$\eta_i = 1 - \exp\left(-1,56 \cdot m \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{ч}} \cdot d_{\text{ч}} \cdot V_{\text{э}}}{18 \cdot \mu_{\text{э}} \cdot d_{\text{кан}}}}\right), \quad (4.27)$$

где m в л/м³, $d_{\text{кан}}$ – диаметр каплей жидкости, м.

Диаметр каплей жидкости зависит от конструкции распыливающего устройства. Для приближенных расчетов можно воспользоваться зависимостью из [35]

$$d_k = \frac{18,3 \cdot d_c}{\text{Re}_9^{0,59}}, \quad (4.28)$$

где d_c – диаметр сопла, м, $\text{Re}_9 = \frac{V_{\text{жс}} \cdot d_c}{\nu_{\text{ж}}}$, $\nu_{\text{ж}}$ – кинематическая вязкость жидкости, м²/с, $V_{\text{жс}}$ скорость жидкости при истечении из сопла форсунки, м/с, $V_{\text{жс}} = \sqrt{\frac{2g \cdot P_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}}$, $P_{\text{ж}}$ – давление жидкости перед соплом форсунки, кг/м². При $\text{Re} > 20000$ отношение d_k/d_c ориентировочно равно 0,06. При диаметре сопла 1...1,5 мм образуется мелкое и очень мелкое распыление жидкости, при диаметре сопла 2...4 мм образуются капли средних размеров. Тангенциальные форсунки дают весьма эффективное распыление жидкости, расчет которых представлен в [30].

Помимо скрубберов КМП перспективными являются скрубберы КЦМП (рис.4.19), в которых жидкость подается в конфузор в виде равномерной пленки, в результате чего предотвращается отложение шлама цементирующей пыли. На выходе из диффузора установлены закручивающие лопасти для создания вращательного движения. В нем скорость газа изменяется в диапазоне от 40 до 150 м/с, плотность орошения жидкостью от 0,2 до 0,6 л/м³, при этом гидравлическое сопротивление при высоких скоростях доходит до 3 кПа. При таких условиях эффективность улавливания частиц пыли размером до $d_{\text{ч}} = 1$ мкм составляет 95...99 % [1].

Разработан ряд высоконапорных скрубберов Вентури для расхода очищаемого газа от 0,47 до 23 м³/с с диаметром горловины от 85 до 420 мм и с расходом орошающей жидкости от 0,3 до 46 л/с. Для улучшения их экономических показателей орошающая вода используется многократно.

Эти пылеуловители требуют применения высоконапорных вентиляторов, а следовательно и повышенных энергозатрат. Удельный расход электроэнергии составляет 1,2...1,5 МДж на 1000 м³/ч газа.

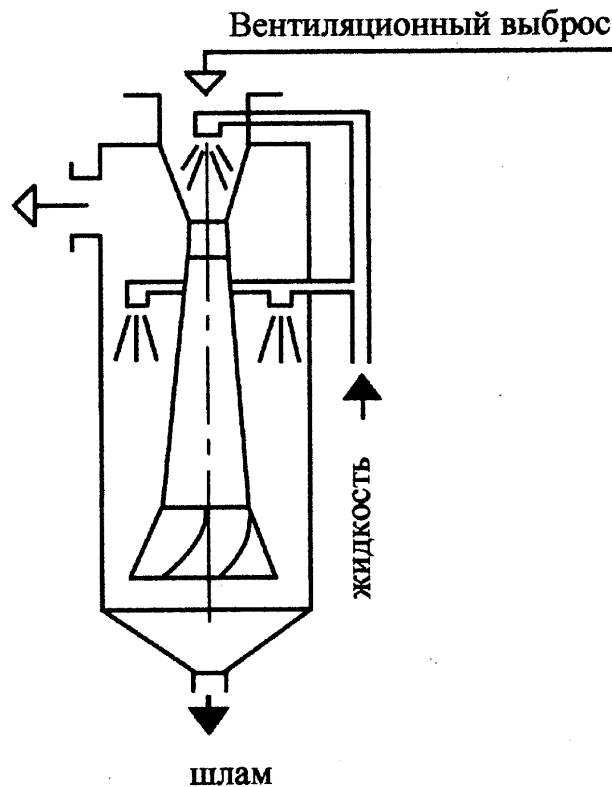


Рис.4.19. Коагуляционный пылеуловитель КЦМП

При расчете параметров труб Вентури скрубберов КМП и КЦМП используются нижеприведенные зависимости.

Местный коэффициент потери давления равен

$$\xi_{\text{сyx}} = 0,165 + 0,034 \frac{l_z}{d_z} \left(0,06 + 0,028 \cdot \frac{l_z}{d_z} \right) \cdot \frac{M_z}{M_a}. \quad (4.29)$$

При диапазоне изменения горловины трубы (см. рис.4.18) $10 \cdot d_z \geq l_z \geq 0,15 \cdot d_z$ гидравлическое сопротивление равно

$$\Delta P_z = \xi_{\text{сyx}} \cdot \frac{V_z^2 \cdot \rho_z}{2}, \quad (4.30)$$

где d_z, l_z – диаметр и длина горловины, м, $V_{зв}$ – скорость звука, м/с.

$$\Delta P_{\text{жс}} = \xi_{\text{жс}} \cdot \frac{V_z^2 \cdot \rho_{\text{жс}} \cdot m}{2}, \quad (4.31)$$

где m – удельный расход орошающей жидкости, $\text{м}^3/\text{м}^3$,
 $\xi_{\text{жс}} = A \cdot \xi_{\text{сyx}} \cdot m^B$, $A = 0,215$ и $B = -0,54$ при центральном подводе жидкости перед конфузоре трубы Вентури; $A = 0,63$ и $B = -0,3$ при центральном подводе жидкости в конфузор трубы; $A = 13,4$ и $B = 0,024$ при периферийном подводе жидкости в конфузор.

Величина гидравлического сопротивления трубы Вентури преимущественно определяется потерей давления в горловине, поэтому для инженерных расчетов допустимо скорость газа в горловине определять по зависимости, м/с:

$$V_z = 4,45 \sqrt{\frac{\Delta P_z}{\rho_z \left(\xi_{сyx} + \xi_{жс} \cdot \frac{m \cdot \rho_{жс}}{\rho_z} \right)}}. \quad (4.32)$$

Парциальная эффективность улавливания частиц пыли представлена в табл.4.7.

Таблица 4.7

$d_{ч}, \text{мкм}$	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	8,0	10
$\eta_i, \%$	45	90	93	95	96	97	99	100

Парциальную эффективность КМП Вентури можно определить и по эмпирической зависимости (4.27).

Полная эффективность очистки газа с учетом дисперсного состава пыли определяется по методике, изложенной в разделе 2.1.

Для труб Вентури оптимальными считаются следующие геометрические характеристики: угол сужения конфузора $\alpha_1 = 15...28^\circ$, длина горловины $l = 0,15 \cdot d_z$, где d_z – диаметр горловины трубы, угол раскрытия диффузора $\alpha_2 = 6...8^\circ$. При расходе газопылевого потока до $1 \text{ м}^3/\text{с}$ $d_z = 85 \text{ мм}$ и расход орошающей жидкости $0,6...1,4 \text{ кг/с}$, длина трубы 1800 мм , при увеличении расхода газопылевого потока до $5 \text{ м}^3/\text{с}$ расход орошающей жидкости увеличится до 5 кг/с , длина трубы составит 4500 мм .

Диаметр горловины трубы Вентури d_z , м рассчитывается по зависимости

$$d_z = 1,88 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{L}{V_z}}. \quad (4.33)$$

Аппарат может быть применен для очистки воздуха, содержащего помимо мелкодисперсной пыли и химические вредные вещества при подаче абсорбирующего раствора. Абсорбирующий раствор должен вступать в химическую реакцию с вредным веществом и образованием безвредных веществ.

Для расчета параметров пылеуловителей КМП удобно пользоваться номограммами, представленными на рис.4.20 и 4.21 [10]. При известной величине газопылевого выброса L , принятом орошении газа жидкостью m и рассчитанном по зависимости (4.28) назначаемом гидравлическом сопротивлении определяется величина удельной мощности контактирования газа с жидкостью $E_{жс}$. По известному значению d_{50} для данного вида пыли и его дисперсного состава и найденной величине $E_{жс}$ по рис. 4.21 определяется общая степень очистки пылевых выбросов.

Номограммы рассчитаны при изменении удельного орошения газа жидкостью m от $0,2$ до $0,6 \text{ л/м}^3$, гидравлического сопротивления ΔP от 1000 до 3500 Па , расхода очищаемого газа L от 6 до 60 тыс. м^3 . Плотность частиц улавливаемой пыли изменяется в пределах от 1590 до 3850 кг/м^3 (рис.4.21).

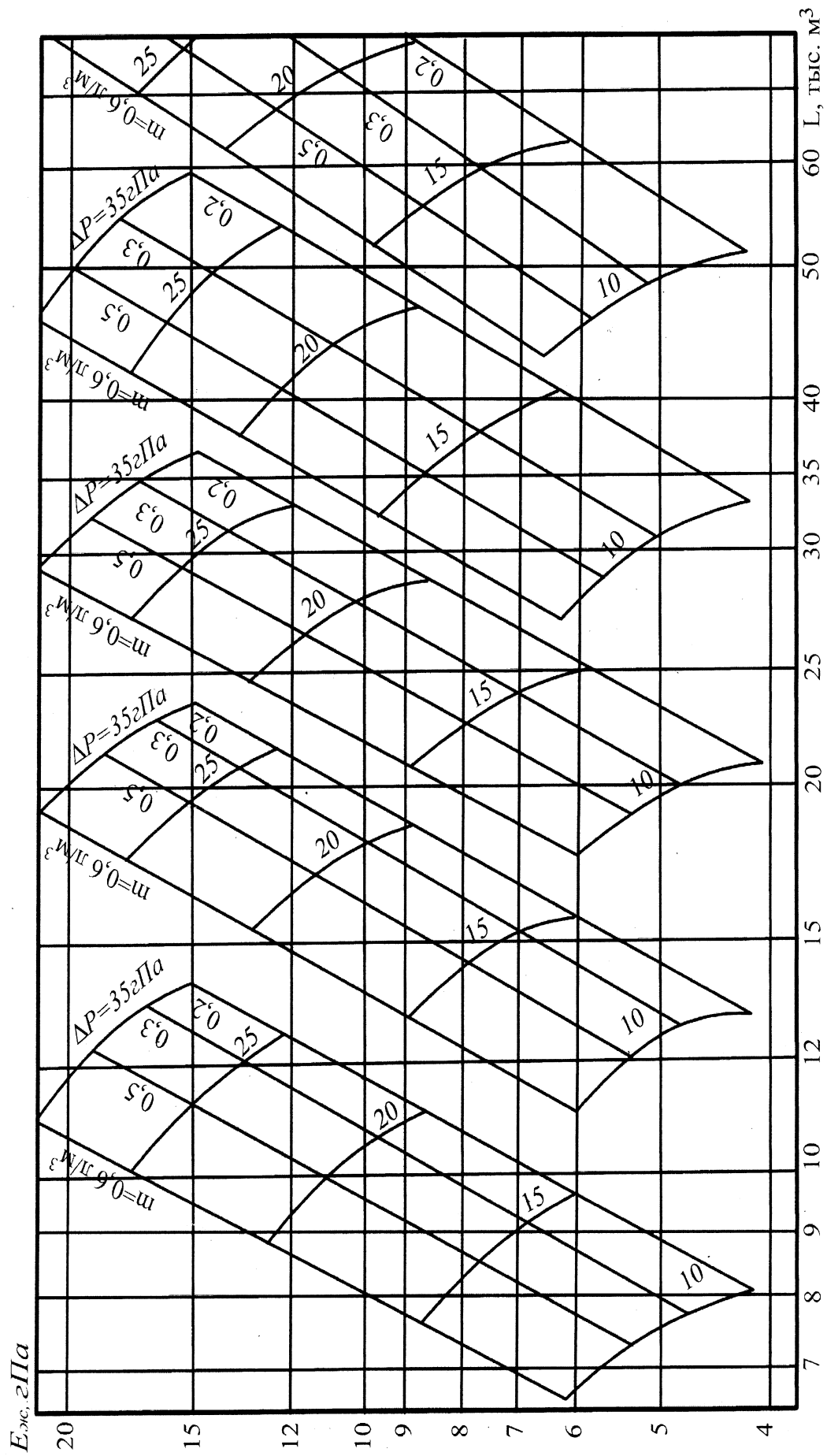


Рис. 420 Номограмма для определения удельной мощности контактирования газа с жидкостью пылеуловителей КМП [10]

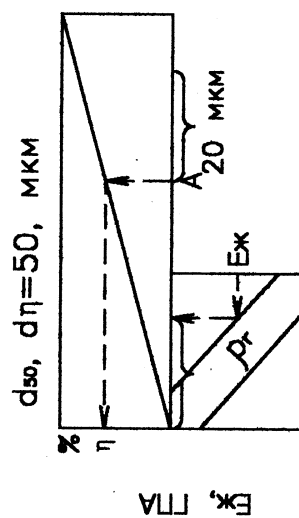
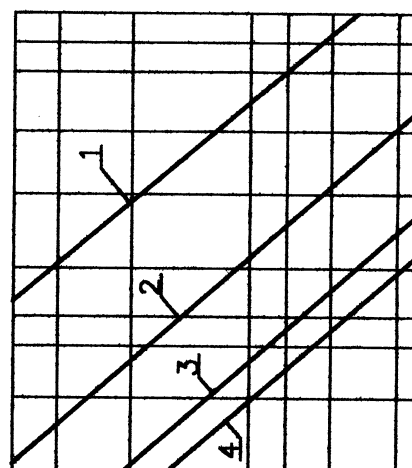
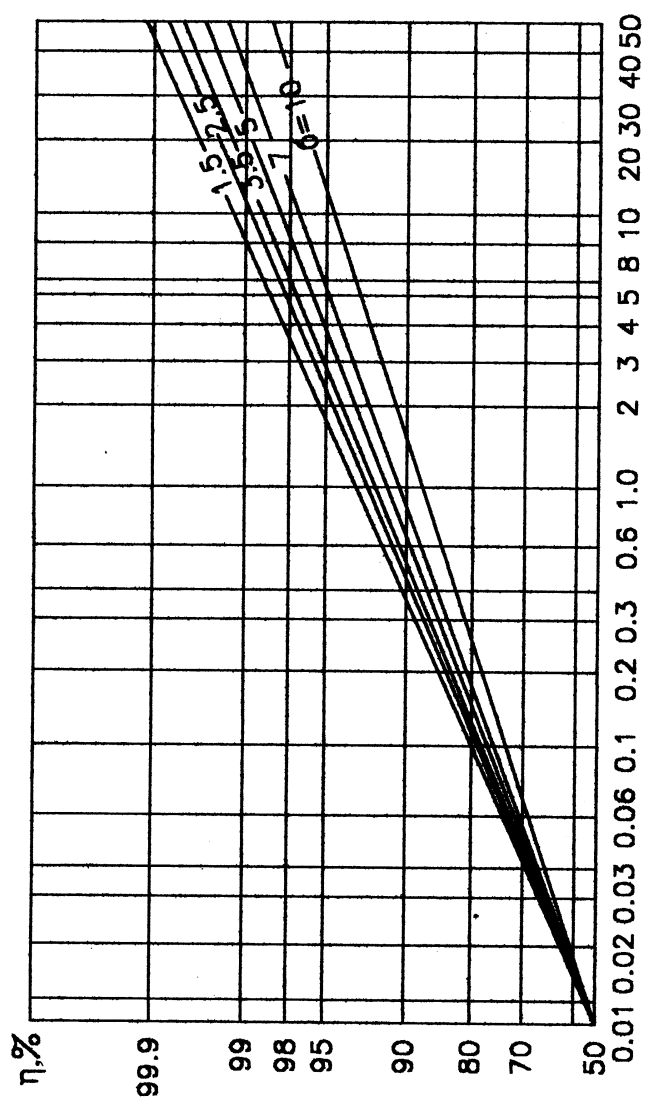


Рис.4.21. Номограмма определения общей степени очистки выбросов от пыли в пылеуловителе КМП: плотность пыли, кг/м^3 , 1 – 1590; 2 – 2650; 3 – 2750; 4 – 3850.

Из приведенных данных следует, что способ пылеулавливания с применением трубы Вентури применим для очистки значительных объемов вентиляционного воздуха от мелкодисперсной пыли, при этом потребуются повышенные энергозатраты по сравнению с другими способами.

Правила пользования номограммами рассмотрим на примере 4.1.

Пример 4.1. Определить степень очистки воздуха с расходом $L = 105$ тыс.м³/ч от кварцевой пыли плотностью $\rho = 3200$ кг/м³ при удельной плотности орошения водой $m = 0,5$ л/м³, температуре $t = 40^\circ\text{C}$ в КМП с параметрами: медианный диаметр $d_{50} = 26$ мкм, дисперсия пыли $\sigma = 2,5$, гидравлическое сопротивление $\Delta P = 2500$ Па.

Решение. По номограмме на рис.4.20 при заданных величинах L , m и ΔP находится соответствующее им значение контактной мощности $E_{жс} = 1500$ Па. По найденному значению контактной мощности по рис.4.21 определяется для кварцевой пыли $d_{\eta=50} = 0,038$ мкм.

Значение $d_{\eta=50}$ определяется для улавливания кварцевой пыли по зависимости (3.6) $d_{\eta=50}^* = 0,038 \sqrt{(2650/3200) \cdot (1,92 \cdot 10^{-5} / 1,82 \cdot 10^{-5})} = 0,035$ мкм, где $1,82 \cdot 10^{-5}$ и $1,92 \cdot 10^{-5}$ – вязкость газа при 20°C и 40°C соответственно.

Затем на оси абсцисс логарифмически вероятностной координатной сетки (рис.4.21) находится точка, соответствующая медианному диаметру пыли $d_{50} = 26$ мкм, и от нее влево откладывается отрезок, равный расстоянию от начала координат до точки $0,035$ мкм. Из найденной точки A (см. рис.4.21) восстанавливается перпендикуляр до пересечения с лучом, соответствующим показателю дисперсии пыли $\sigma = 2,5$. Ордината найденной точки пересечения будет равна искомой степени очистки $\eta = 99$ %.

Номограммы позволяют при требуемой эффективности очистки определять другие экологические параметры очистного аппарата. К примеру, при заданном значении η по номограмме на рис.4.21 определяется величина контактной мощности $E_{жс}$ и при известном расходе загрязненного вентиляционного воздуха L определяются параметры требуемого аппарата КМП. Следует иметь в виду, что величина $d_{\eta=50}$ определяется в обратном порядке.

Представленными номограммами следует пользоваться при запыленности воздуха не выше 30 г/м³. При многократной циркуляции воды содержание твердых частиц в ней не должно превышать величины $0,5$ г/л.

Ниже приведены примеры расчета характеристик очистных аппаратов пенного, ударно – инерционного, насадочного типов и циклона СИОТ.

Пример 4.2. Рассчитать пенный аппарат для очистки вентиляционных выбросов с расходом 53400 м³/ч от пыли с начальной концентрацией $c_n = 2$ г/м³ и дисперсным составом:

$d_{ч}, \text{ мкм}$	0...5	5...10	10...15	15...20	20...30	>30
$\delta, \%$	24	26	17	6	13	14

1. Принимается скорость газа в свободном сечении аппарата $V_c = 3 \text{ м/с}$.
2. Площадь сечения аппарата равна $F = 53400/3600 \cdot 3 = 4,9 \text{ м}^2$.
3. Определяется диаметр корпуса аппарата $D = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,9}{3,14}} = 2,5 \text{ м}$.
4. Принимается плотность орошения газа водой $l = 8 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$.
5. Определяется расход воды $G_{\text{жс}} = 8 \cdot 4,9 = 39,2 \text{ м}^3/\text{ч}$.
6. Принимается отношение площади отверстий дырчатой решетки к площади сечения аппарата равное $\varphi = 0,2$, площадь отверстий будет равна $F_{\text{отв}} = 4,9 \cdot 0,2 = 1 \text{ м}^2$.
7. Принимается диаметр отверстий $d_{\text{отв}} = 0,007 \text{ м}$. Шаг между отверстиями равен $h = d_{\text{отв}} \sqrt{\frac{0,91}{\varphi}} = 0,007 \sqrt{\frac{0,91}{0,2}} = 0,015 \text{ м}$.

8. Высота пены H_n на тарелке определяется по зависимости из [28]

$$H_n = 4d_{\text{отв}} \left(\frac{V_c^2}{\varphi^2 \cdot g \cdot d_{\text{отв}}} \right)^{0,2} = 4 \cdot 0,007 \left(\frac{9}{0,04 \cdot 9,81 \cdot 0,007} \right)^{0,2} = 0,14 \text{ м}.$$

9. Требуемое давление на преодоление гидравлического сопротивления сухой тарелки и пены на ней определяется по зависимости из [28]

$$P_c = \frac{1,2 \cdot V_c^2}{\varphi^2} + 6500 \cdot H_n + \frac{4 \cdot \sigma}{d_{\text{отв}}} = \frac{1,2 \cdot 9}{0,04} + 6500 \cdot 0,14 + \frac{4 \cdot 0,06}{0,007} = 1214 \text{ Па},$$

где $\sigma = 0,06 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ - поверхностное натяжение жидкости в отверстиях тарелки.

10. Используя фракционную степень очистки газа, представленную на рис. 4.6 для гидрофильной пыли с плотностью частиц 2500 кг/м^3 , получим по усредненным данным фракций пыли:

$d_{\text{ч}}^{\text{сп}}, \text{ мкм}$	2,5	7,5	12,5	17,7	25	>30
$\eta_i, \%$	84	91	94	98	100	100

11. Общая степень очистки равна $\eta = (84 \cdot 24 + 91 \cdot 26 + 94 \cdot 17 + 98 \cdot 6 + 100 \cdot 13 + 100 \cdot 14)/100 = 86,9 \%$.

12. При очистке гидрофобной пыли с такой же плотностью частичек общая степень очистки будет равна

$$\eta = (68 \cdot 24 + 92 \cdot 26 + 95 \cdot 17 + 98 \cdot 6 + 99,5 \cdot 13 + 100 \cdot 14)/100 = 82,3 \%$$

Достижение более высокой степени очистки возможно за счет снижения скорости газа в аппарате, увеличения плотности орошения, что повлечет увеличение мощности вентилятора и водяного насоса.

Пример 4.3. Рассчитать характеристики пылеуловителя ПВМ для очистки вентиляционных выбросов с расходом $L = 1 \text{ м}^3/\text{с}$ при температуре газа $t = 20^\circ\text{С}$, с плотностью частиц пыли $\rho_{\text{ч}} = 2700 \text{ кг/м}^3$ следующего дисперсного состава:

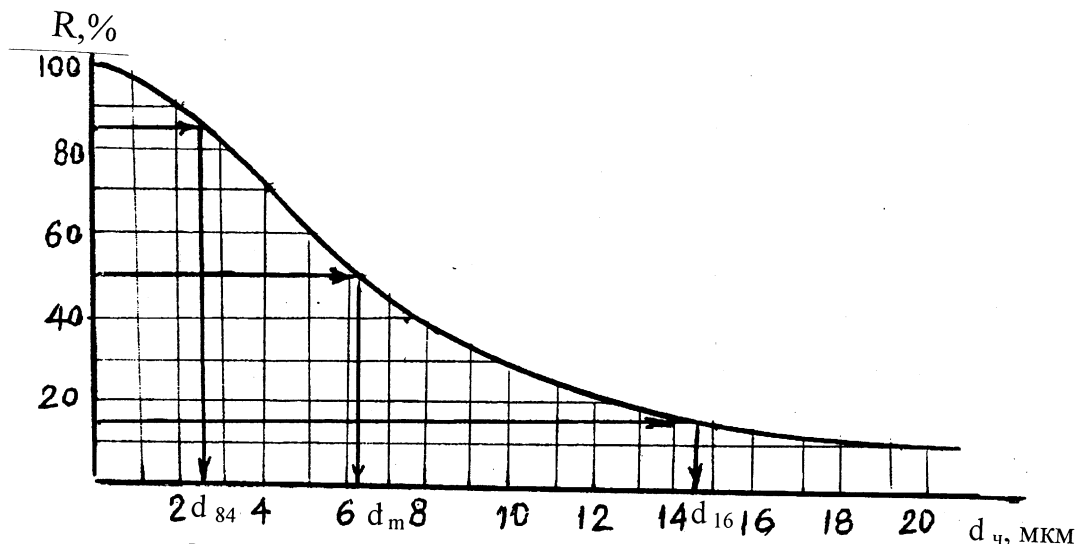
$d_q, \text{мкм}$	0...1	1...3	3...5	5...10	10...20	> 20
$\delta, \%$	10	20	30	20	10	10
$R, \%$	100	90	70	40	20	10

где δ - процентное содержание средней величины фракции, R – показатель функции распределения фракций пыли в процентах по убывающему остатку.

Дисперсия пыли составляет $\sigma = 1,7$; $d_{50} = 1,5 \text{ мкм}$ (размер частиц, улавливаемых на 50% в ПВМ, взят из п.4.4), смачиваемость пыли 100 %.

Решение.

1. Используя данные дисперсного состава пыли, строим графическую зависимость $R=f(d_q)$ и по ней определяем медианную величину частиц пыли d_m (средний размер пыли), $d_{84,1}$ и $d_{15,9}$ – значения размеров частиц пыли, в границах процентного содержания которых по остатку принято определение дисперсии равное 84,1 % и 15,9 % соответственно.



2. Из графика следует, что $d_{15,9} = 14,5 \text{ мкм}$, $d_{84,1} = 2,5 \text{ мкм}$ и $d_m = 6,3 \text{ мкм}$.

3. Определяем логарифм дисперсии пыли

$$\lg \sigma_q = \lg d_{15,9} - \lg d_m = \lg 14,5 - \lg 6,3 = 1,16 - 0,8 = 0,36.$$

4. Принимаем расстояние от низа перегородки пылеуловителя до верхнего уровня воды в нем $\delta = 0,15 \text{ м}$ (см. рис.4.11). Этой величине соответствует стандартное отклонение в функции распределения парциальных коэффициентов очистки (данные представлены в п. 4.4) $\lg \sigma_\eta = 0,2$.

5. Используя зависимость (3.5) применительно к известным значениям d_m

$$\text{и } d_{50} \text{ находим параметр } x = \frac{\lg \frac{d_m}{d_{50}}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_q}} = \frac{\lg \frac{6,3}{1,5}}{\sqrt{0,2^2 + 0,36^2}} = \frac{0,623}{0,41} = 1,52.$$

6. По табл.2.1 определяем параметр $\Phi(x)$ равный 0,931, выражающий общую эффективность очистки выбросов от пыли, которая равна $\eta = 93,1 \%$.

7. Определяем удельный расход газа, проходящий через 1 м перегородки $L^* = L / l_n = 1/0,8 = 1,25$.

8. По зависимости (4.23) определяю гидравлическое сопротивление аппарата $\Delta P = 10^4 \cdot \delta + 880 \cdot \sqrt{L^*} = 10000 \cdot 0,15 + 880 \sqrt{1,25} = 2484 \text{ Па}$.

Пример 4.4. Рассчитать степень очистки газовых выбросов расходом $L = 1 \text{ м}^3/\text{с}$ и температурой 20°C от пыли дисперсного состава, представленного в примере 4.3, в аппарате с неподвижной насадкой из колец Рашига.

Решение.

1. Принимаем насадку с размерами $50 \cdot 50 \cdot 5 \text{ мм}$, у которой эквивалентный диаметр равен $d_g = 0,027 \text{ м}$, удельная поверхность $f = 95 \text{ м}^2/\text{м}^3$, свободный объем $\varepsilon = 0,79 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

2. Принимается плотность орошения газа водой $l = 1,65 \text{ кг/кг}$.

3. Определяется минимально допустимая скорость газа в аппарате по зависимости $V_z^{\min} = 10 \cdot \frac{d_g^{1,7} \cdot f}{l^{0,43}} = 10 \cdot \frac{0,027^{1,7} \cdot 95}{1,65^{0,43}} = 1,5 \text{ м/с}$.

4. Определяется внутренний диаметр насадочного аппарата

$$D = \sqrt{\frac{1,27 \cdot L}{V_c}} = \sqrt{\frac{1,27 \cdot 1}{1,5}} = 0,92 \text{ м}. \text{ Принимаем } D = 0,9 \text{ м, тогда ско-}$$

рость газа составит $V_z = 1,58 \text{ м/с}$.

5. Рассматриваются варианты высоты насадки $h_n = 1 \text{ м}$ и $h_n = 2 \text{ м}$.

6. Определяем критерий Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot V_z \cdot \rho_z}{9,81 \cdot f \cdot \mu_z} = \frac{4 \cdot 1,58 \cdot 1,2}{9,81 \cdot 95 \cdot 1,83 \cdot 10^{-5}} = 445,$$

где μ_z - динамическая вязкость газа, $\text{Па} \cdot \text{с}$ при температуре 20°C .

7. Используя данные п. 4.4, при скорости газа $1,58 \text{ м/с}$ и высоте насадки $h_n = 1 \text{ м}$ размер частиц пыли, улавливаемых на 50 %, равен $d_{50} = 1,25 \text{ мкм}$ и из предыдущего примера медианный диаметр пыли равен $d_m = 4,8 \text{ мкм}$, $\lg \sigma_\eta = 0,38$, тогда при $\lg \sigma_\eta = 0,29$ для насадочных пылеуловителей [5] получим

$$x = \frac{\lg(d_m / d_{50})}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_\eta}} = \frac{\lg(4,8 / 1,25)}{\sqrt{0,084 + 0,144}} = 1,22.$$

8. По табл.2.2 определяем параметр $\Phi(x) = 0,885$, следовательно, $\eta = 88,5 \%$.

9. Для насадки высотой $h_c = 2 \text{ м}$ имеем: $d_{50} = 0,8 \text{ мкм}$, тогда

$$x = \frac{\lg(4,8 / 0,8)}{\sqrt{0,29 + 0,38}} = 1,63 \text{ и параметр } \Phi(x) \text{ равен } 0,947, \text{ следовательно,}$$

$\eta = 94,7 \%$.

10. По зависимости из [6] определяем гидравлическое сопротивление насадки $\Delta P = 10 \xi \cdot V_z^2 \cdot \rho_z \cdot h_c$, где $\xi = 12$ - коэффициент гидравлического сопротивления насадки с размерами $50 \cdot 50 \cdot 5 \text{ мм}$. Для насыпной высоты насадки $h_n = 1 \text{ м}$ потеря давления составит $\Delta P = 10 \cdot 12 \cdot 1,58^2 \cdot 1,2 \cdot 1 = 352 \text{ Па}$, для $h_n = 2 \text{ м}$ - $\Delta P = 704 \text{ Па}$.

11. Определяем гидравлическое сопротивление каплеуловителя, устанавливаемого на выходе очищенного газа из аппарата. Наиболее часто применяют каплеуловитель инерционного типа в виде насадки из стружек, колец Рашига,

пластин зигзагообразной формы и т.д. Для насадки $100 \cdot 100 \cdot 10$ мм коэффициент местного сопротивления $\xi = 1,8$; для зигзагообразных каплеуловителей – $\xi = 6,5$; для каплеуловителей уголкового типа $\xi = 2,5 \dots 3$ [30].

Скорость газа в каплеуловителе уголкового типа принимается $V_k = 3 \dots 5$ м/с, для зигзагообразных $V_k = 5 \dots 6$ м/с.

Приняв каплеуловитель уголкового типа, гидравлическое сопротивление составит $\Delta P = \xi \cdot V_k^2 \cdot \rho_g / 2 = 3 \cdot 36 \cdot 1,2 / 2 = 65$ Па.

12. Гидравлическое сопротивление опорной решетки насадки обычно составляет $20 \dots 25$ Па.

13. Общее гидравлическое сопротивление насадочного аппарата составит $\Delta P_o = 704 + 65 + 25 = 794$ Па.

Пример 4.5. Рассчитать характеристики мокрого циклона СИОТ для очистки газа от пыли, параметры которого приведены в примере 4.3.

Решение.

1. Принимается скорость газа в циклоне $V_g = 5$ м/с.

2. Определяется диаметр циклона $D = \sqrt{\frac{1,27 \cdot 1}{5}} = 0,5$ м.

3. Принимается скорость газа на входе в циклон $V_{gx} = 13$ м/с.

4. По зависимости (4.25) определяется гидравлическое сопротивление аппарата $\Delta P = 147 \cdot V_{gx}^2 - 980 = 930$ Па.

5. По зависимости на рис.4.13 для сопротивления $\Delta P = 930$ Па и диаметра циклона $D = 0,5$ м находится значение $d_{50} = 0,8$ мкм.

6. По зависимости (3.5) при $d_{50} = 0,8$ мкм, $d_m = 4,8$ мкм, $\lg \sigma_\eta = 0,38$ (см. пример 4.3) и из раздела 4.5 $\lg \sigma_\eta = 0,716$ определяется параметр осаждения

$$x = \frac{\lg(d_m / d_{50})}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg \sigma_\eta}} = \frac{\lg(4,8 / 0,8)}{\sqrt{0,51 + 0,144}} = \frac{0,778}{0,468} = 1,66.$$

7. По данным табл. 2.2 определяем значение нормальной функции распределения $\Phi(x) = 0,955$, тогда общая эффективность очистки выбросов от пыли составит $\eta = 95,5$ %.

8. При недостаточной степени эффективности следует повысить скорость газа на входе в циклон до $V_{gx} = 20$ м/с, при этом гидравлическое сопротивление аппарата повысится до значения 1960 Па.

В этих условиях по зависимости на рис.4.15 величина частиц пыли, улавливаемой на 50 %, уменьшится до значения $d_{50} = 0,35$ мкм и общая эффективность очистки станет равной $\eta = 99,5$ %.

С увеличением скорости газа на входе в циклон в 1,5 раза скорость газа в циклоне также увеличится до $V_g = 7,5$ м/с, при этом диаметр циклона станет равным $D = 0,4$ м. С увеличением скорости газа потребная мощность вентилятора увеличится в $1960 / 930 = 2,1$ раза.

5. Пористые фильтры

Фильтрация пыли в пористой среде обеспечивает высокую степень осаждения взвешенных частиц с любыми размерами, вплоть до близких к молекулярным. Происходит улавливание аэрозольных частиц при огибании ими препятствий, образованных на его пути структурными элементами пористого слоя.

В процессе фильтрации происходит отсеивание, инерционный захват и гравитационное осаждение частиц. Ситовой эффект определяет степень осаждения частиц, частицы размером более 1 $\mu\text{м}$ вследствие инерции не могут огибать препятствия, как это происходит с газовым потоком, и происходит их зацеп с препятствием и осаждение в застойных зонах фильтра.

Уловленные фильтрующим материалом частицы образуют пылевой слой, повышающий эффективность осаждения пыли. Однако при этом снижается газопроницаемость фильтрующего материала, для восстановления которой необходима периодическая регенерация фильтра.

Наиболее распространенными пористыми фильтрующими очистными аппаратами (фильтрами) являются:

- волокнистые,
- фильтры - туманоуловители,
- воздушные,
- масляные
- тканевые,
- зернистые,
- фильтровентиляционные агрегаты.

В разделе приведены данные по основным показателям фильтрующих аппаратов, необходимых для выполнения расчета характеристик фильтров, конструкции и компоновки их приведены в [1,2,6,10,25,27,30,38, 40,46].

Основные характеристики фильтровальных материалов приведены в табл.П.1.4.

5.1. Волокнистые фильтры

Фильтрующим элементом волокнистых фильтров (рис.5.1, 5.2) является слой волокон различной толщины. Это фильтры объемного действия, так как рассчитаны на улавливание и накопление частиц преимущественно по всей своей толщине. Они разделяются на тонковолокнистые, глубокие и грубоволокнистые.

Тонковолокнистые фильтры улавливают мелкодисперсную пыль с размерами частиц 0,5 $\mu\text{м}$ и более с эффективностью не менее 99 %. Диаметр волокон фильтрующего материала менее 5 $\mu\text{м}$.

Скорость фильтрации $V_2=0,01\ldots0,1$ м/с , гидравлическое сопротивление чистых материалов $\Delta P = 200\ldots 400$ Па , забитых пылью – 700...1500 Па . Допустимая удельная нагрузка на материал находится в пределах 0,01...0,1 $\text{м}^3/\text{с}\cdot\text{м}^2$. Эти фильтры не подлежат регенерации.

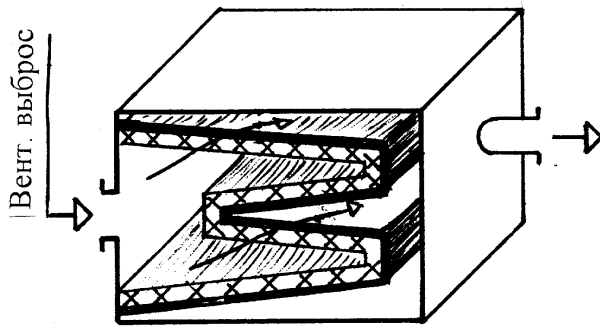


Рис.5.1. Фильтр ФП и с набивным лавсаном

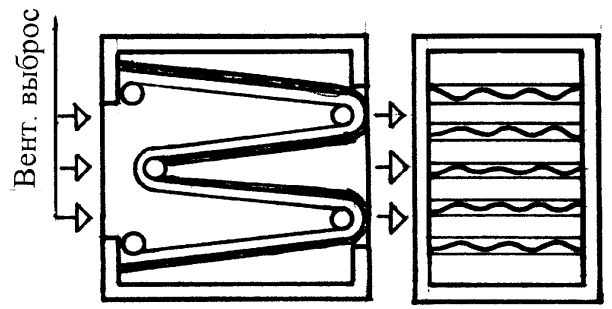


Рис.5.2. Рамный фильтр с материалом ФПП тонкой очистки

При входной концентрации пыли в газе не более $0,5 \text{ мг/м}^3$ фильтрующий материал может очищать запыленный газ длительностью несколько месяцев без его замены. Кроме этого, фракционный состав пыли не должен содержать крупных частиц, при их наличии требуется установка очистного оборудования, улавливающего крупные частицы.

Фильтрующий элемент из набивных лавсановых волокон диаметром 20 мкм в качестве первой ступени очистки и из многослойного синтетического материала перхлорвинила (ФПП) или полиакрилонитрила (ФПАН) в качестве второй ступени очистки с волокнами диаметром 1...2 мкм обеспечивает улавливание мелкодисперсной пыли с эффективностью более 99 %.

Производительность этих фильтров невысокая: от 0,01 до $1,4 \text{ м}^3/\text{с}$, с фильтрующей поверхностью от $0,25 \text{ м}^2$ до 33 м^2 соответственно.

Грубоволокнистые фильтрующие материалы ФГ из лавсанового материала с низким начальным гидравлическим сопротивлением до 100 Па и высокой пылеемкостью более 120 г/м^2 применяются для предварительной очистки газа при необходимости улавливания пыли с высокой эффективностью. Диаметр волокон 15...25 мкм, плотность набивки 15 кг/м^3 . Они улавливают частицы крупнее 1 мкм при удельной нагрузке до $1 \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{м}^2$ и скорости газа при фильтрации до $0,1 \text{ м/с}$. Фильтрующий материал заменяется при возникновении сопротивления $\Delta P = 0,3...0,5 \text{ кПа}$, дальнейшая его эксплуатация экономически не выгодна вследствие возросшей потребляющей мощности электродвигателем вентилятора. При входной концентрации пыли до 1 мг/м^3 смена грубоволокнистого фильтра производится не позднее 6 месяцев.

Глубокие многослойные волокнистые фильтры состоят из глубокого лобового слоя грубых волокон диаметром 8...20 мкм и замыкающего слоя из тонких волокон. Чаще используются в системах стерилизации воздуха с периодической стерилизацией фильтрующего материала острым паром, а также при подаче приточного воздуха в помещения особой чистоты (производство элементов микроэлектроники, микробиологические технологии и т.д.).

5.2. Фильтры – туманоуловители

Туманоулавливание – процесс выделения из газовых потоков взвешенных в них жидких частиц размером менее 10 мкм. Применяются волокнистые самоочищающиеся фильтры, состоящие из слоев стеклянных, синтетических и металлических волокон (рис.5.3) преимущественно для очистки воздуха, удаляемого от ванн травления, анодирования, электролиза растворов и т.д.

Содержание аэрозолей в туманообразных выбросах выражается миллиграммами в 1 м³ воздуха.

Отличительной их особенностью является образование пленки жидкости, удаляющейся по мере скопления в виде капель, то есть они работают в режиме саморегенерации.

Размер капель конденсирующихся аэрозолей составляет 0,3...0,5 мкм, что затрудняет их улавливание в пористых фильтрах.

При наличии в тумане значительного количества твердых частиц пыли фильтрующий элемент забивается. Возможно образование нерастворимых солевых отложений при взаимодействии солей жесткой воды с газами.

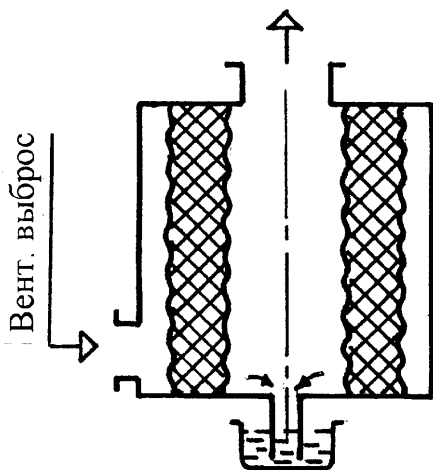


Рис. 5.3. Цилиндрический туманоуловитель

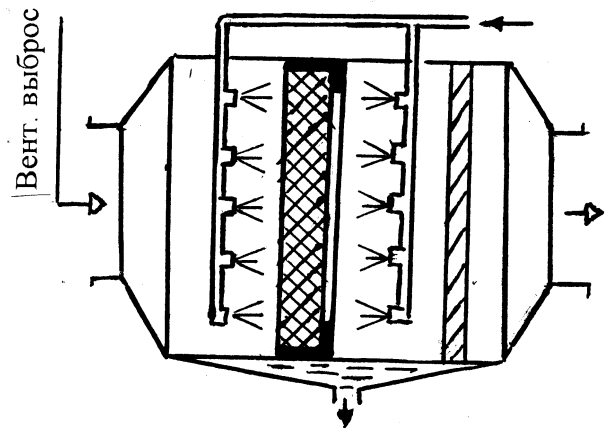


Рис. 5.4. Высокоскоростной туманоуловитель с промывкой

Туманоуловители подразделяются на:

- низкоскоростные ($V_2 \leq 0,2 \text{ м/с}$), снаряженные волокнами размером 5...20 мкм, осаждают частицы диаметром менее 1 мкм;
- высокоскоростные ($V_2 \geq 0,5 \text{ м/с}$) со слоем грубых волокон размером 20 ...100 мкм для выделения из газа частиц крупнее 1 мкм.

Низкоскоростные туманоуловители способны осадить пыль диаметром частиц $d_v \leq 3 \text{ мкм}$ с эффективностью 98% и $d_v \leq 1 \text{ мкм}$ с эффективностью 92...98% при удельной нагрузке менее $0,2 \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{м}^2$ и гидравлическом сопротивлении 1000...1500 Па. Толщина фильтрующего материала из полимерных волокон войлока с пористостью слоя 88...92 % колеблется от 0,01 до 0,1 м.

Высокоскоростные туманоуловители (рис.5.4) осаждают частицы $d_q \geq 3$ мкм с эффективностью до 99,9 %, частицы $d_q = 1 \dots 3$ мкм - с эффективностью 95% и частицы $d_q \leq 1$ мкм - с эффективностью 75...95% при удельной нагрузке $0,5 \dots 1,5 \frac{м^3}{с \cdot м^2}$ и гидравлическом сопротивлении 1,5...8 кПа. При снижении скорости фильтрации происходит падение эффективности очистки выбросов.

Толщина однослойного материала колеблется от 3 до 12 мм, вес его 1 м² составляет 0,2...1 кг.

Широко используется схема туманоуловителя, состоящего из двух соосно расположенных цилиндрических стальных проволочных сеток диаметром проволоки до 3 мм, пространство между которыми заполнено волокнами. Стекловолокна выдерживают температуру до 400°C, волокна из полипропилена – 80°C. Эти материалы позволяют улавливать туманы растворов кислот и щелочей, в связи с этим туманоуловители широко используются в гальваническом производстве.

Фильтры гальванические волокнистые ФВГ-М, ФВГ-Т, ФВГ-С-Ц предназначены для очистки аспирационного воздуха от жидких и твердых аэрозольных частиц в гальванических и травильных производствах [38].

Применяются при операциях хромирования, никелирования, цинкования, травления в щелочах, электрохимическом обезжиривании. Освоен их выпуск на производительность по воздуху 5; 7,5; 10; 20; 40 и 60 м³/ч. Их начальное гидравлическое сопротивление 300 Па, конечное – 700 Па, эффективность очистки доходит до 96 %. Фильтр ФВГ-С-Ц эффективно улавливает и газообразные цианистые соединения, обезвреживание которого производят путем орошения иглопробивного войлока водным раствором 5...10 % NaOH. Р Фильтры ФВГ-М и ФВГ-Т регенерируются путем изъятия из корпуса кассет, состоящих из складок фильтрующего иглопробивного войлока в сетчатом каркасе, и промывкой их водой с последующей обработкой сточных вод в очистном устройстве. Удельная фильтровальная поверхность составляет 0,035...0,06 м³/м²·с.

На выходе из туманоуловителя устанавливают сеточный брызгоуловитель из проволоки легированной стали диаметром 0,2...0,3 мм, удельная нагрузка на сетку брызгоуловителя составляет 1...2,5 м³/с·м², гидравлическое сопротивление сетки - 40...50 Па..

Для регенерации фильтров при осевших на поверхностях частиц сажи, окислов металлов и солей применяется периодическая промывка водой под давлением до 0,2 МПа с расходом до 0,2 м³/м² в течение 0,5...2 мин.

Для очистки грубодисперсных туманов и улавливания брызг применяются сетчатые брызгоуловители, изготовленные в виде многослойных рукавов из набора стальной переплетенной проволоки диаметром 0,2...0,3 мм. Пористость таких уловителей мелких брызг составляет 98...99 %, удельная поверхность проволоки 200...400 м²/м³. Их сопротивление при скорости газа до 2 м/с не превышает 150 Па. Эффективность очистки выбросов от частиц размером 1...3 мкм составляет около 90 %.

Фильтр ФОВ предназначен для очистки выбросов, содержащих абразивно-металлическую пыль от станков. Очистная установка включает в себя

вентилятор производительностью $400 \text{ м}^3/\text{час}$, корпус фильтра с суконным материалом и сборник пыли.

Для очистки от масляного тумана при металлообработке с использованием смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) применяется очистная установка ФРМ, состоящая из вентилятора, на выходе из колеса которого смонтировано кольцо из фильтровального пористого материала. Уловленные капли жидкости собираются в нижней части корпуса вентилятора и отводятся в сборник СОЖ.

Для улавливания мелкодисперсных аэрозолей различных масел находят применение электрические туманоуловители, перед которыми устанавливаются сетчатые фильтры. В них уловленные и сконденсированные аэрозоли стекают по осадительному цилиндрическому заземленному электроду. На внутренний коронирующий электрод подается напряжение 13000 В . Полученный конденсат может возвращаться в производство. Эффективность улавливания аэрозолей размером менее 1 мкм составляет $85\ldots 90 \%$ при скорости газа в электрическом поле до 1 м/с . Производительность их невысокая, например, туманоуловитель ЭВМУ-30 очищает воздух от масла расходом не более $30 \text{ м}^3/\text{ч}$. Применяются также пластинчатые электроды. Метод расчета характеристик электрофильтров представлен в разделе 6.

5.3. Воздушные фильтры

Для поддержания высокой чистоты воздуха или стерильных условий используются фильтры тонкой очистки с эффективностью не менее 99% . В ячейковых фильтрах типа ЛАИК или ФЯЛ в качестве фильтрующего материала используются синтетические волокна диаметром $1\ldots 2 \text{ мкм}$ из перхлорвинила, диацетатцеллюлозы (ФПП, ФПА), нанесенные на основу из более толстых волокон. Скорость фильтрования – до $0,1 \text{ м/с}$. Схематично они принципиально не отличаются от фильтра, представленного на рис.5.1.

Концентрация пыли в очищенном воздухе не должна превышать 30% предельно допустимой концентрации в рабочей зоне. Допускается до 50% очищенного до такой степени воздуха использовать на рециркуляцию.

Вентиляционные воздуховоды, подающие в помещение воздух особой чистоты, изготавливаются из нержавеющей стали или винипласта. Фильтры устанавливаются на нагнетательной стороне вентилятора. Начальное гидравлическое сопротивление воздушного фильтра $\Delta P = 100\ldots 200 \text{ Па}$.

Фильтры, изготовленные из стекловолокна диаметром от 2 до 15 мкм , применяются для очистки горячих газов с температурой до 400°C , допустимая скорость фильтрации до $0,25 \text{ м/с}$, улавливают частицы диаметром более 1 мкм . Они регенерируются обратной продувкой чистым воздухом.

Широко используются плоские фильтры для очистки наружного и рециркуляционного воздуха в системах кондиционирования и приточной вентиляции (ФяРБ, ФяВБ, ФяПБ, ФяУБ, ФяГ). В качестве фильтрующего материала используются металлические и винипластовые сетки, полипропилен, стекловолокно. Конструктивно они представляют установочную раму с ячейкой, содержащей фильтрующий материал. По показаниям микроманометров,

установленных в воздухоочистной камере до и после фильтра, контролируется аэродинамическое сопротивление. Удельная воздушная нагрузка изменяется в пределах $0,3 \dots 2 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$. Регенерация фильтрующего материала может производиться 10-процентным раствором каустической соды. Рамки фильтра часто применяются с размерами $500 \times 500 \times 50 \text{ мм}$, могут иметь и другие размеры.

Ячейковые фильтры ФяГ имеют гофрированный фильтрующий материал, что позволяет увеличить удельную воздушную нагрузку до $3 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ при этом гидравлическое сопротивление составит около 250 Па .

Фильтры ячейковые складчатые (ФяС) применяются преимущественно в качестве второй ступени очистки воздуха от пыли с размерами частиц менее 5 мкм с эффективностью $99,9\%$ [38]. Фильтрующий материал выполнен в виде складок, уложенных на гофрированный сепаратор из алюминиевой фольги. Они могут заменять фильтры с фильтрующим материалом ФПП, ФПА. Применяются для очистки воздуха, подаваемого в помещения особой чистоты (микроэлектроника, микробиология, пищевая промышленность и т.д.), а также для очистки вытяжного воздуха от опасных микроорганизмов. Выпускаются фильтры производительностью от 150 до $4000 \text{ м}^3/\text{ч}$ при удельной воздушной нагрузке от $0,25$ до $1 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ и начальном гидравлическом сопротивлении $60 \dots 100 \text{ Па}$.

Фильтры ячейковые складчатые типа ФяС-Ф чаще используются для очистки приточного и рециркуляционного воздуха в качестве второй ступени после менее эффективных фильтров, допустимая удельная воздушная нагрузка на фильтр не должна превышать $0,3 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$. При достижении перепада давления на фильтре 450 Па необходимо производить его замену.

Фильтры складчатые ФСК изготавливаются в двух вариантах: для использования очистки воздуха от мелкодисперсной пыли с размером частиц $0,3 \text{ мкм}$ и выше с эффективностью $99,99\%$ в двух последовательно установленных фильтрах, а также для одновременной очистки от пыли и газообразных загрязнителей на складчатых фильтрах и адсорбентах из активированного угля, силикагеля или цеолита (фильтры ФСК-Х). Удельная воздушная нагрузка допускается в пределах $0,01 \dots 0,017 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$. Производительность различных чаще всего используемых агрегатов составляет $1000 \dots 4000 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Фильтры ФяК с гофрированным фильтрующим материалом из полиэфирных волокон с вкрапленным в нее активированным углем способны не только очищать воздух от пыли, но и адсорбировать газообразные загрязнители [38]. Выпускаются они производительностью $1700 \dots 3500 \text{ м}^3/\text{ч}$ с начальным гидравлическим сопротивлением $\Delta P = 60 \text{ Па}$ и удельной воздушной нагрузкой $0,07 \dots 0,09 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$. Их удельная сорбционная емкость адсорбционной поверхности составляет $12 \dots 15 \text{ г}/\text{м}^2$. Эффективность очистки от пыли с размером частиц более 1 мкм составляет до 98% . Установка за гофрированным материалом кассеты с активированным углем позволяет существенно увеличить сорбционную емкость, однако при этом увеличится начальное гидравлическое сопротивление примерно в два раза. Расчет высоты насыпного слоя адсорбента, продолжительности адсорбционного периода и гидравлическое сопротивление возможно определить по зависимостям из [28].

5.4. Масляные фильтры

Широко используются ячейковые масляные фильтры типа ФЯР (рис.5.5). Это разъемные коробки, заполненные фильтрующими слоями из гофрированных плетеных промасленных сеток, масляное сетчатое покрытие периодически обновляют, предварительно удаляя промывкой уловленную пыль. Стальные проволоки диаметром $0,25...0,35$ мм образуют поверхности в виде гофров из сеток под углом 90° друг к другу, высота гофров $4...6$ мм. Вместо стальных сеток используются маты из модифицированного пенополиуретана толщиной 20 мм, устойчивого против воздействия масла, бензина.

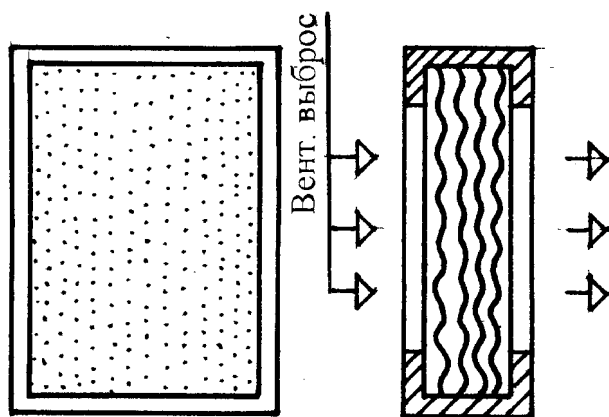


Рис. 5.5. Ячейковый масляный фильтр ФЯР

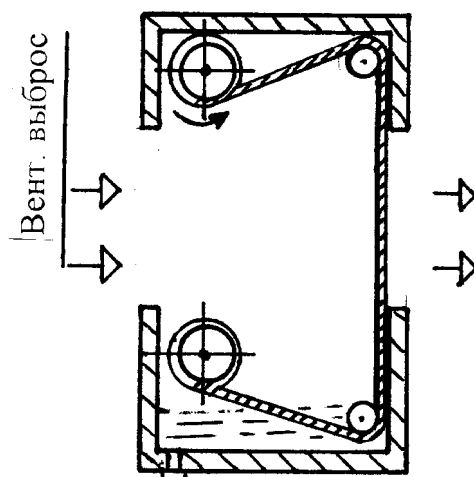


Рис. 5.6. Рулонный автоматический фильтр ФРУ

Пенополиуретан повторно используется после обработки 20-процентным щелочным раствором и многократным отжатием на валах.

Начальное гидравлическое сопротивление сеток составляет не более $50...100$ Па, удельный расход масла $0,9$ кг/м². Применяется масло промышленное, трансформаторное, приборное и другие типы в зависимости от температурного режима работы фильтра в холодный период года.

Эффективность очистки от мелкодисперсной пыли не более 85 %.

Находят применение и самоочищающиеся масляные фильтры типа ФРУ, КдМ, Кт (рис.5.6). Движущаяся сетчатая панель проходит масляную ванну, отмываясь от уловленной пыли, и вновь промасливается. Сетка движется со скоростью $0,003$ м/с. Перемещение сетки происходит электроприводом от сигнала дифференциального манометра при достижении на сетке предельного перепада давления, образуемого при достижении пылеемкости $0,5$ кг/м². Эффективность очистки от частиц пыли диаметром крупнее 3 мкм составляет $90...98$ %, для более мелких частиц — до 60 %. Масло в ванне сменяется при наличии в нем до 7 % пыли.

В качестве фильтрующего материала для очистки значительного по объему воздуха используют слегка промасленные маты длиной до 25 м, уложенные в перемещающиеся сетчатые транспортеры, обеспечивая очистку воздуха от частиц диаметром менее 10 мкм с эффективностью 90 %.

Сложность применения масляных фильтров определяется необходимостью регенерации отработанного масла.

Применяются масляные фильтры для очистки воздуха перед поступлением его в турбогенераторные установки, воздушные компрессоры, в вентиляционных системах промышленных кондиционеров. Используются они и в качестве первой ступени при обработке воздуха до особой чистоты на фильтре второй ступени.

5.5. Тканевые фильтры

Тканевые фильтры широко используются в так называемых рукавных фильтрах (рис.5.7, рис.5.8), имеющих весьма широкое применение. Они представляют собой аппараты с корпусами прямоугольной или круглой формы. Внутри корпусов установлены фильтрующие рукава диаметром от 100 до 300 мм высотой от 0,5 до 5 м. Газопылевой выброс пропускают через фильтрующую поверхность рукавов. После накопления на их поверхности слоя пыли, гидравлическое сопротивление которого достигает предельно допустимой величины, рукава регенерируют, сбрасывая пыль в бункер. Регенерация проводится путем обратной продувки рукавов с расходом воздуха более $0,03 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ или более 15 % от общего расхода воздуха длительностью импульса 1с или встряхиванием продолжительностью 1...2 мин. Применяется и двусторонняя импульсная продувка с длительностью импульса 0,1...0,4 с и периодами между срабатыванием продувки от 2 до 200 с воздухом давлением до 0,6 МПа.. Используется и продувка рукавов вентиляционным воздухом. Удельная воздушная нагрузка на ткань изменяется в диапазоне 0,02...0,2 $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$. Длину рукавов рекомендуется принимать до 3 м, так как при большей длине не обеспечивается равномерное оседание пыли и его площадь используется недостаточно эффективно [1]. Удельная воздушная нагрузка на ткань должна составлять 0,015...0,05 $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$.

При выборе регенерации рукавов механическим встряхиванием следует учитывать прочностные качества ткани, способность длительно выдерживать знакопеременные нагрузки, вибрационный режим работы [30]. Так, стекловолокно является нестойким на изгиб, поэтому на него допустимо воздействие покачиванием из стороны в сторону без изменения натяжения. Фильтры из эластичных тканей регенерируются волнообразными колебаниями, поднимая и опуская рукава. Встряхивание, покачивание, колебания и прочее выполняется электроприводами.

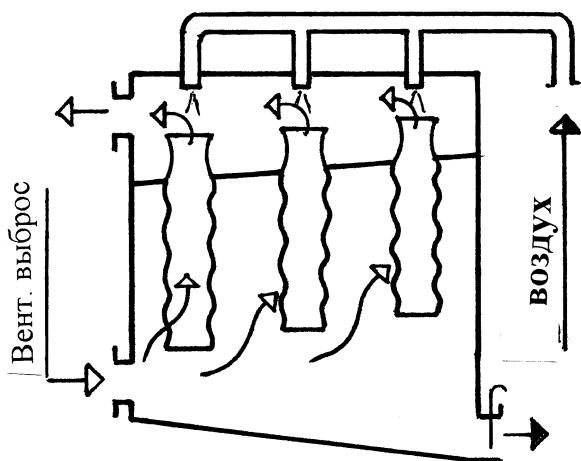


Рис. 5.7. Рукавный фильтр
с продувкой

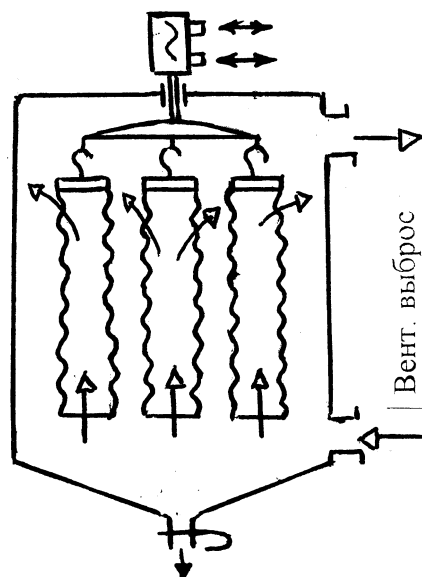


Рис.5.8. Рукавный фильтр
со встряхиванием

В тканевых фильтрах применяются тканые или валяные материалы, изготовленные из натуральных или синтетических волокон диаметром 10...30 мкм. Наиболее часто применяемые ткани представлены в табл.5.1.

Таблица 5.1

Марка ткани	Толщина, мм	Масса, кг на 1м ²	Плотность, кг/м ³	Воздухопроницаемость, м ³ /с·м ²
1. Шерсть+капрон	2,3	0,5	1200	0,16
2. Лавсан	1,4	0,42	1380	0,09
3. Войлок+лавсан	2,5	0,46	1350	0,14
4. Нитрон,тефлон	1,6	0,43	1170	0,11
5. Ткань оксалиновая	0,7	0,51	1500	0,11
6. Стеклоткань	0,65	0,6	2540	0,16
7. Стеклоткань+силикон	0,55	0,61	2000	0,2
8. Стеклоткань+саржа	0,55	0,61	2000	0,2
9. Сукно №2	1,5	0,4	1200	0,05
10. Лавсан двухслойный	2,6	0,94	2200	0,067
11. Войлок	2,0	0,6	1500	0,14
12. Полипропилен	1,5	0,37	920	0,1

Марку ткани выбирают с учетом условий ее работы в рабочей среде (температурный режим, агрессивность среды, абразивность пыли и т.д.).

В табл. 5.2 приведены характеристики фильтрующих тканей по их стойкости против воздействия к износу и к агрессивным средам.

Таблица 5.2

Марка ткани	Допустимая температура, K	Стойкость		
		к износу	к кислотам	к щелочам
1. Хлопок	340	средняя	плохая	хорошая
2. Шерсть	350	средняя	средняя	плохая
3. Полипропилен	350	хорошая	хорошая	хорошая
4. Стеклоткань	515	плохая	хорошая	плохая
5. Капрон, нейлон	350	хорошая	плохая	хорошая
6. Лавсан	390	хорошая	хорошая	средняя
7. Нитрон	373	средняя	средняя	средняя
8. Тефлон	490	средняя	хорошая	хорошая
9. Оксалон	500	хорошая	хорошая	хорошая
10. Сталь нержавеющая	715	хорошая	хорошая	хорошая

Например, в цементной промышленности применяются фильтры типа НС (СМЦ) производительностью до $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ со стеклотканью, очистка воздуха от пыли осуществляется с рукавов диаметром $0,2 \text{ м}$ и длиной $1,37 \text{ м}$. Расход воздуха на одну регенерацию составляет 10% от общего расхода газа, длительность продувки около 1 с . Образующееся гидравлическое сопротивление при оседании пыли доходит до 2000 Па , удельная воздушная нагрузка равна $0,02 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$, степень очистки составляет 99% . Рукавные фильтры относительно быстро могут потерять пропускную способность при очистке воздуха, содержащего слипающуюся пыль, в этом случае применяется более частая регенерация рукавов.

Для особо тонкой очистки воздуха применяется фильтр ФРОС (фильтр рукавный с регенерацией обратной продувкой сжатым воздухом) со степенью очистки 99% . К примеру, для очистки $10000 \text{ м}^3/\text{ч}$ воздуха потребуется 84 рукава диаметром $0,2 \text{ м}$ и длиной 4 м при удельной нагрузке $0,02 \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{м}^2$.

Фильтры типа ФРУ со стеклотканями или с лавсановым иглопробивным антистатическим полотном применяются во взрывоопасных химических производствах, они оборудованы взрывными клапанами из тонкой фольги, предохраняющими аппарат от разрушения в случае возгорания газопылевой смеси.

Фильтры ФРКИ и ФРКН (фильтр рукавный каркасный с импульсной продувкой) являются фильтрами общего назначения с использованием лавсановой ткани или войлока из синтетического материала. При очистке воздуха от абразивной пыли используются устойчивые к истиранию полиэфирные ткани. По сравнению с другими фильтрами они имеют повышенную удельную воздушную нагрузку $0,05 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$, и поэтому удельная масса этих аппаратов, отнесенная к 1000 м^3 очищаемого газа, на 30% меньше.

Рукавные фильтры ФР и ФРУ оборудованы механизмами встряхивания рукавов. В момент встряхивания рукавов секция отключается от всасывающего воздуховода клапанами. Рукавные фильтры ФРМ и ФВС оборудованы механизмом встряхивания и обратной воздушной продувкой.

Шерстяные и хлопчатобумажные ткани характеризуются высокой воздухопроницаемостью, но у них низкая термическая и химическая стойкость.

Перспективными являются материалы, изготовленные на основе фенилона, номекса, оксалона, отличающиеся высокой механической прочностью и эластичностью при температуре до 530 К.

Исходные параметрические данные всего многообразия различных по конструкции и назначению рукавных фильтров находятся в пределах диапазона приведенных выше изменений, поэтому они могут быть основой при расчете характеристик при решении конкретных задач.

5.7. Зернистые фильтры

Зернистые фильтры из сыпучих материалов применяются преимущественно при действии факторов, позволяющих получить более эффективные результаты по сравнению с применением тканевых фильтров. К таким факторам следует отнести: экономические, температурные, прочностные и режимную нестабильность. Зернистые фильтры в ряде случаев более дешевые, способны выдерживать высокие температуры, колебания режима поступления выбросов слабо отражаются на эффективности очистки.

В качестве фильтрующей среды используется песок, галька, шлак, кокс, резина, разные отходы производства.

Эффективность очистки вентиляционных выбросов от мелкодисперсной пыли составляет не менее 95 %.

Зернистые фильтры бывают с неподвижной и подвижной насадкой. Наибольшее распространение получили фильтры с неподвижной насадкой, они конструктивно проще и не нуждаются в сложных устройствах для непрерывной выгрузки отработанной насадки. Фильтры с подвижной насадкой используются, когда фильтрующие гранулы и уловленная пыль могут быть использованы в технологическом процессе и при не высоких требованиях к качеству очистки.

Конструктивные решения зернистых аппаратов весьма разнообразные. На рис.5.9 представлена расчетная схема зернистого фильтра с цилиндрическим расположением слоя неподвижной насадки, его регенерация осуществляется путем создания вибраций контейнера с насадкой электровибратором.

Их сложность – трудность создания эластичного вибрирующего контейнера с зернистым материалом, при встряхивании происходит измельчение материала от возникающих вибраций.

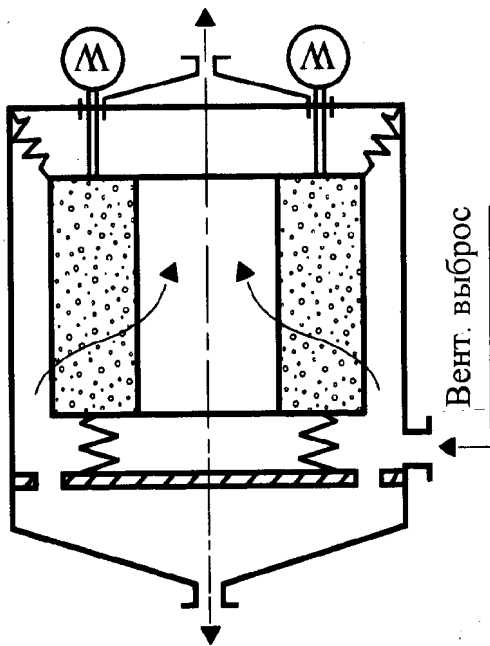


Рис. 5.9. Фильтр с цилиндрическим зернистым слоем с регенерацией методом вибрации

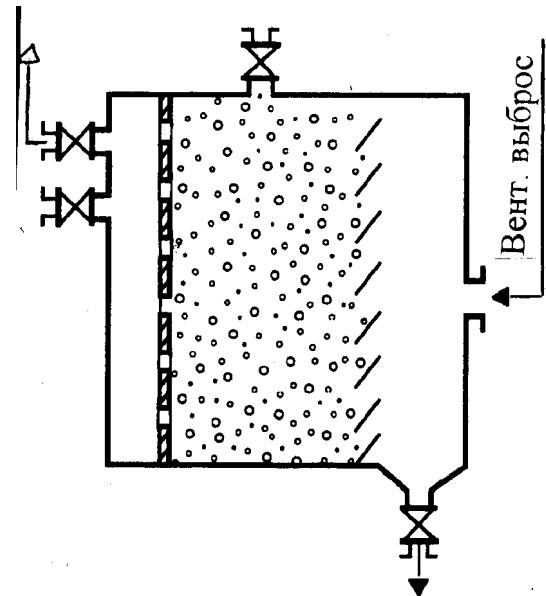


Рис. 5.10. Фильтр шахтного типа с регенерацией продувкой

На рис.5.10 представлена схема фильтра с периодической продувкой. Жалюзийные решетки, расположенные со стороны поступающих выбросов, позволяют не создавать сложные регенерирующие устройства.

На рис.5.11 представлена схема фильтра с горизонтальным расположением фильтрующего материала с периодическим вращением фильтрующего слоя и последовательной продувкой секторов для их регенерации. Применяется для очистки не горячих выбросов с эффективностью 95...99%, общее гидравлическое сопротивление доходит до 1500 Па.

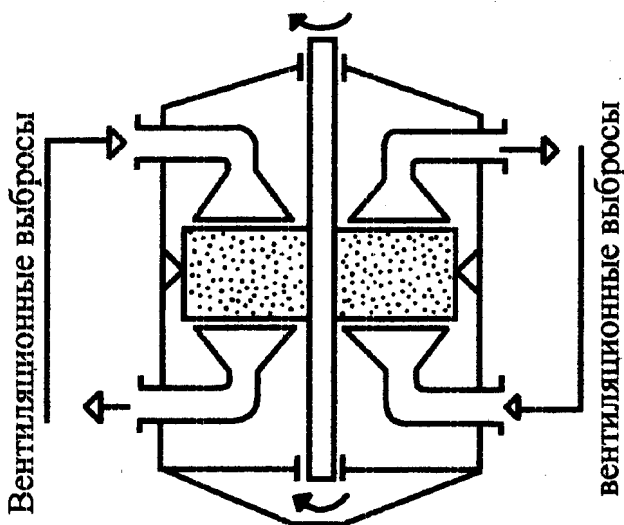


Рис. 5.11. Фильтр горизонтальный с вращением секторов

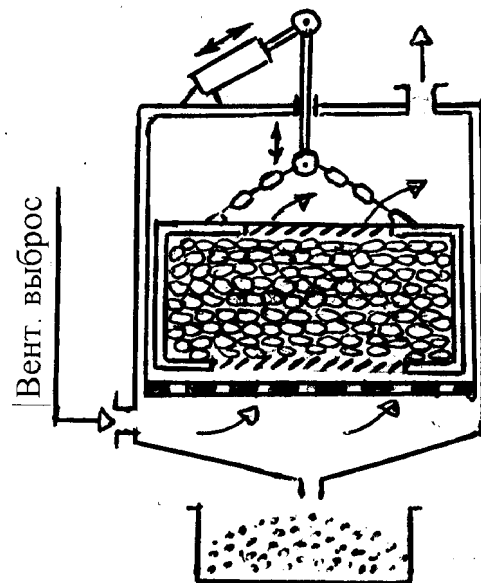


Рис. 5.12. Фильтр цепной с регенерацией встряхиванием

На рис.5.12 представлена схема фильтра с использованием в качестве насадки цепей. Используются для очистки воздуха с высоким содержанием сильно слипающейся пыли и обеспечивают эффективность осаждения пыли до 98% частиц размером до 5 мкм при гидравлическом сопротивлении до 1800 Па.

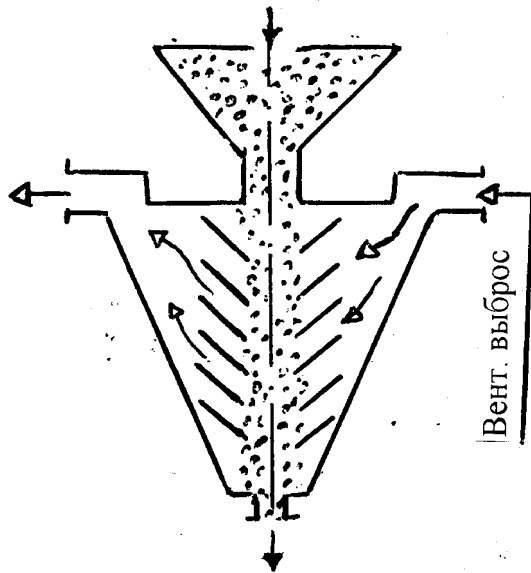


Рис. 5.13. Фильтр с подвижным слоем, используемым однократно

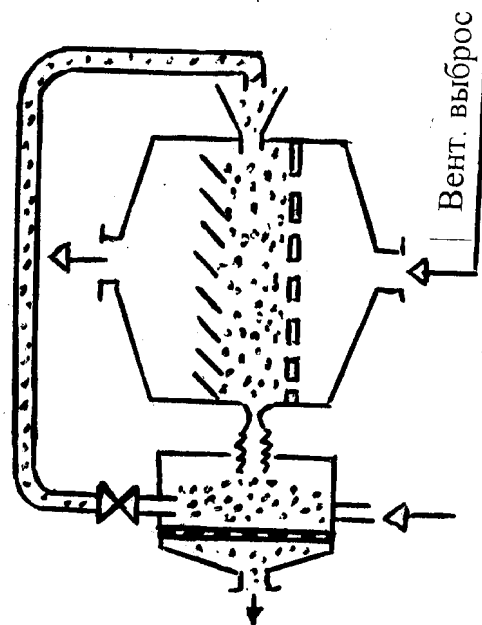


Рис. 5.14. Фильтр с подвижным слоем, используемым многократно

На рис.5.13 представлена схема динамического слоевого фильтра с гравитационным перемещением материала, регенерируемого в отдельном аппарате, запыленная насадка может использоваться в технологическом процессе.

На рис.5.14 представлена схема фильтра с подвижным слоем материала, который после регенерации воздушной продувкой вновь транспортируется воздухом в очистной аппарат.

Для увеличения продолжительности фильтровального режима применяются насыпные зернистые фильтры многослойные, каждый слой имеет различные размеры зерен, уменьшающиеся к выходной части аппарата. Их расчет сводится к раздельному определению характеристик слоев, при этом общее гидравлическое сопротивление не должно превышать назначенной величины.

Для снижения затрат на регенерацию зернистых фильтров и увеличения цикла фильтрования используются зернистые фильтры - циклоны, расчет характеристик которых производится раздельно для циклонной и фильтровальной частей. В зернистый фильтр поступает пыль преимущественно с размерами частиц менее 10 мкм.

Находят применение фильтры со связанной структурой зернистого слоя преимущественно в условиях высоких температур и высокоагрессивных сред. Они имеют высокую механическую прочность, хорошо ре-

генерируются, обладают высокой задерживающей способностью по отношению к самым тонким взвесям.

В качестве фильтровальных перегородок применяются керамические и металлокерамические изделия в виде труб, дисков, патронов, втулок, плит. Из металлических порошков методом спекания получают фильтровальные изделия из нержавеющей стали, титана, меди, карбидов тяжелых металлов с размерами гранул от 0,05 до 1 мм. Удельная фильтрующая поверхность большинства материалов находится в пределах $15...20 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Регенерация их производится обратной продувкой очищенным воздухом давлением 0,15...0,2 МПа через 30...60 мин расходом до 10 % от расхода очищаемого газа.

Высокая эффективность очистки достигается при обеспечении ламинарного течения газопылевого потока через зернистый слой при критерии Рейнольдса не выше 180 [5].

Зернистые фильтры применяются в химической промышленности, в криогенной технике для получения чистого кислорода и водорода, в производствах, использующих чистые газы и т.д.

Зернистые фильтры со связанной структурой способны задерживать частицы размером до 1 мкм. Толщина стенки фильтрующих элементов со связанной структурой колеблется от 0,5 до 5 мм. Они обладают высоким гидравлическим сопротивлением, достигающим до 3000 Па, при удельной нагрузке газа $0,3 \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{м}^2$ и высокой стоимостью, поэтому для очистки вентиляционного воздуха они находят ограниченное применение.

5.5 Фильтровентиляционные агрегаты

Находят применение фильтровентиляционные агрегаты:

- пылеулавливающие (ПАУ, АПР),
- вентиляционные пылеуловители (УВП),
- передвижные фильтровентиляционные установки (ФВУ, ЕМК),
- для улавливания масляного тумана (ФВА-М).

Отличительной особенностью этих агрегатов является наличие в них взаимозвязанных по функциональному назначению циклона, фильтрующих агрегатов, вентилятора с электродвигателем, средства для передвижения агрегата, пульта питания и управления работой агрегата (ППУ).

Агрегат ПАУ предназначен для отсоса и очистки воздуха от крупнодисперсной не слипающейся и не абразивной пыли, в котором частицы пыли с размерами более 30 мкм очищаются с эффективностью 99,5 % при производительности по воздуху от 1250 до 3900 $\text{м}^3/\text{ч}$.

Агрегат АПР предназначен для очистки воздуха от абразивной крупнодисперсной пыли с эффективностью 99,5 % частиц медианным размером до 30 мкм. После циклонного аппарата применены рукавные фильтры. Выпускаются двух типов на производительность 1200 и 1600 $\text{м}^3/\text{ч}$.

Агрегат УВП предназначен для удаления пыли, опилок, стружки. Отличительная его особенность – допустимость отсоса взрывоопасной пыли. Степень очистки пыли с размерами частиц более 5 мкм составляет 99,9 %. В

корпусе фильтра создается разрежение до 1500 Па, поэтому к нему предъявляются повышенные требования по герметичности. Агрегаты выпускаются производительностью 1200, 2000, 3000, 5000 и 7000 м³/ч.

Передвижная фильтровентиляционная установка ФВУ используется при выполнении сварочных работ в помещениях с отсутствием стационарных сварочных постов.

Агрегат ФВА-М предназначен для улавливания масляного тумана, аэрозолей СОЖ и других веществ при операциях механической обработки деталей и других технологических операциях. Фильтрующая часть агрегата (ФВА-10) используется с целью защиты воздухопроводов и вентилятора от пожароопасных отложений.

Высокая эффективность очистки 99,97 % достигается в агрегате ФВА-М за счет трехступенчатой очистки на фильтрах грубой очистки (улавливаются частицы размером до 5 мкм), предварительной очистки (улавливаются частицы размером до 0,3 мкм) и тонкой очистки (улавливаются частицы размером менее 0,3 мкм). Агрегат укомплектован глушителем шума и устройством слива конденсата.

Агрегат ПА212М комплектуется последовательно установленными циклоном, камерой с суконными рукавными фильтрами и механизмом встряхивания, вентилятором и предназначен для очистки вентиляционных выбросов от металлообрабатывающих станков, содержащих абразивную пыль и мелкую стружку. Производительность агрегата 700 м³/час, очищенный воздух с концентрацией мелкодисперсной пыли ниже 30 % от ПДК вновь поступает в производственное помещение.

Агрегат ПА218 предназначен для очистки воздуха от абразивно-металлической пыли и мелкой стружки. Состоит из циклона с вмонтированными в него жалюзьями, вентилятора с электродвигателем, на выходе из которого установлены звукопоглощающие кольца шумоглушителя.

Агрегат ЕМК предприятия "СовПлин" производительностью 1200 и 1500 м³/час обеспечивает очистку вентиляционного воздуха от пыли и вредных газообразных веществ при выполнении сварочных работ. Он состоит из бумажного фильтра, периодически заменяемого на новый, кассеты с активным углем, периодически регенерируемого путем продувки горячим воздухом для десорбции и последующего обезвреживания уловленных веществ, вентилятора. Эффективность очистки от мелкодисперсной пыли и вредных газообразных веществ составляет не менее 95 %.

Агрегат ВИСИ для высокоэффективной очистки газов от мелкодисперсной пыли в системе вытяжной вентиляции, содержащий циклон, сетчатую камеру с перфорированными экранами толщиной 3 мм из полистирола с разностью электрических потенциалов 3,2 кВ на них, вентилятора с электродвигателем. Улавливается пыль с размерами частичек до 0,5 мкм с общей эффективностью 98%.

Пылеулавливающий агрегат ЗИЛ-900М производительностью 720 м³/ч и содержащий циклон, 12 рукавных фильтров, вентилятор с электродвигателем и установленным на выходе шумоглушителем предназначен для очистки воз-

духа от сухой пыли, обеспечивает очистку воздуха с подачей его в рабочую зону производственного помещения [25].

Не рекомендуется использование всех типов фильтровентиляционных агрегатов для очистки воздуха от смолообразующих веществ, быстро забивающих фильтрующие материалы.

Все фильтровентиляционные агрегаты работоспособны в диапазоне температур от -10 до $+50$ °С.

5.8. Расчет параметров фильтровальных тканей

Расчет сводится к определению площади фильтрации, гидравлического сопротивления, частоты и продолжительности регенерации фильтрующего материала, эффективности очистки газовых выбросов от пыли. Для определения наиболее рациональной ткани очистного аппарата требуется также определение эксплуатационных расходов.

При определении фильтровальных свойств ткани при известном (принятом) дисперсном составе пыли (например, $d_{50}=1,1$ мкм) по табл.5.2 вначале назначают марку ткани, исходя из температуры газопылевого потока, абразивности пыли и её химической активности. По общему расходу газопылевого потока L , м³/с, воздухопроницаемости W (табл.5.1) определяется требуемая фильтровальная площадь, м²:

$$F_1 = L/W. \quad (5.1)$$

При плоском фильтре площадь равна произведению ширины на её высоту $F_1 = b \cdot h$, при круглой форме фильтра (рукава) диаметром d : $F_1 = \pi \cdot d \cdot h$.

Определяется дополнительная площадь f_2 отключаемых при предусмотренной регенерации рукавов при их диаметре d_p и длине l_p

$$f_2 = \pi \cdot d_p \cdot l_p. \quad (5.2)$$

Для плоской поверхности фильтрации шириной b и высотой h $f_2 = b \cdot h$.

При выполнении периодической регенерации фильтрующей поверхности задаются количеством отключений рукавов (поверхностей) за 1 час (например, $n = 10$) с продолжительностью регенерации τ_1 , тогда за 1 час продолжительность отключений равна $\tau_o = \tau_1 \cdot n$, что составит $\tau_o/3600$ долю неработающих рукавов.

Общее число рукавов равно

$$N_0 = \frac{F_1}{f_2} \left(1 + \tau_o/3600 \right). \quad (5.3)$$

Продолжительность цикла фильтрования τ_ϕ до наступления заданного предельного гидравлического сопротивления фильтра с осевшей на нем пылью ΔP_{np} определяется постоянной составляющей гидравлического сопротивления самого фильтровального материала с оставшейся после регенерации

пылью ΔP_1 и переменной составляющей ΔP_2 , создаваемой накопившейся при фильтровании пылью [5], т.е.

$$\Delta P_{np} = \Delta P_1 + \Delta P_2. \quad (5.4)$$

Значение ΔP_1 определяется по зависимости

$$\Delta P_1 = K_1 \cdot \mu_z \cdot V_z, \quad (5.5)$$

где $K_1 = (1100 \dots 1500) \cdot 10^6, \text{ м}^{-1}$ – величина постоянная, для лавсана и пыли с размером частиц $d_m (d_{50}) = 10 \dots 20 \text{ мкм}$; $K_1 = (2300 \dots 2400) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ – для частиц пыли с $d_m = 2,2 \dots 3 \text{ мкм}$; $K_1 = (13000 \dots 15000) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ для пыли с частицами $d_m = 0,7 \text{ мкм}$. Для более плотного материала (например, стекловолокна) величину K_1 следует увеличить в 1,5...2 раза.

Значение ΔP_2 определяется по зависимости

$$\Delta P_2 = \mu_z \cdot V_z \cdot c_{вх} \cdot \tau_\phi \cdot K_2 \quad (5.6)$$

или по зависимости для улавливания волокнистой пыли и пуха

$$\Delta P_2 = \frac{817 \cdot \mu_z \cdot V_z^2 \cdot c_{вх} (1 - \varepsilon) \cdot \tau_\phi}{d_m^2 \cdot \varepsilon^3 \cdot \rho_n}, \quad (5.7)$$

где μ_z – динамическая вязкость газа, $\text{Па} \cdot \text{с}$; V_z – скорость газа, м/с ; $c_{вх}$ – концентрация пыли в воздухе, кг/м^3 ; K_2 – параметр сопротивления пыли, м/кг , равный для частиц пыли с медианным диаметром $d_m = 0,7 \text{ мкм}$ $K_2 = 330 \cdot 10^9$; для пыли с $d_m = 3 \text{ мкм}$ $K_2 = 80 \cdot 10^9$; для пыли с $d_m = 12 \dots 20 \text{ мкм}$ $K_2 = (6,5 \dots 16) \cdot 10^9$;

$$\varepsilon = \frac{\rho_\phi - \rho_n}{\rho_\phi} \quad - \text{ пористость пыли, } \rho_\phi, \rho_n - \text{ плотность материала частиц и}$$

насыпная плотность пыли, значения которых представлены в табл.1.2 раздела 1. Пористость пыли зависит от её дисперсности, характеризуемой величиной d_m , и в первом приближении определяется из выражения

$$\varepsilon = 1 - 79 \cdot d_m^{0,47}, \quad (5.8)$$

где d_m имеет размерность м .

Зависимости (5.6) и (5.7) позволяют способом перебора режимов работы очистного аппарата определить наиболее рациональные соотношения между длительностью фильтрации до момента начала регенерации фильтрующего материала и допустимым гидравлическим сопротивлением с учетом потребной мощности вентилятора на преодоление сопротивления.

Начальное гидравлическое сопротивление большинства тканей не превышает значения 1000 Па , за исключением стеклоткани, где оно составляет $1200 \dots 1500 \text{ Па}$, и фетров – $1500 \dots 1900 \text{ Па}$.

Удельная нагрузка на фильтр для тканей из шерсти и синтетических волокон составляет $0,018 \dots 0,022 \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{м}^2$, для малых начальных концентраций пыли, характерных для большинства вентиляционных выбросов, эти величины могут быть увеличены до $0,03 \dots 0,04 \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{м}^2$.

Более точные значения удельной нагрузки на фильтр для различных видов тканей определяются по зависимости

$$q = q_n \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot c_4, \quad (5.9)$$

где q_n – нормативная удельная нагрузка, представленная для различных видов пыли в табл.5.3.

Значения коэффициентов c_1 :

1 – для тканевого фильтра с импульсной продувкой,

1,1 – для нетканых материалов,

0,7 – для фильтров с обратной продувкой.

Таблица

5.3

Значения $q_n, м^3/с \cdot м^2$, для различной пыли				
0,06	0,043	0,033	0,028	0,02
Зерновая Бумажная Табачная Древесная Опиловочная	Асбестовая Целлюлозная Песчаная Гипсовая Известковая Соляная	Цементная Угольная Резиновая Сахарная Керамическая	Зольная Металлическая Пластмассовая Силикатная Красителей	Цветных металлов Моющих средств в Углерода

Значение коэффициента c_2 , зависящее от исходной концентрации пыли в воздухе, представлено в табл.5.4

Таблица 5.4

$c_{вх}, г/м^3$	80	40	20	10	5	3	1
c_2	0,85	0,9	0,95	0,97	1,05	1,1	1,1

Значение коэффициента c_3 , учитывающего влияние дисперсного состава пыли, представлено в табл.5.5.

Таблица 5.5

c_3	1,2...1,4	1,1	1,0	0,9	0,7..0,9
Размер частиц пыли, $мкм$	>100	50...100	10...50	3...10	<3

Значение коэффициента c_4 , зависящее от температуры газа, представлено в табл.5.6.

Таблица 5.6

$t^{\circ}C$	20	40	60	80	100	140	160
c_4	1,0	0,9	0,84	0,78	0,75	0,72	0,7

Эффективность очистки воздуха от пыли зависит не только от структуры фильтрующего материала, но и от размеров, формы, слипаемости пыли,

толщины слоя осевшей пыли, скорости набегающего потока газа и т. д. Наиболее приемлемыми показателями обладают материалы из войлока, так как после регенерации фильтровального материала в нем остается часть пыли,

способствующая эффективному улавливанию мелкодисперсных фракций. Так, при использовании толстой ворсистой шерсти начальная эффективность осаждения частиц пыли размером 0,3 мкм составляет 39 %, а после ее запыленности и регенерации эффективность повысилась до 69 % [30].

Из многообразия воздействующих факторов, определяющих начальное осаждение пыли на тканях, выделяются инерционный и ситовый. Инерционный фактор воздействует на эффективное осаждение пыли размерами более 1 мкм. Ситовый фактор с учетом влияния осевшей пыли эффективно воздействует на улавливание более мелкой пыли.

Многообразие воздействующих факторов на степень осаждения пыли на различных тканях не позволяет установить методы инженерного расчета показателей эффективности очистки пылевых выбросов, поэтому в большинстве случаев эта оценка базируется на экспериментальных данных.

В работе [36] приведены зависимости, позволяющие более достоверно по сравнению с зависимостями, полученными рядом других авторов, определить начальную эффективность фильтровальных материалов.

Эффективность инерционного осаждения пыли определяется по зависимости

$$\eta_u = \frac{(Stk \cdot F)^{3,9}}{(Stk \cdot F)^{3,9} + 4,3 \cdot 10^{-4}}, \quad (5.10)$$

где F – фактор коррекции, равный

$$F = 1 + \frac{1,75 \cdot Re}{150 \cdot (1 - \varepsilon)}, \quad (5.11)$$

Re – критерий Рейнольдса, ε – пористость пыли,

$$Re = \frac{V_z \cdot \rho_z \cdot d'_{экв}}{\varepsilon \cdot \mu_z}, \quad (5.12)$$

$d'_{экв}$ – эквивалентный диаметр зерна зернистых фильтров, волокна, м.

Эффективность зацепления (касания) частиц пыли за зерна или волокна определяется по зависимости

$$\eta_3 = (1 + d_m/d_3)^2 - 1 / (1 + d_m/d_3). \quad (5.13)$$

Граничным условием определения зацепления отдельных частиц или фракций пыли является $d_4/d_3 < 0,35$, поскольку при приближении размера волокон материала или насадки из зерен к размеру частичек пыли проницаемость фильтровального материала будет ничтожно мала.

Начальная эффективность незапыленного фильтрующего материала равна

$$\eta_n = 1 - (1 - \eta_u) \cdot (1 - \eta_3). \quad (5.14)$$

Значение общей эффективности осаждения пыли на большинстве тканях составляет 99,5 % и более.

Однако при чрезмерном увеличении толщины слоя осевшей пыли на тканях происходит ее проскок, поэтому важным параметром, определяющим эффективность очистки, является допустимое гидравлическое сопротивление запыленного материала и межрегенерационный интервал времени. Их значения определяются по зависимостям (5.4) - (5.7).

Примерное соотношение между пылеемкостью тканевого волокнистого материала a_n , г/м², и возникающим гидравлическим сопротивлением ΔP , Па, при начальном гидравлическом сопротивлении материала после его регенерации ΔP_n допустимо применять при ориентировочных расчетах, используя экспериментальные данные [27]. Эта зависимость может быть представлена в виде

$$\Delta P = \Delta P_n + c \cdot a_n, \quad (5.15)$$

где c – коэффициент, зависящий от размера частиц пыли, может быть принят равным: $c = 0,075$ для размера частиц $d_q > 8$ мкм; $c = 0,145$ для $d_q = 5,5$ мкм; $c = 0,34$ для $d_q = 2$ мкм и $c = 0,88$ для $d_q = 0,5$ мкм.

Следовательно, чем меньше размеры осаждаемой пыли, тем больший возникает рост гидравлического сопротивления и тем чаще требуется регенерация материала.

При выборе фильтрующего материала следует учитывать допустимую скорость газового потока. По данным [1] при увеличении скорости с 0,0015 м/с до 0,1 м/с проскок пыли с размером частиц $d_q = 0,3$ мкм через материал увеличивается с 0,2 до 5 %; с размером частиц $d_q = 0,6$ мкм с 0,2 до 1 %, а частицы с размером $d_q = 0,15$ мкм с 0,02 до 3,5 %. Исходя из этих данных, следует при выборе режима пылеочистки воздуха учитывать дисперсный состав пыли. При значительном объеме доли пыли с размерами частиц менее 5 мкм скорость газа должна быть менее 0,01 м/с.

При регенерации ткани продувкой секундный расход продувочного воздуха должен превышать расход фильтруемого газа в 1,5...2 раза.

Срок службы тканей находится в пределах 6...24 мес. и определяется нагрузкой на них, способом регенерации, видом пылевых выбросов.

5.9. Особенности расчета параметров зернистых фильтров

Отличительной особенностью зернистых фильтров от тканевых является допустимая повышенная нагрузка q , составляющая 0,2...0,33 м³/с·м².

В связи с этим фильтровальная площадь при одинаковой производительности требуется значительно меньшая, равная

$$F_\phi = L/q. \quad (5.16)$$

При фильтровании сыпучая насадка фильтров неподвижна и частицы пыли осаждаются внутри насыпного слоя и по мере их осаждения повышается эффект пылеулавливания.

Общий перепад давлений на зернистом слое состоит из перепада на чистом слое ΔP_ϕ , определяемого режимом течения пылегазового потока, и перепада, обусловленного уловленной пылью ΔP_n , т.е. $\Delta P_{\text{общ}} = \Delta P_\phi + \Delta P_n$.

Режим течения определяется величиной критерия Рейнольдса, равного

$$Re = \frac{V_z \cdot \rho_z \cdot d_{экв}}{\varepsilon \cdot \mu_z}, \quad (5.17)$$

где d_z – средний диаметр зерна насадки, м; μ – динамическая вязкость газа, Па·с; ε – пористость насадки, изменяющейся в пределах 0,2...0,5 м³/м³; $d_{экв} = 2/3 \cdot (\varepsilon / (1-\varepsilon)) \cdot d_z$; d_z – диаметр зерна насадки, изменяющийся в пределах (0,1...10)·10⁻³ м.

Для значений $Re \geq 10$ при расчете гидравлических сопротивлений используют зависимости из [5,10]:

$$\Delta P_\phi = \frac{490 \cdot [\mu_z \cdot V_z \cdot H(1-\varepsilon)^2]}{\varepsilon^3 \cdot \Phi^2 \cdot d_z^2}, \quad (5.18)$$

$$\Delta P_n = \frac{1,97 \cdot 10^{-6} (V_z \cdot c_{вх} \cdot \tau \cdot \eta_{нач})}{d_z^2 \cdot \sqrt{d_m}}, \quad (5.19)$$

где Φ – коэффициент формы зерна, для сферических зерен равен 1; для песка, гальки, активного угля – 0,8; для алюмогеля, силикагеля – 0,5; d_m – медианный диаметр пыли, м; $c_{вх}$ – концентрация пыли на входе в зернистую насадку, кг/м³; $\eta_{нач}$ – начальная эффективность зернистого фильтра, определяемой по зависимостям (5.8) – (5.12).

При начальной эффективности зернистого фильтра $\eta_{нач} = 0,9...0,95$ её увеличение зависит от увеличивающейся толщины слоя пыли δ_n , плотности пыли ρ_n и уменьшается с ростом скорости газопылевого потока V_z , диаметра зерна насадки d_z и определяется по зависимости [11]

$$\eta = 1 - e^{-\kappa_n(a + \varepsilon \cdot \tau)}, \quad (5.20)$$

$$\text{где } a = 0,88 \cdot 10^{-7}; \varepsilon = 2,6 \cdot 10^{-11}; \kappa_n = \frac{\delta_n^{0,25} \cdot d_m \cdot \rho_n}{V_z^{0,5} \cdot d_z^{1,5} \cdot \mu_z}.$$

Ниже приведены примеры расчета наиболее часто используемых в промышленности фильтров – туманоуловителей, рукавных и зернистых фильтров.

Пример 5.1. Рассчитать характеристики очистного аппарата для очистки вентиляционного воздуха от аэрозолей водных растворов серной кислоты, дисперсный состав которых и парциальная эффективность очистки которых при скорости фильтрации до 1 м/с имеет значения:

$d_{ч},$ мкм	0...0,5	0,5...1	1...3	3...5	5...10	> 10
$\delta, \% \text{ мас.}$	10	20	30	20	12	8
$\eta_i, \%$	75	85	95	99	100	100

Расход вентиляционного выброса $L = 1,0 \text{ м}^3/\text{с}$.

Требуемая общая эффективность очистки выбросов – не менее $\eta_{тр} = 90 \%$.

Решение.

1. Принимается конструкция высокоскоростного туманоуловителя, представленного на рис.5.6.
2. Принимается удельная нагрузка на площадь фильтрующего элемента $q = 1,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$.
3. Определяется площадь фильтрующей поверхности $F = L/q = 1/1,5 = 0,66 \text{ м}^2$. Принимается диаметр фильтрующего элемента $d = 0,3 \text{ м}$ и высотой $h = 0,7 \text{ м}$.
4. Скорость газа перед фильтрующим элементом $V_c = L/F = 1/0,66 = 1,52 \text{ м/с}$.
5. Принимается ширина двухслойного иглопробивного материала $\delta = 5 \text{ мм}$ из полипропиленового волокна диаметром $d_\phi = 0,07 \text{ мм}$.
6. Для обеспечения равномерной нагрузки на фильтровальный материал перед ним устанавливаем тонкостенную решетку с коэффициентом местного сопротивления $\xi = (F/f_k)^2 - 1$, где f_k – площадь сечения вентиляционного канала, приняв скорость газа в вентиляционном канале $V_k = 5 \text{ м/с}$, $f_k = L / V_k = 1/5 = 0,2 \text{ м}^2$. Тогда $\xi = (1/0,2)^2 - 1 = 24$.
7. Определяем общую эффективность очистки

$$\eta_o = \frac{1}{100} \sum \eta_i \cdot \delta_i = \frac{1}{100} \sum (75 \cdot 10 + 85 \cdot 20 + 95 \cdot 30 + 99 \cdot 20 + 100 \cdot 12 + 100 \cdot 8) = 92,8\%.$$
8. Для случаев, когда требуется повышенная эффективность очистки, необходимо увеличить скорость газопылевого потока до 3...5 м/с, при этом по данным [3] парциальная эффективность составит при улавливании аэрозолей $d < 1 \text{ мкм}$ – 85 %; $d = 3 \text{ мкм}$ – 95 %; $d > 3 \text{ мкм}$ – 100 %.
9. Общая эффективность очистки газа от аэрозолей составит 94 %.
11. Гидравлическое сопротивление аппарата определяется суммой гидравлических сопротивлений фильтрующего материала, равного по данным [8] $\Delta P_1 = 1,5 \dots 2,0 \text{ кПа}$, спрямляющей решетки $\Delta P_2 = \xi \rho_c \cdot V_c^2 / 2 = 241,2 \cdot 2,3 / 2 = 33 \text{ Па}$. Остальные потери давления менее значимы.

Пример 5.2. Определить основные характеристики рукавного фильтра в качестве второй ступени очистки выбросов с концентрацией цементной пыли на выходе из первой ступени $c_{\text{вых}} = 0,001 \text{ кг/м}^3$ и дисперсным составом, представленным в таблице.

$d_{\text{ч}},$ мкм	<1	1...3	3...5	5...10	10...15	> 15
$\delta, \%$	15	40	15	12	10	8

Расход запыленного вентиляционного выброса $L = 2 \text{ м}^3/\text{с}$, температура газа $t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, динамическая вязкость $\mu_c = 0,13 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Эффективность аппарата первой ступени очистки $\eta_1 = 70 \%$. Предельное гидравлическое сопротивление запыленного материала $\Delta P = 1500 \text{ Па}$. Требуется общая эффективность очистки $\eta = 95 \%$.

Решение.

1. В качестве фильтрующего материала по табл.5.1 принимается лавсан толщиной $\delta = 1,5 \text{ мм}$.

2. По зависимости (5.7) определяем допустимую удельную нагрузку на материал, приняв по табл.5.3 нормативную удельную нагрузку $q_n = 0,033 \text{ м}^3 / \text{м}^2 \cdot \text{с}$, $q = q_n \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot c_4$, где $c_1 = 0,7$ – для тканевого материала с обратной продувкой при регенерации фильтра; $c_2 = 1,1$ по табл.5.4; $c_3 = 0,9$ по табл.5.5; $c_4 = 0,95$ по табл.5.6; $q = 0,033 \cdot 0,7 \cdot 1,1 \cdot 0,9 \cdot 0,95 = 0,022 \text{ м}^3$. Определяется площадь фильтровальной поверхности $F_1 = L/q = 2/0,022 = 90,9 \text{ м}^2$.

3. Определяем скорость газа на входе в фильтровальную поверхность $V_g = L / F = 2/90,9 = 0,022 \text{ м/с}$. С учетом дисперсного состава пыли скорость газа соответствует требованиям, изложенным в разделе 5.7.

4. Принимается диаметр рукава $d_p = 0,3 \text{ м}$, длина рукава $l_p = 4 \text{ м}$, тогда фильтрующая поверхность рукава равна $f_p = 3,14 \cdot d_p \cdot l_p = 3,14 \cdot 0,3 \cdot 4 = 3,77 \text{ м}^2$.

5. Принимается продолжительность регенерации фильтрующего материала обратной продувкой $\tau = 10 \text{ с}$ при регенерации за 1 час $n = 100$ рукавов.

6. По зависимости (5.3) определяется требуемое число рукавов с учетом выведения из процесса фильтрации регенерируемых рукавов:
 $N_o = F_1/f_p(1 + \tau \cdot n / 3600) = 90,9/3,77 (1 + 10 \cdot 100/3600) = 31$.

7. По зависимости (5.6) определяется постоянная часть гидравлического сопротивления фильтрующего материала после его регенерации: $\Delta P_1 = K_1 \cdot \mu_z \cdot V_g$. Для медианного диаметра частиц, равного в соответствии с дисперсным составом $d_m = 3 \text{ мкм}$ $K_1 = 2400 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$;
 $\Delta P_1 = 2400 \cdot 10^6 \cdot 13 \cdot 10^{-6} \cdot 0,022 = 686 \text{ Па}$.

8. По зависимости (5.7) определяется функциональная зависимость между переменным гидравлическим сопротивлением за счет количества осевшей пыли на фильтровальном материале и продолжительностью цикла фильтрования: $\Delta P_2 = K_2 \cdot \mu_z \cdot V_g^2 \cdot c_{ax} \cdot \tau_\phi = 80 \cdot 10^9 \cdot 13 \cdot 10^{-6} \cdot 0,00045 \cdot 0,001 \cdot \tau = 0,468 \cdot \tau_\phi$.

10. Рассчитывается зависимость переменной части гидравлического сопротивления очистного аппарата от продолжительности фильтрации воздуха, результаты заносятся в таблицу.

$\tau_\phi, \text{сек}$	1000	2000	2500	3000	3600
$\Delta P_2, \text{Па}$	468	936	1170	1400	1685

10. Определяется предельно допустимая величина переменной составляющей гидравлического сопротивления: $\Delta P_2^{np} = \Delta P_{np} - \Delta P_1 = 2000 - 686 = 1314 \text{ Па}$.

12. Используя представленные в таблице данные, период между регенерациями рукавов для предельного гидравлического сопротивления по условиям задачи 1500 Па составит около 1000 с , т.е. через каждые 16 мин .

13. С учетом среднего диаметра частиц пыли $d_m = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ и используя зависимости (5.8) ... (5.14), применив материал с диаметром волокон $15 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, определяем начальную эффективность осаждения пыли.

14. Эффективность пылеосаждения за счет действия инерционного фактора η_n определяем с использованием зависимостей: $\varepsilon = 1 - 79 \cdot d_m^{0,47} = 0,75$;

$$Re = \frac{V_z \cdot d_z \cdot \rho_z}{\mu_z} = \frac{0,022 \cdot 15 \cdot 10^{-6} \cdot 1,2}{13 \cdot 10^{-6}} = 0,02;$$

$$F = 1 + 1,75 \cdot Re / 150 \cdot (1 - \varepsilon) = 0,999. \quad Stk = \frac{V_z \cdot d_m^2 \cdot \rho_z}{18 \cdot \mu_z \cdot d_z} = \frac{0,022 \cdot 25 \cdot 10^{-12} \cdot 2650}{18 \cdot 13 \cdot 10^{-6} \cdot 15 \cdot 10^{-6}} = 0,41.$$

$$\eta_u = \frac{(Stk \cdot F)^{3,9}}{(Stk \cdot F)^{3,9} + 0,00043} = 0,986.$$

15. При воздействии фактора зацепления эффективность пылеосаждения составит $\eta_z = (1 + d_m / d_z)^2 - 1 / 1 + d_m / d_z = 0,92$.

17. Общая начальная эффективность пылеосаждения составит $\eta_o = 1 - (1 - \eta_u)(1 - \eta_z) = 1 - 0,014 \cdot 0,08 = 0,999$.

Пример 5.3. Рассчитать необходимые характеристики зернистого фильтра, обеспечивающего с эффективностью 95 % очистку вентиляционного воздуха расходом $L = 2 \text{ м}^3/\text{с}$ при температуре $t = 80^\circ\text{C}$ от цементной пыли, медианный диаметр которой равен $d_m = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, плотность материала частиц $\rho_z = 2650 \text{ кг}/\text{м}^3$, насыпная плотность пыли $\rho_n = 1250 \text{ кг}/\text{м}^3$, концентрация пыли на входе $c_{вх} = 0,001 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Решение.

1. Принимается схема фильтра с цилиндрическим зернистым слоем (рис.5.9). Регенерация зернистой насадки осуществляется методом встряхивания с обратной продувкой.
2. Принимается величина удельной газовой нагрузки $q_n = 0,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$.
3. Определяется площадь фильтровальной поверхности $F = L/q_n = 2/0,5 = 4 \text{ м}^2$, при этом скорость газа составит $V_z = 0,5 \text{ м}/\text{с}$.
4. Принимается в качестве зернистого материала гравий со средним размером зерен $d_z = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

$$5. \text{ Определяется пористость слоя пыли: } \varepsilon = \frac{\rho_z - \rho_n}{\rho_z} = \frac{2650 - 1250}{2650} = 0,54.$$

6. Определяется число Рейнольдса по зависимости (5.17):

$$Re = \frac{V_z \cdot \rho_z \cdot d_{экв}}{\varepsilon \cdot \mu_z}, \text{ где } d_{экв} = 2/3 \cdot (\varepsilon / (1 - \varepsilon)) \cdot d_z = 0,0023 \text{ м};$$

$$\rho_z = 353 / (273 + 80) = 1 \text{ кг}/\text{м}^3; \quad Re = \frac{0,5 \cdot 1 \cdot 0,0023}{0,54 \cdot 14 \cdot 10^{-6}} = 151.$$

7. Определяется влияние высоты зернистого слоя H на гидравлическое сопротивление зернистой насадки по зависимости (5.18):

$$\Delta P_\phi = 490 \frac{V_z \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot \mu_z \cdot H}{\varepsilon^3 \cdot d_z} = 490 \frac{0,5 \cdot 0,21 \cdot 14 \cdot 10^{-6} \cdot H}{0,22 \cdot 9 \cdot 10^{-6}} = 364 \cdot H$$

8. По данной зависимости определяется ряд значений ΔP_ϕ и H

$H, м$	0,2	0,5	0,7	1,0	1,2	1,5
$\Delta P_{ф,,}$ $Па$	73	183	255	364	437	546

9. По зависимости (5.19) определяется гидравлическое сопротивление за счет осажденной в зернистой насадке пыли:

$$\Delta P_n = 1,97 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{V_z \cdot c_{ex} \cdot \tau \cdot \eta_n}{d_z^2 \cdot \sqrt{d_m}}. \text{ Для зернистого фильтра со столь значитель-}$$

ной разницей размеров d_m и d_z начальная эффективность осаждения пыли определяется только величиной эффективности инерционного осаждения - η_n .

$$Stk = \frac{V_z \cdot d_m^2 \cdot \rho_u}{18 \cdot \mu_z \cdot d_z} = \frac{0,5 \cdot 25 \cdot 10^{-12} \cdot 2650}{18 \cdot 14 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^{-3}} = 0,044;$$

$$F = 1 + \frac{1,75 \cdot Re}{150 \cdot (1 - \varepsilon)} = 1 + \frac{1,75 \cdot 151}{150 \cdot (1 - 0,75)} = 8,05;$$

$$\eta_n = \frac{(Stk \cdot F)^{3,9}}{(Stk \cdot F)^{3,9} + 0,00043} = \frac{(0,044 \cdot 8,05)^{3,9}}{(0,044 \cdot 8,05)^{3,9} + 0,00043} = 0,976.$$

$$\Delta P_n = \frac{1,97 \cdot 0,5 \cdot 0,001 \cdot 0,976 \cdot \tau}{9 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{5 \cdot 10^{-6}}} = 0,048 \cdot \tau.$$

10. По данной зависимости определяется ряд значений ΔP_n и τ

$\tau, с$	7200	10800	12600	14400	28800
$\Delta P_{n,,}$ $Па$	345	520	605	690	1380

11. Регенерацию фильтра целесообразней организовывать по окончании рабочей смены, то есть через 8 часов, при этом общее гидравлическое сопротивление составит $\Delta P = 1380 + 546 = 1926 \text{ Па}$, что вполне допустимо по энергозатратам на работу вентилятора среднего давления.

12. Размер гравия оказывает существенное влияние на эффективность зернистого фильтра и его гидравлическое сопротивление определяется зависимостями (5.18) и (5.19).. Так при использовании гравия с размером $d_z = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ гидравлическое сопротивление уменьшится в четыре раза, что способствует увеличению промежутка времени между регенерацией зернистого слоя, однако при этом по зависимости (5.10) произойдет существенное снижение эффективности очистки вентиляционного воздуха от пыли, поэтому при выборе размера насадки следует увязывать параметры как экологические, так и экономические.

Пример 5.4. Рассчитать кассетный масляный фильтр для очистки приточного воздуха расходом $L = 6000 \text{ м}^3/\text{ч}$ при концентрации пыли $c_{ex} = 5 \text{ мг}/\text{м}^3$.

Решение.

1. В качестве фильтрующего материала принимается стеклоткань с удельной воздушной нагрузкой $q_v = 0,16 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ (см.табл.5.1).
2. Определяется необходимая фильтрующая поверхность: $F = L/q_v = 6000/(3600 \cdot 0,16) = 10,4 \text{ м}^2$.
3. Принимается площадь одной кассеты, выпускаемой промышленностью, $0,22 \text{ м}^2$, тогда необходимое число кассет равно $n_k = 10,4/0,22 = 47$. По конструктивным соображениям необходимо иметь четное число кассет, образуемых прямоугольником, поэтому принимается 48 кассет.
4. Принимается эффективность очистки от пыли $\eta = 0,85$ и выбирается по конструктивным соображениям три фильтра по 16 ячеек.
5. Определяется количество осевшей пыли на кассете за 1 час: $m = (L \cdot c_{вх} \cdot \eta) / n_k = (6000 \cdot 0,005 \cdot 0,85) / 48 = 0,53 \text{ г/ч}$.
6. Определяется срок работы кассеты до ее регенерации при допустимой пылеемкости материала кассеты $G = 500 \text{ г}$ $\tau = G/m = 500/0,53 = 943 \text{ ч}$.

6. Электрофильтры

6.1. Общие сведения

Аппараты, у которых процесс удаления твердых или жидких частиц из газообразной среды осуществляется под воздействием электрических сил, называются *электрофильтрами*. Образованное между электродами электрическое поле приводит к перемещению свободных электронов и положительно заряженных молекул в направлении силовых линий тока поля. Направление движения каждого заряда определяется его положительным или отрицательным зарядом, скорость их движения определяется напряженностью поля. При значительной скорости ионы и электроны ионизируют нейтральные молекулы газа и такой процесс называется *ударной ионизацией*.

Электрическое поле создается *коронирующим* и *осадительным* электродами. В качестве осадительного электрода используются трубы круглой или шестигранной формы и профилированные пластины. В качестве коронирующего электрода используется проволока диаметром до 4 мм, проволока с иглами или узкая полоса с многочисленными выступами в виде острых углов или иголок длиной 5...10 мм для обеспечения фиксированных точек разряда. Электроды закреплены на изоляторах. Вокруг коронирующего электрода под воздействием отрицательного напряжения 40...70 кВ при напряженности поля 25...40 кВ/см образуется голубовато-фиолетовое свечение.

На рис. 6.1 приведена принципиальная схема электрофильтра.

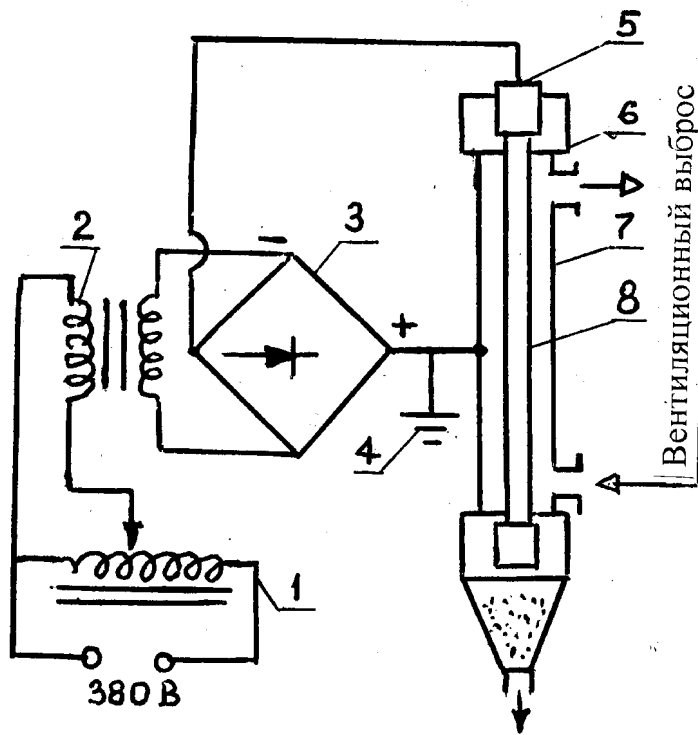


Рис.6.1. Электрическая схема электрофилтра:

- 1- регулятор напряжения,
- 2- трансформатор,
- 3 – выпрямитель высоко – вольтный,
- 4 – заземление,
- 5 – изолятор,
- 6 – электрофилтр,
- 7- осадительный электрод,
- 8- коронирующий электрод

Газовые ионы различной полярности, образующиеся в зоне короны, под действием электрического поля движутся к разноименным электродам и возникает ток короны, в результате чего частицы осаждаются на электродах.

Основная часть пыли осаждается на развитой поверхности осадительных электродов, меньшая часть попадает на коронирующие электроды.

Частицы размером более 1 мкм заряжаются ионами, движущимися под действием сил электрического поля, а частицы мельче 0,2 мкм заряжаются ионами, участвующими в диффузионном процессе.

Коронный разряд возникает только при достижении определенной напряженности электрического поля, называемой *критической* и равной, например, для воздуха 15 кВ/см при температуре 20°C и атмосферном давлении. По мере дальнейшего увеличения напряженности поля интенсифицируются процессы осаждения пыли до определенной величины, выше которой возникает электрический разряд с возможным пробоем межэлектродного промежутка.

Осевшая на электроды пыль постепенно будет разряжаться. Время разрядки меняется в зависимости от удельного электрического сопротивления, по которому пыли делятся на три группы: низкоомные (менее 10^2 Ом·см), средней проводимости ($10^4 \dots 10^9$ Ом·см) и высокоомные (выше 10^9 Ом·см). Пыль первой группы разряжается быстро и поэтому может снова попасть в газовый поток, поэтому для нее промежуток между встряхиванием электродов должен быть малым. Осажденная пыль третьей группы может вызвать ис-

крение и пробой. Устраняют это явление смачиванием поступающей на очистку пыли водой.

Зависимость пылеемкости осадительных электродов m , $\text{кг}/\text{м}^2$, от удельного электрического сопротивления пыли ρ , представлена в табл.6.1.

Таблица 6.1

$\lg \rho$	10	8	7	6	5
m , $\text{кг}/\text{м}^2$	0,73	1,17	1,43	1,62	1,8

На рис.6.2 и 6.3 приведены схемы однозонного и двухзонного электрофильтров.

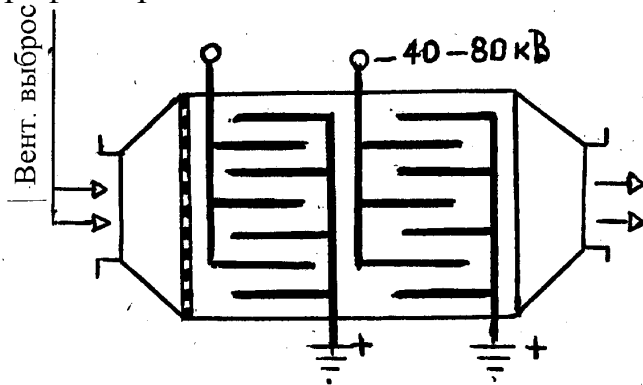


Рис. 6.2. Однозонный двухполюсный электрофильтр

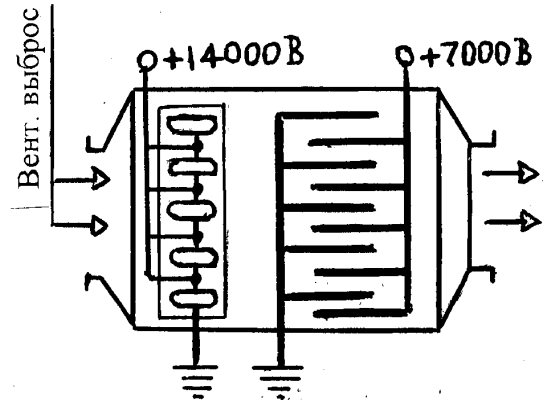


Рис. 6.3. Двухзонный электрофильтр с ионизатором

В двухзонном электрофильтре зарядка улавливаемых частиц происходит в ионизаторе, а осаждение заряженных частиц происходит в осадителе, образованном рядом параллельных пластин с попарным чередованием заземленных и заряженных пластин.

Двухзонные электрофильтры применяются для очистки слабозапыленных вентиляционных выбросов или приточного воздуха с улавливанием очень мелкодисперсной пыли. Для увеличения выработки озона уменьшают расстояние между электродами и на коронирующий электрод подается положительный заряд. При наличии в помещении вредных химических веществ малой концентрации озон в приточном воздухе будет снижать их концентрацию за счет реакций окисления с образованием нетоксичных продуктов.

Электрофильтры бывают сухие и мокрые. В сухих электрофильтрах осевшие на электродах частицы удаляют при помощи механизма встряхивания и они ссыпаются в бункер. В мокрых электрофильтрах осевшие частицы на электродах смываются водой. Некоторая часть пыли приобретает положительный заряд и поэтому осаждается на коронирующих электродах, их также встряхивают или обмывают водой.

На рис.6.4 изображена схема пластинчатого электрофильтра со встряхиванием электродов (поз.4) и их подъемом со сбросом (поз.1,2).

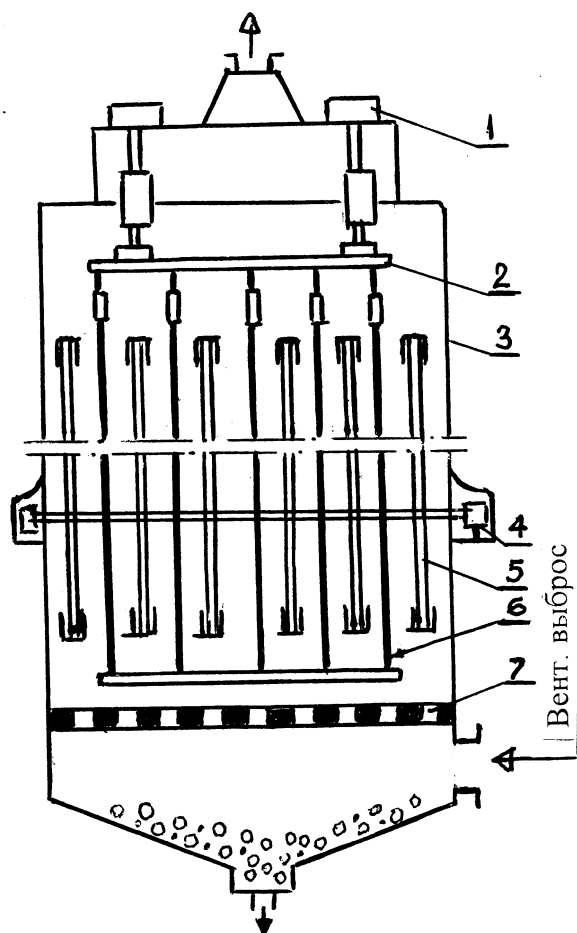


Рис. 6.4. Пластинчатый сухой электрофильтр:

- 1 — механизм встряхивания, коронирующего электрода,
- 2 — подвес коронирующих электродов,
- 3 — корпус электрофильтра,
- 4 — механизм встряхивания осадительного электрода,
- 5 — осадительные электроды,
- 6 — коронирующие электроды,
- 7 — газораспределительная решетка

Встряхивание электродов производится соударением кулачковым механизмом в горизонтальном направлении с последующим резким сбросом, в результате чего происходит столкновение электродов между собой. Применяется и подъем электродов с последующим сбросом их вниз.

Однозонные электрофильтры для удобства отключения и ремонта их сооружают из нескольких последовательных секций, а их электроды и механизмы встряхивания делятся на несколько электрических полей длиной 2...4 м с отдельным электропитанием.

На рис 6.5 приведена схема трубчатого электрофильтра с цилиндрическими осадительными электродами. В них промывка электродов проводится преимущественно водой путем создания на внутренней поверхности трубы тонкой пленки, смывающей пыль. Удельный расход воды составляет $5,5...7,5 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$.

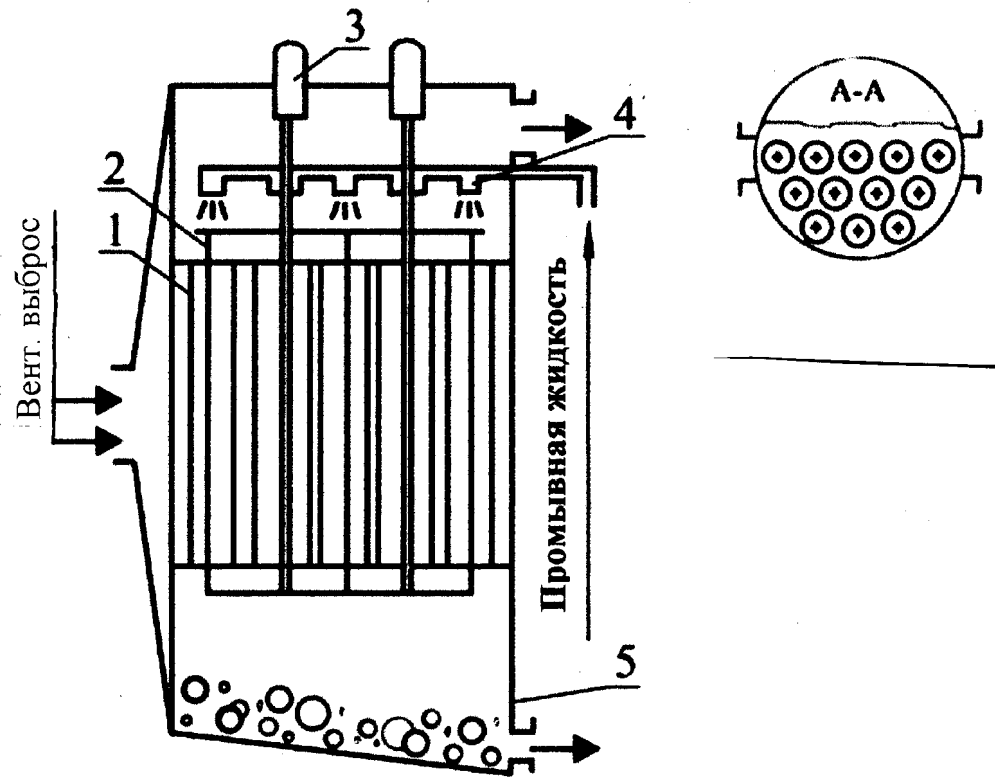


Рис. 6.5. Трубчатый электрофильтр:

1 – осадительный электрод, 2 – коронирующий электрод, 3 – изолятор, 4 – форсунка распыла воды, 5 – корпус

6.2. Расчетные характеристики электрофильтров

Очень важным фактором, влияющим на процесс осаждения пыли, является скорость газового потока в сечении электрофильтра, так как от нее зависит время пребывания частиц пыли в электрическом поле и вторичный унос пыли. В сухих электрофильтрах с плоскими и трубчатыми электродами скорость газового потока принимается $V_z = 0,2 \dots 1$ м/с, в электрофильтрах с профилированными поверхностями, создающими зоны аэродинамической тени – до 1,7 м/с. При известном расходе газового потока L активная площадь проходного сечения электрофильтра составляет

$$F = L / V_z, \quad (6.1)$$

Для трубчатого электрода активная площадь равна

$$F = n \cdot \pi \cdot (R_2 - R_1)^2, \quad (6.2)$$

для плоского электрода –

$$F = n \cdot d \cdot \delta, \quad (6.3)$$

где n – количество каналов осадительных электродов, R_1 – радиус коронирующего электрода, R_2 – радиус трубчатого электрода, δ – высота плоского осадительного электрода (при горизонтальной подаче выбросов) или длина канала подачи выбросов снизу вверх, d – расстояние между соседними осадительными электродами в ряду.

Критическое напряжение электрического поля определяется зависимостью для трубчатого осадительного электрода

$$U_0 = E_0 \cdot R_1 \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad (6.4)$$

для пластинчатого осадительного электрода

$$U_0 = E_0 \cdot R_1 \cdot \left(\frac{\pi \cdot H}{d} - \ln \frac{2\pi \cdot R_1}{d} \right) = E_0 \cdot R_1 \cdot A, \quad (6.5)$$

где E_0 – критическая напряженность электрического поля, В/м; H – расстояние между радиусом коронирующего электрода (или концом иглы на нем) и пластинчатым электродом, м; $A = \left[\frac{\pi \cdot H}{d} - \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{d} \right]$,

$$E_0 = 3,04 \cdot \left(\beta + 0,0311 \sqrt{\frac{\beta}{R_1}} \right) \cdot 10^6, \quad (6.6)$$

где β – безразмерная величина относительной плотности газа, равная

$$\beta = \frac{(B - p) \cdot 293}{1,013 \cdot 10^5 \cdot (273 + t)}, \quad (6.7)$$

p – создаваемое вентилятором разрежение в газопылевом потоке, установленным за электрофильтром.

Основным показателем работы электрофильтра является вольт-амперная характеристика, записываемая в виде

$$i_0 = c \cdot U \cdot (U - U_0), \quad (6.8)$$

где i_0 – линейная плотность тока, А/м; U – напряжение на электродах, В; U_0 – критическое напряжение, В, определяемое по зависимостям (6.4) или (6.5); E_0 – критическая напряженность поля, определяемая по зависимости (6.6), c – постоянная величина, равная для пластинчатого электрофильтра

$$c = \frac{39,4 \cdot \kappa \cdot \varphi}{d^2 \cdot 9 \cdot 10^9} \cdot A, \quad (6.9)$$

для трубчатого фильтра

$$c = \frac{2 \cdot \kappa}{9 \cdot 10^9 \cdot R_2^2 \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad (6.10)$$

где $\kappa = 2,1 \cdot 10^{-4}$ – показатель подвижности электронов для воздуха; φ – коэффициент, зависящий от взаиморасположения электродов, его значение представлено в табл.6.2

Таблица 6.2

H/d	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4
φ	0,08	0,07	0,05	0,03	0,027	0,017	0,013

Рабочее напряжение U у большинства электрофильтров находится в пределах 30...60 кВ. Большему напряжению соответствует и больший ток короны, изменяющийся в диапазоне от 0 до 200 мА.

Напряженность поля в пластинчатом электрофилт্রে определяется по зависимости [5], В/м:

$$E = \sqrt{\frac{2 \cdot i_0 \cdot H}{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot k \cdot d}}, \quad (6.11)$$

в трубчатом электрофилт্রে при $U > U_0$ [10]:

$$E = \left(\frac{U}{(R_2 - R_1) \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}} \right). \quad (6.12)$$

Скорость газа в активном сечении электрофилтра изменяется в пределах 0,2...1,5 м/с, при этом меньшей скорости соответствует более высокая степень очистки и меньший вынос пыли в процессе сброса осевшей пыли.

Скорость дрейфа частиц пыли (скорость, перпендикулярная к осадительному электроду) размерами $d_q > 1$ мкм определяется по зависимости [8], м/с:

$$V_d = 0,059 \cdot 10^{-10} E^2 \cdot \frac{d_q}{\mu_z}, \quad (6.13)$$

для частиц < 1 мкм [22]:

$$V_d = 0,017 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{E}{\mu_z}, \quad (6.14)$$

где d_q – диаметр частиц в м; μ_z – динамическая вязкость газа в Па·с; E – напряженность поля, В/м.

В табл.6.3 приведены скорости дрейфа частиц в электрическом поле коронного разряда различной напряженности E .

Таблица 6.3

Диаметр частиц, мкм	Теоретическая скорость дрейфа, м/с	
	$E=15 \cdot 10^4$, В/м	$E=30 \cdot 10^4$, В/м
0,4	0,012	0,025
1,0	0,013	0,03
2,0	0,015	0,06
10	0,075	0,3
20	0,15	0,6

Действительная скорость для частиц более 1 мкм вдвое меньше теоретической, для частиц менее 1 мкм их различие не существенно.

Примерная парциальная эффективность трубчатого электрофилтра определяется по зависимости [8]

$$\eta_i = 1 - \exp\left(-\frac{V_d \cdot l}{V_z \cdot D}\right), \quad (6.15)$$

для пластинчатого электрофилтра

$$\eta_i = 1 - \exp\left(-\frac{V_d \cdot l}{V_z \cdot H}\right), \quad (6.16)$$

где l – активная высота электрода, м; V_z , V_d – скорости газа в активном сечении электрофильтра и скорость дрейфа частиц, м/с; D – диаметр трубчатого осадительного электрода, м; H – расстояние между коронирующим электродом и пластинчатым осадительным электродом, м.

Рассчитанная по этим зависимостям эффективность осаждения пыли отличается от действительной величины до 20%, так как на неё в значительной мере оказывают влияние конструктивные особенности электродов и электрические параметры преобразовательной аппаратуры.

Общая эффективность осаждения пыли определяется по зависимости

$$\eta_{\text{общ}} = \sum \frac{\eta_i \cdot \delta_i}{100}, \quad (6.17)$$

где δ_i – процентное содержание i -той фракции пыли.

Активная длина электрода определяется из выражения [1], м:

$$l = \frac{\ln(1 - \eta_{\text{общ}}) \cdot V_z \cdot d_3}{V_d}, \quad (6.18)$$

где d_3 – межэлектродное расстояние, м, для трубчатого оно равно $R_2 - R_1$, для пластинчатого – H .

Удельная поверхность осаждения пыли f трубчатого электрофильтра равна, $\text{м}^2 \cdot \text{с} / \text{м}^3$:

$$f = \frac{\pi \cdot D \cdot l \cdot n}{L}, \quad (6.19)$$

пластинчатого электрофильтра:

$$f = \frac{l \cdot b \cdot n}{L}, \quad (6.20)$$

где L – расход газа, $\text{м}^3/\text{с}$; h – активная длина электрода, м; b – ширина пластинчатого электрода м; n – количество каналов между осадительными электродами.

Продолжительность периода осаждения пыли на электродах до момента сброса определяется удельным электрическим сопротивлением ее в слое. Пыль с малым электрическим сопротивлением (до $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) сравнительно быстро теряет свой электрический заряд и может снова попасть в газовый поток. При толщине слоя осевшей пыли до 1 мм она должна сброситься в бункер. Пыль с удельным сопротивлением $10^2 \dots 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ хорошо удерживается на электродах и при встряхивании сыпается в бункер почти без пылеобразования. Для нее допустимо образование слоя на электродах до 10 мм . Величина удельного пылеосаждения m толщиной слоя δ на единицу длины электрода 1 м равна, $\text{кг}/\text{м}^2$:

$$m = \rho_{\text{нас}} \cdot \delta, \quad (6.21)$$

где $\rho_{\text{нас}}$ – насыпная плотность уловленной пыли, $\text{кг} / \text{м}^3$.

Величина удельного пылеосаждения m имеет пропорциональную зависимость от логарифма удельного электрического сопротивления слоя оса-

жденной пыли $lg\rho_3 = (12 - 3,8m)$. Результаты расчета по этой зависимости при-

ведены в табл.6.1. При известном значении величины p_3 находятся величина удельного пылеосаждения m и допустимая толщина осажденной пыли δ .

Активная длина электрода l , м, может быть определена из условия $l \geq V_z \cdot \tau_\partial$, где τ_∂ – время нахождения частицы пыли в межэлектродном пространстве. При известной средней величине дрейфа различных фракций пыли $V_\partial^c p$, которая определяется с использованием зависимостей (6.13) и (6.14), и

заимствования из [6] зависимости $\ln \frac{c_{вых}}{c_{вх}} = -\frac{V_\partial \cdot \tau_\partial}{d_\partial}$, где d_∂ - межэлектрод-

ное расстояние, для пластинчатого электрода $d_\partial = H$, для трубчатого – $d_\partial = R_2 - R_1$; $c_{вх}$, $c_{вых}$ - концентрации пыли на входе и на выходе из электрофильтра, соответственно, и при использовании соотношения $c_{вых} = c_{вх}(1 - \eta_{общ})$, в итоге получим

$$\tau_\partial = -\frac{\ln(1 - \eta_{общ}) \cdot d_\partial}{V_\partial^{cp}}. \quad (6.22)$$

Общая площадь одного пластинчатого осадительного электрода равна

$$F_\partial = \sigma \cdot l = V_z \cdot \tau_\partial \cdot l. \quad (6.23)$$

Количество осадительных электродов при общей требуемой площади $F = L / V_z$ равно

$$n = F / F_\partial. \quad (6.24)$$

При диаметре трубчатого электрода D их количество равно

$$n = L / \pi \cdot D \cdot l \cdot V_z. \quad (6.25)$$

Интервал встряхивания пыли по данным [8] равен, с :

$$\tau = \frac{m \cdot l}{H \cdot V_z \cdot c_{вх} \cdot \left(1 - \sqrt[n]{1 - \eta_{общ}}\right)^{x-1}}, \quad (6.26)$$

n – число полей в электрофильтре, x – порядковый номер поля, для которого определяют паузу.

Мощность, потребляемая электроагрегатами для питания электродов, равна [22], кВт :

$$N = \frac{U \cdot i \cdot f_k \cdot f_i \cdot \cos \varphi}{10^3 \cdot \eta_a}, \quad (6.27)$$

где $f_k = 0,707$ – коэффициент перевода значения амплитудного напряжения в эффективное; $f_i = 1,3 \dots 1,5$ – фактор кривой выпрямленного тока; $\eta_a = 0,8 \dots 0,85$ - коэффициент полезного действия агрегата.

6.3. Условия применения электрофильтров

Электрофильтры помимо очистки выбросов от пыли могут использоваться в гальваническом производстве для улавливания туманов и капель серной кислоты, аэрозолей окислов свинца, хрома, цинка и пр. Для них осадительные трубы изготавливают из поливинилхлорида, а коронирующие электроды

- из нержавеющей стали. Очистка электродов производится водными растворами кислот.

В электрофильтры нельзя подавать взрывоопасные смеси, не допускается также подача смесей, в результате осаждения которых могут возникнуть электрохимические реакции с выделением токсичных веществ (например, SO_3 , NH_4 и др.). Не допускается подача пыли, образующей на электродах электроизоляционный слой, вызывающий возникновение "обратной короны".

Наибольшее распространение получили сухие вертикальные электрофильтры типа УВ, ЭВВ, горизонтальные сухие ЭГА, ЭГТ, УГТ [5,8, 30] .

Электрофильтры типа УВ допускают очистку газа с температурой до 250°C , площадь осаждения пыли изменяется от 5,0 до 860 м^2 .

Электрофильтры типа ЭГА предназначены для очистки невзрывоопасных газов с температурой до 330°C . Пластины осаждения пыли имеют ширину 640 мм, коронирующие электроды – в виде ленточно-игольчатых натянутых струн высотой от 4 до 12 м, площадь осаждения изменяется от 430 до 30000 м^2 . Все электрофильтры оборудованы откидными взрывными клапанами на случай появления взрывоопасной смеси.

Электрофильтры типа ЭВМ предназначены для улавливания кислотных туманов с расходом газа 15 л/с при осадительной площади 460 м^2 .

Электрофильтры типа УГТ предназначены для очистки газов с температурой до 400°C , применяются в химической промышленности, в строительной индустрии, в черной и цветной металлургии. УГТ имеет три электрических поля, расположенных последовательно с длиной активного поля 2,5 м и шириной 6 м. Пыль удаляется с электродов посредством ударов молотков по наковальням электродов.

Электрофильтры УГМ предназначены для очистки выбросов от пыли с температурой до 250°C ; они односекционные с двумя полями. Расстояния между плоскими осадительными электродами 275 мм, высота электродов 3 м, пыль удаляется механическим встряхиванием.

Электрофильтры ЭВМ, ПМК – это вертикальный шестигранный кислотный аппарат, осадительные электроды выполнены из свинца или поливинилхлорида в виде шестигранных труб, коронирующие электроды - из стальной оцинкованной проволоки, число осадительных электродов от 42 до 183 шт. с площадью активного сечения от 2 до 10 м^2 .

Электрофильтры горизонтальные типа ЭГМ с мокрой очисткой электродов, общая площадь осадительных электродов 2500 м^2 , расход воды 45 л/с, пропускная способность $64\text{ м}^3/\text{с}$, расстояние между осадительными электродами 300 мм, гидравлическое сопротивление 250 Па..

Электрофильтры горизонтальные ЭГ-КЭН производительностью от 16,7 до $77,8\text{ м}^3/\text{с}$, оснащенные комбинированными электродами НИИОГаз, очищают выбросы с эффективностью 99,7 %. от высокоомной пыли с электрическим сопротивлением до $10^{10}\text{ Ом}\cdot\text{м}$. Коронирующие электроды выполнены профилированными лентами со сложным характером изменения на них напряженности электрического поля.

По приведенным характеристикам наиболее используемых современных электрофильтров возможно выбрать предпочтительную схему и ориентиро-

точные параметры электрофильтра для дальнейшего определения требуемых параметров под конкретные исходные данные очистки выбросов от пыли или аэрозолей.

Неотъемлемой частью электрофильтров являются агрегаты питания выпрямленным током высокого напряжения. Наиболее распространенными являются агрегаты питания АТФ. Для нормальной работы электрофильтра важно правильно подобрать мощность и количество агрегатов питания.

Мощность агрегата питания, затрачиваемая для осаждения частиц пыли, равна, kBt :

$$N_a = I_k \cdot U_k, \quad (6.28)$$

где I_k – номинальный ток агрегата, A ; U_k – напряжение на короне, B .

$$I_k = 1000 \cdot i \cdot F_o, \quad (6.29)$$

где $i = 0,1 \dots 0,8 \text{ mA} / \text{m}^2$ – ток короны на 1 m^2 площади осадительного электрода, F_o – площадь осадительных электродов.

Пример 6.1. Рассчитать характеристику однозонного электрофильтра для очистки вентиляционного воздуха от пыли при исходных параметрах: расход газа $L = 2 \text{ m}^3 / \text{с}$, температура $t = 30^\circ \text{C}$; барометрическое давление $B = 0,98 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$; разрежение перед фильтром, создаваемое вентилятором, $p = 0,03 \cdot 10^5 \text{ Па}$; динамическая вязкость газа $\mu_z = 18,5 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$; концентрация пыли на входе в электрофильтр $c_{\text{вх}} = 0,3 \text{ г/м}^3$; удельное электрическое сопротивление пыли $\rho_z = 0,98 \cdot 10^8$; плотность частиц пыли $\rho_{\text{ч}} = 2650 \text{ кг/м}^3$; насыпная плотность пыли $\rho_{\text{нас}} = 1250 \text{ кг/м}^3$; плотность газа $\rho_z = 353 / (273 + 30) = 1,16 \text{ кг/м}^3$. Дисперсный состав пыли:

$d_{\text{ч}}, \text{мкм}$	0...5	5...10	10...20	> 20
$\delta, \% \text{ масс.}$	40	25	20	15

Общая степень очистки вентиляционного воздуха от пыли должна составлять $\eta_{\text{общ}} = 90 \%$.

Решение.

1. Принимается пластинчатая конструкция электрофильтра горизонтального со встряхиванием осевшей пыли, расстояние между осадительными электродами $d = 0,2 \text{ м}$; коронные электроды проволоочные с иглами, расстояние от оси проволоки до конца иглы $R_1 = 0,003 \text{ м}$.

2. Расстояние между концом иглы и плоскостью осадительного электрода $H = d/2 - R_1 = 0,1 - 0,003 = 0,097 \text{ м}$.

3. По зависимости (6.1) определяем площадь активного сечения электрофильтра F , приняв скорость газового потока $V_z = 0,6 \text{ м/с}$; $F = L/V_z = 2/0,6 = 3,4 \text{ м}^2$.

4. Приняв высоту пластинчатого электрода $v = 2,0 \text{ м}$, по зависимости (6.3), определяем количество межэлектродных газовых каналов $n = F/d \cdot v = 3,4/0,2 \cdot 2 = 9$. Количество осадительных электродов – 10, коронирующих – 9 шт.

5. Определяется относительная плотность газов по зависимости (6.7):

$$\beta = \frac{(B-p) \cdot 293}{1,013 \cdot 10^5 (273+t)} = \frac{(0,98-0,03) \cdot 10^5 \cdot 293}{1,013 \cdot 10^5 \cdot (273+30)} = 0,9.$$

6. Определяется критическая напряженность коронного разряда по зависимости (6.6): $E_0 = 3,04(\beta + 0,931\sqrt{\beta/R_1}) \cdot 10^6 = 3,04(0,9 + 0,031\sqrt{0,031/0,003}) = 3,04 \cdot 10^6 \text{ В/м}.$

7. Определяется критическое напряжение коронного разряда (начало отрицательного коронного разряда) по зависимости (6.5):

$$U_0 = E_0 \cdot R_1 \cdot A; \quad A = \frac{\pi \cdot H}{d} - \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{d} = \frac{3,14 \cdot 0,097}{0,2} - \ln \frac{6,28 \cdot 0,003}{0,2} = 3,28.$$

$$U_0 = 3,04 \cdot 10^6 \cdot 0,003 \cdot 3,88 = 35,4 \cdot 10^3 \text{ В}.$$

8. Определяется значение величины C по зависимости (6.9) при показателе подвижности ионов в воздухе $\kappa = 2,1 \cdot 10^{-4}$:

$$C = \frac{4,38 \cdot 10^{-9} \cdot \kappa \cdot \varphi}{d^2 \cdot A} = \frac{4,38 \cdot 10^{-9} \cdot 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi}{0,04 \cdot 3,88} = 5,3 \cdot 10^{-13}, \text{ где значение } \varphi = 0,09$$

принимается из табл. 6.1 для отношения $H/d = 0,5$.

9. Принимается величина рабочего напряжения $U = 50 \text{ кВ}.$

10. Определяется линейная плотность тока короны по зависимости (6.8):

$$i_0 = U(U - U_0) \cdot C \cdot 10^6 = 50 \cdot (50 - 35,4) \cdot 5,3 \cdot 10^{-13} \cdot 10^6 = 0,387 \cdot 10^{-3} \text{ А/м}.$$

11. Напряженность электрического поля определяется по зависимости (6.11) при показателе диэлектрической проницаемости в разреженном воздухе $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}:$

$$E = \sqrt{\frac{2 \cdot i_0 \cdot H}{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot k \cdot d}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,387 \cdot 10^{-3} \cdot 0,097}{3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,2}} = 2,45 \cdot 10^5 \text{ В/м}.$$

12. Используя данные табл. 6.1, для заданного вида пыли с удельным электрическим сопротивлением $\rho_3 = 0,98 \cdot 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ пылеемкость осадительного электрода составит $m = 1,17 \text{ кг/м}^2$. Тогда по зависимости (6.21) определяется толщина осевшей пыли

$$\delta = m / \rho_{\text{нас}} = 1,17/1250 = 0,001 \text{ м}$$

13. Скорость дрейфа частиц пыли в активном сечении фильтра для среднего диаметра фракции определяется по зависимости (6.13):

$$V_d = 0,059 \cdot 10^{-10} \cdot E^2 \cdot d_q / \mu_z = 0,059 \cdot 10^{-10} \cdot 6 \cdot 10^{10} \cdot d_q / 18,5 \cdot 10^{-6} = 0,02 \cdot 10^6 \cdot d_q.$$

14. По данным дисперсного состава пыли определяется медианный размер частиц пыли равный $d_m = 8,8 \text{ мкм}$ и по зависимости (6.13) находится средняя скорость дрейфа частиц пыли $V_d = 0,02 \cdot 10^6 \cdot 8,8 \cdot 10^{-6} = 0,17 \text{ м/с}.$

15. По зависимости (6.22) определяется среднее время нахождения частиц пыли в электрическом поле для их осаждения:

$$\tau_0 = -\frac{\ln(1-\eta_0) \cdot H}{V_d} = -\frac{\ln(1-0,85) \cdot 0,097}{0,17} = 1,3 \text{ с}.$$

16. Длина осадительного электрода должна быть не менее $l \geq \tau_0 \cdot V_z = 1,3 \cdot 0,6 = 0,8 \text{ м}.$ Принимается $l = 1,0 \text{ м}.$

17. Определяется фракционная эффективность осаждения пыли от скорости дрейфа пыли по зависимости (6.16):

$$\eta_{\phi} = 1 - \exp\left(-\frac{V_{\partial} \cdot l}{V_{\Sigma} \cdot H}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{V_{\partial} \cdot 1}{0,6 \cdot 0,097}\right) = 1 - \exp(-17,1 \cdot V_{\partial}).$$

18. Для каждой фракции пыли определяется скорость дрейфа частиц и фракционная эффективность их осаждения, результаты заносятся в таблицу.

$d_{\phi}, \text{мкм}$	0...5	5...10	10...20	> 20
$\delta_i, \% \text{ мас.}$	40	25	20	15
$V_{\partial}, \text{м/с}$	0,05	0,15	0,3	> 0,4
$\eta_{\phi}, \%$	58	93	99,4	100

19. Определяется общая эффективность осаждения пыли по зависимости (6.17): $\eta_{\text{общ}} = 1/100 (58 \cdot 40 + 93 \cdot 25 + 99,4 \cdot 20 + 100 \cdot 15) = 87,3 \%$.

Данная величина на 12,7 % ниже требуемой эффективности.

20. Для достижения требуемой эффективности осаждения пыли следует увеличить напряженность электрического поля до $U = 60 \text{ кВ}$, при этом скорость дрейфа частиц увеличится в 1,8 раза, тогда фракционная эффективность осаждения пыли размерами 0...5 мкм повысится с $\eta_{\phi} = 58 \%$ до $\eta_{\phi} = 79 \%$, фракции 5...10 мкм - до $\eta_{\phi} = 99\%$ и общая эффективность составит величину $\eta_{\text{общ}} = 91,5 \%$.

21. По зависимости (6.26) определяется интервал между встряхиванием пыли:

$$\tau = 16,7 \cdot \frac{m \cdot l}{L \cdot c_{\text{ex}} (1 - \sqrt{1 - \eta_{\text{общ}}})} = 16,7 \cdot \frac{1,17 \cdot 1}{2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} (1 - \sqrt{1 - 0,915})} = 91730 \text{ с} = 25,5 \text{ ч}.$$

22. По зависимости (6.27) определяется потребляемая электрофильтром мощность: $N = \frac{U \cdot i_0 \cdot f_k \cdot f_i \cdot \cos \varphi}{\eta_a} = \frac{60000 \cdot 0,387 \cdot 10^{-3} \cdot 0,707 \cdot 1,4 \cdot 0,8}{0,8} = 23 \text{ кВт}.$

Пример 6.2. При исходных данных, представленных в примере 6.1, определить эффективность очистки пылевых выбросов в трубчатом электрофильтре при радиусах осадительного электрода $R_2 = 0,1 \text{ м}$ и коронирующего электрода $R_1 = 0,003 \text{ м}$.

Решение.

1. Критическое напряжение электрического поля определяется по зависимости $U_0 = E_0 \cdot R_1 \cdot \ln R_2 / R_1 = 3,04 \cdot 10^6 \cdot 0,003 \cdot 3,5 = 32 \cdot 10^3 \text{ В}.$

2. По зависимости (6.10) определяется постоянная

$$C = \frac{2 \cdot \kappa}{9 \cdot 10^9 \cdot R_2^2 \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}} = \frac{2 \cdot 2,1 \cdot 10^{-4}}{9 \cdot 10^9 \cdot 0,01 \cdot 3,5} = 13,3 \cdot 10^{-13}.$$

3. По зависимости (6.8) определяется линейная плотность тока короны при $U = 60 \text{ кВ}$: $i_0 = U (U - U_0) \cdot C \cdot 10^6 = 60(60 - 32) \cdot 13,3 \cdot 10^{-7} = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ А/м}.$

4. По зависимости (6.12) определяется напряженность поля

$$E = \frac{U}{(R_2 - R_1) \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}} = \frac{60000}{0,097 \cdot 3,5} = 0,174 \cdot 10^6 \text{ В/м}.$$

5. По зависимости (6.13) определяется средняя скорость дрейфа частиц пыли фракции 0...5 мкм:

$$V_d = 0,059 \cdot 10^{-10} \cdot E^2 \cdot d_m / \mu_z = 0,059 \cdot 10^{-10} \cdot 3,02 \cdot 10^{10} \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} / 18,5 \cdot 10^{-6} = 0,024 \text{ м/с.}$$

6. По зависимости (6.15) определяется эффективность осаждения пыли

$$\eta_{cp} = 1 - \exp\left(-\frac{V_d \cdot l}{V_z \cdot 2R_2}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{0,024 \cdot 1}{0,6 \cdot 0,2}\right) = 0,2.$$

Следовательно, фракционная эффективность для заданных исходных параметров ниже по сравнению с пластинчатым электрофильтром.

Библиографический список

1. Банит Ф.Г., Малыгин А.Д. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов.- М.: Стройиздат, 1979.- 350 с.
2. Белевицкий А.М. Проектирование газоочистительных сооружений. – Л.: Химия, 1990. – 288 с.
3. Балтренас П.Б. Обеспыливание воздуха на предприятиях стройматериалов. - М.: Стройиздат, 1990. – 182 с.
4. Вальдберг А.Ю. Теоретические основы охраны атмосферного воздуха от загрязнения воздуха промышленными аэрозолями. Учебное пособие. – СПб: ТИЦБП, 1993. – 432 с.
5. Горемыкин В.А., Красовицкий Ю.В. и др. Расчет и выбор пылеулавливающего оборудования. Учебное пособие. - Воронеж: Воронежская государственная архитектурно-строительная академия, 2000. – 326 с.
6. Гордон Г.М., Пейсахов И.Л. Пылеулавливание и очистка газов.- М.: Металлургия, 1968.- 496 с.
7. Дубинская Ф.Е., Лебедюк Г.К. Скрубберы Вентури. Промышленная и санитарная очистка газов. Обзорная информация, серия ХМ-14. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1977. – 62 с.
8. Зиганшин М.Г., Посохин В.Н., Колесник А.А. Проектирование аппаратов пылегазоочистки. – М.: "Экспресс - ЗМ", 1998. – 505 с.
9. Константинова З.И. Защита воздушного бассейна от промышленных выбросов. - М.: Стройиздат, 1981. – 103 с.
10. Коузов П.А. и др. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. – Л.: Химия, 1982. – 256 с.
11. Кузнецов П.А. Троицкая Т.М. Защита воздушного бассейна от загрязнения вредными веществами химических предприятий. – М.: Химия, 1979 – 344 с.
12. Кравчик Я. Автореферат дис. "Пылеулавливание, тепло -и массообмен в аппаратах интенсивного действия" док. тех. наук: 1996 / МГАХМ. М., 1996. – 32 с.
13. Красовицкий Ю.В., Дуров В.В. Обеспыливание газов зернистыми слоями. – М.: Химия, 1991. – 192 с.
14. Куркин В.П. Механика пылеулавливания. – М.: ИПКнефтемаш, 1981.– 30 с.

15. Лебедюк Г.К. Распыливающие устройства в аппаратах газоочистки. – М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1976. – 52 с.
16. Лейкин И.Н. Рассеивание вентиляционных выбросов химических предприятий.- М.: Химия, 1982. – 200 с.
17. Мазус М.Г. Тканевые фильтры. Обзорная информация, серия ХМ-14 "Промышленная и санитарная очистка газов".- М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1974. – 319 с.
18. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. – Л.:Гидрометеиздат, 1987. – 94 с.
19. Оборудование и сооружения для защиты биосферы от промышленных выбросов. Учебное пособие для вузов. – М.: Химия, 1985. – С.64...86.
20. Охрана окружающей среды./ Под ред. С.В. Белова. – М.: Высшая школа, 1991. – С.67...100.
21. Очистка и рекуперация промышленных выбросов./ Под ред. З.Ф. Максимова. – М.: Лесная промышленность, 1989. – С.285...310.
22. Павлов К.Ф., Романков П.Г. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. –Л.: Химия, 1987. – 575 с.
23. Пейсахов И.Л., Лютин Ф.Б. Атлас диаграмм и номограмм по газопылевой технике. – М.: Металлургия, 1974. – 116 с.
24. Плановский А.Н., Рамм В.М. Процессы и аппараты химической технологии. –М.: Изд - во химической литературы, 1962. – С.183.
25. Полосин И.И. Охрана атмосферы от выбросов промышленной вентиляции. Учебное пособие. – Воронеж: Воронежская государственная архитектурно-строительная академия, 1998. – 154 с.
26. Потапов О.П., Кропп Л.Д. Батарейные циклоны. - М.: Энергия, 1977. – 100 с.
27. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. - М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.
28. Скрыпник А.И. Очистка вентиляционных выбросов от вредных химических веществ. Учебное пособие. - Воронеж, 2002. – 117 с.
29. Скрыпник А.И., Черных Е.М. и др. Эффективная очистка отходящих газов от кониозоопасной пыли в производствах строительной индустрии с учетом возникновения неблагоприятных метеорологических условий.- Новосибирск: Известия вузов. Строительство, №6 , 2002. – С.67...70.
30. Справочник по пыле- и золоулавливанию./ Под ред. А.А. Русанова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
31. Торочешников Н.С. и др. Техника защиты окружающей среды. Учебное пособие для вузов. – М.: Химия, 1981. – С.238...268.
32. Tardos G. Gal E., Rfeffer R/ A study of inertial effects in granular bed filtration. AlChEI, 1985 – 31 № 7. – P.1093. 1104.
33. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И. Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1981. – 390 с.
34. Фильтр ФЦГМ. Техническое описание. – М.: НИПИОТстром, 1988. – 15 с.
35. Хавкин Ю.И. Центробежные форсунки. – Л.: Машиностроение, 1976. – 168 с.

36. Чудинов А.В. Автореферат диссертации "Разработка и исследование нового высокоэффективного пылеуловителя для очистки технологических и вентиляционных газовых потоков от мелкодисперсной пыли" канд. тех. наук: 2002 /Тульский государственный университет. Тула, 2002. – 20 с.
37. Штокман Е.А. Очистка воздуха. – М.: Изд - во АСВ, 1999. – 319 с.
38. Фильтровентиляционные агрегаты. Каталог.– М.: ОАО МОВЕН, 2003. – 80 с.
39. Шафран Л.Е. и др. Очистка газов скоростными электрофильтрами.- М.: Цветные металлы, № 6, 1978. – С. 25...28.
40. Шершнева В.Н. и др. Оборудование и детали вентиляционных систем. Справочник. Воронеж: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, 2004. – 760 с.
41. Электрическая очистка газов. Научные труды НИИОГаз. – М: Энергия, 1968. – 100 с.
42. Эльтерман В.М. Охрана воздушной среды на химических и нефтехимических предприятиях. – М.: Химия, 1985. – 160 с.
43. Энергетика и защита окружающей среды./Под ред. Н.Г. Залогина, Л.И. Кроппа.- М.: Энергия, 1979. – 352 с.
44. Энтин В.И. и др. Аэродинамические способы повышения эффективности систем и аппаратов пылеулавливания в производстве огнеупоров. - Воронеж: Истоки, 1998. – 432 с.
45. Юдашкин М.Я. Очистка газов в металлургии. – М.: Металлургия, 1976. – 384 с.
46. Швыдкий В.С., Ладыгичев. М. Г. Очистка газов. Справочник. М.: Теплоэнергетик, 2002. – 636 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Таблица П.1.1

Перечень пылеобразных и аэрозольных загрязняющих веществ

Код	Наименование вещества	Класс опасности	ПДК _{м.р.} , мг/м ³	ПДК _{с.с.} , мг/м ³	ОБУВ, мг/м ³
0150	Алюминий нитрид				0,01
0101	Алюминий оксид	2		0,03	
2933	Алюмосиликаты (цеолиты)	2		0,03	
0231	Бария соли	2	0,015	0,004	
0106	Бария оксид				0,004
0309	Бор аморфный				0,01
2902	Взвешенные вещества (аэрозоль пыли)	3	0,5	0,15	
0111	Висмут оксид	3		0,05	
0123	Железо оксиды	3		0,04	
0240	Железо нитрат				0,004

0121	Железо сульфат	3		0,007	
0130	Кадмия хлорид	1		0,0003	
0133	Кадмия оксид, сульфат	1		0,0003	
0125	Калия карбонат (поташ)	4	0,1	0,05	
0126	Калий хлорид	4	0,3	0,1	
0128	Кальций оксид (известь)				0,3
2876	Цинк хромовый (катализатор)				0,0015
0260	Кобальт оксид	2		0,001	
2731	Краска порошковая (эпоксидная)	2	0,005		
0323	Кремния диоксид				0,02
0263	Лития карбонат				0,005
0136	Литий хлорид				0,02
0138	Магний оксид	3	0,4	0,05	
3167	Магний карбонат				0,05
0146	Меди оксид	2		0,002	
0145	Медь сернистая	2	0,003	0,001	
0144	Медь хлористая	2		0,002	
0150	Сода каустическая (гидроокись натрия)				0,01
3129	Натрий силикат				0,3
0159	Натрия сульфат	3	0,3	0,!	
0164	Никель оксид	2		0,001	
0166	Никель сульфат	1	0,002	0,001	
0275	Ниобий оксид				0,15

Продолжение табл. П.1.1

Код	Наименование вещества	Класс опасности	ПДК _{м.р.} мг/м ³	ПДК _{с.с.} мг/м ³	ОБУВ, мг/м ³
2930	Пыль абразивная				0,04
2934	Пыль аминопластов				0,04
2931	Пыль асбестосодержащая	1		0,06 ч./мл	
2962	Пыль бумаги				0,1
2935	Пыль винипласта				0,01
2963	Пыль вязкозная				0,05
2998	Пыль табачная с 2,7% никотина	4	0,0008	0,0004	
2964	Пыль табачная с 1,5% никотина				0,03
2965	Пыль гетинакса				0,03
2936	Пыль древесная				0,1

2936	Пыль стекловолокна				0,06
2916	Пыль стеклопластика				0,06
2977	Пыль талька				0,5
2712	Пыль титана, циркония				0,1
2952	Пыль текстолита				0,04
2978	Пыль резиновая				0,1
2993	Пыль углеродных материа- лов				0,05
2980	Пыль формальдегидной смо- лы				0,05
2953	Пыль фенопластов				0,05
2981	Пыль ферросплавов				0,02
2917	Пыль хлопковая	3	0,2	0,05	
2954	Пыль хромово-цинковая				0,01
3713	Пыль чая				0,01
2937	Пыль зерновая	3	0,5	0,15	
3716	Пыль мучная	4	1,0	0,4	
2919	Пыль капроновая				0,05
2912	Пыль костной муки				0,01
2966	Пыль крахмала	4	0,5	0,15	
2987	Пыль латуни				0,003
2920	Пыль меховая				0,03
2968	Пыль стирального порошка				0,1
2908	Пыль двуокиси кремния 70- 20%	3	0,3	0,1	

Продолжение табл. П.1.1

Код	Наименование вещества	Класс опасно- сти	ПДК _{м.р.} , мг/м ³	ПДК _{с.с.} , мг/м ³	ОБУВ, мг/м ³
2907	Пыль двуокиси кремния > 70 %	3	0,15	0,05	
2909	Пыль двуокиси кремния < 20 %	3	0,5	0,15	
2914	Пыль гипса				0,5
2988	Пыль парафинов				0,6
2944	Пыль пемоксоли				0,03
3705	Пыль перца				0,03
2912	Пыль поливинилхлорида				0,1
2946	Пыль свинцово-цинковая	1		0,0001	
2922	Пыль полипропилена				0,1
2990	Пыль полистирола				0,35

2976	Пыль слюды				0,04
0184	Свинец	1	0,001	0,0003	
0192	Тетраэтилсвинец	1	0,0001	0,00004	
3134	Стронций карбонат				0,05
0193	Теллур диоксид	1		0,0005	
	Карбонат кальция CaCO_3	3	0,5	0,15	
	Карбонат натрия Na_2CO_3	3	0,15	0,05	
0187	Ртуть двуйодистая красная				0,0009
0328	Сажа	3	0,15	0,05	
0196	Феррит бариевый	3		0,004	
0199	Феррит марганцевый	2		0,002	
0198	Феррит никелевый	2		0,004	
0341	Фосфор красный				0,0005
0339	Фосфор белый				0,0005
0343	Фториды натрия	2	0,03	0,01	
0297	Цинка оксид	2		0,05	

Таблица П.1.2

Характеристики жалюзийных пылеуловителей с относительным отбором газа в циклон 10 % [8]

Ширина входной камеры, b_1 , мм		Ширина отсосной щели, b_2 , мм	Длина решетки, l , мм	Высота решетки, h , мм	Число лопастей в решетке,
396		20	1166	1171	22
450		22,5	1325	1321	25
	486	24,5	1431	1432	27
	504	25	1484	1485	28
	540	27	1590	1589	30
	576	29	1696	1694	32
	612	30	1802	1798	34
	648	32,5	1908	1903	36
	684	34	2014	2008	38
	720	36	2120	2112	40
	756	38	2226	2217	42
	792	39,5	2332	2321	44

	828	41,5	2438	2426	46
	864	43	2544	2531	48
	900	45	2650	2635	50
	1008	50,5	2968	2949	56
	1080	54	30180	3158	60
	1152	57,5	3392	3368	64
	1260	63	3710	3681	70
	1350	67,5	3915	3943	75

Примечание: Длина входной камеры $l_k = L / (V_z \cdot v_1)$.

Динамическая вязкость воздуха, $\text{Па} \cdot \text{с} \cdot 10^6$

Таблица П.1.3

Темпера- тура, °С	Вязкость	Темпера- тура, °С	Вязкость	Темпера- тура, °С	Вязкость
- 50	14,6	60	20,1	180	24,9
- 20	16,3	70	20,3	200	25,8
0	17,1	80	20,9	250	27,8
10	17,7	90	21,6	300	29,7
20	18,2	100	21,8	350	31,4
30	18,7	120	22,7	400	32,8
40	19,2	140	23,5	500	36,1
50	19,6	160	24,1	600	39,2

Характеристики фильтровальных тканей [1,10,30]

Таблица П1.4

№ п/п	Наименова- ние ткани	Мас- са 1 м^2	Толщи- на, мм	Разрыв- ная наг- рузка, кгс на 50 см^2	Воздухо- прони- цае- мость, $\text{дм}^3 / \text{м}^2 \cdot \text{с}$	Термо- стой – кость, °С	Скорость филтрово- вания, м /мин
1	Нитроновая	426	1,6	151	100	120	0,7...0,9
2	Нитроновая двойного плетения	545	1,8	181	71	120	0,7...0,9
3	Полиоксиди- озол	500		326	110	200	0,7...0,9
4	Стек- лоткань	617	0,5	328	180	250	0,3...0,8
5	Сукно №2	400	1,5	58	50	90	0,7...0,9
6	Сукно полу- шерстяное	1440	1,5	122	46	60	0,7...0,9

7	Лавсан, арт.217	424	1,3	176	166	130	1...2
8	Лавсан, арт.86033	316	1,3	244	180	130	1...2
9	Лавсан двой- ной	940	2,6	622	69	130	1...2
10	Войлок игло- пробивной	580	2,5	130	110	130	1,5...3
11	Холстопроши- вное полотно 507	500	2,0	87	348	130	1,5...3
12	Холстопроши- вное полотно 508	400	2,0	38	611	130	1,5...3
13	Оксалоновая	510	0,7	420	110	200	1,5...3
14	Войлок с лав- саном	460	2,5	100	140	130	1,5...3

Плотность воды $\rho_{\text{ж}}$, кг/м³ при давлении $P = 10^5 \text{ Па}$

Таблица П.1.5

Темпера- тура, °С	Плотность	Темпера- тура, °С	Плотность	Темпера- тура, °С	Плотность
0	999,87	30	995,68	64	981,1
2	999,97	34	994,4	70	977,8
4	1000	40	992,23	74	975,5
10	999,73	44	990,7	80	971,8
16	998,97	50	988,1	90	965,53
20	998,23	54	986,2	94	962,26
24	997,33	60	983,2	100	958,4

Значения поверхностного натяжения воды, $\sigma \cdot 10^2$, Н / м

Таблица П.1.6

Темпера- тура, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
σ , Н / м	7,6	7,4	7,27	7,1	6,9	6,8	6,6	6,4	6,2	6,0	5,85

Плотность твердых материалов $\rho_{\text{ч}}$ и их насыпная плотность $\rho_{\text{н}}$, кг / м³

Таблица П.1.6

Материал	$\rho_{\text{ч}}$, кг / м ³	$\rho_{\text{н}}$, кг/м ³	Материал	$\rho_{\text{ч}}$, кг / м ³	$\rho_{\text{н}}$, кг / м ³
Алебастр	2600	-	Медь	8800	-
Алюминий	2700	-	Мел	2200	1300
Антрацит	1600	-	Нейлон	1140	-
Апатит	3190	1850	Резина	1500	-
Асбест	2600	-	Сода	1450	800
Бетон	2300	-	Соль камен.	2350	1020
Гипс	2240	1300	Свинец	11400	-
Гранит	2700	-	Сосна	500	-
Зола	2·200	680	Сталь нержав	700	-
Земля сухая	1800	1300	Стекло	2500	-
Известняк	2650	1800	Текстолит	1380	-
Кварц	2650	1500	Тефлон	2200	-
Кирпич	1500	-	Уголь камен.	1350	800
Кокс	1300	500	Цемент	2900	1250
Латунь	8500	-	Чугун	7000	-

Приложение 2

**Соотношения между единицами измерения СИ
и единицами других систем**

1. Длина: 1 мкм (микрометр) = $1 \cdot 10^{-6}$ м; 1 А (ангстрем) = $1 \cdot 10^{-10}$ м.
2. Объем: $1 \text{ л} = 1 \text{ дм}^3 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.
3. Масса: $1 \text{ кг} = 0,102 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2 / \text{м} = 1 \text{ кмоль} / M$, M – молекулярная масса вещества.
4. Вес (сила тяжести): $1 \text{ Н} = 0,102 \text{ кгс} = 10^5 \text{ дин}$.
5. Давление: $1 \text{ Па} = \text{Н} / \text{м}^2 = \text{кгс} / \text{м} \cdot \text{с}^2$; $1 \text{ Па} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ бар} = 0,981 \text{ кгс} / \text{м}^2$; $1 \text{ кгс} / \text{см}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па} = 735 \text{ мм. рт. ст.}$; $1 \text{ мм. рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}$; $1 \text{ мм. вод. ст.} = 9,81 \text{ Па}$.
6. Поверхностное натяжение жидкости: $1 \text{ Н} / \text{м} = 1 \text{ Дж} / \text{м}^2$; $1 \text{ дин} / \text{см} = 10^{-3} \text{ Н} / \text{м}$.
7. Энергия, работа: $1 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 9,81 \text{ Дж}$; $1 \text{ ккал} = 4,19 \text{ кДж}$; $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ кДж}$.
 $1 \text{ эрг} = 10^{-7} \text{ Дж}$; $1 \text{ л.с. (лошадиная сила)} = 735,5 \text{ Вт}$.
8. Количество движения (p) = масса · скорость, $p = m \cdot V$, $\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}$.
9. Момент количества движения (M_k) = количество движения · расстояние; $M_k = p \cdot l$, $\text{кгс} \cdot \text{м}^2 / \text{с}$.
10. Мощность (N) = работа в 1 Дж за 1 секунду; $N = \text{Дж} / \text{с} = \text{Вт}$.
11. Плотность (ρ) = масса : объем; $\rho = m / W = \text{кг} / \text{м}^3$.

11. Динамическая вязкость (μ) = сила / (метр·секунда); $\mu = \text{кгс} / \text{м} \cdot \text{с} = \text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = \text{Па} \cdot \text{с}$.

13. Кинематическая вязкость (ν) = динамическая вязкость : плотность среды;

$$\nu = \mu : \rho = (\text{кг} / \text{м} \cdot \text{с}) : (\text{кг} / \text{м}^3) = \text{м}^2 / \text{с}.$$

14.1 градус Цельсия ($^{\circ}\text{C}$) = 1 К; 1 градус Фаренгейта ($^{\circ}\text{F}$) = 0,556 К;

1 градус

Реомюра ($^{\circ}\text{R}$) = 1,25 К; 1 градус Ранкина ($^{\circ}\text{Ra}$) = 0,556 К.

Множители и приставки к единицам измерения

Т (тера) – 10^{12} ,	д (деци) – 10^{-1} ,
Г (гига) – 10^9 ,	с (санتي) – 10^{-2} ,
М (мега) – 10^6 ,	м (милли) – 10^{-3} ,
к (кило) – 10^3 ,	мк (микро) – 10^{-6} ,
г (гекто) – 10^2 ,	н (нано) – 10^{-9} ,
да (дека) – 10^1 ,	п (пико) – 10^{-12} .

Оглавление

Предисловие

.....3

1. Основные сведения о пыли и пылеочистке воздуха.....5

2. Пылеосадительные камеры и инерционные пылеуловители..... 14

2.1. Расчет пылеосадительных камер.....16

2.2. Расчет жалюзийных пылеуловителей.....23

2.3. Расчет гравитационно - инерционных пылеуловителей.....26

3. Циклоны сухой очистки пылевых выбросов 28

3.1. Типы циклонов, их применение, схемные особенности.....28

3.2. Расчет параметров циклона.....33

3.3. Особенности расчета параметров аппарата ВЗП..... 41

3.4. Расчет параметров центробежно – инерционного пылеуловителя.....46

4. Мокрые пылеуловители.....51

4.1. Полые форсуночные пылеуловители.....51

4.2. Пенные тарельчатые пылеуловители.....53

4.3. Пылеуловители с неподвижной и подвижной насадкой.....58

4.4. Пылеуловители ударного и ударно-инерционного типа.....62

4.5. Пылеуловители центробежного действия.....64

4.6. Скоростные пылеуловители с трубой Вентури.....68

5. Пористые фильтры.....80

5.1. Волокнистые фильтры.....80

5.2. Фильтры – туманоуловители.....82

5.3. Воздушные фильтры.....	84
5.4. Масляные фильтры.....	86
5.5. Тканевые фильтры.....	86
5.6. Зернистые фильтры.....	90
5.7. Фильтровентиляционные агрегаты.....	93
5.8. Расчет параметров фильтровальных тканей.....	95
5.9. Особенности расчета параметров зернистых фильтров.....	99
6. Электрофильтры.....	105
6.1. Общие сведения	105
6.2. Расчетные характеристики электрофильтров.....	108
6.3. Условия применения электрофильтров.....	113
Библиографический список.....	117
Приложение 1.....	120
Приложение 2.....	126
1.	