А. И. Пирумов

ОБЕСПЫЛИВАНИЕ ВОЗДУХА

МОСКВА
СТРОЙИЗДАТ
1974

УДК 628.511

Пирумов А. И. Обеспыливание воздуха. М., Стройиздат, 1974. 207 с.

В книге рассмотрены вопросы борьбы с пылью в промышленных, общественных и жилых зданиях. В ней изложены основы теории пылеулавливания, приведены современные конструкции, методы подбора и расчета воздушных фильтров и пылеуловителей, применяемых в системах вентиляции и кондиционирования воздуха, а также основные положения проектирования воздухоочистных установок.

Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников проектных и научно-исследовательских институтов, строительных и монтажных организаций и служб эксплуатации зданий различного назначения, занимающихся вопросами очистки воздуха.

Табл 34, ил. 92, список лит.: 121 назв.

П $\frac{30210-624}{047(01)-74}$ 194—74

© Стройиздат, 19

ОСНОВНЫЕ БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

D — диаметр циклона, канала, волокна; коэффициент диффузии;

d — диаметр шарообразной пылевой частицы;

E — эффективность улавливания пыли; энергия;

F — сила инерции;

G — масса пыли;

g — ускорение свободного падения;

H, h — ширина канала или сечения;

k — постоянная закона площадей;

m, $m_в$, $m_ж$ — масса соответственно пылевой частицы, воздуха (в объеме пылевой частицы) и капли или присоединенного объема жидкости;

N — число пылевых частиц;

p — давление;

Q — объем воздуха;

R — радиус сечения, кривизны, циклона;

r — радиус шарообразной пылевой частицы;

Re — критерий Рейнольдса ($\mathrm{Re}=\frac{v\,d\,\rho_в}{\mu_в}$ при движении частицы в воздухе);

St — критерий Стокса $\left(\mathrm{St}=\frac{1}{18}\cdot\frac{d^2 w_\infty}{\mu_в h}\rho\right.$ при движении частицы в воздухе);

t — время;

v, v_s, v_c, v_r, v_φ, v_z — скорость пылевой частицы (скорость соответственно движения, витания и сепарации, а также ее радиальная, тангенциальная и аксиальная составляющие);

w, w_φ, w — скорость воздушного потока (скорость течения, а также ее тангенциальная и аксиальная составляющие);

$w_{ср}$, w_0 — соответственно средняя и начальная скорость воздушного потока;

w_∞ — невозмущенная скорость воздуха далеко от препятствия;

Γ — циркуляция скорости;

$\mu_в$, $\mu_ж$ — коэффициент динамической вязкости соответственно воздуха и жидкости;

ζ — коэффициент местного сопротивления;

ρ, $\rho_ж$, $\rho_в$ — плотность соответственно пылевой частицы, жидкости и воздуха;

σ — поверхностное натяжение жидкости;

τ — время релаксации пылевой частицы ($\tau = \frac{m}{3\pi\mu_в d}$);

φ — потенциал скорости;

ψ — функция тока; коэффициент аэродинамического сопротивления;

ω — угловая скорость вращения.

ВВЕДЕНИЕ

Выбросы пыли в атмосферу увеличиваются по мере роста промышленного производства. Особенно опасных размеров достигло загрязнение воздуха в 50-е годы, когда валовые выбросы пыли и золы отдельными предприятиями стали исчисляться сотнями и тысячами тонн [7, 37, 70]. Катастрофический рост загрязнения воздуха в этот период был обусловлен резким несоответствием между развитием промышленного производства и техники очистки, в частности техники обеспыливания воздуха, которая была не в состоянии решить проблемы, поставленные перед ней промышленностью. В дальнейшем техника обеспыливания получила значительное развитие, и рост загрязнения воздуха в отдельных местностях был приостановлен. Так, если в 1952 г. катастрофический смог в Лондоне привел к гибели 4000 человек, то уже в 1956 г. смог повторился здесь в более слабой форме, и число его жертв снизилось до 1000 человек, а в 1962 и 1967 гг. — соответственно до 700—800 и 300—400 человек [23]; при этом видимость повысилась с 2,5 до 8,5 км.

Однако достигнутые успехи носят в основном местный характер, а в целом загрязненные атмосферы постоянно возрастает. Об этом свидетельствует, например, увеличение ущерба, наносимого загрязнением воздуха в США, с 1,5 млрд. долларов в 1952 г. до 12 млрд. долларов в 1965 г. и до нескольких десятков миллиардов долларов в 1969 г. [72].

В настоящее время Лондон по интенсивности загрязнения воздуха уже не составляет исключения среди других столичных и больших городов мира — в Нью-Йорке в 1963 г. от аналогичных причин погибло 400 человек, в Токио в 1970 г. от смога пострадало 10 тыс. человек, а в 1971 г. — 28 тыс. человек. В Лос-Анджелесе действует трехбалльная система «воздушных тревог». По тревоге № 1 запрещается пользование некоторыми типами мусоросжигательных печей, сокращается автомобильное движение и т. п. По тревоге № 3 полностью прекращается работа промышленных предприятий и транспорта. В Токио такие воздушные тревоги объявляются 100—150 раз в году, а в Эссене, самом «грязном» городе ФРГ, в некоторых районах периодически приостанавливается автомобильное движение.

Характерно, что уже начинает отчетливо проявляться взаимодействие выбросов различных стран, вызывая необходимость создания международных правовых основ защиты атмосферы.

Борьба с загрязнением атмосферы стала одной из важнейших социальных проблем глобального характера.

В СССР плановое размещение промышленности и более совершенные санитарные нормы смягчают вредные последствия загрязнения атмосферы. Тем не менее и в Советском Союзе борьба с загрязнением воздуха является важной проблемой.

Состояние воздушного бассейна промышленных районов определяется главным образом уровнем развития техники очистки дымовых и других газов промышленных установок. Очистка технологических выбросов — это часть основного производства, которая должна проектироваться одновременно с ним. В данной книге очистка их не рассматривается.

Загрязнение воздуха в промышленных районах, в свою очередь, создало проблему обеспыливания воздуха, подаваемого в помещения системами приточной вентиляции и кондиционирования, с целью защиты от пыли, содержащейся в наружном воздухе, людей, оборудования и отделки помещений, а также теплообменников приточных камер и кондиционеров. Новые аспекты этой проблемы возникли в связи с развитием производств, предъявляющих повышенные требования к чистоте воздуха в помещениях для наиболее ответственных технологических операции, в связи с увеличением масштабов потребления воздуха в производстве кислорода, в газотурбинных и других установках, а также в связи с освоением пустынных и полупустынных районов с малосвязными почвами, где часто возникают пыльные бури.

Второй важной задачей вентиляционной техники является очистка воздуха, удаляемого из производственных помещений с помощью вытяжных (аспирационных) вентиляционных систем. Объем отдельных вентиляционных выбросов и содержание пыли в них, как правило, невелики. Выбросы обычно производятся в течение неполных суток с перерывами и переменной интенсивностью. На общее состояние воздушного бассейна вентиляционные выбросы оказывать значительного влияния не могут, но из-за небольшой высоты расположения над землей, рассредоточенности, большого суммарного объема и, как правило, плохой очистки они сильно загрязняют приземной слой атмосферы.

Весьма актуальными стали также мероприятия по устранению последствий запыленности воздуха в производственных помещениях, в частности очистка спецодежды.

Оборудование, применяемое для обеспыливания воздуха, подразделяют на следующие основные виды (СНиП I-Г. 5-62): 1) воздушные фильтры для очистки от пыли наружного или рециркуляционного воздуха, подаваемого в помещения системами приточной вентиляции и кондиционирования; 2) пылеуловители для улавливания пыли из воздушных выбросов вытяжных (аспирационных) вентиляционных систем.

Разделение оборудования на воздушные фильтры и пылеуловители является несколько условным. Так, имеются пылеуловители, в которых отделение пыли происходит главным образом в результате фильтрации воздуха через пористые слои, например рукавные пылеуловители. Эти пылеуловители часто именуют рукавными фильтрами, подобно тому как электрические золоуловители часто называют электрическими фильтрами, хотя в действительности фильтрации воздуха в них не происходит.

Противоречивость терминологии проистекает из существовавшей ранее разобщенности сфер применения обеспыливающего оборудования разных видов. Однако с течением времени разнородные по конструкции обеспыливающие аппараты, традиционно носящие одинаковые наименования, например электрические фильтры для очистки выбросов и электрические фильтры для очистки воздуха в системах приточной вентиляции, волокнистые тканевые фильтры для очистки выбросов и волокнистые фильтры для кондиционеров и т. п., все чаще стали применять в одних и тех же отраслях народного хозяйства. В этих условиях неточность терминологии создала определенные неудобства, что обусловило необходимость более четкого разграничения двух основных областей применения обеспыливающих аппаратов — очистки выбросов и очистки наружного воздуха, определяющих их конструкцию.

Техника обеспыливания характеризуется большим разнообразием конструкций и форм исполнения обеспыливающего оборудования. Число модификаций фильтров и пылеуловителей настолько велико, что в данной книге приводится описание лишь наиболее распространенных, в первую очередь в СССР, или наиболее интересных по своему устройству и конструктивному решению аппаратов, которые могут быть использованы в вентиляционных системах. При этом не рассматриваются пылеуловители, применяющиеся пока главным образом для очистки технологических выбросов (электрические, пенные, рукавные, Вентури), хотя с течением времени их использование в вентиляционных системах, несомненно, будет возрастать.

Правильное применение средств техники обеспыливания воздуха приобретает особое значение в современных условиях растущего загрязнения атмосферы.

ГЛАВА I

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССОВ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ВОЗДУХА

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПЫЛЕЙ ПО ИХ ДИСПЕРСНОСТИ

Пыль является одной из разновидностей аэрозолей, т. е. дисперсных систем, состоящих из твердых или жидких частиц (дисперсной фазы), взвешенных в газовой (дисперсионной) среде, а именно аэрозолью с твердыми частицами диспергационного происхождения [110]. Такие частицы образуются при измельчении твердых тел, например при дроблении руд, механической обработке металлов, ветровой эрозии грунтов и т. п.

Аэрозоли с твердыми частицами, образовавшимися в результате объемной конденсации пересыщенных паров, например паров металлов, и при химических реакциях некоторых веществ, находящихся в газообразном состоянии, называют *дымами.* К ним относятся аэрозоли, возникающие при горении, плавке металлов и их сварке, а также при некоторых фотохимических процессах [26].

Аэрозоли с жидкими частицами называют *туманами.*

Иногда аэрозолями называют дисперсные системы с частицами размером менее 10 мкм [97]. Такое определение основывается на том, что для частиц крупнее 5—10 мкм взвешенное состояние не является характерным, во всяком случае в покоящейся воздушной среде.

В инженерной практике, как правило, пылью называют не только среду со взвешенными частицами — аэрозоль, но и сами пылевые частицы различного происхождения, в том числе осевшие (порошки), и это упрощение сохранено в некоторой мере в дальнейшем изложении.

Ввиду развитой поверхности многие пыли обладают повышенной взрыво- и огнеопасностью.

Одной из важнейших характеристик пыли является ее дисперсность. Под дисперсностью пыли понимается совокупность размеров всех частиц, составляющих пылевую систему. Она определяет особенности поведения дисперсных систем, а также методы, применяемые при решении пылетехнических задач.

Наглядное представление о сравнительной дисперсности различных пылей можно получить, сопоставляя интегральные кривые распределения массы их дисперсной фазы по размерам частиц. Систему классификации пылей по их дисперсности оказалось возможным создать путем спрямления этих кривых в билогарифмической или вероятностно-логарифмической сетке [76].

Классификационная номограмма, приведенная на рис. I.1, представляет собой вероятностно-логарифмическую сетку, на

которую штрихпунктирными линиями нанесены границы пяти классификационных групп пылей:

I — очень крупнодисперсная пыль;

II — крупнодисперсная пыль (например, мелкозернистый песок для строительных растворов по ГОСТ 8736—67);

III — среднедисперсная пыль (например, цемент);

IV — мелкодисперсная пыль (например, кварц молотый пылевидный КП-3 по ГОСТ 9077—59);

V — очень мелкодисперсная пыль.

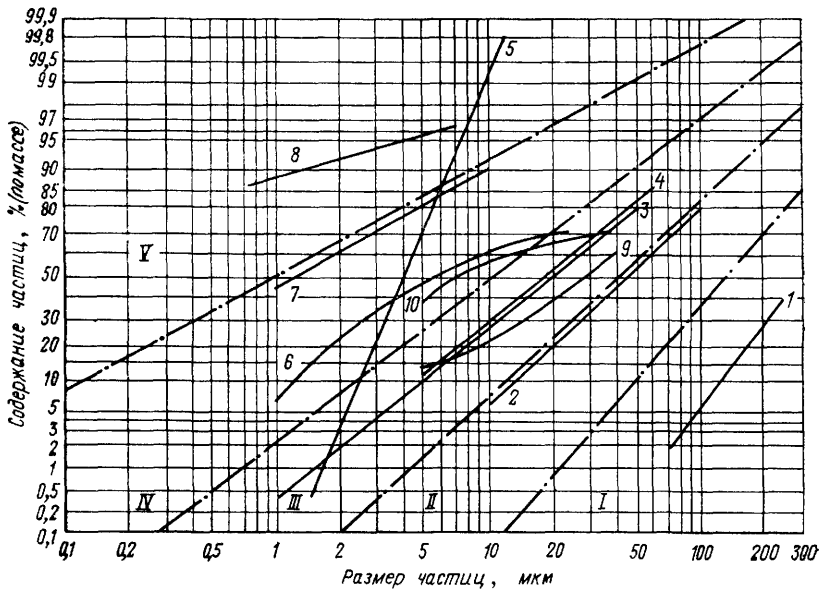


Рис. I.1. Классификационная номограмма

I — V — классификационные группы пылей по их дисперсности; *1* — уголь, измельченный в шаровой мельнице, *2* — мелкозернистый кварцевый песок; *3* — пылевидный кварц КП-3, *4* — цемент, *5* и *6* — пыли, применяемые при испытаниях лабораторией ЦНИИПромзданий, *7* — дым мартеновских печей, *8* — атмосферная пыль: *9* — стандартная испытательная пыль «Аризона-крупная» (США), *10* — то же, «Аризона мелкая»

Расположение кривой в той или иной зоне номограммы означает принадлежность данной пыли к соответствующей классификационной группе[1].

Кривые распределения иногда имеют несколько максимумов, принимая вид ломаных линий, или располагаются несимметрично относительно границ классификационной группы. Тем не менее определение группы пыли по дисперсности, как правило, не вызывает особых затруднений.

[1] С 1962 г. номограмма с использованием билогарифмической сетки включена в главу СНиП I-Г.5-62.

Пылевые частицы находятся в непрерывном движении относительно среды, в которой они взвешены. Знание законов, определяющих их взаимодействие с этой средой, важно для решения технических задач.

2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ С ВОЗДУШНЫМИ ПОТОКАМИ

Движение частиц в прямолинейном потоке. Законы, определяющие движение частиц в покоящемся воздухе, или, что то же, законы их обтекания воздухом, зависят от размеров частиц.

Аэродинамическое сопротивление частицы диаметром d, движущейся со скоростью v_c относительно воздуха плотностью $\rho_в$, выражают формулой

$$F = \psi \frac{\pi d^2}{4} \rho_в \frac{v_c^2}{2}. \qquad (I.1)$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления ψ зависит от числа Рейнольдса Re.

При движении с малыми скоростями и очень небольших размерах частиц, когда $0<\mathrm{Re}<1$, $\psi=24/\mathrm{Re}$, а сопротивление определяется формулой Стокса[1],

$$F = 3\pi\mu_в d v_c. \qquad (I.1a)$$

В тех случаях, когда исследуется движение, характеризующееся заведомо большими значениями Re, для определения коэффициента аэродинамического сопротивления применяют формулу Л. С. Клячко [48]:

$$\psi = \frac{24}{\mathrm{Re}} + \frac{4}{\sqrt[3]{\mathrm{Re}}}. \qquad (I.2)$$

В интервале $3<\mathrm{Re}<400$ эта формула дает отклонения от действительных значений не более 2%, при $\mathrm{Re}=1000$ погрешность составляет около —4%, а при $\mathrm{Re}=0{,}1$ — около 4%.

Пылевые частицы оказывают друг на друга механическое и аэродинамическое воздействие, выравнивающее скорости их движения. Соприкосновение частиц часто приводит к образованию агрегатов, т. е. к коагуляции пыли, сильнейшим образом изменяющей свойства пылевого облака, вызывая его «старение».

Механизм удержания соприкоснувшихся пылевых частиц чрезвычайно сложен. В наиболее общем случае — при отсутствии электрических сил — он определяется силами молекулярного притяжения. Последние очень малы и быстро убывают по

[1] Условно принимают, что частицы представляют собой идеальные сферы, учитывая дополнительно в случае необходимости влияние их формы. Обычно пренебрегают также той частью сопротивления, которая связана с сообщением движения самой среде при изменениях скорости движения частицы.

мере удаления частиц друг от друга, становясь ничтожно малыми уже при зазоре между ними около 1 мкм [31]. Силы молекулярного притяжения зависят от площади контактирующих поверхностей частиц и, следовательно, от их формы.

Силами, стремящимися разъединить слипшиеся частицы, при отсутствии особых механических воздействий в виде вибрации и т. п. являются сила тяжести частиц и аэродинамические силы. При экспериментах добиться полного разрушения агрегатов из частиц радиусом около 1 мкм в потоке, образующемся в плоской щели шириной 80 мкм, удавалось только при скоростях более 170 м/с [111].

Способность пыли к слипанию зависит в первую очередь от ее дисперсности. Кроме размера частиц большое значение при этом имеют их форма и механические свойства, в основном их пластичность, влияющая на площадь контакта.

Увлажнение пыли приводит к образованию на поверхности отдельных частиц слоя влаги и тем самым увеличивает площадь их контактирующих поверхностей. Способность пылевых частиц к слипанию возрастает также при конденсации паров воды в зазорах между их контактирующими поверхностями, обусловленной действием двойного электрического слоя, образующегося в зоне контакта, и ряда других эффектов.

Движение частиц в криволинейном потоке. Установлено, что формула Стокса (I.1а), полученная для сферы, обтекаемой прямолинейным поступательным потоком, не вполне точно определяет даже сопротивление частицы, седиментирующей в горизонтальном потенциальном потоке [75]. При обтекании же сферы криволинейным потоком симметричность линий тока нарушается и проявляется воздействие ряда новых факторов.

Если движение происходит по концентрическим окружностям, а частицы воздуха не вращаются (потенциальный поток), то скорости распределяются по закону площадей:

$$w R = k = \text{const}. \qquad \text{(I.3)}$$

Для определения постоянной k рассмотрим плоское течение в криволинейном канале единичной толщины, образованном двумя концентрическими поверхностями (рис. I.2).

Объемный расход Q потока, протекающего со скоростью w по каналу, равен:

$$Q = \int_{R_1}^{R_2} w\, dR = w_2 R_2 \ln \frac{R_2}{R_1}.$$

Так как $Q/(R_2 - R_1) = w_0$, то

$$w = \frac{w_0 (R_2 - R_1)}{R \ln \dfrac{R_2}{R_1}}$$

или

$$k = w R = \frac{w_0 (R_2 - R_1)}{\ln \frac{R_2}{R_1}}. \qquad (I.4)$$

Во вращающихся потоках реальных вязких газов скорости распределяются по закону, несколько отличающемуся от закона площадей:

$$w R^{\varkappa} = \text{const}, \qquad (I.3a)$$

при этом значение показателя степени $\varkappa$, согласно измерениям, составляет в различных случаях от 0,5 до 1.

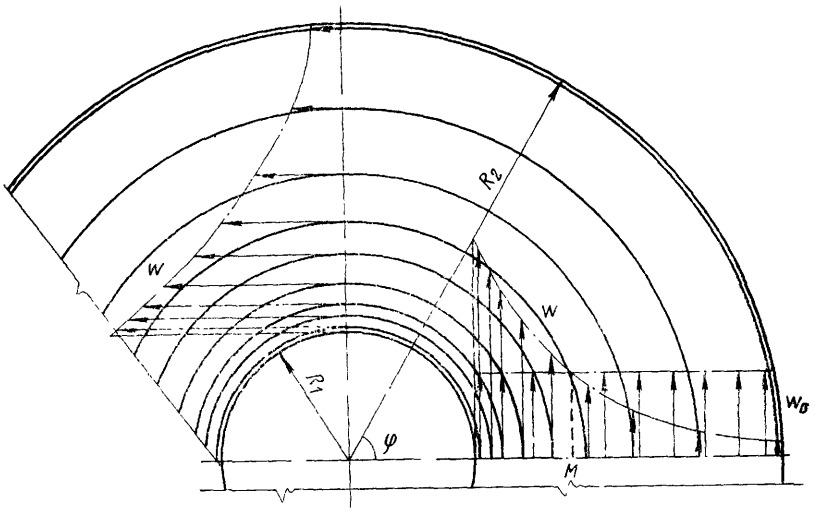


Рис. I.2. Эпюры скоростей потенциального течения в криволинейном канале

В центре вращающегося потока (ядре вихря) $\varkappa = -1$ и скорости распределены как в твердом теле. В этом случае по аналогии с вращательным движением твердых тел постоянная k может быть названа угловой скоростью вращения потока ω. Сопротивление тел, обтекаемых вращающимися потоками при $\omega = \text{const}$, было исследовано Тейлором и Праудманом [75]. Оказалось, что сопротивление сферы радиусом r равно:

$$\mathbf{F} = 6\pi r \mu_{\text{в}} \mathbf{v}_c - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{в}} \omega \times (\omega \times \mathbf{R}) + \frac{2}{3}\pi r^2 \rho_{\text{в}} (\omega \times \mathbf{v}_c). \qquad (I.5)$$

Первый член правой части этого уравнения — сила Стокса в ее обычном выражении, а второй и третий члены — дополнительные компоненты аэродинамического сопротивления, обу-

словленные вращением потока. Второй член, по модулю равный $m_в w^2/R$, представляет собой центростремительную силу объема воздуха, вытесненного сферой; третий член с модулем $2\pi r^2 \rho_в \omega v_c$ — силу, направленную под прямым углом к вектору скорости относительного движения сферы в сторону вращения потока.

Учитывая, что $2\pi r\omega$ представляет собой циркуляцию Γ относительной скорости по контуру среднего сечения сферы, получим третий член в виде $^1/_3 r\rho_в \Gamma v_c$. Так как величина $\rho_в \Gamma v_c$ представляет собой подъемную силу кругового цилиндра радиусом r, обтекаемого прямолинейным потенциальным потоком со скоростью v_c, можно сделать вывод, что рассматриваемый член уравнения (I.5) — это подъемная сила сферы радиусом r.

С учетом сказанного уравнение (I.5) примет вид

$$F = 6\pi r \mu_в v_c + \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_в \frac{w^2}{R} + \frac{1}{3} r \rho_в \Gamma v_c. \qquad (I.6)$$

Второй и третий члены этого уравнения очень малы по сравнению с его первым членом, поэтому нет оснований отказываться от применения формулы Стокса и для криволинейных потоков, во всяком случае при движении шарообразных частиц.

Однако теоретические и экспериментальные исследования Тейлора и Праудмана показали также, что при определенных условиях обтекание тел криволинейными потоками может иметь двухмерный характер, в результате чего как сила сопротивления, так и подъемная сила частицы будут значительно больше, чем это следует из формул (I.1а) и (I.6) [75].

Силы инерции. Один из важнейших результатов взаимодействия пылевых частиц с увлекающими их воздушными потоками — это проявление сил инерции.

На инерционной сепарации пыли из воздушных потоков основано устройство большой группы разнообразных «инерционных» пылеуловителей, получивших наиболее широкое распространение в практике обеспыливания: циклонов, жалюзийных пылеуловителей, центробежных скрубберов, ротоклонов и др. В значительной мере силами инерции обусловлены отделение пыли при фильтрации воздуха через пористые слои, осаждение пыли на препятствиях, коагуляция пылевых частиц в поле ультразвуковых колебаний и т. п.

Еще сравнительно недавно природа и существо сил инерции являлись предметом дискуссии [113]. Классическая механика была склонна трактовать силы инерции как фиктивные силы, которые вводятся формально, чтобы можно было применять законы Ньютона при рассмотрении некоторых движений тел.

В свете современных физических представлений различают два класса сил инерции: 1) ньютоновы силы инерции, действующие в инерциальных системах отсчета, т. е. в системах неподвижных или движущихся по отношению к неподвижным прямо-

линейно и равномерно; 2) силы инерции, действующие в неинерциальных системах отсчета, т. е. в системах, движущихся по отношению к неподвижным с ускорением.

Рассмотрим прежде всего ньютоновы силы инерции. Согласно первому закону Ньютона (закон инерции), в инерциальной системе координат каждое уединенное тело, на которое не действуют силы со стороны других тел, может двигаться только прямолинейно и равномерно. Таким можно представить движение пылевой частицы в вакууме, если отвлечься от сил тяготения или допустить, что масса частицы достаточно мала, чтобы можно было на некоторый промежуток времени пренебречь влиянием этих сил, например на искривление ее траектории.

Частица, движущаяся в воздушной среде, испытывает ее воздействие. Согласно второму закону Ньютона, в результате этого воздействия у частицы возникает ускорение относительно неподвижной системы координат и скорость ее движения начинает уменьшаться. Ускорение всегда пропорционально действующей на частицу силе сопротивления среды и по направлению совпадает с направлением этой силы.

Если абсолютная скорость частицы относительно неподвижной системы координат равна **v**, а скорость воздушной среды (потока) — **w**, то сила инерции

$$m\,\frac{dv}{dt} = 3\,\pi\,\mu_{в}\,d\,(\mathrm{w} - \mathrm{v}), \tag{I.7}$$

или

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{\tau}\,(\mathrm{w} - \mathrm{v}),$$

где

$$\tau = \frac{m}{3\,\pi\,\mu_{в}\,d}\,. \tag{I.8}$$

В данном случае ускоряющее действие оказывает на частицу воздушная среда. Ускоряющая сила, представленная правой частью уравнения (I.7), приложена к частице.

Согласно третьему закону Ньютона, каждое действие вызывает равное ему и противоположное по направлению противодействие. Ньютонова сила инерции представляет собой силу противодействия ускоряемой частицы и как сила реакции приложена к ускоряющей воздушной среде. Таким образом, действующая сила аэродинамического сопротивления и противодействующая ей сила инерции, характеризующие взаимодействие частицы с воздушным потоком, имеют одну и ту же природу.

Для исследования сил инерции второго класса рассмотрим поведение частицы в потоке, протекающем, например, в конфузорной части трубы пылеуловителя Вентури, в неподвижной системе координат. По мере сужения сечения конфузора скорость

потока $\mathbf{w}$ быстро возрастает. Скорость же движения частицы $\mathbf{v}$, равная в момент входа в конфузор $\mathbf{v}_0=\mathbf{w}_0$, изменяется медленнее, и поэтому всегда существует значение $\mathbf{v}_c=\mathbf{v}-\mathbf{w}$, отличное от нуля.

Введем подвижную систему координат, движущуюся вместе с потоком, т. е. движущуюся ускоренно с переменной скоростью $\mathbf{w}$ по отношению к неподвижной системе координат. Абсолютная скорость частицы $\mathbf{v}=\mathbf{w}+\mathbf{v}_c$, при этом $\mathbf{w}$ может быть названа *скоростью переносного движения*, а $\mathbf{v}_c$ — *скоростью относительного движения*. Соответственно ускорение составит:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt}=\frac{d\mathbf{w}}{dt}+\frac{d\mathbf{v}_c}{dt}.$$

Наблюдатель, связанный с подвижной системой координат и поэтому не замечающий ее ускорения $d\mathbf{w}/dt$, должен будет отметить, что пылевая частица движется с ускорением, равным $d\mathbf{v}/dt-d\mathbf{w}/dt$, которое он не смог бы объяснить действием каких-либо конкретных сил. Для объяснения этого явления необходимо ввести в рассмотрение силу инерции $-m d\mathbf{w}/dt$, направленную в сторону, противоположную направлению потока. Уравнение движения частицы относительно подвижной системы координат примет вид

$$\frac{d\mathbf{w}}{dt}+\frac{d\mathbf{v}_c}{dt}=-\frac{1}{\tau}\,\mathbf{v}_c.$$

Вследствие произвольности выбора скорости подвижной системы координат $\mathbf{w}$ может произвольно изменяться и значение силы $-m d\mathbf{w}/dt$. Очевидно, однако, что эта сила также является силой реакции частиц.

Рассмотрение движения частиц в подвижных системах координат часто упрощает исследование.

3. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ПРОЦЕССОВ СЕПАРАЦИИ ПЫЛИ ИЗ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ

Современные представления о механизме отделения пыли от воздушных потоков

Сепарация пыли из воздушных потоков происходит в результате действия сил тяжести, инерции, электрических и радиотермических, а также в результате молекулярной и турбулентной диффузии. Взаимодействие между частицами может приводить к их укрупнению и тем самым способствовать дальнейшей сепарации. Во всех случаях окончательное отделение пыли от воздушных потоков и ее улавливание определяется действием силы тяжести частиц или условиями их контакта с поверхностями, на которые они осаждаются, в частности с поверхностями жидкостей. Исследованиям различных механиз-

мов отделения пыли посвящено большое число работ, многие из которых получили освещение в монографиях Н. А. Фукса [110, 111] и других исследователей [26, 96, 97, 119]. Далее упоминаются только отдельные оригинальные работы, из числа непосредственно относящихся к рассматриваемым вопросам, или работы, не освещенные в указанных монографиях.

Седиментация наиболее полно рассмотрена в покоящейся среде и в ламинарных потоках.

Из уравнения движения пылевой частицы, находившейся в покое в момент времени $t=0$, а затем медленно оседающей со скоростью v под действием силы тяжести $(0<\mathrm{Re}<1)$,

$$\frac{dv}{dt}+\frac{v}{\tau}-g=0 \qquad (I.9)$$

скорость осаждения частицы составит:

$$v=v_s\,(1+e^{-t/\tau}),$$

где v_s — постоянная скорость витания, равная

$$v_s=\frac{1}{18}\,\pi d^2\,\mu_в\,\rho.$$

Как правило, время t пребывания частицы в канале значительно больше времени ее релаксации τ. Вследствие этого величиной $e^{-t/\tau}$ можно пренебречь и принять скорость осаждения v равной скорости витания v_s. Осаждение частиц под действием собственного веса происходит очень медленно $(v_s=g\tau)$.

В ламинарном потоке составляющие скорости течения в любой его точке могут быть выражены через функцию тока ψ:

$$w_L=\frac{\partial\psi}{\partial H};\quad w_H=-\frac{\partial\psi}{\partial L}.$$

Если принять, что скорость v_L движения частицы в направлении потока равна скорости потока w_L, то составляющие скорости частицы можно выразить следующими уравнениями:

$$\frac{dL}{dt}=\frac{\partial\psi}{\partial H};\quad \frac{dH}{dt}=-\frac{\partial\psi}{\partial L}=v_s.$$

В результате получим дифференциальное уравнение траектории частиц $v_s dL=-d\psi$. Интегрируя по длине канала L, получим:

$$v_s L=\psi_0-\psi_L,$$

где ψ_0 и ψ_L — значения функции тока в точках, занимаемых частицей соответственно при входе в канал и выходе из него.

Функция тока выражает объем воздуха, протекающего в единицу времени между дном канала единичной ширины и данной линией (поверхностью) тока. Поскольку траектории осаждающихся частиц пересекают дно канала, $\psi_L=0$ разграничивает траектории осаждающихся и неосаждающихся частиц.

Для осаждающихся частиц $\psi_0 = v_s L$. Если обозначить общий расход потока через $w_{ср} H$, то эффективность седиментационного осаждения частиц E_s будет характеризоваться соотношением

$$E_s = \frac{v_s L}{w_{ср} H}.$$

Длина канала, необходимая для полного осаждения всех частиц со скоростью витания v_s, составляет:

$$L = \frac{w_{ср} H}{v_s}.$$

Так видно из последнего выражения, эффективность осаждения не зависит от характера распределения скоростей.

Диффузия. Для отделения мелких частиц более действенным является фактор диффузии. Чем мельче частицы, тем в большей мере проявляется их способность к молекулярной (броуновской) диффузии во всех случаях и к турбулентной диффузии в турбулизированных потоках аэрозолей.

В процессе диффузии частицы не остаются на одной линии тока. Совершая неупорядоченное движение, они перемещаются также в направлениях, поперечных к линии тока, приближаясь к границам потоков и к поверхности обтекаемых препятствий, вплоть до столкновения с ними.

Для осаждения частиц размером $d \leqslant 0{,}2$ мкм молекулярная диффузия является определяющей. Результат броуновского движения частиц размером $d > 1$ мкм, когда коэффициент диффузии $D < 10^{-7}$ см^2/с, очень мал. Молекулярная диффузия учитывается в теории высокоэффективных фильтров, предназначенных для улавливания очень мелкодисперсных пылей.

Влияние турбулентной диффузии распространяется на частицы значительно большего размера. Исследования показывают, что частицы размером $d \leqslant 30$ мкм полностью увлекаются турбулентными пульсациями. Полнота захвата частиц турбулентными пульсациями зависит от их массы или инерции. Таким образом, даже в диффузионном осаждении силы инерции играют важную роль, а в большинстве случаев практики обеспыливания вентиляционного воздуха силы инерции являются определяющим фактором.

Инерционная сепарация пыли. Инерционная сепарация может происходить в криволинейных и прямолинейных потоках. Циклонные пылеуловители, в которых используется инерционная сепарация в криволинейных потоках, применяют около 100 лет. Исследованию циклонной сепарации посвящено множество работ. При теоретическом рассмотрении такой сепарации обычно принимали, что тангенциальная составляющая скорости движения частицы совпадает со скоростью среды, и определяли радиальную составляющую ее относительной скорости, возникающую под действием центробежной силы. В ли-

тературе приводятся формулы для определения размера наименьших частиц, полностью сепарирующихся в циклоне, в зависимости от скорости воздуха и геометрии циклона. Формулы различны по написанию, но все выведены из одного и того же условия — равенства центробежной силы силе сопротивления среды:

$$m\,\omega^2 R = 3\pi\mu_в\, d\, v_c. \qquad (I.10)$$

Разные исследователи, принимая в формуле (I.3а) значения показателя степени в пределах $-1 \leqslant \varkappa \leqslant 1$, задаваясь длительностью движения частиц и т. п., получали формулы для определения «минимального диаметра» частиц, входящих в циклон в наибольшем удалении от его наружной стенки и успевающих достигнуть ее за время пребывания в циклоне. Практика показала, что для расчета циклонов эти формулы неприменимы.

Более детальный анализ взаимодействия частицы со средой в криволинейном потоке [75] позволил несколько уточнить теорию. Дальнейшее ее развитие приведено в последующем изложении.

В прямолинейных потоках инерционные эффекты проявляются при обтекании препятствий. Препятствия могут иметь вид плоских перфорированных листов, реек, цилиндров (волокна, круглые стержни), отдельных сферических тел (шары, капли, зерна) и т. п. Такими препятствиями в обеспыливающих устройствах являются отдельные элементы заполнения фильтров и пылеуловителей, а также капли жидкости, разбрызгиваемой в мокрых пылеуловителях.

Инерционное осаждение в данном случае обусловливается искривлением линий тока воздуха при обтекании им препятствий. Эффективность осаждения или коэффициент захвата определяется сотношением числа частиц, соударяющихся с препятствием, с числом частиц, которые пересекли бы контур препятствия, если последнее не отклоняло бы течения.

Аналитическое решение уравнений движения частиц при обтекании препятствий затруднено необходимостью учета распределения скоростей вблизи препятствий, соотношения размеров частиц и препятствий, а также числа Рейнольдса. Как правило, коэффициенты захвата определяются с помощью вычислительных машин. Л. М. Левин рассмотрел процесс осаждения частиц из потока шириной $2l$ на бесконечной пластинке, установленной перпендикулярно направлению потока, при ее симметричном обтекании [56]. Было установлено, что при значениях критерия Стокса $\mathrm{St} > \frac{1}{4} \cdot \frac{l}{w_\infty}$ частицы рано или поздно осаждаются на бесконечной пластинке, а при значениях критерия Стокса $\mathrm{St} < \frac{1}{4} \cdot \frac{l}{w_\infty}$ частицы вообще не осаждаются на ней.

Физически это явление объясняется торможением потока, несущего частицы, вблизи передней критической точки обтекания — точки застоя. Движение частиц малого размера при этом настолько замедляется, что они теряют инерцию и под влиянием поперечных составляющих скорости потока сносятся параллельно пластинке, не достигая ее поверхности.

Оказалось, что критические условия осаждения существуют для широкого класса симметричных потоков аэрозолей. Было выявлено, что критические значения критерия Стокса $St_{кр}$ зависят от формы обтекаемого препятствия и связаны с поведением потока около точки застоя.

Осаждение частицы на препятствии происходит не только при пересечении его контура траекторией центра частицы, но и тогда, когда частица коснется препятствия, т. е., например, когда центр шарообразной частицы приблизится к препятствию на расстояние, равное радиусу частицы. Этот «эффект зацепления» существенно увеличивает эффективность осаждения частиц на очень тонких волокнах или других препятствиях, когда размеры частицы соизмеримы с размерами препятствия.

В высокоэффективных воздушных фильтрах диаметр волокон часто является величиной одного порядка с размерами частиц. К таким фильтрам относятся, например, целлюлозно-асбестовые фильтры, в которых на каркасе из относительно крупного целлюлозного волокна уложены волокна асбеста диаметром в доли микрометра, а также нетканые волокнистые фильтры из смеси толстых и тонких волокон. В этом случае отклонение траектории частиц при обтекании волокон мало, как и при очень больших значениях критерия Стокса St.

С другой стороны, если размеры частиц намного меньше диаметра волокон, очень мал эффект зацепления.

Таким образом, значение $St_{кр}$ определяет для тела данной конфигурации минимальный диаметр частиц $d_{мин}$ из оседающих на нем:

$$d_{мин} = \sqrt{\frac{18\,\mu_в\,St_{кр}\,l}{w_\infty \rho}}. \qquad (I.11)$$

Чем больше значение $St_{кр}$, тем хуже происходит инерционное осаждение мелких частиц при прочих равных условиях. Оказалось, что меньшими значениями $St_{кр}$ характеризуются тела более обтекаемой формы. Частицы улавливаются тем лучше, чем больше их плотность ρ и скорость потока и меньше линейные размеры препятствия.

Критические значения критерия Стокса и значения минимального диаметра осаждающихся частиц для некоторых препятствий, используемых в обеспыливающих устройствах, приведены в табл. I.1.

Осаждение на цилиндрических препятствиях было рассчитано Брауном при помощи специально сконструированного ин-

ТАБЛИЦА I.1

Критические значения критерия Стокса для некоторых препятствий, характерных для фильтров и пылеуловителей

Препятствие	$St_{кр}$	Диаметр препятствия, мкм	Скорость обтекающего потока, м/с	Диаметр наименьшей частицы из осаждающихся на препятствии, мкм
Цилиндрические волокна или проволока (включая пленку замасливателя при ее наличии)	1/8	30	1,5	0,39
			2,5	0,3
		60	1,5	0,56
			2,5	0,43
		350	1,5	1,38
		450	1,5	1,56
		900	2,5	1,7
Капля сферическая	1/12	50	2,5	0,33
			15	0,134
			100	0,052
		500	2,5	1,04
			15	0,425
			100	0,16

тегратора [110]. Результаты расчета приведены на рис. I.3. Параметр $\varphi = Re^2/St$ учитывает действительное значение числа Re обтекания частицы и, таким образом, характеризует степень отклонения от формулы Стокса, которой отвечают очень малые значения φ ($\varphi \approx 0$).

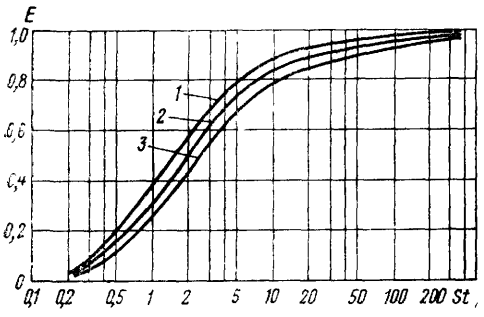


Рис. I.3. Эффективность E инерционного осаждения пылевых частиц при потенциальном обтекании цилиндра
1 — при $\varphi = 0$, *2* — при $\varphi = 100$; *3* — при $\varphi = 1000$

Теория фильтрации аэрозолей. Очистка воздуха от пыли в пористых слоях происходит в результате одновременного действия всех рассмотренных механизмов отделения частиц. Эта одновременность создает большие трудности для развития теории фильтрации. Суммировать эффекты от действия отдельных механизмов нельзя, так как общий эффект хотя и больше каждого отдельного слагаемого, но меньше их суммы. Исследования высокоэффективных фильтров I класса, выполненных из очень тонких волокон, показали, что эффективность этих фильтров (близкая к абсолютной) снижается на доли процента в области частиц размером 0,1—0,3 мкм, для которых инерционный эффект уже почти неощутим, а диффузионный еще недостаточно действен.

Определению суммарного коэффициента захвата пылевых частиц единицей длины волокна в фильтре посвящено много серьезных исследований[1]. В последнее время все большее распространение получает метод расчета улавливания очень мелкодисперсных частиц ($d<5$ мкм), разработанный Н. А. Фуксом и его сотрудниками [47] для высокоэффективных фильтров при скоростях фильтрации менее 1 м/с. Метод основывается на определении коэффициента захвата K_s «веерной» модели фильтра, представляющего собой систему решеток из параллельных волокон, повернутых на произвольные углы относительно друг друга.

В элементарном слое фильтра толщиной dh, образованного волокнами диаметром D, уложенными с одинаковой плотностью упаковки α, общая длина волокон равна $\frac{4\alpha\, dh}{\pi D^2}$. При протекании со скоростью w через этой слой аэрозоля, концентрация частиц в котором равна N_0, каждой единицей длины волокна улавливается $K_s D N_0 w/(1-\alpha)$ частиц данного размера.

Убыль частиц в потоке с переменной концентрацией N составит $-wdN$, или

$$-\frac{dN}{N}=\frac{4\alpha K_s}{\pi D\,(1-\alpha)}\,dh. \qquad (I.12)$$

Учитывая, что величина α очень мала, после интегрирования получим:

$$\lg\,(1-K_s)=2-\frac{1{,}72\,\alpha\, h\, K_s}{\pi D}.$$

Практический интерес представляет закономерность распределения осаждающейся пыли по толщине фильтра. Для выяснения этой закономерности запишем выражение (I.12) в виде

$$\frac{dN}{N}=-\frac{dh}{\lambda},$$

где λ — постоянная фильтрации.

После интегрирования получим:

$$\frac{N}{N_0}=e^{-h/\lambda}, \qquad (I.13)$$

откуда следует, что при $h=\lambda$ коэффициент проскока равен $c^{-1}=0{,}368$.

В соответствии с этим постоянную фильтрации можно определить как толщину слоя фильтра, в котором задерживается 63,2% всех частиц:

$$\lambda=\frac{h}{2{,}3\lg\frac{N}{N_0}}. \qquad (I.14)$$

[1] Полный обзор развития и современного состояния теории фильтрации приведен в работе [107].

Из выражения (I.14) следует, что чем эффективнее фильтр, тем меньше его постоянная фильтрации. Наиболее эффективное улавливание происходит в первых по течению воздуха слоях фильтра. Это положение хорошо подтверждается экспериментальными исследованиями, описанными в главе II. Теория фильтрации относится главным образом к области максимального проскока частиц, предполагая полное улавливание частиц за пределами этой области, что справедливо для высокоэффективных фильтров, и совершенно не учитывая отскока частиц от волокон, который, как будет показано далее, имеет место уже при сравнительно небольших скоростях соударения.

Фильтры общего назначения, наиболее широко применяемые в системах вентиляции, рассчитывают главным образом на основе опытных данных, однако приближенную оценку их эффективности можно получить с помощью приводимых теоретических зависимостей.

Отделение пылевых частиц в поле действия электрических сил обычно протекает в две стадии: сначала они заряжаются в поле коронного разряда, а затем осаждаются под действием электрических сил[1].

Коронный разряд возникает в неоднородном электрическом поле у поверхности электродов с малым радиусом кривизны. Различают зону ионизации газа небольшой протяженности (собственно корону) и внешнюю зону коронного разряда. В зоне короны, где напряженность поля очень велика, ионы, содержащиеся в газе, перемещаются по направлению силовых линий поля и разгоняются настолько, что, столкнувшись с нейтральными газовыми молекулами, выбивают из них несколько внешних электронов. При этом возникают новые положительные и отрицательные ионы.

Образующиеся в процессе лавинообразной ударной ионизации ионы, имеющие заряд того же знака, что и потенциал коронирующего электрода, притягиваются к противоположно заряженному осадительному электроду, устремляясь во внешнюю зону ионизации. Сталкиваясь здесь с пылевыми частицами, ионы сообщают им свой заряд, вследствие чего эти частицы также начинают притягиваться к осадительному электроду. Скорость движения пылевой частицы к электроду зависит в значительной мере от величины полученного ею заряда, которая, в свою очередь, определяется действующими на газовые ионы вблизи частицы силами, связанными с внешним полем, поляризацией частиц, электростатическим отображением и отталкиванием одноименных зарядов.

Электрическое осаждение может происходить также в результате взаимодействия зарядов, образующихся на волокнах

---

[1] Принцип электрической очистки газов от пыли детально рассмотрен в работе [106].

пористого фильтра, с нейтральными пылевыми частицами. Заряженное волокно создает вокруг себя неоднородное электрическое поле. Частицы поляризуются этим полем и притягиваются к поверхности волокна. Электрическое осаждение усиливается с увеличением размеров частиц и уменьшением толщины волокон. Электрические заряды на волокнах в большинстве случаев нестабильны и быстро исчезают вследствие проводимости волокна и под влиянием влажности. Известны фильтры с непрерывно возобновляемым электрическим полем, но они пока не получили широкого распространения.

Закономерности инерционной сепарации пыли в криволинейных потоках

Инерция пылевых частиц, взвешенных в воздушных потоках, проявляется при любых изменениях скорости потока. В технике обеспыливания широко используется инерционная сепарация, происходящая при сравнительно плавном, но длительном искривлении потоков.

Движение частицы в криволинейном потоке при отсутствии внешних воздействий описывается уравнением

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\tau}\,\mathbf{v}_c. \qquad (I.15)$$

В работе [75] давалось приближенное решение уравнения (I.15), при этом движение частицы рассматривалось в подвижной системе координат. Скорость частицы принималась равной $\mathbf{v}=\mathbf{w}+\mathbf{v}_c$, а ее ускорение определялось согласно теореме Кориолиса.

Уравнение (I.15) при этом может быть представлено в виде

$$m\frac{d\mathbf{v}_c}{dt} + m\,\omega\times(\omega\times\mathbf{R}) + m\left(\frac{d\omega}{dt}\times\mathbf{R}\right) + 2m\,(\omega\times\mathbf{v}_c) = -3\pi\, d\,\mu_{\text{в}}\,\mathbf{v}_c. \qquad (I.16)$$

Каждый из членов левой части этого уравнения представляет собой компонент силы $m d\mathbf{v}/dt$, с которой частица действует на воздушный поток, стремящийся искривить ее траекторию и изменить ее скорость.

Второй член уравнения (I.16) представляет собой центробежную силу. Как уже отмечалось, при исследованиях инерционной сепарации пыли, например в циклонных пылеуловителях, часто учитывается только эта составляющая силы инерции и уравнение движения записывается в форме (I.10).

Первый член уравнения (I.16) связан с ускорением сепарационного движения и может быть равен нулю только при скорости $\mathbf{v}_c=\text{const}$, что, как правило, невозможно. Направление силы, представленной этим членом, зависит от начальных условий входа частицы в искривленную часть потока. Примем, что при искривлении потока скорости его отдельных слоев изме-

няются в соответствии с законом площадей — скорость периферийных слоев уменьшается, а скорость центральных слоев увеличивается. В точке M (см. рис. I.2) скорость потока равна его начальной скорости $\mathbf{w}_0$. Можно считать, что перестройка потока происходит мгновенно, в то время как скорость пылевых частиц, равная до этого скорости потока ($\mathbf{v}_0=\mathbf{w}_0$), изменяется сравнительно медленнее. В силу этого в начальный момент времени $t=0$ можно принять $\mathbf{v}_c=\mathbf{w}_0-\mathbf{w}(R_0)$.

В соответствии с указанным, в правой части потока, представленного на рис. I.2, скорость $\mathbf{v}_c$ направлена к его периферии. Легко убедиться, что вектор $m d\mathbf{v}_c/dt$ направлен в ту же сторону, что и вектор центробежной силы, хотя не всегда полностью совпадает с ним. Слева от точки M эта сила обращена к центру потока.

Вектор, представленный третьим членом уравнения (I.16), всегда совпадает по направлению со скоростью $\mathbf{w}$; он представляет собой реакцию частицы, переходящей во все более замедленные слои, на тормозящее влияние среды.

Четвертый член уравнения представляет собой силу Кориолиса. В рассматриваемом случае она направлена также к периферии потока.

Сепарация частиц на начальном участке движения. Расчет сепарационного движения частиц в криволинейном канале может быть произведен с помощью ЭВЦМ[1].

Схема потока представлена на рис. I.2. В неподвижной системе координат $w=k/R$ и $R=\sqrt{x^2+y^2}$. Тогда уравнение (I.15) в проекциях на оси координат имеет вид

$$\left.\begin{aligned}&\frac{d^2x}{dt^2}+\frac{1}{\tau}\cdot\frac{dx}{dt}+\frac{k}{\tau}\cdot\frac{y}{x^2+y^2}=0;\\&\frac{d^2y}{dt^2}+\frac{1}{\tau}\cdot\frac{dy}{dt}-\frac{k}{\tau}\cdot\frac{x}{x^2+y^2}=0.\end{aligned}\right\}\qquad(\text{I.17})$$

Для возможности расчета на ЭВЦМ по методу Рунге — Кутта уравнения (I.17) преобразуются в систему уравнений первого порядка

$$\frac{dx}{dt}=u;\quad\frac{dy}{dt}=q;$$

$$\frac{du}{dt}=-\frac{1}{\tau}u-\frac{k}{\tau}\cdot\frac{y}{x^2+y^2};\quad\frac{dq}{dt}=-\frac{1}{\tau}q+\frac{k}{\tau}\cdot\frac{x}{x^2+y^2}.$$

Начальные условия имеют вид

$$t=0;\quad x_0=R_0;\quad y_0=0;\quad u_0=0;\quad q_0=w_0.$$

При расчете принимали $\tau=3{,}06\cdot10^{-3}$с ($d=20$ мкм), $\tau=27{,}5\cdot10^{-3}$ с ($d=60$ мкм) и $\tau=172{,}1\cdot10^{-3}$ с ($d=150$ мкм).

[1] В работе [75] уравнение (I.15) решалось приближенно с помощью разложения функции в степенной ряд и введения некоторых упрощений.

Расчет проводили для значений R_0, равных 0,1; 0,15; 0,2; 0,3 и 0,4 м. Средняя скорость входа воздуха $w_0=15$ м/с; $R_1=0{,}005$ м; $R_2=0{,}5$ м; $k=2{,}93$ м^2/с. Для каждого интервала времени Δt определялись координаты частицы $x(t)$, $y(t)$, $R=\sqrt{x^2+y^2}$, скорости dx/dt и dy/dt и угол φ*.

В данном случае оказалось возможным проследить траектории частиц на неограниченном расстоянии.

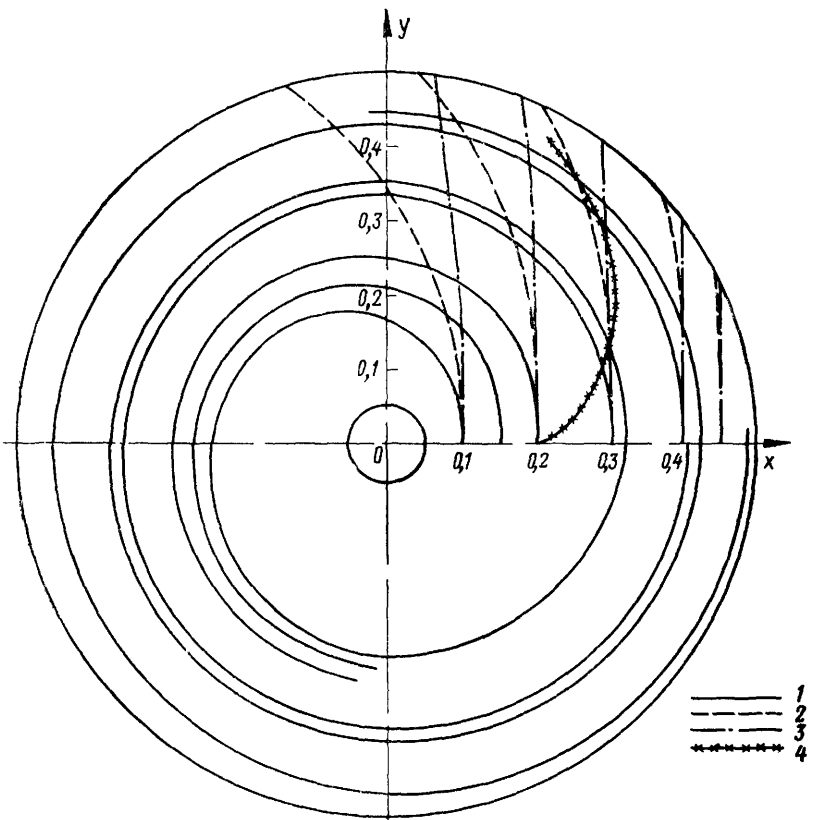


Рис I.4. Траектории в криволинейном потоке

1 — частиц крупностью 20 мкм; *2* — то же, 60 мкм; *3* — то же, 150 мкм; *4* — то же, 60 мкм по упрощенному расчету

Как видно из рис. I.4, траектории частиц представляют собой спирали с последовательно убывающими приращениями полярного радиуса, т. е. асимптотически приближающиеся к окружности очень большого радиуса. В области $w<w_0$ траек-

* Расчет проведен на ЭВЦМ «Мир-2» вычислительного отдела ЦНИИПромзданий.

тории частиц искривлены меньше, чем в области $w > w_0$. Как и следовало ожидать, чем крупнее частица, тем меньше искривлена ее траектория. График позволяет оценить возможности циклонной сепарации. Частицы крупностью 20 мкм и меньше, входящие в циклон на расстояние более $^1/_5$ радиуса от его наружной стенки, должны совершить более двух оборотов в своем спиральном нисходящем движении, чтобы достигнуть этой стенки. Между тем, продолжительность пребывания частицы в циклоне может не удовлетворять этому условию.

Анализ уравнений (I.17) приводит к ряду интересных выводов. Прежде всего перейдем от декартовых координат к полярным, введя в уравнения значения первых и вторых производных от координат $x = R\cos\varphi$ и $y = R\sin\varphi$. После преобразований получим:

$$\frac{d^2R}{dt^2} - R\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + \frac{1}{\tau}\cdot\frac{dR}{dt} = 0; \qquad (I.18)$$

$$2\frac{dR}{dt}\cdot\frac{d\varphi}{dt}R + R^2\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{1}{\tau}R^2\frac{d\varphi}{dt} - \frac{k}{\tau} = 0, \qquad (I.19)$$

откуда

$$R^2\frac{d\varphi}{dt} = k + c_0 e^{-t/\tau}. \qquad (I.20)$$

Применительно к воздушному потоку $Rd\varphi/dt = w$. В данном случае это произведение представляет собой тангенциальную составляющую скорости движения частицы, т. е.

$$v_\varphi = \frac{k + c_0 e^{-t/\tau}}{R}.$$

Постоянная интегрирования определяется из условия $R = R_0$ и $v_\varphi = v_0 = w_0$ при $t = 0$. Тогда $c_0 = w_0R_0 - k$ и

$$v_\varphi = w + \left(w_0\frac{R_0}{R} - w\right)e^{-t/\tau}. \qquad (I.21)$$

Из выражения (I.21) видно, что с течением времени тангенциальная составляющая скорости движения частицы стремится к тангенциальной составляющей скорости воздушного потока, что в пределе приводит к квазистационарному состоянию движения. Оно достигается тем скорее, чем меньше время релакса- от нуля, является участком нестационарного движения частицы, в пределах которой значение $e^{-t/\tau}$ еще существенно отличается от нуля, является участком нестационарного движения частицы, т. е. начальным участком. Длина этого участка различна для частиц разного размера. Для практических расчетов можно принять, что $v_\varphi = w$ при $t \geqslant 7\tau$, т. е. при $e^{-t/\tau} \leqslant 10^{-3}$.

Расчеты показали, что для частиц размером 5 мкм и более длина начального участка соизмерима с общей протяженностью пути, проходимого частицей в циклонных аппаратах.

Отметим, что из выражений (I.18) и (I.20) имеем:

$$\frac{d^2R}{dt^2}+\frac{1}{\tau}\cdot\frac{dR}{dt}-\frac{[k+(w_0R_0-k)\ e^{-t/\tau}]^2}{R^3}=0. \qquad (I.22)$$

Сепарация частиц за пределами начального участка движения. В этом случае время t достаточно велико и уравнение (I.22) принимает вид [96, 119]

$$\frac{d^2R}{dt^2}+\frac{1}{\tau}\cdot\frac{dR}{dt}-\frac{k^2}{R^3}=0. \qquad (I.23)$$

Полученное уравнение типа Эмдена — Фаулера не может быть решено в элементарных функциях. Принимая обозначение $dR/dt=v_R$, приведем уравнение (I.22) к следующему виду:

$$\frac{dv_R}{dR}=\frac{[k+(w_0R_0-k)\ e^{-t/\tau}]^2}{v_R\,R^3}-\frac{1}{\tau}. \qquad (I.24)$$

В фазовой плоскости (R, v_R) уравнение (I.24) представляет собой изменение углов наклона касательных к кривой v_R в зависимости от R (рис. I.5). Очевидно, что значение $dv_R/dR=0$ соответствует максимуму скорости v_R. Из уравнения (I.24) в этом случае имеем:

$$v_{R\ макс}=\frac{\tau\ (k+c_0e^{-t/\tau})^2}{R^{*3}}, \qquad (I.25)$$

где R^* — значение R, соответствующее $v_{R\ макс}$.

Для частиц, входящих на поворот в точке M ($c_0=0$), а также для очень мелких частиц ($e^{-t/\tau}\to 0$) независимо от их начального положения, т. е. для всех частиц, у траекторий которых нет начального участка, уравнение (I.25) имеет вид

$$v_{R\ макс}=\tau\ \frac{k^2}{R^{*3}}. \qquad (I.26)$$

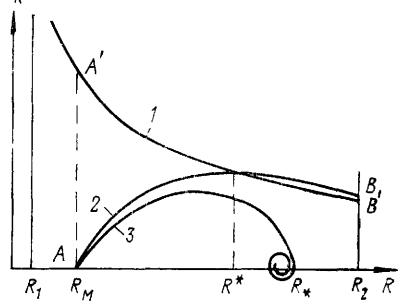


Рис. I.5. Изменение скорости частицы в фазовой плоскости

Уравнение (I.26) представляет собой кубическую гиперболу, на которой расположена точка, соответствующая максимальному значению v_R, т. е. точка максимума функции $v_R=f(R)$.

Отбрасывая в порядке первого приближения первый член в уравнении (I.23), получим равенство

$$v_{1\,R}=\tau\ \frac{k^2}{R^3}, \qquad (I.27)$$

совпадающее с уравнением (I.10), поскольку $v_c=v_R$. Очевидно, что на рис. I.5 уравнение (I.27) представляет собой кривую *1*, а

ее участок в области между значениями R_M и R_2 дает величины скорости v_R, принимаемые при пользовании формулами типа (I.10) для расчетов сепарации. Действительная величина скорости определяется кривой *2*, а погрешность расчета оценивается площадью, заключенной между кривыми *1* и *2*.

Интегрируя уравнение (I.27), получим при $t=0$, $R=R_0$ и $c_1=R_0^4$

$$R^4 = R_0^4 + 4\tau kt. \tag{I.28}$$

Пользуясь этим уравнением, можно построить траектории частиц для рассмотренного выше течения. Положение частицы на траектории определяется величинами R и φ по формулам (I.20) и (I.28), а именно: $RdR=\tau k d\varphi$, и после интегрирования $2\tau k\varphi=R^2+c_2$. При $\varphi=0$ и $R=R_0$ постоянная интегрирования $c_2=-R_0^2$ и

$$\varphi = \frac{R^2 - R_0^2}{2\tau k}. \tag{I.29}$$

Вычисленная для частицы размером 60 мкм при $R_0=0{,}2$ м траектория нанесена на рис. I.4 (кривая 4) для возможности сопоставления ее с приведенными на том же графике более точными траекториями частиц. В то время как истинные траектории на всем протяжении отклоняются от прямой первоначального движения в направлении течения, т. е. частицы как бы «сдуваются» потоком, траектории, построенные по упрощенной формуле, отклоняются в противоположную сторону. Такой характер движения не может быть объяснен действием каких-либо физических факторов. Он, несомненно, является следствием того, что величина членов дифференциального уравнения, отброшенных при составлении упрощенной формулы, соизмерима с величиной оставленных членов, т. е. настолько велика, что их игнорирование приводит не только к количественным, но и к качественным погрешностям.

С уменьшением τ вносимая погрешность пропорционально уменьшается, однако остается существенной. Приближение к истинному значению v_R можно получить, подставляя в уравнение (I.23) его величину по выражению (I.27). После преобразований получим в качестве второго приближения

$$v_{2R} = \frac{\tau k^2}{R^3} + \frac{3\tau^3 k^4}{R^7}.$$

Аналогично можно получить последующие приближения. Расчеты показали, что для рассмотренного примера вблизи значения R_2 второе и третье приближения достаточно точно определяют величину v_R, однако в области между значениями R_M и R^* истинные значения скорости таким путем получить нельзя.

На рис. I.5 показано изменение скорости движения частицы, вошедшей в поток в равновесной точке M. Для других частиц фазовая картина изменения v_R отличается расположением гипербол *1*. Из рис. I.5 следует, что выражениями типа (I.10) можно пользоваться для оценки величины радиальной составляющей скорости движения частиц за пределами начального участка, а для мелких частиц — вблизи наружных стенок. Рассчитывать с их помощью траекторию частиц и соответственно «минимальные диаметры» сепарирующихся частиц нельзя, так как при этом вместо истинной скорости v_R, изменяющейся по кривой AB, принимаются значения скорости по кривой $A'B'$, намного большие на участке $R_M R^*$.

Сепарация пыли в пограничных областях турбулентных потоков

Сепарация пыли вблизи границ потоков отличается рядом особенностей, обусловленных закономерностями распределения поперечных пульсаций скоростей турбулентных потоков. Известно, что средней части потока, удаленной от его твердых границ и отличающейся постоянством распределения скоростей, свойственна более или менее изотропная турбулентность, т. е. здесь среднеквадратичные пульсации скоростей одинаковы во всех направлениях. Если выделить мысленно в этой части потока, например горизонтального, горизонтальную площадку, то вследствие существования поперечных пульсаций скорости через эту площадку будет происходить перенос объемов воздуха как сверху вниз, так и снизу вверх. Количество воздуха, перемещающегося в противоположных направлениях, должно быть совершенно одинаковым, так как в противном случае в верхней либо в нижней части потока образовались бы пустоты, что невозможно.

Рассмотрим движение частицы, находящейся в потоке, вблизи выделенной площадки. Очевидно, что такая частица будет вовлечена в пульсирующее поперечное движение, при этом в тем большей мере, чем меньше ее размеры и масса. Степень увлечения частицы размером 1 мм (при плотности, равной 1) составляет всего 2%, но частица размером 100 мкм увлекается на 70%, а частица размером менее 30 мкм — практически полностью [110].

Частица, перенесенная, например, из слоя, расположенного под площадкой, в слой, расположенный над площадкой, в дальнейшем может быть вновь перенесена под площадку либо унесена в верхнюю часть потока. Так как движение обменивающихся объемов воздуха хаотично и определяется случайными причинами, движение частиц подчиняется статистическим закономерностям. Если распределение частиц по вертикальному сечению потока было равномерным, то при отсутствии внешних

сил турбулентное перемешивание не может нарушить этого распределения. При неравномерном начальном распределении частиц перемешивание приводит к их распространению по всему сечению потока.

Вблизи стенок положение меняется, так как здесь результирующая пульсаций скоростей не равна нулю, иначе говоря, здесь через рассматриваемую площадку происходит обмен массами воздуха, обладающими различными скоростями. Вследствие этого у дна потока частицы, подхватываемые поднимающимися массами, получают больший импульс, чем частицы, увлекаемые вниз. Устанавливается закономерный процесс турбулентного переноса, препятствующего осаждению частиц на дне.

Экспериментальные исследования распределения пульсаций скоростей позволили подойти к количественной оценке явления взвешивания частиц потоками [16]. В частности, исследования Е. М. Минского [61] показали, что среднеквадратичные пульсации скоростей w'_z изменяются по следующей закономерности:

$$\sqrt{\overline{w_z'^2}} = 1{,}05\, w_{ср} \sqrt{0{,}125\,\frac{\lambda}{k_1}\left[1 + 1{,}72\left(\frac{l}{R_г}\right)^{1{,}8}\right]}, \qquad (I.30)$$

где $w_{ср}$ — средняя скорость течения в канале; λ — коэффициент трения; k_1 — коэффициент корреляции; l — расстояние от оси до рассматриваемой точки; $R_г$ — гидравлический радиус канала.

Как видно из формулы (I.30), наименьшее значение пульсаций скоростей соответствует оси потока, когда $l=0$, а наибольшее их значение — его периферической части, например вблизи дна канала (для пограничного слоя потока формула неприменима). Подобная закономерность наблюдается в распределении пульсаций скоростей и в циклонах [120].

Приближенно граничный размер частиц, оседание которых затруднено турбулентными пульсациями, можно оценить исходя из соотношения их скоростей витания и пульсаций скоростей. Частицы определенного размера будут совершать беспорядочное движение в том районе потока, где усредненная по времени поперечная пульсация скорости равна скорости витания данных частиц. Частица, вышедшая по случайным причинам из этого района, испытывает воздействие скоростей, либо бо́льших, чем ее скорость витания, и тогда вновь поднимается до прежнего уровня, либо меньших, чем ее скорость витания, и в этом случае оседает до прежнего уровня.

Пользуясь выражением (I.30), из условия $v_s(d) = \sqrt{\overline{w_z'^2}}$ получим для граничного размера частиц:

$$d_l = 4{,}36 \sqrt{\frac{w_{ср}}{a} \cdot \frac{\mu_в}{\rho g} \sqrt{0{,}125\,\frac{\lambda}{k_1}\left[1 + 1{,}72\left(\frac{l}{R_г}\right)^{1{,}8}\right]}}, \qquad (I.31)$$

где a — отношение среднеквадратичных значений пульсаций скоростей.

Частицы размером $d<d_l$ будут находиться во взвешенном состоянии, а размером $d>d_l$ достигнут дна канала. Граничный размер оседающих частиц для всего сечения может быть определен из условия $l/R_г=1$. Некоторые частицы этой категории, находящиеся вблизи границ потока, могут получить импульс, достаточный для того, чтобы они достигли дна или, оказавшись в пределах ламинарного пограничного слоя, вышли из области пульсаций. На дальнейшее движение пылевых частиц, оказавшихся в пределах пограничного слоя, оказывают влияние такие факторы, как их подъемная сила, соотношение их размеров и скорости движения, толщина и скорость пограничного слоя.

Градиент скорости в пределах пограничного слоя может достигать очень большой величины. При этом частицы в пограничном слое начинают вращаться вокруг собственной оси. Так, наблюдая движение пшеничных зерен в каналах пневматического транспорта, отмечали угловые скорости вращения зерен 30 000—60 000 об/мин, а наблюдая движение песчинок в прямолинейном канале — угловые скорости их вращения до 3300 об/мин [24].

Рассмотрим частицу, осевшую на дно воздуховода. Толщина пограничного слоя соизмерима с размером частицы, поэтому в то время как самая нижняя точка частицы соприкасается с неподвижной границей потока, верхняя испытывает его увлекающее действие. При этом только очень мелкие частицы могут оставаться неподвижными под влиянием сил адгезии. Основная же масса частиц перекатывается под воздействием опрокидывающего момента. Если принять во внимание соотношение скорости потока и размеров частиц, то легко прийти к выводу, что угловые скорости могли достигать наблюдавшихся величин. В самом деле, скорость ламинарного пограничного слоя у плоской стенки в системе координат XOY, расположенной так, что ось ординат направлена перпендикулярно направлению потока и стенке, может быть представлена функцией

$$w_x = \alpha \delta,$$

где α — коэффициент пропорциональности; δ — толщина пограничного слоя [101].

Пользуясь общепринятыми представлениями механики, можно рассматривать градиентное течение как вращение потока вокруг непрерывно перемещающихся по прямой линии мгновенных центров вращения. При таком рассмотрении градиентного потока α есть не что иное, как угловая скорость вращения потока вокруг мгновенных центров. Очевидно, что коэффициент α равен, кроме того, угловой скорости ω вращения всех частиц потока, в том числе и взвешенных в нем. Поскольку толщина ламинарного слоя δ измеряется долями миллиметра, а секунд-

ная скорость потока w_x — метрами, очевидно, что величина ω действительно очень велика.

Доказано, что силы, действующие на круговой цилиндр, движущийся в градиентном прямолинейном потоке, отличаются от сил, действующих на тот же цилиндр в неградиентном потоке, составляющей $2\pi r\rho\alpha v_c$ [75]. Эта сила направлена от стенки канала (при $v_c>0$), т. е. представляет собой подъемную силу Н. Е. Жуковского, возникновение которой обусловлено вращением частицы. Легко убедиться, что подъемная сила больше силы тяжести частицы, если $v_c\omega=1{,}2\rho/\rho_в$.

Таким образом, достаточно, чтобы в экспериментах Феллиса скорость движения частицы отличалась от скорости воздушного потока на 0,04—0,10 м/с, и тогда подъемная сила частицы будет больше ее силы тяжести. Под влиянием подъемной силы частицы движутся вверх до тех пор, пока вращаются, а затем вновь падают на дно канала.

Условия удержания пылевых частиц на поверхностях

Осаждение пылевых частиц на сухих поверхностях. Современная теория пылеулавливания исходит из представления, что каждое соприкосновение частицы с препятствием завершается ее прилипанием; частица отделяется от потока и может считаться уловленной. В действительности это справедливо только для очень мелких частиц. Крупные частицы, коснувшись в процессе сепарации поверхности, могут отскочить от нее и вновь вернуться в воздушный поток. Это обстоятельство не имеет практического значения при рассмотрении процесса фильтрации в высокоэффективных фильтрах. Основной задачей в таких фильтрах является создание условий для соприкосновения с волокнами частиц размером меньше 1 мкм, которые прочно удерживаются на них. Более крупные частицы здесь улавливаются как ситом плотными фильтрующими слоями. Несколько иная задача решается в пылеуловителях и широко распространенных фильтрах общего назначения II и особенно III класса эффективности, используемых для отделения и надежного удержания более крупных частиц.

Соприкосновение частиц с препятствием подчиняется закономерностям удара. Коэффициент k восстановления скорости частицы после удара можно принять равным 0,8. Отскоку микротел после удара препятствуют силы адгезии. Если кинетическая энергия отскока частиц (в предположении отсутствия сил адгезии) меньше энергии адгезии, то частицы прилипают, в противном случае они отскакивают. Таким образом, если пренебречь силой тяжести частицы, предельное условие ее прилипания выразится равенством [27]

$$\frac{m v^2}{2} = E_{ад}, \qquad (I.32)$$

где v — скорость отскока в предположении отсутствия сил адгезии; $E_{ад}$ — энергия адгезии.

В свете наиболее современной теории молекулярных взаимодействий Е. М. Лифшица при пренебрежении электрическими и капиллярными силами, действительной формой поверхности частицы и ее деформацией при ударе, а также рядом других факторов сила адгезии $F_{ад}$ может быть вычислена по формуле [52]

$$F_{ад} = \frac{h\omega}{16\pi z_0^2} d, \qquad (I.33)$$

где $h\omega$ — константа Лифшица — Ван-дер-Ваальса; z_0 — зазор между контактирующими телами, при котором силы адгезии достигают максимума.

Величина постоянной $h\omega$, известная пока лишь для небольшого числа твердых веществ, колеблется в пределах от 0,6 до 9 эВ. Приняв в качестве среднего значения $h\omega = 6$ эВ, а величину z_0 в соответствии с установившейся практикой равной $4 \cdot 10^{-8}$ см, получим силу адгезии

$$F_{ад} = 0{,}012\, d \text{ дин}, \qquad (I.34)$$

где d — размер частиц в мкм.

Порядок величины силы адгезии, получаемой при расчете по формуле (I.33), подтверждается экспериментальными исследованиями ряда авторов [52, 57]. Теоретически эта зависимость может быть использована для оценки порядка величины силы адгезии частиц радиусом от 1 до 100 мкм. Следует, однако, учитывать, что с увеличением размеров частиц ($d > 2$ мкм) адгезия все в большей мере определяется размером (радиусом) выступов их шероховатой поверхности. Контакт может осуществляться как в одной, так и в нескольких точках. При размере выступов около 0,5 мкм и контакте в одной точке сила адгезии не превышает 3—4 мдин, а при размере выступов 0,1 мкм и контакте в трех точках — 1,8—2,4 мдин.

В выражении (I.32) энергия адгезии, т. е. работа, затрачиваемая на преодолении сил адгезии, при изменении зазора между контактирующими телами равна:

$$E_{ад} = \int_0^\infty F_{ад}\, dh.$$

Сила адгезии убывает очень быстро — пропорционально квадрату или даже кубу размера зазора в наиболее узком его месте, становясь чрезвычайно малой величиной уже при зазорах около 1 мкм. Прямое измерение зазора весьма сложно. Если принять, как это делается в ряде работ [14, 41, 57], что $E_{ад} = E_{ад} h$, а $h = 6$ Å, то получим, что $E_{ад} = 0{,}012 \cdot 6 \cdot 10^{-8}\, d$ мин.

Тогда из условия (I.32) получим:

$$v^2 = \frac{2 \cdot 0{,}012 \cdot 6 \cdot 10^{-8}\, d}{m} \cdot \frac{1 - k^2}{k^2}, \qquad (I.35)$$

откуда граничное значение скорости, при котором еще возможно прилипание частиц, равно:

$$v \approx \frac{0{,}249}{d} \text{ см/с}, \qquad (I.36)$$

где d — размер частиц в мкм.

Из выражения (I.36) видно, что частицы размером около 1 мкм могут прилипать к поверхностям при скоростях столкновений примерно 0,3 см/с. При деформации частиц или волокон[1] и при образовании на контактирующих телах слоя адсорбированных молекул воды и углеводородов условия адгезии могут становиться более благоприятными [1]. Тем не менее сухие поверхности волокон и других препятствий не могут надежно удерживать крупные пылевые частицы, хотя первоначальное осаждение их из воздушных потоков происходит так же, как и на смоченных поверхностях.

В процессе последовательных столкновений крупных частиц с волокнами фильтрующего слоя скорость их постепенно уменьшается, так как она не может восстанавливаться воздушным потоком мгновенно. При этом создаются более благоприятные условия для их седиментации и механического удержания в фильтрующем слое.

Экспериментальное исследование показало, что максимум эффективности сухих фильтров соответствует крупности частиц 4—6 мкм; при большей крупности частиц d эффективность фильтров резко снижается [20]. Смоченные фильтры сохраняют высокую эффективность в области более крупных частиц. Характерно, что эффективность испытанных смоченных фильтров также обнаруживает тенденцию к падению по мере увеличения крупности частиц.

Осаждение пылевых частиц на смоченных поверхностях. Смачивание поверхностей, предназначенных для осаждения частиц, является хорошо известным средством повышения эффективности фильтров и пылеуловителей.

При наличии тонкой пленки смачивающей жидкости на поверхности сила адгезии определяется формулой [39]

$$F_{ад} = \frac{2\pi\sigma d}{1 + \operatorname{tg}(\varepsilon/2)} \cos\vartheta, \qquad (I.37)$$

где ε — угол, определяющий смоченную часть поверхности частицы (сферы); ϑ — краевой угол смачивания, зависящий от химических свойств и дисперсности пыли.

[1] По расчетам Лоффлера, за счет деформации синтетических волокон при ударе о них твердых пылевых частиц $F_{ад}$ увеличивается в 2—3 раза.

Для смачивания поверхностей, предназначенных для осаждения пылевых частиц, стремятся подбирать жидкости, хорошо смачивающие частицы, например масла. При $\vartheta=0$ и при точечном контакте, т. е. когда $\varepsilon=0$, сила адгезии достигает значения

$$F_{ад}=2\pi\sigma d. \tag{I.38}$$

На рис. I.6 показана сферическая частица, контактирующая с тонкой пленкой несмачивающей жидкости. При полном смачивании поверхность жидкости вблизи частицы повышается (см. пунктир слева на рис. I.6), улучшая условия контакта. Формула (I.38) подтверждена многочисленными экспериментами. В частности, Ларсен установил, что она распространяется также на сплошные пленки масел, покрывающие волокна фильтров [55], причем $F_{ад}=A2\pi\sigma d$. Коэффициент A зависит от площади поверхности контакта; для частицы, погруженной в пленку на 0,5 d, коэффициент $A=0{,}83$.



Рис. I.6. Осаждение сферической пылевой частицы на смоченную поверхность

Принимая толщину пленки $\delta\approx 0{,}5\ d$, а поверхностное натяжение, как для нефтяного масла, 30 дин/см, получим

$$F_{ад}\approx 157\ d\ \text{дин}. \tag{I.39}$$

Как видно из выражений (I.39) и (I.34), при смоченной поверхности сила адгезии значительно больше, чем при сухой. При отрыве частицы от смоченной поверхности сила адгезии действует до тех пор, пока отрываемая частица сохраняет контакт с пленкой жидкости; согласно выражению (I.37), эта сила увеличивается по мере отрыва частицы, достигая максимума при $\varepsilon=0$. Принимая в соответствии с этим зазор h равным толщине пленки замасливателя, составляющей в нормальных условиях не менее 20—40 мкм, и предполагая, что наличие тонкой пленки не оказывает влияния на упругий характер столкновения, получим:

$$v^2=\frac{2\cdot 157\cdot 40\cdot 10^{-4}\,d}{m}\cdot\frac{1-k^2}{k^2},$$

откуда

$$v=\frac{7350}{d}\ \text{см/с}. \tag{I.40}$$

Из выражения (I.40) видно, что частицы размером 10 мкм удерживаются на поверхностях даже при скоростях, превышаю-

щих 7 м/с, однако частицы размером 100 мкм отскакивают от смоченных фильтрующих поверхностей уже при скоростях около 1 м/с.

В замасленных фильтрах с заполнением, например, из толстых волокон или проволочных сеток скорость фильтрации составляет 1,5—3,5 м/с. При таких значениях скорости на поверхностях надежно удерживаются частицы размером не более 25—30 мкм. Действительно, при испытаниях замасленных фильтров из стекловолокнистого фильтрующего материала типа ФСВУ с применением искусственно приготовленной пыли, крупность которой составляла от 10 до 100 мкм, эффективность улавливания очень быстро падала с 99—95 до 30%. В воздуховоде за фильтром наблюдалось выпадение крупных пылевых частиц из воздушного потока.

При скоростной киносъемке процесса столкновений частиц кварца с цилиндрическими элементами, смоченными маслами, был зафиксирован отскок частиц размером около 200 мкм при толщине пленки от 25 до 40 мкм в зависимости от вида применявшихся замасливателей. Скорость частиц, рассчитанная по кинограммам, составляла 2 м/с, коэффициент восстановления скорости был близок 1.

Очевидно, что по мере насыщения слоя масла уловленными пылевыми частицами условия удержания частиц ухудшаются. Тенденция к падению эффективности фильтров при наличии в воздухе очень крупной пыли наблюдалась и в исследованиях Уитби [20].

Если жидкость плохо смачивает частицу, так это часто бывает на практике, поверхность жидкости вблизи частицы приобретает вогнутую форму. В случае, если жидкость совершенно не смачивает частицу ($\vartheta \to \pi$), в выражении (I.37) знак плюс меняется на минус, т. е. силы поверхностного натяжения жидкости препятствуют погружению в нее частицы.

Способность пыли смачиваться оказывает существенное влияние на эффективность ее улавливания. Некоторые вещества гидрофобны из-за особенностей молекулярной структуры их поверхности. Иногда гидрофобностью обладает пыль гидрофильных материалов вследствие образования на поверхностях ее частиц электрического заряда одного знака с зарядом на поверхности воды или адсорбции на поверхностях ее частиц прочного слоя молекул воздуха, препятствующих их смачиванию

Известно, что смачиваемость твердых тел уменьшается с увеличением их дисперсности — даже такой предельно гидрофильный минерал, как кварц, после раздробления становится трудносмачиваемым. Можно считать, что частицы размером менее 10 мкм и особенно менее 5 мкм относятся к несмачиваемым независимо от их состава [12, 13].

Для улавливания гидрофобных частиц необходимо, чтобы их

кинетическая энергия превышала работу погружения частицы в воду, т. е. работу преодоления сил поверхностного натяжения. Это условие осуществляется только при больших скоростях соударения. Повышение эффективности пылеулавливания в этом случае достигается уменьшением поверхностного натяжения воды путем введения «смачивателей», подогрева и т. п.

Схема сил, действующих на частицу, погружающуюся в несмачивающую жидкость в результате косого удара под углом α, показана на рис. I.6. Силы поверхностного натяжения σ в данном случае образуют прямой угол с радиусом частицы (пунктирная стрелка) и имеют составляющую, направленную в сторону, противоположную направлению движения частицы. Вес частицы и гидростатическая сила не учитываются.

Так как силы поверхностного натяжения пропорциональны смоченному периметру частицы, определяемому ее хордой 2λ, то суммарная выталкивающая сила будет равна: $F=-2\pi\lambda\sigma\times\sin(\alpha+\beta)$. Из условия равенства кинетической энергии движущейся частицы работе погружения ее в жидкость на глубину $d<\delta$ можно определить предельную скорость, необходимую для надежного удержания частиц в пленках. Энергия погружения частицы в жидкость определяется интегралом

$$E_\sigma = \int_0^{z=2r} F\,dz, \qquad (I\ 41)$$

где z — путь погружения.

Из рис. I.6 имеем $\lambda=r\sin(\alpha+\beta)$ и $F=-2\pi r\sigma\sin^2(\alpha+\beta)$. По нормали к поверхности путь погружения равен. $z=r-r\times\cos(\alpha+\beta)$; при этом величина z изменяется в пределах $0\leqslant z\leqslant 2r$ при изменении β соответственно в пределах $-\alpha\leqslant\beta\leqslant\pi-\alpha$. Тогда $dz=r\sin(\alpha+\beta)\,d\beta$.

Проекция dz на направление движения частицы x равна

$$dx=-\frac{dz}{\cos\alpha},$$

а проекция силы F на направление движения x равна

$$F_\alpha=\frac{F}{\cos\alpha}.$$

После подстановки в (I.41) получим:

$$E_\sigma=\int_{-\alpha}^{\pi-\alpha}\frac{2\pi r^2\sigma\sin^3(\alpha+\beta)}{\cos^2\alpha}\,d\beta=\frac{8\pi}{3}\cdot\frac{r^2\sigma}{\cos^2\alpha}. \qquad (I.42)$$

Предельное условие погружения частицы и в этом случае имеет вид $mv^2/2=E_\sigma$, откуда

$$v=\frac{1}{\cos\alpha}\sqrt{\frac{8\sigma}{\rho d}}. \qquad (I.43)$$

Из формулы (I.43) следует, что при любых размерах и плотности несмачиваемых частиц существуют такие значения угла α, при которых погружение и соответственно улавливание частицы может произойти только при очень больших скоростях движения. Очевидно, что на практике во многих случаях частицы рикошетируют от поверхности жидкости, причем в зависимости от соотношения между v и α они рикошетируют либо круто вверх, после чего вновь разгоняются и уносятся воздушным потоком, либо полого над поверхностью жидкости. В последнем случае возможно повторение рикошетов до тех пор, пока траектория прыгающих частиц не изменится так, что угол α станет достаточно малым для выполнения предельного условия с учетом установившейся скорости сближения частицы с поверхностью жидкости. При $\alpha=0$ получим [67]:

$$v = 2{,}83 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho d}} \text{ см/с.} \qquad \text{(I.44)}$$

Из формулы (I.44) видно, что при скоростях фильтрации около 3 м/с, характерных для масляных фильтров, в них могут надежно удерживаться несмачиваемые маслом частицы, начиная с размера 10 мкм. Частицы, не погрузившиеся полностью в пленку в момент удара, остаются на ее поверхности, которая быстро выпрямляется до формы, определяемой только весом частицы (в случае горизонтальной поверхности пленки). Адгезия в данном случае определяется лишь молекулярными силами и для частиц крупнее 1 мкм, согласно изложенному выше, очень мала, вследствие чего осевшие частицы могут быть сорваны потоком.

В реальных условиях угол смачивания $\vartheta<\pi$, поэтому в общем случае

$$F = 2\pi\lambda\sigma \sin(\alpha+\beta)\cos\vartheta; \qquad \text{(I.44)}$$

$$E_\sigma = -\frac{8}{3}\pi r^2 \sigma \frac{\cos\vartheta}{\cos^2\alpha}. \qquad \text{(I.46)}$$

При $\vartheta=\pi$ энергия погружения определяется формулой (I.42), при $\vartheta=\pi/2$ энергия $E_\sigma=0$, так как сила поверхностного натяжения направлена вдоль поверхности жидкости. При значениях $0<\vartheta<\pi/2$ силы поверхностного натяжения способствуют поглощению частиц жидкостью.

Осаждение пылевых частиц на поверхности жидкости. Если толщина пленки жидкости больше размера частицы, то последняя может погрузиться в жидкость полностью. Утолщенные пленки и слои жидкости необходимы для надежного улавливания пыли при ее повышенной концентрации, в особенности при наличии в ней крупных частиц. Такие условия стремятся создать при очистке воздушных выбросов в мокрых пылеуловителях, при этом, как правило, используют циркулирующую в пылеуловителях воду.

В рассматриваемом случае кинетическая энергия частицы

должна быть достаточна для преодоления сопротивления воды при ударе о ее поверхность и при погружении в нее. Важно выяснить также, какова должна быть минимальная толщина слоя воды, чтобы крупная частица, движущаяся через воду с большой скоростью, не смогла вновь вернуться в воздушный поток, отскочив в воде от твердой стенки

В то время как E_σ в зависимости от способности частицы смачиваться может достигать положительной или отрицательной величины или быть равной нулю (при $\vartheta=\pi/2$), затраты энергии частицы на удар и на движение в жидкости происходят при всех условиях ее взаимодействия с жидкостью. Если пренебречь потерями энергии на брызгообразование и струйные явления, которые в данном случае не могут быть велики, то удар можно рассматривать как быстрое погружение свободно летящего тела [51, 87, 93].

При неравномерном движении частицы в воде нельзя пренебрегать присоединенной массой, как это делается при исследовании движения частицы в воздухе. Кроме того, ввиду большей вязкости воды значение Re в начале движения оказывается больше 1 даже при движении с малыми скоростями и очень небольших размерах частиц. С учетом этого уравнение движения частицы имеет вид

$$(m+m_{ж})\frac{dv}{dt}=-Kv^2, \tag{I.47}$$

где K — коэффициент сопротивления сферы.

В данном случае для определения коэффициента сопротивления сферы удобно применить формулу (I.2). Имея в виду эту формулу, а также то, что присоединенная масса сферической частицы равна половине массы жидкости в объеме сферы, после преобразования получим из выражения (I.47)

$$\frac{\pi}{6}\rho d^3\left(1+\frac{\rho_{ж}}{2\rho}\right)\frac{\mu_{в}}{\rho_{ж}d}\cdot\frac{d\mathrm{Re}}{dt}=-\frac{\pi}{2}\rho_{ж}d^2\left(\frac{6}{\mathrm{Re}}+\frac{1}{\sqrt[3]{\mathrm{Re}}}\right)\frac{\mu_{в}^2\mathrm{Re}^2}{\rho_{ж}^2d^2}. \tag{I.48}$$

Подставив в уравнение (I.48) соотношение

$$\frac{d\mathrm{Re}}{dt}=v\frac{d\mathrm{Re}}{dx}=\frac{\mu_{в}}{\rho_{ж}d}\mathrm{Re}\frac{d\mathrm{Re}}{dx},$$

запишем

$$d\left(1+\frac{\rho_{ж}}{2\rho}\right)\frac{d\mathrm{Re}}{dx}=-\frac{3\rho_{ж}}{\rho}\left(\frac{6}{\mathrm{Re}}+\frac{1}{\sqrt[3]{\mathrm{Re}}}\right)\mathrm{Re}. \tag{I.49}$$

Замена $x=\xi d$ приводит уравнение (I.49) к безразмерному виду

$$\frac{d\mathrm{Re}}{d\xi}=-\frac{3\rho_{ж}}{\rho\left(1+\frac{\rho_{ж}}{2\rho}\right)}(6+\mathrm{Re}^{2/3}).$$

Разделяя переменные и подставляя $u^3=\mathrm{Re}$, после интегрирования получим:

$$\frac{u}{\sqrt{6}}-\operatorname{arc\,tg}\frac{u}{\sqrt{6}}=c-\frac{\rho_ж}{\rho\left(1+\frac{\rho_ж}{2\rho}\right)\sqrt{6}}\xi.$$

Постоянная интегрирования c определяется из условия: при $x=0$ имеем $v=v_0$; $\mathrm{Re}=\mathrm{Re}_0$. Тогда

$$\frac{x}{d}\cdot\frac{\rho_ж}{\rho\left(1+\frac{\rho_ж}{2\rho}\right)\sqrt{6}}=\frac{\sqrt[3]{\mathrm{Re}_0}}{\sqrt{6}}-\frac{\sqrt[3]{\mathrm{Re}}}{\sqrt{6}}+$$

$$+\operatorname{arc\,tg}\frac{\sqrt[3]{\mathrm{Re}}}{\sqrt{6}}-\operatorname{arc\,tg}\frac{\sqrt[3]{\mathrm{Re}_0}}{\sqrt{6}}. \qquad (I.50)$$

Для воды $\rho_ж=1$ г/см^3. Принимая $\rho=2{,}5$ г/см^3, получим, что общая длина пройденного частицей пути $x_к$ (при $v=0$) определится выражением

$$\frac{x_к}{3\sqrt{6}\,d}=\frac{\sqrt[3]{\mathrm{Re}_0}}{\sqrt{6}}-\operatorname{arc\,tg}\frac{\sqrt[3]{\mathrm{Re}_0}}{\sqrt{6}}. \qquad (I.51)$$

При малых значениях $\mathrm{Re}\left(\mathrm{Re}<5;\ \sqrt[3]{\mathrm{Re}}/\sqrt{6}<1\right)$ можно ограничиться двумя членами разложения функции:

$$\operatorname{arc\,tg}\frac{\sqrt[3]{\mathrm{Re}}}{\sqrt{6}}=\frac{\sqrt[3]{\mathrm{Re}}}{\sqrt{6}}-\frac{\mathrm{Re}}{18\sqrt{6}},$$

после чего из выражения (I.50) при принятых значениях $\rho_ж$ и ρ получим:

$$\frac{x}{d}=\frac{1}{6}(\mathrm{Re}_0-\mathrm{Re})$$

и соответственно

$$\frac{x_к}{d}=\frac{1}{6}\mathrm{Re}_0. \qquad (I.52)$$

На рис. I.7 показана зависимость пути x/d, проходимого частицами в воде, от Re_0, подсчитанная по формуле (I.50)*. Как видно из графика, скорость крупных частиц убывает быстрее, чем скорость мелких, движение которых в воде подчиняется формуле Стокса. Мелкие частицы (размером до 5 мкм) при таких больших начальных скоростях движения в воде, как 2 м/с, проходят путь не более 1,2 d. Влияние размера частиц на абсолютную длину пути $x_к$ больше, чем влияние скорости. Из графика видно, что смачиваемая частица размером, например, 100 мкм при начальной скорости движения 10 м/с проходит до нулевой скорости путь 20,5 d, т. е. более 2 мм.

* В целях облегчения расчета на рис. I.8 дана номограмма значений Re для движения частицы в воде при $t=20$°C.

Рис. 17. Зависимость пути, проходимого сферической пылевой частицей в воде, от размера частицы и значения критерия Re в момент удара частицы о поверхность воды

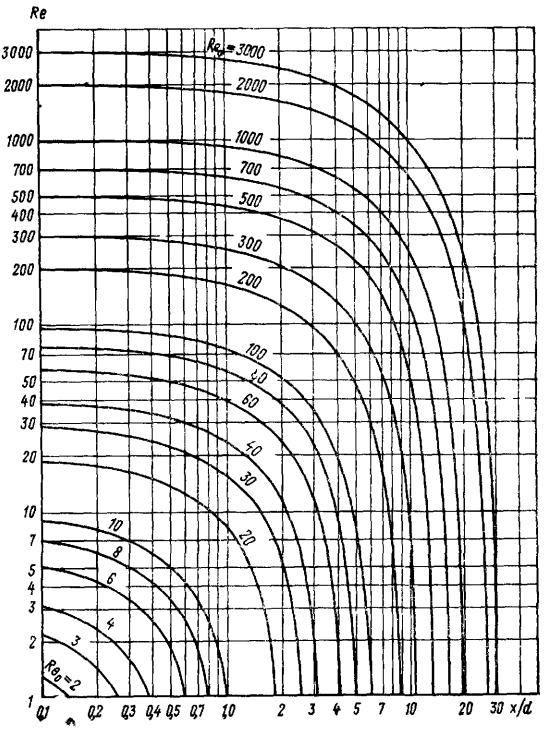
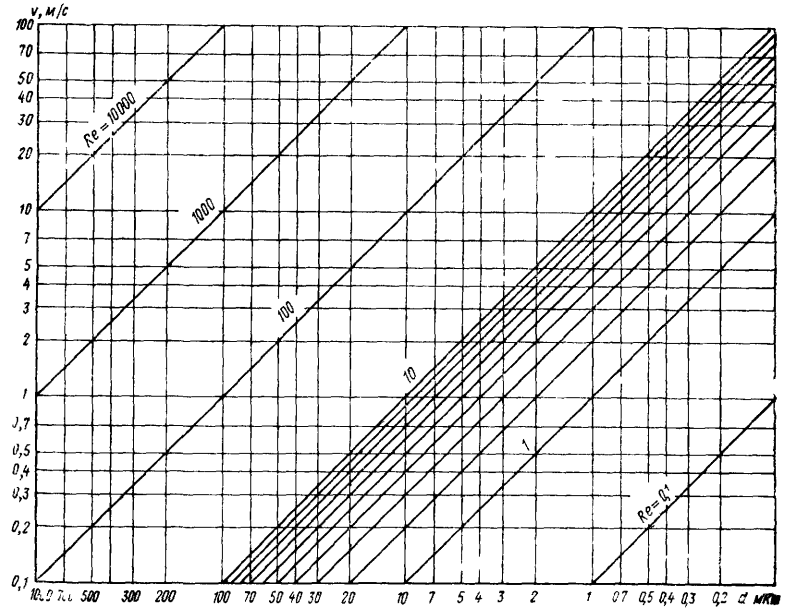


Рис 18. Значения Re для движения сферических пылевых частиц в воде при $t=20°C$



Согласно изложенному, для удержания на поверхности воды хорошо смачиваемой частицы достаточно их точечного контакта. Плохо смачиваемые частицы, включая все мелкие, будут уловлены в том случае, если глубина погружения в жидкость их центра превышает их радиус r ($x/d>0{,}5$), так как при этом можно ожидать захлопывания каверны за погрузившейся частицей. Как видно из графика на рис. I.7, этому условию соответствуют значения $Re>5$. Из графика видно также, что для торможения крупных частиц требуется большая толщина пленки воды. Например, смачиваемая частица ($\vartheta\approx\pi/2$) размером 40 мкм, ударившись о поверхность воды со скоростью 18 м/с, что вполне реально для условий пылеулавливания, пройдет в воде до полной потери скорости путь, равный около 16 d. Представим, что толщина слоя воды равна 0,3 мм, как это имеет место в центробежных скрубберах [30]. Пройдя через такой слой воды, частица ударится о поверхность металлической стенки со скоростью 5,2 м/с. Пренебрегая потерями энергии частицы при ударе ее о твердую стенку, получим, что она покидает поверхность воды со скоростью примерно 0,6 м/с. Вылетевшая из воды частица может быть подхвачена воздушным потоком и вынесена из пылеуловителя.

Проведенный анализ позволяет сделать некоторые важные выводы.

В сухих фильтрах общего назначения II и III класса эффективности могут надежно удерживаться пылевые частицы размером не более 4—5 мкм. Заполнять сухие фильтры предпочтительнее полимерными материалами, так как деформация поверхности этих материалов при ударе о них частиц улучшает условия контакта и адгезии.

В фильтрах с поверхностями, смоченными маслами, могут надежно удерживаться хорошо смачиваемые частицы размером до 20—50 мкм и плохо смачиваемые частицы размером до 10 мкм.

Пленками воды в мокрых пылеуловителях надежно удерживаются частицы, движение которых характеризуется значением $Re>5$. Частицы малых размеров и частицы, соударяющиеся с поверхностью пленки воды с малыми скоростями, погружаются в воду на глубину менее величины r и, если они плохо смачиваются водой, могут быть сорваны воздушными потоками. При значении $Re>1000$ и толщине пленки воды менее 20 r возможен отскок частиц от твердой стенки, покрытой пленкой, и вторичный выход частицы в воздушный поток.

Общие закономерности пылеулавливания в пористых слоях

Совокупность рассмотренных условий осаждения пылевых частиц на элементах заполнения пористого слоя, а также особенности его выполнения и размещения, т. е. конструкция са-

мого фильтра, сообщают фильтру определенные качества, в первую очередь эффективность, пылеемкость и связанное с ней сопротивление. Зависимость между переменным сопротивлением фильтра $H\ (G_y)$ и количеством уловленной в нем пыли G_y выражается уравнением

$$H\ (G_y) = A G_y^n . \tag{I.53}$$

На логарифмической сетке эта зависимость, выявленная экспериментальным путем, представляется прямой линией, определяемой угловым коэффициентом n и постоянной A, получаемой из условия $G_y/E = 1$:

$$A = \frac{H\ (G_y = E)}{E^n} , \tag{I.54}$$

где $H(G_y = E)$ — сопротивление фильтра, когда количество задержанной в нем пыли численно равно его эффективности.

Соответственно уравнение процесса пылеулавливания можно написать в виде

$$H\ (G_y) = H\ (G_y = E)\ \frac{G_y^n}{E^n} . \tag{I.55}$$

Постоянный угловой коэффициент n может быть определен из условия $G_y = 1$:

$$n = \frac{\lg H\ (G_y = E) - \lg H\ (G_y = 1)}{\lg E} . \tag{I.56}$$

Отсюда следует, что для любого фильтра

$$\frac{\lg H\ (G_y = E) - \lg H\ (G_y = 1)}{n \lg E} = 1$$

и что для оценки качества фильтра можно пользоваться безразмерным комплексом, связывающим эффективность, пылеемкость и сопротивление фильтра, т. е. критерием качества фильтра в виде

$$K_к = \frac{n \lg E}{\Delta \lg H\ (G_y)} , \tag{I.57}$$

где $\Delta \lg H(G_y) = \lg H(G_y = E) - \lg H(G_y)$.

Удобно выбирать $G_y = E - \Delta G_y$. В дальнейшем принимается $\Delta G_y = 200$ г.

При практических расчетах значение n можно определять по линеаризированным графикам как отношение отрезков

$$\frac{\lg H\ (G_y = E)}{\lg G_y\ (H = H_E) - \lg G_y\ (H = 1)} ,$$

где H_E — сопротивление фильтра при $G_y = E$; $G_y(H = H_E)$ и $G_y(H = 1)$ — количество уловленной пыли соответственно при сопротивлениях H_F и 1 кгс/м^2

Чем хуже показатели эффективности и пылеемкости (сопротивления) фильтра, тем больше Кк. У самоочищающихся фильтров сопротивление не изменяется и Кк = 0. Значения Кк для некоторых фильтров, испытанных автором, даны в главе II.

ГЛАВА II

ВОЗДУШНЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ АТМОСФЕРНОГО И РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ВОЗДУХА

1 КЛАССИФИКАЦИЯ ВОЗДУШНЫХ ФИЛЬТРОВ

Важнейшими показателями воздушных фильтров являются их эффективность и сопротивление. Эффективность фильтров зависит от дисперсности улавливаемой пыли. Ввиду того что на практике она меняется, правильнее говорить об усредненных показателях определенных групп или классов фильтров Классификация фильтров по таким показателям приведена в табл II 1*

ТАБЛИЦА II 1

Классификация воздушных фильтров по их эффективности

Класс фильтров	Эффективно улавливаемые полевые частицы	Нижние пределы эффективности при очистке атмосферного воздуха, %
I	Частицы всех размеров .	99
II	Частицы размером более 1 мкм .	85
III	То же, от 10 до 50 мкм . .	60

Характеристика воздушных фильтров, наиболее широко применяемых в нашей стране, дана в табл II.2.

Фильтры I класса, как правило, волокнистые, характеризуются способностью улавливать частицы всех размеров и достаточно надежно удерживать их на сухих поверхностях и в густом переплетении образующих фильтр тонких волокон.

В волокнистых фильтрах II класса с более толстыми волокнами, расположенными в слое не так часто, частицы мельче 1 мкм задерживаются неполно Более крупные частицы эффективно задерживаются в результате механического зацепления и инерции. Частицы крупные 4—5 мкм в сухих фильтрах этого класса могут удерживаться недостаточно надежно. В волокнистых фильтрах II класса волокна не должны быть толще 8—10 мкм. В электрических фильтрах II класса частицы задерживаются под влиянием электрических сил.

В фильтрах III класса, заполняемых относительно толстыми

---

* По рекомендации автора эта классификация принята в СНиП I Г 5-62, см также [76] Аналогичные системы классификации предложены в ФРГ, США, ГДР и других странах [10, 18, 86, 118]

ТАБЛИЦА 11 2

Номенклатура воздушных фильтров

Вид фильтра	Тип фильтра	Наименование фильтра	Класс фильтра по эффективности	Воздушная нагрузка на входное сечение, м³/ч·м²		Начальное сопротивление при допустимой воздушной нагрузке, кгс/м²	Пылеемкость входного сечения фильтра (при увеличении сопротивления в 2—3 раза), г/м²	Способ регенерации
				рекомендуемая	допустимая			
Сухие пористые	Волокнистые	Ячейковые ФяЛ	I	6000	7000	10	430	Смена фильтрующего материала
		Ячейковые ЛАИК	I	— *	—	—*	—	Смена фильтра
		Рулонные ФРП	III	5000	9000	10	1000	Очистка фильтрующего материала пневматически
	Сетчатые	Ячейковые ФяВ	III	6000	7000	6	2600	То же или промывкой в воде
	Губчатые	Ячейковые ФяП	III	6000	7000	7	350	То же
Смоченные пористые	Волокнистые	Рулонные ФРУ	III	8000	10 000	6	450	Смена фильтрующего материала
		Ячейковые ФяУ	III	6000	7000	4	570	То же

Вид фильтра	Тип фильтра	Наименование фильтра	Класс фильтра по эффективности	Воздушная нагрузка на входное сечение, м³/ч·м²		Начальное сопротивление при допустимой воздушной нагрузке, кгс/м²	Пылеемкость входного сечения фильтра (при увеличении сопротивления в 2—3 раза), г/м²	Способ регенерации
				рекомендуемая	допустимая			
Смоченные пористые	Масляные	Самоочищающиеся Кд, КдМ и Кт	III	6000	7000	8	7—15**	Непрерывная промывка фильтрующих элементов в масле с периодической заменой масла
		Самоочищающиеся ФШ	III	7000	8000	8	7—15**	То же
		Ячейковые ФяР	III	6000	7000	6	2300	Промывка фильтрующих элементов в содовом растворе с последующим замасливанием
		Ячейковые ФяВ	III	6000	7000	6	2600	То же
Электрические	Электрические двухзональные промывные	Агрегатные ФЭ	II	7000	8000	1/6***	1500	Промывка фильтра водой
		Тумбочные ЭФ-2	II	7000	8000	1***/6	1500	То же

* См. табл. II.9.

** В процентах от массы масла в ванне.

*** В числителе дано сопротивление без противоуносного фильтра, в знаменателе — сопротивление с учетом противоуносного фильтра.

волокнами, проволокой и т. п., основным действующим фактором является инерция, эффект которой определяется значениями числа $St > 100$. Ввиду большого размера пор и каналов, образующихся в заполнении таких фильтров, условия удержания крупных частиц после их отскока здесь особенно неблагоприятны, в связи с чем фильтры этого типа, как правило, смачивают. Как было показано в п.3 главы I, минимальный размер частиц, улавливаемых отдельными элементами заполнения, может быть сравнительно мал, однако вследствие разреженности фильтрующей среды эффективность фильтров определяется условиями удержания частиц, и в первую очередь плохо смачиваемых частиц, на смоченных поверхностях. Из этих соображений для фильтров III класса нижний предел размеров эффективно улавливаемых частиц принят приблизительно равным 10 мкм, а верхний — 50 мкм (см. табл. II.1).

К III классу относятся также некоторые сухие фильтры. Следует, однако, иметь в виду, что надежность этих фильтров значительно меньше, особенно при содержании в воздухе крупных частиц, которые способствуют срыву осевших мелких, а также при возможности толчков, вибраций и т. п.

Эффективность, пылеемкость и сопротивление фильтров, относящихся к одному и тому же классу, также могут несколько различаться, в связи с чем эти показатели получают путем лабораторных испытаний фильтров. Часто испытания проводят по методикам, дающим заведомо завышенные результаты, вследствие чего в литературе можно встретить данные, мало соответствующие действительной эксплуатационной эффективности фильтров.

В США применяют методику испытаний, согласно которой фильтры, соответствующие III классу по СНиП, испытывают на каменноугольной золе с добавкой 5% волокнистой (хлопчатобумажной) пыли, а фильтры, соответствующие II классу по СНиП, — на атмосферной пыли. Эффективность фильтров определяют оптическим методом без возможности перехода к весовой эффективности, представляющей наибольший интерес при решении практических задач [63, 114]. Институт воздушных фильтров США проводит испытания фильтров II и III класса весовым методом на смёте дорожной пыли штата Аризона с добавкой 25% сажи и 3% волокнистой пыли (см. рис. I.1).

В Англии фильтры испытывают по стандартной методике (стандарт № 2831) на аэрозоле метиленовой синьки с частицами размером от 0,2 до 2 мкм путем оценки эффективности оптическим методом либо на стандартной испытательной пыли с оценкой эффективности весовым методом.

В ФРГ принята методика испытаний фильтров, разработанная в Боннском пылетехническом институте. Испытания проводят с искусственным запылением воздуха «кварцевой мукой»,

по своему составу аналогичной пылевидному кварцу КП-3 по ГОСТ 9077—59, применяемому в лаборатории ЦНИИПромзданий.

Все перечисленные методики, как правило, не предусматривают ограничения предельной крупности пыли, поступающей в испытываемый фильтр, и ее дезагрегации; испытаниям могут подвергаться только очень небольшие образцы фильтрующих материалов.

В заключение следует отметить, что существуют методики испытаний фильтров I класса на тумане маслянистых жидкостей с частицами размером около 0,3 мкм. Эти методики позволяют точно оценить даже небольшие проскоки аэрозолей через плотнейшие фильтры.

С 1958 г. в лаборатории ЦНИИПромзданий применяется весовая методика испытаний фильтров, основанная на использовании атмосферного воздуха, естественное пылесодержание которого несколько увеличивается путем добавления небольшого количества очень мелкодисперсной пыли, близкой по своим физико-химическим свойствам к атмосферной пыли [77]. Для запыления воздуха применяется пылевидный кварц КП-3 (см. рис. I.1).

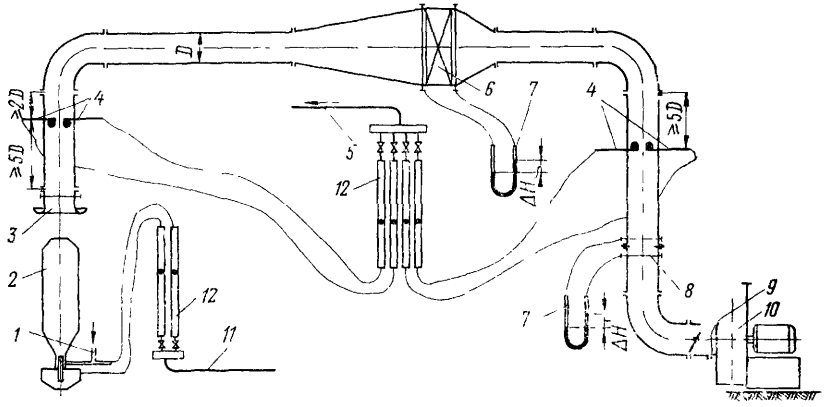


Рис II.1. Схема стенда для испытания фильтров

1 — трубка для подвода пыли из дозатора; *2* — классификатор; *3* — входной коллектор; *4* — пылезаборные трубки; *5*—вакуумный трубопровод; *6*—испытываемый фильтр; *7* — микроманометр; *8* — измерительная диафрагма; *9* — дроссель-клапан; *10* — вентилятор; *11* — нагнетательный трубопровод; *12* — расходомеры

Схема испытательного стенда показана на рис. II.1. Пылевидный кварц через механический дозатор, обеспечивающий равномерную подачу материала (на схеме не показан)[1], подается к основанию цилиндрического классификатора диаметром 450 мм. Горловина классификатора образована двумя коаксиальными трубками, причем внутренняя трубка сообщается

[1] Для этой цели удобно применять генератор, разработанный в НИИОГазе С. С. Янковским и Н. Г. Булгаковой.

также с бункером классификатора. Аэрозольный концентрат поступает в кольцевой зазор тангенциально и, вращаясь, переходит через плавное уширение в шахту классификатора.

Вращение потока позволяет разрушить пограничный слой у стенок шахты и выровнять поле скоростей в шахте, что облегчает классификацию частиц. В средней части потока в зависимости от установившейся в нем скорости течения частицы либо поднимаются вверх, либо падают вниз. В первом случае частицы выходят из классификатора и отводятся в канал стенда. Верхний предел крупности этих частиц определяется скоростью потока и поэтому может регулироваться изменением объема подаваемого сжатого воздуха. Крупные частицы через горловину классификатора выпадают в бункер.

Падающие крупные частицы могут увлекать за собой некоторое число мелких частиц. Кроме того, большое количество частиц разного размера может выпадать в бункер в момент выхода пылевого концентрата из кольцевой щели. Для предотвращения этого явления в горловине создается ток воздуха. В результате в бункер опускаются только те частицы, которые из-за их большой массы не выносятся из верхней части классификатора.

При испытаниях фильтров скорость восходящего потока в рабочей части классификатора принимают равной 0,8 см/с, что соответствует скорости витания частиц кварца размером 10 мкм. Применение трехциклонного прибора и каскадного импактора НИИОГаз позволило установить фракционный состав пыли (линия *5* на рис. I.1).

Поток концентрированной аэрозоли, выходящей из классификатора, разбавляют до концентрации $1 \pm 0{,}5$ мг/м^3. Входное отверстие канала стенда, оформленное в виде плавного коллектора, располагают непосредственно над выходным отверстием классификатора.

Перемешивание аэрозоли удалось ускорить, введя в воздуховод небольшое полотнище, укрепленное в виде флага на стержне, расположенном поперек канала. Энергичные встряхивания полотнища существенно турбулизируют поток за счет диссипации энергии флага его свободным концом [105]*.

Эффективность фильтра устанавливают сравнением концентрации пыли в воздухе до и после его очистки. Концентрация определяется по пробам, которые отбирают из каналов до и после фильтра с помощью пылезаборных трубок (рис. II.2). В насадок пылезаборной трубки закладывается аналитический фильтр типа АФА, что предотвращает потери пыли, имеющие место в трубках с внешней фильтрацией Небольшая масса вкладного фильтра ($\leqslant$40—60 мг) позволяет более точно определять небольшие привесы, получаемые при отборе проб.

* Энергия встряхивания так велика, что ее оказалось возможным использовать для аэродинамического обеспыливания спецодежды [80].

Пылезаборные трубки располагают на вертикальных участках каналов В сечении размещают не менее двух пылезаборных трубок Для установки трубок используют плотные кулачковые зажимы Продолжительность отбора проб не менее 3—6 ч

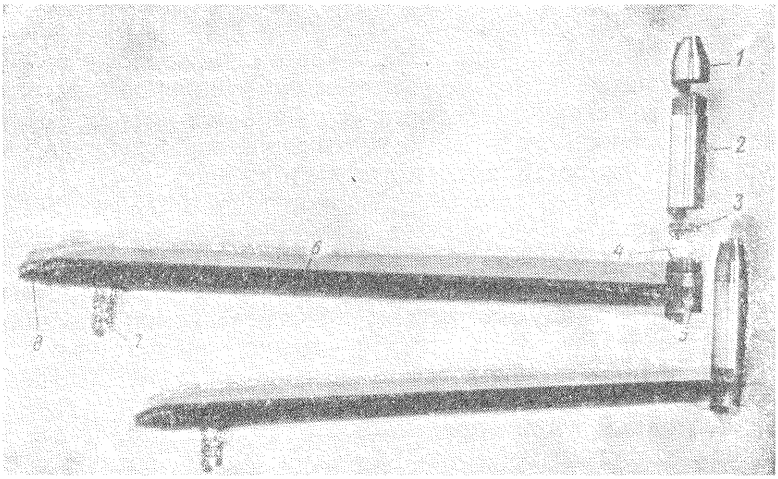


Рис II 2 Пылезаборные трубки с внутренней фильтрацией (верхняя трубка дана в разобранном виде)

1 — сменный наконечник, *2* — вставка для отбора проб при повышенной запыленности, *3* — уплотнительное кольцо *4* — внутренний фильтр (аллонж) из материала ФП (АФА), *5* — отверстие для измерения статического давления *6* — трубка для отсоса пробы *7* — штуцер полного давления, *8* — штуцер статического давления

Пробы отбираются изокинетически, т е скорость отсоса воздуха во входном сечении насадка трубки равна скорости потока в этом месте Такой способ отбора позволяет избежать искажений, связанных с инерционностью пылевых частиц Если скорость отсоса больше, чем скорость потока, то во входное отверстие попадут не все крупные частицы из периферии засасываемой элементарной трубки тока В противном случае, наоборот, в него могут попасть частицы, находящиеся вне этой трубки Влияние нарушения изокинетичности при определенных условиях сказывается уже на частицах размером более 4 мкм

Трубка ЦНИИПромзданий, показанная на рис II 2, приспособлена для измерения скорости потока в месте ее установки. Полное давление измеряется с помощью микроманометра, присоединяемого к штуцеру, установленному на всасывающем канале трубки, а статическое давление — через специальное отверстие в плоской торцовой стенке насадка трубки Статическое давление передается к микроманометру с помощью тонкой трубки и второго штуцера Скоростной напор вычисляется по разности

Рис. II.3. Аэродинамические характеристики фильтров и фильтрующих материалов ▶

1 — фильтра Рекк Б; *2* — фильтров Рекк М и ФяР; *3* — фильтра ФяВ; *4* — фильтра ГСТМ; *5* — материала Виледон фирмы «Фройденберг» (ФРГ); Р5В/220; *6* — то же, АЗ/300; *7* — то же, Р15/500; *8* — фильтра Кд, *9* — фильтра ФШ; *10* — фильтра Вентекс; *11* — материала Виледон японского производства; *12* — то же, итальянского производства, *13* — материала производства ЧССР; *14* — материала ЦНИИШерсти; *15* — материала Сипрон; *16* — материала ВНИИСВ; *17* — материала ФСВУ (фильтры ФРУ и ФяУ); *18* — фильтра ФяЛ; *19* — фильтра Микросорбон *20* — необработанного ППУ ($\times 10^3$); *21* — обработанного ППУ, $\delta = 10$ мм; *22* — то же, $\delta = 20$ мм; *23* — то же, $\delta = 40$ мм; *24* — фильтра Дрий-Пак; *25* — материала ФВН (фильтр ФРП)

давлений в указанных штуцерах с учетом тарировочного коэффициента, равного для трубок этой конструкции приблизительно 0,6. По вычисленной скорости подбирается объем отсоса, после чего освобождается зажим, отключавший трубку на время измерений скорости, и начинается отбор проб.

Трубка описанной конструкции менее подвержена забиванию пневмометрических каналов пылью, чем трубки других типов. При отборе проб в условиях большой запыленности, например в вытяжных вентиляционных системах, цилиндрическая часть насадка удлиняется вставкой *2*, заполняемой стеклянной ватой, после чего устанавливается сменный наконечник *1*, отверстие в котором подбирается из условия соблюдения изокинетичности отбора пробы.

Концентрация пыли определяется как частное от деления массы пыли, уловленной аллонжем, на объем воздуха, профильтрованного через аллонж за время отбора пробы.

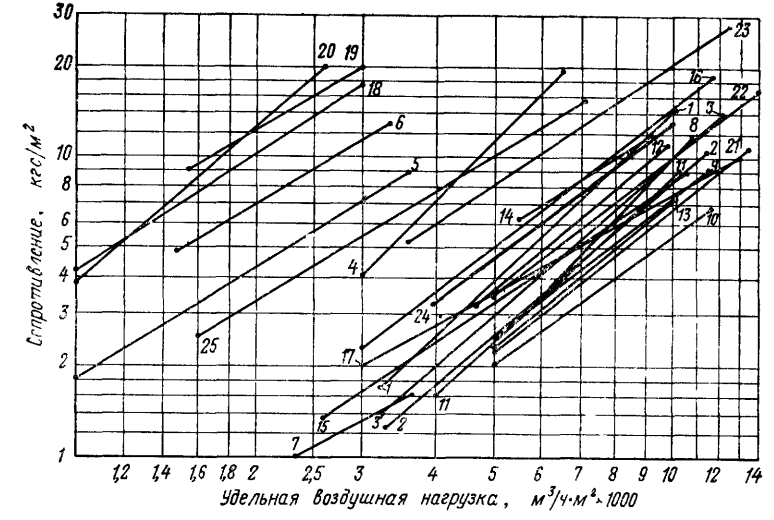
Изменяющееся по мере накопления пыли сопротивление испытываемого фильтра фиксируется в процессе определения его эффективности, что позволяет получить комплексную характеристику фильтра, включая его пылеемкость.

Предварительно определяется аэродинамическая характеристика $H\ (Q)$ чистого фильтра, т. е. зависимость его сопротивления от удельной воздушной нагрузки (рис. II.3). Анализ приведенных характеристик показывает, что коэффициенты местного сопротивления не сохраняют постоянного значения; это свидетельствует об изменении режима течения. В зависимости от состояния пористого слоя (замасленность, коррозия, вариации в толщине волокон и т. п.) сопротивление может отличаться на ± 10—15%.

На рис. II.4 даны пылевые характеристики $1 — E(G_y)$ и $H(G_y)$ испытанных фильтров и фильтрующих материалов. Полное сопротивление фильтра подсчитывается по формуле $H = H(Q) + H(G_y)$, где $H(Q)$ — начальное сопротивление чистого фильтра (см. рис. II.3) при той же воздушной нагрузке, при которой определялось $H(G_y)$, т. е., как правило, при $Q = 7000$ м^3/ч·м^2*.

Технические показатели фильтров, приведенные в табл. II.2, определены по описанной методике.

* Нагрузки, отличающиеся от этой величины, указаны в подписи к рис. II.4.



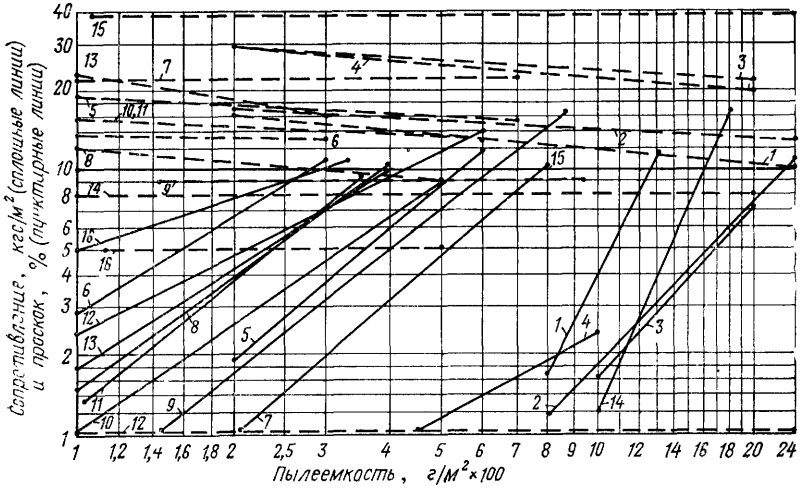


Рис. II 4. Пылевые характеристики фильтров и фильтрующих материалов

1 — фильтра Рекк Б (при 6000 м³/ч·м², Кк=61); *2* — фильтра Рекк М и ФяР (при 6000 м³/ч·м², Кк= 73), *3* — фильтра ФяВ (Кк=75); *4* — фильтра ГСТМ (Кк=89), *5* — материала Виледон японского производства (Кк=70); *6* — то же, итальянского производства (Кк=54); *7* — материала производства ЧССР (Кк=84)), *8* — материала ЦНИИШерсти (Кк=39), *9* — материала Сипрон (Кк=36); *10* — материала ФСВУ и фильтров ФРУ и ФяУ (при Кк=7000 м³/ч м², Кк=56), *11* — то же (при 10 000 м³/ч·м², Кк=56); *12* — фильтра ФяЛ (Кк=5); *13* — фильтра ФяП (Кк=89); *14* — фильтров ФЭ и ЭФ-2 (при 7200 м³/ч·м², Кк=33); *15* — фильтра Кд; *16* — фильтра Дрий-Пак (Кк=21)

2. МАСЛЯНЫЕ ВОЗДУШНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Общие сведения

Для повышения эффективности улавливания крупных частиц фильтры этого типа смачиваются малоиспаряющимися вязкими жидкостями. До последнего времени для смачивания применялись нефтяные масла, вследствие чего в практике установилось указанное выше название фильтров этого типа. Иногда их называют также висциновыми по названию масла, примененного в первых фильтрах такого типа фирмой «Дельбаг».

Влияние качества смачивающих жидкостей рассматривается в главе IV.

Необходимость обновления масляных пленок обусловливает регулярное проведение грязных и трудоемких ручных операций по промывке фильтров, регенерации масел и пр. В последние годы масляные фильтры все чаще заменяются более прогрессивными, в частности волокнистыми. Тем не менее масляные фильтры пока еще являются основным видом фильтровального оборудования для очистки воздуха в приточных камерах и кондиционерах. Достоинства масляных фильтров — долговечность их основной конструкции, предохраняемой от коррозии масляными пленками, и дешевизна единственного расходуемого материала — **масла.**

В конструктивном отношении масляные фильтры подразделяются на два основных вида: ячейковые и самоочищающиеся.

Ячейковые масляные фильтры

Ячейковые фильтры типа Рекк. Фильтры этого типа представляют собой металлическую коробку, заполненную гофрированными стальными сетками. Коробка закреплена в металлической установочной рамке. Высота гофров сетки составляет 4 мм. Сетки уложены в коробку фильтров так, что гофры смежных сеток направлены перпендикулярно друг другу. Заполнение фильтров состоит из трех слоев стальных сеток различных номеров по ГОСТ 3826—66 (№ 0,63; 1,2; 2,5), расположенных таким образом, что размеры отверстий в сетках уменьшаются в направлении движения очищаемого воздуха.

Промышленность изготовляла фильтры малой (индекс М) и большой (индекс Б) модели с числом сеток соответственно 12 и 18. Площадь лобовой поверхности ячеек обеих моделей равна 0,22 м^2.

Аэродинамические и пылевые характеристики фильтров обеих моделей приведены на рис. II.3 и II.4.

Эффективность фильтров несколько увеличивается с повышением воздушной нагрузки. Это увеличение невелико, и при практических расчетах эффективность фильтров при всех нагрузках может приниматься постоянной.

Как видно из графика на рис. II.4, эффективность большой модели превышает эффективность малой модели не более чем на

2—3%. Практически эффективность очистки воздуха в фильтрах обеих моделей можно считать одинаковой (около 80%). По мере загрязнения фильтра его эффективность несколько возрастает. Это объясняется накоплением пыли на сетках (главным образом, на первой сетке), в результате чего образуется рыхлый слой пыли, который, в свою очередь, служит фильтрующей средой.

Следует отметить, что в некоторых районах СССР наблюдается резкий рост сопротивления фильтров летом, когда в воздухе содержится много пуха цветущих тополей. Оседая на первых сетках фильтров, этот пух образует сплошной слой, обладающий высоким сопротивлением.

Некоторый рост эффективности в начальный период запыления наблюдается почти во всех пористых фильтрах.

На рис. II.5 показано распределение осажденной пыли по толщине фильтров, в том числе фильтра Рекк, определенное путем послойного взвешивания сеток [79]. Нижние ветви графика представляют собой дифференциальные, а верхние — интегральные кривые распределения массы уловленной пыли. Как видно из графика, в фильтре Рекк до 90% уловленной пыли было задержано в первых восьми сетках. Дальнейшее увеличение числа сеток оказывает все меньшее влияние на эффективность пылеулавливания.

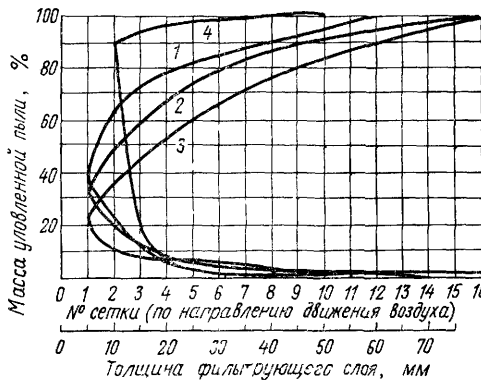


Рис II.5. Распределение пыли по толщине фильтрующего слоя

1 — фильтров Рекк М и ФяР, *2* — замасленного фильтра ФяВ, *3* — сухого фильтра ФяВ, *4* — фильтра ФяП

Эффективность фильтров данного класса можно оценить с помощью изложенных в п. 3 главы I соображений об инерционной сепарации пыли на препятствиях цилиндрической формы.

Для фильтров рассматриваемого типа с диаметром проволоки 350 мкм, скоростью фильтрации 1,5 м/с и толщиной масляной пленки 50 мкм, согласно табл. I.1, $St_{кр}=1/8=0{,}125$ и $d_{мин}=1{,}56$ мкм.

Принимая для упрощения, что ширина зоны застоя при обтекании проволоки равна $d_{мин}$, найдем, что вероятность улавливания таких частиц на одной сетке при среднем расстоянии между нитками сетки примерно 1,5 мм равна $1{,}56/1500\approx 1/1000$.

Учитывая все 12 сеток и взаимно перпендикулярное располо-

жение ниток, получим примерную вероятность улавливания $^1/_{40}$. Таким образом, эффективность улавливания частиц размером 1—1,5 мкм в этих фильтрах не может превысить 3%.

Такой же вывод получается при рассмотрении рис. I.3, где видно, что близкая к 80% эффективность достигается при значениях $St>6$. Для замасленных проволок диаметром 350 мкм этому соответствует размер частиц примерно 10 мкм ($St=6$; эффективность, обусловленная инерционным эффектом, $E=0{,}8$).

Эффективность улавливания частиц этого размера первой сеткой равна $2\cdot0{,}8\cdot450/1500\approx0{,}48$. Следующая сетка уловит соответственно $2\cdot0{,}8(1-0{,}48)450/1500\approx0{,}25$ и т. д. Так как суммарная эффективность вообще равна $E=1-(1-E_1)^n$, где n — число сеток, то как и следует из рис. II.5, эффективность фильтра при увеличении числа сеток вначале возрастает быстро, а затем ее увеличение замедляется. С учетом дисперсного состава пыли и наличия в ней плохо смачивающихся частиц результаты расчета удовлетворительно соответствуют результатам экспериментального исследования распределения пыли по толщине фильтра.

Унифицированные ячейковые фильтры типа Фя. В 1965 г. фильтры Рекк подверглись модернизации, при которой изменились также некоторые размеры ячеек. Модернизированные фильтры могут заполняться как стальными гофрированными сетками, так и другими заполнителями и, в частности, при заполнении волокнистыми или губчатыми материалами использоваться как сухие фильтры.

В зависимости от заполнителя различают следующие модификации ячейковых фильтров Фя, выпускаемых Крюковским вентиляторным заводом:

ФяР . . . . фильтр ячейковый с заполнением из 12 стальных гофрированных сеток по ГОСТ 3826—66

ФяВ . . . . . фильтр ячейковый с заполнением из 12 винипластовых «сеток» по СТУ 30-124-23-62

ФяП . . . . . фильтр ячейковый с заполнением из модифицированного пенополиуретана по МРТУ 6-05 1150-68

ФяУ . . . . фильтр ячейковый с заполнением из упругого стекловолокнистого фильтрующего материала по ТУ 21-01-369-70.

Фильтры типа Фя с заполнением из стальных гофрированных сеток по аэродинамической и пылевой характеристикам равноценны фильтрам Рекк малой модели и обозначаются индексом ФяР (табл. II.3).

Ячейка этих фильтров (рис. II.6) представляет собой разъемную металлическую коробку *1*, закрепленную в установочной рамке *2* пружинными защелками *3*. Разъемная коробка состоит из корпуса, куда укладывается фильтрующий слой, и крышки, которая плотно вставляется в корпус и защемляется в нем при

сборке зигами, выштампованными на боковых стенках обеих деталей. Рамка и крышка могут снабжаться опорными решетками, удерживающими фильтрующий слой от выпадения под воз-

ТАБЛИЦА II 3

Технические показатели фильтров типа Фя

Показатели	ФяР	ФяВ	ФяП	ФяУ
Номинальная пропускная способность, м³/ч	1540	1540	1540	1540
Удельная воздушная нагрузка, м³/ч·м²	7000	7000	7000	7000
Начальное сопротивление, кгс/м²	5	6	6	4
Пылеемкость (при увеличении сопротивления до 15 кгс/м²), г/м²	2300	2600	350	570

действием воздушной нагрузки. Корпус ячейки снабжен ручками для его установки и извлечения.

Регенерацию фильтров следует проводить по графику, заменяя загрязненные фильтры на период их обработки резервными. Рекомендуется иметь в резерве не менее 10% фильтров.

На предприятиях, имеющих большое количество фильтров, для облегчения работы персонала по отмывке фильтров в содовом растворе может быть использована фильтромоечная машина, представляющая собой ванну, в которой загрязненные фильтры промываются путем энергичных встряхиваний с помощью особого вибромеханизма [19].

Фильтры типа Фя можно монтировать в плоские и V-образные панели (рис. II.7). Для возможности сборки ячеек в плоские панели

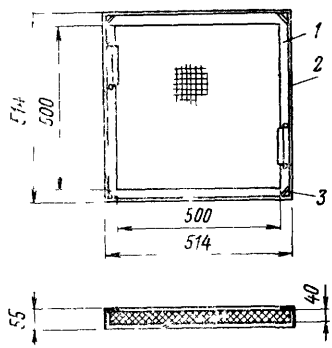


Рис II 6 Ячейка **унифицированных фильтров типа Фя**

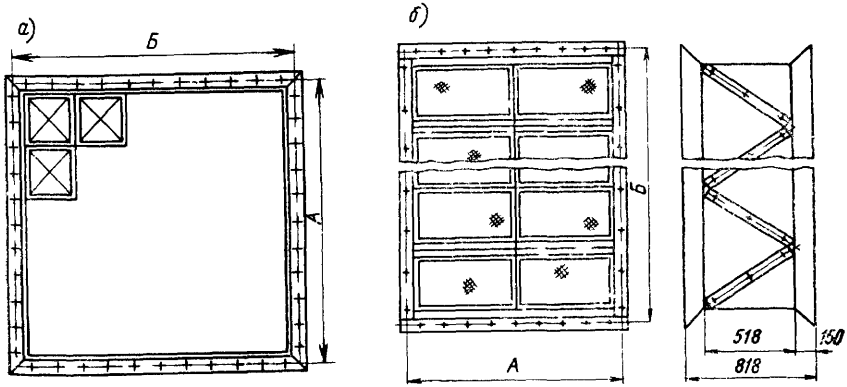


Рис II 7 Панели для установки фильтров типа Фя
а — плоская; *б* — V-образная

в каждой стенке установочной рамки устроено по три отверстия. Установочные рамки присоединяются друг к другу на болтах или заклепках, а зазоры между ними уплотняются. Разработаны чертежи панелей пропускной способностью до 40 тыс. м³/ч (табл. II.4 и II.5).

ТАБЛИЦА II 4

Технические показатели плоских панелей для фильтров типа Фя

Пропускная способность, тыс м³/ч	Число ячеек в панели	Компоновка ячеек в панели	Присоединительные размеры, мм (см рис II 7, *а*)	
			А	*Б*
3—3,5	2	1×2	518	1034
4—7	4	2×2	1034	1034
7—10	6	2×3	1034	1560
10—15	9	3×3	1560	1560
15—20	12	3×4	1560	2066
20—25	15	3×5	1560	2582
25—28	16	4×4	2066	2066
28—35	20	4×5	2066	2582
35—37	24	4×6	2066	3098
37—40	25	5×5	2582	2582

ТАБЛИЦА II 5

Технические показатели V-образных панелей для фильтров типа Фя

Пропускная способность, тыс м³/ч	Число ячеек в панели	Присоединительные размеры, мм (см рис II.7, *б*)	
		А	*Б*
10	6	564	1344
20	14	1580	1034
40	27	2090	1598

Угол между двумя смежными ячейками, установленными в V-образной панели, составляет 30°. Сопротивление панели при этом практически не увеличивается и может приниматься по характеристикам одиночных ячеек.

Фильтры ФяВ заполнены 12 винипластовыми гофрированными сетками (пленками) со следующей технической характеристикой:

Диаметр отверстий, мм	2,8 ± 0,1
Расстояние между центрами отверстий, мм:	
по длине пленки	3,1 ± 0,2
» ширине »	3,6 ± 0,2
Высота гофров, мм	1 — 2,5
Шаг гофров, мм	5
Толщина пленки, мм	0,5

Сопоставляя пылевые характеристики ячейковых фильтров Рекк и винипластовых фильтров (см. пунктирные линии *2* и *3* на рис. II.4), можно заметить, что последние имеют несколько меньшую эффективность.

Кривые распределения пыли в масляном винипластовом фильтре имеют более пологий характер, чем в фильтрах Рекк (см. рис. II.5), что указывает на большую глубину проникания пыли в этот фильтр и объясняет его несколько большую пылеемкость

Фильтры с заполнением из винипластовых гофрированных сеток значительно легче и удобнее в эксплуатации.

Характерно, что и при заполнении испытываемых фильтров силоновыми сетками их сопротивление росло по мере запыления медленнее, обусловливая их бо́льшую по сравнению с фильтрами с металлическими сетками, пылеемкость [97]

Пластмассовые сетки не корродируют и поэтому могут использоваться без замасливания. По основным техническим показателям сухие фильтры ФяВ мало уступают замасленным и могут быть рекомендованы для применения в тех случаях, когда замасливание воздуха и вообще применение масел является нежелательным. По аэродинамической характеристике сухие фильтры этого типа практически не отличаются от замасленных.

При изготовлении и ячейки фильтров ФяВ из коррозионноустойчивых материалов могут быть использованы в качестве орошаемых в случае повышенной запыленности воздуха (более 1—2 мг/м^3), так как орошаемые фильтры непрерывно очищаются от оседающей в них пыли и сопротивление их остается постоянным. Фирма «Свенск Флактфабрикен» (Швеция) применяет такие фильтры в системах вентиляции сухогрузных морских судов, где запыленность воздуха достигает больших размеров, особенно при погрузке и разгрузке угля, руды, минеральных удобрений и других сыпучих и пылящих грузов.

Орошение в этом случае производится забортной водой с расходом около 0,1 л/м^3. Наклонно установленный фильтрующий слой орошается со стороны входа воздуха с помощью форсунок Пропускная способность установок, осуществленных на некоторых судах, по данным каталогов фирмы, превышает 100 тыс. м^3/ч.

Ячейковые фильтры типа ГСТМ-373 с заполнением из колец Рашига. Фильтры с заполнением из керамических колец Рашига продолжают находить некоторое применение, несмотря на их большую массу (27 кг) и большое сопротивление. Глубина этих фильтров значительно больше, чем других, так как для создания достаточно развитой фильтрующей поверхности из колец диаметром 20—25 мм нужно очень много колец

Самоочищающиеся масляные фильтры

Самоочищающиеся фильтры типа Кд. Фильтры этого типа разработаны в качестве секции кондиционеров того же наименования. Номенклатура самоочищающихся фильтров типа Кд (табл II 6) включает фильтры на производительность 3—240 тыс м^3/ч.

ТАБЛИЦА II 6

Технические показатели фильтров типов Кд и Кт

Обозначение моделей и типоразмеров	Номинальная пропускная способность, тыс. м³/ч	Площадь входного сечения фильтра, м²	Полезная емкость масляной ванны, л
Кд-43	3	0,315	20
Кд-45	5	0,49	40
Кд-10	10	1,01	75
Кд-20	20	2	135
Кт-30	30	3,115	290
Кд-40	40	3,48	175
Кт-40	40	3,94	290
Кд-60	60	5,84	488
Кт-60	60	6,31	585
Кд-80	80	7,12	590
Кт-80	80	7,88	585
Кд-120	120	10,9	590
Кт-120	120	12,62	585
Кд-160	160	14,9	790
Кт-160	160	15,76	585
Кд-200	200	18,7	790
Кд-240	240	20,55	885
Кт-250	250	23,64	850

На рис II 8 показан фильтр Кд-240 на номинальную пропускную способность до 240 тыс. м³/ч. Фильтр представляет собой металлическую станину коробчатой формы, в верхней и нижней частях которой установлены соответственно ведущие и натяжные горизонтальные валы фильтровальных панелей[1]. Панели имеют вид непрерывной ленты из пружинно-стержневой сетки, элемент которой показан на рис. II.9.

Ведущие валы устанавливаются в подшипниках и приводятся во вращение электродвигателем через редуктор. В небольших фильтрах применяется ручной привод.

Перемещение панелей происходит в результате трения сеток о поверхность верхних вращающихся валов. Нижние валы расположены в ванне с маслом, составляющей опорную часть станины, благодаря чему обеспечивается постоянная промывка движущихся панелей в масле. На рис II.8 фильтр показан во время его испытаний. К движущейся фильтровальной панели подвешены грузы в виде стальных листов большого веса. С течением времени пружинные сетки фильтровальных панелей растягиваются и поэтому их следует укорачивать.

В фильтрах Кд устанавливаются две фильтрующие панели последовательно по ходу воздуха. Таким образом, очищаемый

[1] В последнее время фильтры модернизировались изготовителями Модернизация касалась габаритных размеров, привода и способа удаления шлама Модернизированным конструкциям присвоены обозначения КдМ, Кт и др.

воздух проходит через четыре пружинные сетки. В целях предупреждения уноса масла направление движения панелей выбирается так, чтобы последняя поверхность двигалась сверху вниз.

При лабораторных испытаниях по методике, описанной в п. 1 данной главы, эффективность фильтров составила около 60%.

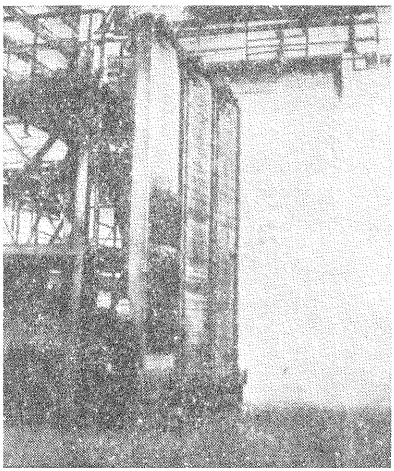


Рис. II 8. Масляный самоочищающийся фильтр Кд-240

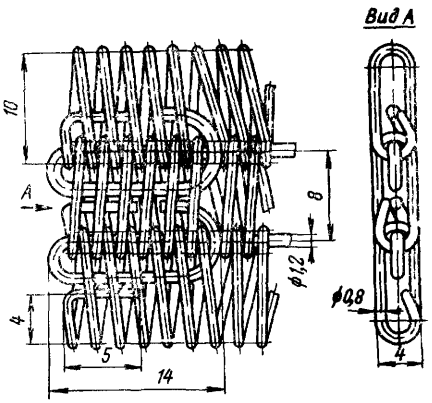
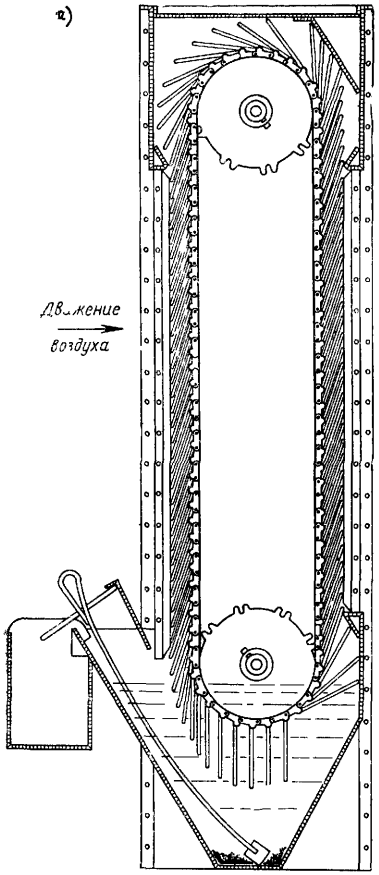


Рис. II 9. Пружинно-стержневая сетка фильтров типа Кд

По данным эксплуатационных испытаний, эффективность фильтров типа Кд при начальной запыленности воздуха 0,2—0,3 мг/м³ составляет 50—60%.

Оценку эффективности фильтров Кд можно произвести по той же методике, что и фильтров Рекк. Толщина проволоки в данном случае 800 мкм, а с учетом масляной пленки около 900 мкм. Число рядов проволочных решеток с учетом частичного влияния кольцевого расположения проволоки можно принять равным шести, а расстояние между проволоками — 800 мкм. Согласно табл. I.1, $d_{мин}=1{,}7$ мкм. Эффективность улавливания частиц этого размера можно оценить примерно в $1{,}7/1600=1/940$, а для шести решеток — соответственно в 1/156, или примерно 1%. Для частиц размером 10 мкм критерий Стокса $St=4{,}25$ и, согласно рис. I.3, $E=70\%$. Эффективность улавливания частиц этого размера первой решеткой стержней составит $70\cdot 900/1600\approx 40\%$, а всеми сетками примерно 95,4%, что также корреспондирует с результатами экспериментов.

Аэродинамическая характеристика фильтров, полученная в эксплуатационных условиях, показана на рис. II.3. С течением времени сопротивление фильтров несколько возрастает в связи с



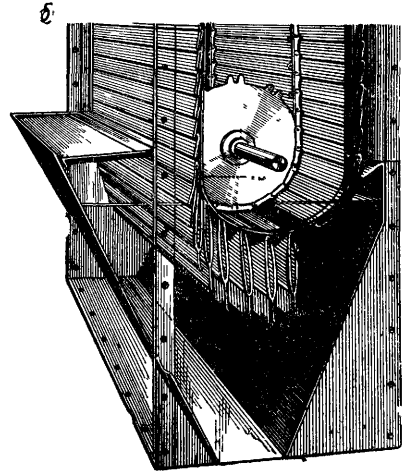


Рис II 10 Самоочищающийся масляный фильтр с сетчатыми шторками
а — конструктивная схема, *б* — устройство нижней части фильтра

загрязнением и коррозией сеток, вследствие чего рекомендуется принимать сопротивление фильтров на 2—3 кгс/м^2 больше

Самоочищающиеся фильтры типа ЛФПВ. В Финляндии применяются фильтры типа ЛФПВ, несколько сходные по конструкции с фильтрами типа Кд. Фильтрующие панели в этих фильтрах устроены так же, как и в фильтрах Кд, однако шаг сетки значительно больше, в особенности в первой панели. Отличается также конструкция валов, которые имеют пластинчатые продольные ребра, сопрягающиеся при движении панелей с местами сочленения элементов сетки.

Самоочищающиеся фильтры Славянского завода и фильтры Мальти Дьюти фирмы «ААФ» (США). Фильтрующие панели в этих фильтрах образованы из сетчатых шторок, прикрепленных к втулочным цепям, надетым на приводные зубчатые шестерни (рис. II.10). На вертикальном участке движения шторки перекрывают друг друга, создавая фильтрующий слой из трех-четырех слоев сеток. В нижней части фильтра шторки разъединяются при проходе через масляную ванну, в его верхней части они переворачиваются.

Шлам удаляется вручную с помощью скребка, извлекаемого за две ручки через переднюю уширенную часть ванны.

Фильтры Славянского завода комплектуются из базовой секции шириной 1700 мм с электроприводом и одной или двух дополнительных секций правой и левой сборки. Номинальная пропускная способность каждой секции 20 тыс. м³/ч, удельная воздушная нагрузка 8350 м³/ч·м².

К нижней части шторок фильтров Мальти Дьюти могут прикрепляться стальные предохранительные решетки для защиты сеток от повреждения и забивания крупными предметами. По сборке эти фильтры также аналогичны фильтрам Славянского завода. Шторки движутся периодически через каждые 12 мин. В фильтрах высотой до 2850 мм фильтрующие панели проворачиваются в течение 13 с, а в более высоких фильтрах — в течение 20 с. По данным фирмы, такой режим движения обеспечивает сток излишков масла к тому времени, когда шторка, вышедшая из масляной ванны, начинает подвергаться действию воздушного потока.

Для работы фильтров в условиях повышенной запыленности предусматривается возможность циркуляции масла в ваннах с его очисткой в регенерационной аппаратуре. Ванны многосекционных установок в этом случае объединяются с помощью патрубков и соединительных отводов-калачей диаметром 100 мм. Большой диаметр коммуникаций позволяет поддерживать такие скорости циркуляции масла, которые предупреждают выпадение шлама на дно ванн и обеспечивают прокачиваемость масла и при низких температурах. Для этой же цели фильтры снабжаются электроподогревателями, устанавливаемыми снаружи ванн. При подборе фильтров фирма рекомендует исходить из скорости потока воздуха не более 2,5—2,6 м/с.

Самоочищающиеся шторчатые фильтры типа ФШ. Фильтры типа ФШ (рис. II.11 и табл. II.7) предназначены для использования как в нормальных условиях, так и при повышенной запыленности воздуха. С этой целью в фильтр предусмотрено механическое удаление шлама с помощью скребкового транспортера.

ТАБЛИЦА II.7

Технические показатели фильтров типа ФШ

Показатели	Ф2Ш1	Ф4Ш2	Ф6Ш3	Ф8Ш4	Ф12Ш5
Номинальная пропускная способность, тыс. м³/ч	20	40	60	80	120
Площадь рабочего сечения, м²	1,8	3,2	5,9	7,2	11,1
Число секций при ширине секции, мм.					
1532	1	—	1	2	2
1015	—	2	1	—	—
Полезная емкость масляной ванны, м³	0,3	0,41	0,48	0,56	0,56
Масса (без масла), кг	538	925	1280	1546	1625

Фильтр состоит из секций, представляющих собой вертикальный транспортер периодического действия, съемные шторки которого являются фильтрующими элементами.

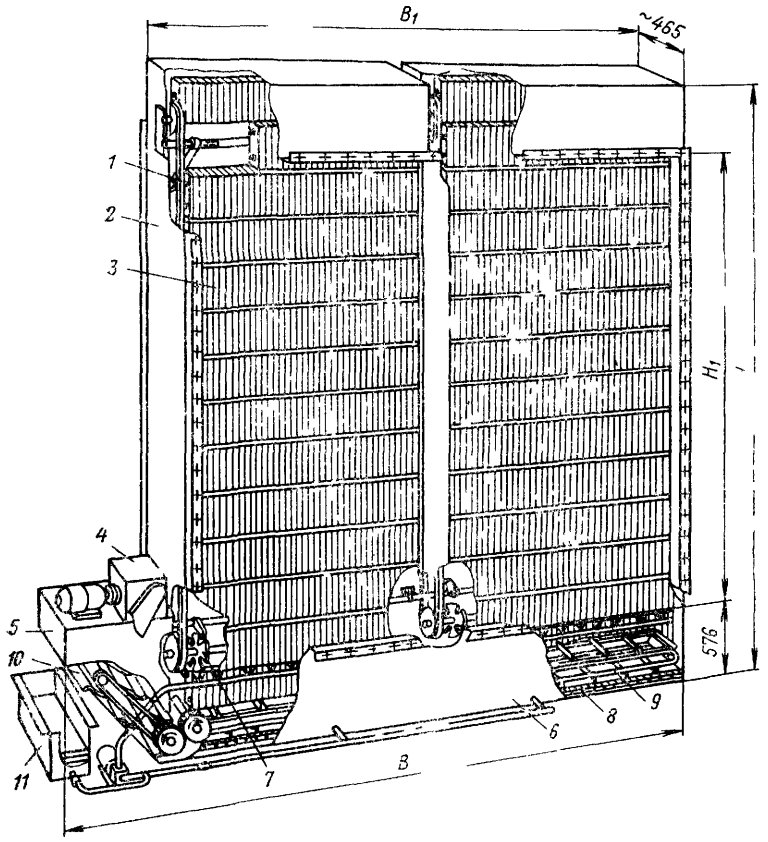


Рис II 11 Схема устройства фильтра ФШ производства Серпуховского механического завода

На двух бесконечных втулочных цепях *1*, расположенных у боковых стенок корпуса *2* за пределами живого сечения фильтра, шарнирно подвешены фильтрующие шторки *3*. Шторки, находящиеся в одной плоскости, образуют сплошную фильтрующую панель. Это обеспечивается направляющими и конструкцией самих шторок, устроенных таким образом, что зазор между ними перекрывается. Цепи движутся по системе «патер ностер» без опрокидывания, разъединяясь и снова соединяясь в верхней и нижней частях фильтра при переходе из одной плоскости в другую.

Перемещение шторок и работа механизмов шламоудаления

осуществляется от одного привода *4*, расположенного на бункере *5* масляной ванны *6*. Скребковый механизм связан с редуктором узла привода цепной передачей, а ведущий вал секции — механизмом мальтийского креста *7*.

Рычаг храпового механизма выполнен с пружинными элементами. При повышении крутящего момента на выходном валу редуктора в случае заедания или заклинивания шторок в направляющих пружинные элементы тяги сжимаются, при этом микровыключатель, закрепленный на тяге, размыкает цепь питания электродвигателя. Наличие механизма мальтийского креста исключает одновременную нагрузку на узел привода от двух или более секций.

В фильтре имеется устройство для равномерного натяжения цепей механизма шторок без перекосов.

Ванна состоит из двух отсеков, разделенных между собой фильтрующим слоем *8*, например листом губчатого пенополиуретана, опирающимся на перфорированную металлическую перегородку. Из нижнего отсека ванны масло перекачивается шестеренным насосом в верхний отсек. Таким образом создается непрерывная рециркуляция масла, очищаемого фильтрующим слоем.

Шлам, скапливающийся на фильтрующем слое в ванне, счищается с него скребковым механизмом *9* и сбрасывается в бункер ванны. Механизм для удаления шлама из бункера ванны представляет собой группу черпаков *10*, шарнирно-подвешенных на цепях. При разгрузке черпаки опрокидываются и ударяются о нож, укрепленный на корпусе бункера. При этом бо́льшая часть вынесенного шлама сбрасывается с черпака в шламоприемник *11*.

Шламоприемник оборудован фильтром из куска мешковины, отделяющим масло, которое в небольшом количестве выносится со шламом. Профильтрованное масло из шламоприемника может возвращаться в ванну фильтра при помощи того же насоса.

Фильтрующая шторка состоит из вертикальных пластинок специального профиля, насаженных на горизонтальные штыри и жестко стянутых при сборке П-образными боковыми стенками. Шторки всегда обращены к потоку одной стороной. Отсутствие нижней и верхней стенок способствует более свободному течению масла между пластинками и, следовательно, лучшей их промывке; после выхода шторки из ванны масло быстро стекает с нее. При рекомендуемой воздушной нагрузке порядка 8 тыс. $м^3/ч \cdot м^2$ скорость в живом сечении шторок (без учета толщины масляных пленок) составляет около 4 м/с (см. табл. II.7).

Эффективность фильтров можно оценить следующим образом. Пластинки заполнения шторок образуют множество плоских изломанных каналов шириной в свету 3,5 мм. В пределах каждой из шторок поток изгибается дважды под углом $\varphi = 45°$, а в

двух рядах шторок — 4 раза. Можно считать, что каждый изгиб канала представляет собой искривление потока с внутренним и наружным радиусами соответственно $R_1=12$ мм и $R_2=15$ мм.

Минимальный размер частиц $d_{мин}$, сепарирующихся после четырех искривлений потока к наружной стенке с эффективностью порядка 95%, может быть приближенно оценен из условия, что эффективность сепарации этих частиц на каждом из четырех поворотов составит $E=1-\sqrt[4]{1-0{,}95}\approx 0{,}5$. Тогда для достижения необходимой эффективности достаточно, чтобы полностью отделились частицы размером $d_{мин}$ из половины ширины входного сечения, т. е. все значения R должны быть в интервале

$$R_{50\%}=\frac{R_2+R_1}{2}<R<R_2.$$

Учитывая, что в данном случае размер улавливаемых частиц заведомо очень мал, воспользуемся для оценки формулой (I.29), из которой следует

$$\tau=\frac{R_{50\%}^2-R_1^2}{2k\varphi}.$$

Приняв распределение скоростей в сечении канала согласно формуле (I.4), в результате вычислений получаем $\tau=4{,}5\cdot 10^{-4}$ с или $d_{мин}=7$ мкм.

Присоединительные фланцы фильтров производительностью 20, 40, 60, 80 и 120 тыс. м³/ч по своим размерам в точности совпадают с фланцами секций кондиционеров Кд* (табл. II.8).

ТАБЛИЦА II 8

Основные габаритные и присоединительные размеры, мм, фильтров типа ФШ

Марка фильтра	H	H_1	B	B_1
Ф2Ш1	2400	1344	2325	1580
Ф4Ш2	2880	1844	2916	2090
Ф6Ш3	3660	2625	3433	2625
Ф8Ш4	3660	2625	3950	3125
Ф12Ш5	5033	4000	3950	3125

Аэродинамическая характеристика фильтров типа ФШ показана на рис. II.3.

Режим передвижения шторок прерывистый, с паузами, средняя скорость передвижения 0,76 см/с. Продолжительность пауз составляет 12,5 мин, что достаточно для стока излишков масла. Ванна фильтра снабжена сифонным устройством для удаления скопляющейся в ней воды.

* На рис. II.11 условно показан фильтр, состоящий из двух секций

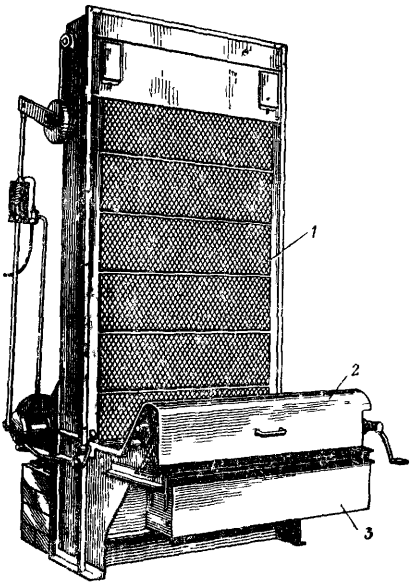


Рис II 12 Самоочищающийся шторчатый фильтр фирмы «Конкордия» с механическим шламоудалением

1 — шторка, *2* — укрытие над поперечным скребковым транспортером шламоудаления *3* — шламоприемник

Шарнирно-шторчатые фильтры имеют ряд преимуществ перед фильтрами с сетчатыми панелями: фильтрующие панели достаточно жестки и прочны; пластинки, образующие фильтрующий слой, значительно лучше сеток отмываются от пыли; масло стекает быстрее и поэтому его вынос за пределы фильтра происходит в гораздо меньшей степени; механизированное удаление шлама непосредственно в процессе работы фильтров без замены каждый раз всего масла облегчает их эксплуатацию. Конструкцию шторок можно менять, воздействуя таким образом на эффективность фильтров без изменения их основной конструкции.

Самоочищающиеся шторчатые фильтры фирм «Дельбаг» и «Конкордия» (ФРГ). В этих фильтрах шторки выполнены в виде металлических рамок коробчатой формы. Рамки заполнены штампованными просечными пластинками, образующими лабиринтообразную структуру. Для лучшей промывки и стока масла верхняя и нижняя стенки рамок имеют отверстия. Вращение от редуктора, расположенного внизу, передается при помощи длинной штанги и храпового механизма на промежуточную ось, а с нее — цепными передачами на верхние звездочки цепей шторок (рис. II.12). Движение имеет прерывистый характер.

Удаление шлама производится при помощи скребкового механизма с длинными продольными скребками. Механизм может иметь как ручной, так и механический привод.

3. ВОЛОКНИСТЫЕ ВОЗДУШНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Общие сведения

К волокнистым фильтрам относится большая группа фильтров различной конструкции, снаряжаемых неткаными волокнистыми фильтрующими слоями. Развитие технологии нетканого производства различных текстильных изделий позволило получать во-

локнистые слои машинной выработки в виде матов, обладающие необходимой однородностью и прочностью.

Объемные нетканые фильтрующие материалы могут быть изготовлены из нескольких тонких слоев штапельного (короткого) волокна, получаемых на чесальных машинах текстильного производства. Слои склеивают связующими веществами типа латекса, поливинилацетатной смолы и т. п. Связующее наносят на поверхности отдельных слоев с помощью пульверизаторов, после чего слои накладывают друг на друга и обрабатывают в сушильных камерах, где связующее полимеризуется, скрепляя между собой как слои, так и волокна в слоях.

Синтетические волокна могут быть также связаны в прочный слой в процессе их изготовления.

В других случаях волокнистые слои пропитывают эмульсиями связующих веществ, а затем подвергают термической обработке. Такие нетканые материалы называют клеевыми.

Действие склеивающих смол может быть заменено или усилено механическим связыванием волокон с помощью специальных игл (иглопробивные материалы). Недостатком таких фильтрующих материалов иногда является повышенный проскок пылевых частиц через каналы, образованные иглами.

Объемные фильтрующие материалы могут быть изготовлены также из длинного волокна путем его специальной укладки, пропитки связующим веществом и последующей вытяжки получаемого слоя. Такие материалы характеризуются волнистой структурой и упругостью. Толщина материалов может достигать 100 мм.

Волокнистые слои могут иметь различную структуру — от очень плотной структуры типа бумаги или картона и до едва связанной структуры типа ваты или ватина. Эффективность волокнисых слоев также варьирует в очень широких пределах — от «абсолютной», т. е. обеспечивающей практически полное улавливание частиц всех размеров, до эффективности, соответствующей III классу фильтров. Повышение эффективности достигается утонением применяемых волокон и более плотной их укладкой. Сопротивление волокнистого слоя, как правило, увеличивается с повышением его эффективности.

В конструктивном отношении волокнистые фильтры подразделяются на две группы: ячейковые и рулонные.

Ячейковые волокнистые фильтры бывают плоские, карманные и складчатые. Плоские фильтры заполняются рыхлыми волокнистыми материалами толщиной 25—50 мм. В карманных фильтрах применяются материалы с повышенным сопротивлением и, соответственно, с повышенной эффективностью, а в складчатых фильтрах — еще более плотные материалы, которые укладываются в фильтр так, что образуют складки, позволяющие максимально развить фильтрующую поверхность.

Рулонные волокнистые фильтры также бывают плоские и складчатые.

Как правило, фильтрующий материал после использования выбрасывают, однако имеются материалы, которые можно использовать повторно после очистки их путем отряхивания, промывки, продувки или пылесосом.

Волокнистые фильтры значительно менее пылеемки, чем масляные, однако их применение позволяет избежать трудоемких и грязных операций, связанных с эксплуатацией и регенерацией масляных фильтров. Отчасти по этой причине масляные фильтры вытесняются равноценными им по эффективности волокнистыми фильтрами III класса.

Ячейковые волокнистые фильтры

Плоские фильтры

Плоские ячейковые волокнистые фильтры по конструкции не отличаются от масляных, а их технические показатели определяются свойствами фильтрующего материала. Характеристики нескольких видов материала типа Виледон, весьма распространенного нетканого фильтрующего материала, приведены на рис. II.3 и II.4. Образцы различались по толщине волокон и слоя, эффективности и пылеемкости. Такие фильтры легко регенерируются промывкой водой из шланга с наконечником, просто под водопроводным краном, в тазу с мыльной водой и т. п. или очисткой пылесосом, что делает их особенно удобными в установках бытового назначения.

Объемный нетканый фильтрующий материал, изготовленный по технологии ЦНИИШерсти, сформирован из смеси натуральной свиной щетины и полипропиленового медно-аммиачного или полихлоридного волокна. Толстая и упругая щетина, укладываемая в количестве до 25—35%, создает упругий каркас, который заполняется более тонким химическим волокном.

Фильтры могут снаряжаться также фильтрующим материалом типа ФСВУ (ТУ 21-01-369-70), который изготовляется из тянутого стеклянного волокна Ивотским стекольным заводом. В процессе выработки слой приобретает большую упругость, вследствие чего может транспортироваться и храниться в сжатом состоянии. Материал, выпускаемый шириной до 1150 мм и толщиной 50 мм, слегка промасливается. Содержание масла составляет до 10% массы волокна. Масса 1 м^2 материала 300—350 г. Плотность 8 кг/м^3. Прочность на разрыв полоски материала шириной 100 мм не меньше 7 кгс.

В отличие от известных ранее стекловолокнистых фильтрующих материалов, изготовлявшихся из дутьевого волокна, очень хрупких и способных в процессе эксплуатации загрязнять воздух игольчатой стеклянной пылью, материал ФСВУ прочен.

Он обладает небольшим начальным сопротивлением и удовлетворительной эффективностью — около 80% при испытании в эксплуатационных условиях центра Москвы, что несколько выше эффективности описанных ранее масляных фильтров. Если сравнивать фильтры по количеству пропускаемой ими пыли ($1—E$), то окажется, что материал ФСВУ примерно на 25% эффективнее заполнения фильтров ФяР. В соответствии с толщиной волокна материала ФСВУ и его более плотной укладкой следовало ожидать еще большей разницы в эффективности[1]; возможно, что здесь сказывается плохое смачивание маслом волокон, покрытых слоем полимера. После использования материал должен быть заменен новым.

В некоторых случаях полотнища материала развешивают в рабочем сечении на штырях, укрепляемых в верхней части проема. В этом случае для удержания в нужном положении материала, прогибающегося под давлением воздушного потока, следует предусматривать опорную решетку. Стекловолокнистые фильтры могут также встраиваться в строительные конструкции здания, например в подшивной потолок при подаче воздуха через него в помещение окрасочных камер.

Карманные фильтры

В тех случаях, когда предъявляются особые требования к компактности фильтра, либо при малой величине располагаемого давления удобно пользоваться фильтрами карманного типа.

На рис. II.13 показан фильтр Дрий-Пак фирмы «ААФ». Карманы этого фильтра имеют глубину около 400 мм. Для предотвращения смыкания карманов, раздувающихся под давлением воздуха, их прошивают металлическими скрепками, образующими несколько рукавов. Карманы крепятся на клею к лицевой панели площадью примерно 0,5 м². Этот фильтр может быть отнесен ко II классу эффективности.

Фирма «Дельбаг» выпускает карманные фильтры, соответствующие I и II классу эффективности.

Карманные фильтры применяются самостоятельно, а также в комплекте с рулонными волокнистыми или электрическими фильтрами.

Складчатые фильтры

Фильтры типа ЛАИК[2]. Эти фильтры (рис. II.14) обладают практически 100%-ной эффективностью улавливания пыли лю

[1] Согласно табл. I.1, минимальный диаметр улавливаемых частиц для волокон толщиной 30 мкм составляет 0,3—0,4 мкм, т. е. в 4—5 раз меньше чем для проволоки, применяемой в масляных фильтрах ФяР.

[2] Лаборатория аэрозолей Физико-химического института им. Л. Я. Карпова.

бой дисперсности, а также микроорганизмов, вследствие чего они называются также абсолютными фильтрами. Проскок частиц через фильтры типа ЛАИК не превышает 0,01—0,03%, причем главным образом проскакивают частицы размером 0,1—0,3 мкм.

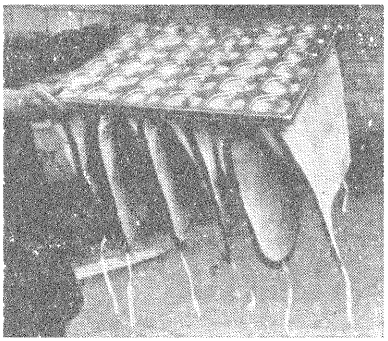


Рис II 13 Карманный ячейковый фильтр Дрий-Пак

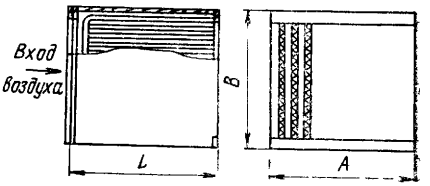


Рис II 14 Фильтр типа ЛАИК

Фильтры составлены из деревянных П-образных рамок, между которыми уложен слоями фильтрующий волокнистый материал типа ФП (ткань акад. И. В. Петрянова). Для предупреждения слипания ткани между слоями проложены гофрированные сепараторы. Характеристика фильтров, применяемых в системах вентиляции, дана в табл. II.9.

ТАБЛИЦА II.9

Технические показатели фильтров типа ЛАИК

Марка фильтра	Фильтрующая поверхность, м²	Пропускная способность, м³/ч	Сопротивление, кгс/м²	Габаритные размеры, мм	
		при нагрузке 150 м³/ч м²		входное сечение $A \times B$	длина L
Д-2,8	2,76	420	14—19	296×318	370
Д-6	6,1	900	14—19	320×636	370
Д-9	9	1350	20—25	320×636	520
Д-15	15,1	2260	41—48	355×636	750
Д-16	15,6	2340	20—25	590×636	470
Д-26	26,3	3960	41—48	590×636	750
ЛАИК СП-3/15	15,1	2250	18	565×735	780
ЛАИК СП-6/15	15,1	2250	24	565×735	780
ЛАИК СП-3/17	17,5	2550	15	615×995	355
ЛАИК СП-6/17	17,5	2550	21	615×995	355
ЛАИК СП-3/21	21	3150	29	650×690	625
ЛАИК СП-6/21	21	3150	34	650×690	625
ЛАИК СП-3/26	26	3950	40	660×665	750
ЛАИК СП-6/26	26	3950	46	660×665	750
ЛАИК СЯ (ФяЛ1)	16	2400	13	550×680	310

Примечание Буквой Д обозначаются фильтры с деревянным каркасом предприятий объединения «Изотоп», буквами ЛАИК СП — фильтры Одесского завода ЭМА (цифры в числителе обозначат начальное сопротивление при нагрузке 36 м³/ч м², цифры в знаменателе — рабочую поверхность), буквами ЛАИК СЯ — фильтры Серпуховского механического завода (см далее фильтры ФяЛ)

Материал типа ФП представляет собой слой ультратонкого (1,4—3,2 мкм) химического волокна на марлевой подложке. В вентиляционной технике, как правило, используется материал ФПП-15-1,7 (ТУД2ТУ-171-58). В случаях, когда в воздухе могут содержаться аэрозоли масел, а также при повышенной температуре воздуха рекомендуется применять материал ФПА-15-2,0 (ТУД2ТУ-180-58). Имеются также другие сорта материала ФП, отличающиеся толщиной волокна, сопротивлением и т. п.

В процессе выработки материал ФПП приобретает электрический заряд, что способствует более эффективной очистке воздуха, особенно сухого. При очистке влажного воздуха или при хранении материалов в условиях повышенной влажности заряд быстро стекает [71].

Основные технические показатели наиболее распространенных материалов типа ФП приведены в табл. II.10.

ТАБЛИЦА II.10

Технические показатели фильтрующих материалов типа ФП

Показатели	ФПП-15-1,7	ФПА-15-2,0
Толщина волокон, мкм	1,5	1,5
Материал волокна	Перхлорвинил	Ацетилцеллюлоза
Сопротивление при воздушной нагрузке 36 м³/ч·м² (скорости фильтрации 1 см/с), кгс/м²	1,5—1,9	2±0,2
Максимальная допускаемая температура очищаемого воздуха, °С	60	150
Химическая стойкость по отношению к кислотам и щелочам	Стоек	Нестоек
Стойкость по отношению к маслам и органическим растворителям (типа пластификаторов, хлорированных углеводородов и др.)	Нестоек	Стоек
Отношение к влаге	Гидрофобный	Гидрофильный

Примечание. При удельной воздушной нагрузке, превышающей 36 м³/ч·м², указанное сопротивление материалов нужно увеличивать прямо пропорционально увеличению нагрузки.

Кроме материалов, указанных в табл. II.10, выпускаются другие материалы с большими сопротивлением и эффективностью.

Фильтрующий материал пригоден только для однократного использования. По достижении предельного сопротивления фильтры ЛАИК заменяют целиком.

Фильтры типа ФяЛ. Эти фильтры отличаются от других фильтров типа ЛАИК возможностью неограниченного повторного использования основных элементов их конструкции. Замена фильтрующего материала производится периодически при достижении установленной проектом величины сопротивления фильтра.

Ячейка фильтра состоит из двух взаимозаменяемых боковых стенок и двух крышек, набора П-образных рамок и гофрированных сепараторов, закладываемых между слоями фильтрующего материала для предотвращения их слипания (рис. II.15).

Боковые стенки имеют штампованные направляющие пазы, а П-образные рамки — фиксирующие выступы, размещаемые при сборке фильтра в направляющих пазах боковых стенок.

Технические показатели фильтров типа ФяЛ

Пропускная способность при воздушной нагрузке 125 м³/ч·м², м³/ч	2000
Суммарная поверхность фильтрующего материала, м²	16
Площадь лобового сечения, м²	0,33
Эффективность, %	100
Пылеемкость при увеличении сопротивления в 2 раза, г на 1 м² лобового сечения	430
Начальное сопротивление, кгс/м²	9—10
Масса, кг	42,7

При весовой эффективности фильтра, практически равной 100%, пылеемкость его невелика — всего около 10 г на 1 м² фильтрующего материала при увеличении сопротивления вдвое против начального.

Фильтры поставляются в собранном виде, снаряженные фильтрующим материалом. Повторная сборка и снаряжение фильтров в процессе их эксплуатации производятся непосредственно потребителем. Для сборки фильтров применяют специальное приспособление ИП9, имеющее вид пресса. Приспособление состоит из двух основных узлов: плиты, на поверхности которой с ребрами, препятствующими смещению фильтра во время его сборки, укреплены вертикальные стойки с резьбой для навертывания упорных гаек, и горизонтальной жесткой штанги с двумя винтовыми прижимами.

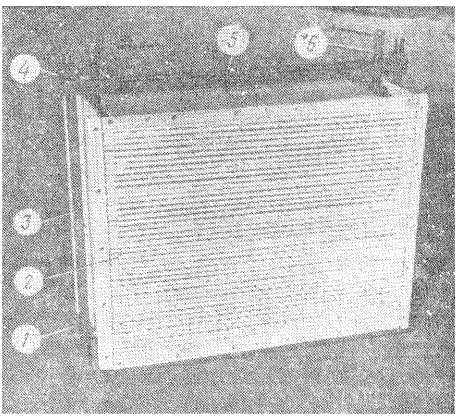


Рис. II.15. Ячейковый фильтр типа ФяЛ с приспособлением для сборки и разборки

1 — плита; *2* — фильтр; *3* — стойка; *4* — упорная гайка; *5* — штанга; *6* — винтовой прижим

Собранные фильтры монтируют в камеру с помощью установочных рам, которые могут компоноваться в плоские панели на производительность до 120 тыс. м³/ч (табл. II.11).

При установке ячеек в панели фильтрующий слой в фильтрах должен быть обращен к потоку воздуха ворсистой стороной.

Возможна также установка фильтров с вертикальным расположением фильтрующего слоя.

При использовании фильтров в качестве секций кондиционеров Кд удобнее пользоваться фильтр-камерами (рис. II.16). Для присоединения к другим секциям кондиционеров фильтр-камеры имеют фланцы соответствующих размеров (табл. II.12).

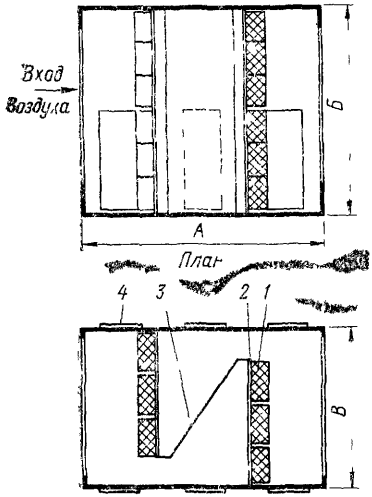


Рис. II.16. Схема фильтр-камер для монтажа фильтров в установках кондиционеров типа Кд

1 — фильтр; *2* — установочная рама; *3* — перемычка; *4* — дверка

ТАБЛИЦА II.11

Технические показатели плоских панелей для фильтров типа ФяЛ

Пропускная способность панели, тыс. м³/ч	Габаритные размеры, мм		Число фильтров
	ширина	высота	
20	3280	1820	12
30	2400	3640	18
40	3280	3640	24
60	4800	3640	36
80	6440	3640	48
120	4800	7280	72

ТАБЛИЦА II.12

Технические показатели фильтр-камер для фильтров типа ФяЛ

Типоразмеры	Пропускная способность камеры, тыс. м³/ч	Габаритные размеры, мм			Число фильтров	Число установочных рам Фр46А
		А	*Б*	*В*		
Фр51ПЗ	10	3000	2000	850	6	2
Фр52ПЗ	20	4000	2000	1610	12	4
Фр53ПЗ	40	4000	3046	2120	24	8
Фр54ПЗ	60	4000	3400	2661	36	12
Фр55ПЗ	80	5000	4000	3161	48	16
Фр56ПЗ	120	6000	6000	3161	72	24

В камерах монтируются установочные рамы для фильтров и перемычки, обеспечивающие одинаковую воздушную нагрузку на фильтры.

Фильтры Омикрон. Фильтр Омикрон одноразового использования фирмы «АКИ», показанный на рис. II.17, сходен по уст-

ройству и техническим показателям с фильтрами типа ЛАИК. Так же, как аналогичные фильтры фирм «ААФ» (Сабмикрон), «Дельбаг» и многих других он снаряжается фильтрующим материалом, изготовляемым на основе ультратонкого стекловолокна.

Рулонные волокнистые фильтры

Рулонные фильтры типа ФРУ. Применение рулонных фильтров значительно облегчает эксплуатацию воздухоочистных устройств, вследствие чего они получили широкое распространение.

На рис II.18 показан один из рулонных фильтров типа ФРУ производства Симферопольского машиностроительного завода. В верхней и нижней части каркаса фильтра установлены катушки. Концы намотанных на верхние катушки полотнищ стекловолокнистого фильтрующего материала пропускаются через щели в каркасе и закрепляются на нижних катушках По мере загрязнения пылью, уловленной из потока воздуха, протекающего через фильтр, материал перематывают с верхней катушки на нижнюю

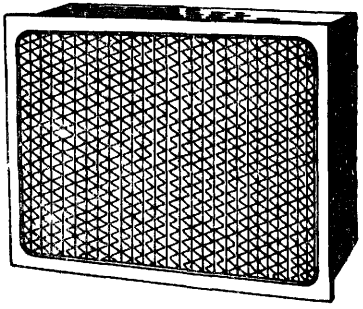


Рис II 17 Фильтр Омикрон

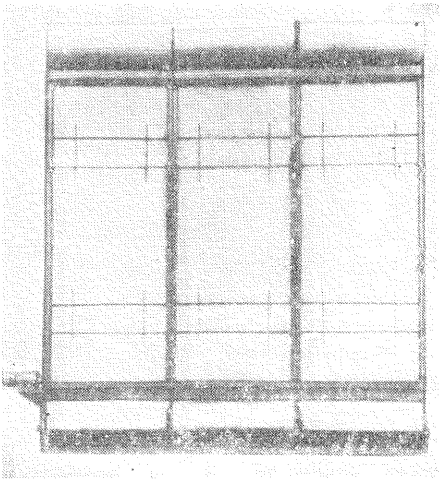


Рис II 18 Рулонный волокнистый фильтр типа ФРУ

На одном каркасе фильтра устанавливается несколько катушек с рулонным фильтрующим материалом Это позволяет иметь широкую номенклатуру типоразмеров фильтров при ограниченном числе размеров материала по ширине и дает возможность комплектовать фильтровальную установку из агрегатов большой пропускной способности Катушки вынесены за пределы рабочего сечения фильтра, что разгружает это сечение и позволяет обеспечить более равномерное распределение воздуха по поверхности фильтрующего материала

ТАБЛИЦА II.13

Технические показатели фильтров типа ФРУ

Показатели	Ф12РУ1	Ф8РУ2	Ф6РУ6	Ф4РУ4	Ф2РУ7
Номинальная пропускная способность, тыс. м³/ч	120	80	60	40	20
Площадь рабочего сечения (округлено), м²	12	8	6	4	2
Число секций шириной, мм:					
1050	3	3	1	2	—
800	—	—	2	—	2
Ширина фильтрующего материала, мм	1020	1020	1020; 770	1020	770
Число катушек	6	6	6	4	4
Масса, кг	970	717	523	408	353

В зависимости от пропускной способности фильтры собираются из двух или трех унифицированных секций шириной 1050 и 800 мм (табл. II.13 и рис. II.19).

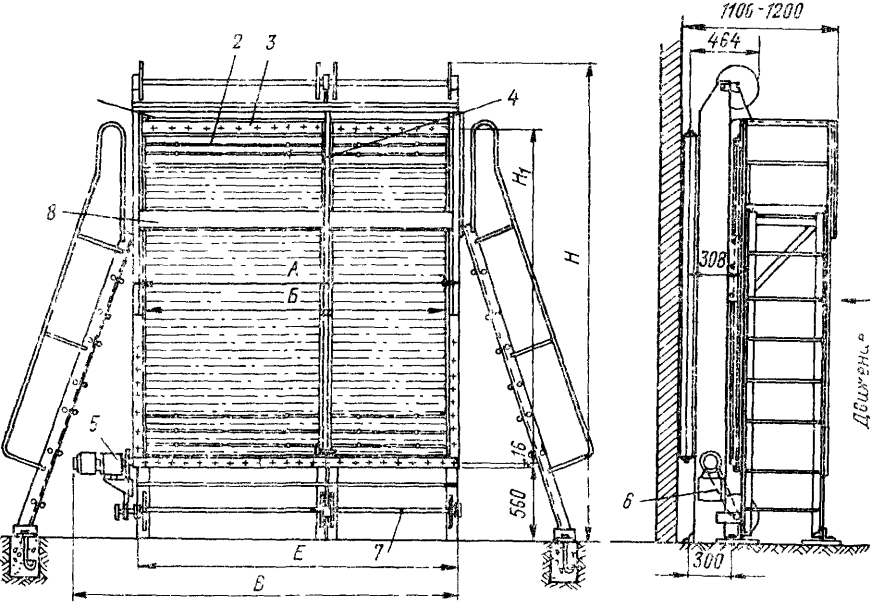


Рис. II.19. Установка фильтра типа ФРУ в вентиляционной камере

Каждая секция фильтра состоит из сварного корпуса *1* с размещенной внутри него подвижной решеткой *2*, выполненной из двух бесконечных роликовых цепей, в ушках которых закреплены поперечные проволочные рамки. Края рамок опираются на уголки, приваренные к боковым стенкам корпуса секции. Под-

вижная решетка натянута между нижним и верхним валами. Нижний вал секции ведущий, он установлен в подшипниках. Верхний вал натяжной и может перемещаться в вертикальной плоскости при помощи специальных натяжных винтов. Нижние звездочки цепей подвижных решеток соединены с валом при помощи шпонок, а верхние звездочки свободно прокручиваются на валу.

Секции фильтра соединяются между собой при помощи стяжек, пропущенных через отверстия соприкасающихся стенок и горизонтальных уголков присоединительных фланцев *3*. Зазоры между секциями уплотняются резиновой прошвой *4* или деревянными брусьями.

На одной из секций на кронштейне установлен редукторный электропривод *5* мощностью 0,27 квт, обеспечивающий перемещение подвижных решеток и вращение нижних катушек фильтра с помощью цепи *6*.

Катушка *7* фильтра представляет собой трубчатую металлическую ось с двумя круглыми ребордами. Для закрепления на оси катушки полотнища фильтрующего материала имеется скоба, прокалывающая полотнище в первом витке.

Для обслуживания устраивают рабочую площадку *8* с лестницей (с одной стороны площадки). Полотнища, образующие сплошную поверхность фильтрующего материала, опираются своими кромками на неподвижные направляющие уголки.

В фильтрах используется фильтрующий материал типа ФСВУ. Длина каждого полотнища 15—25 м. Фильтрующий материал поддерживается подвижными решетками, что предотвращает его прогиб, нарушение в нем структуры и его разрыв под давлением воздуха. Решетки исключают возникновение растягивающих усилий в материале при перемотке его вниз.

Плотность намотки материала на катушки регулируется фрикционом, синхронизирующим скорости перемещения решеток и материала. Скорость перемещения материала при перемотке составляет около 50 см/мин.

Привод фильтра включается вручную по показаниям микроманометра или при помощи системы автоматического управления.

Автоматизация включения и выключения механизма перемотки достигается путем применения двух мембранных датчиков перепада давления типа ДПН-100 или СПД-II.

Следует учитывать, что при пологой характеристике вентилятора даже небольшое увеличение сопротивления фильтра вследствие его загрязнения может привести к недопустимому уменьшению его производительности. В таких случаях от применения

описанной схемы автоматики следует отказаться, устанавливая режим перемотки по результатам эксплуатации.

Рулонные фильтры ФРУ могут снаряжаться и другими фильтрующими материалами, например из синтетического волокна, губчатыми и т. д.

Присоединительные размеры фильтров приняты по кондиционерам типа Кд (табл. II.14).

ТАБЛИЦА II 14

Основные присоединительные и габаритные размеры, мм, фильтров типа ФРУ (см. рис. II.19) и типа ФРП (см. рис. II.20)

Марка фильтра	*А*	*Б*	*В*	*Е*	*Н*	H_1
Ф12РУ1 и Ф12РП1	3160	3072	3595	3152	5090	4000
Ф8РУ2 и Ф8РП2 .	3160	3072	3595	3152	3700	2625
Ф6РУ6 и Ф6РП6 .	2660	2572	3095	2652	3700	2625
Ф4РУ4 и Ф4РП4 .	2120	2021	2545	2101	2930	1844
Ф2РУ7 и Ф2РП7 .	1609	1521	2044	1601	2433	1344

Для возможности нормального обслуживания фильтров, установленных в кондиционерах, разработаны специальные переходные камеры с люком для доступа к нижним катушкам.

При установке фильтра в вентиляционных камерах его крепят непосредственно к обрамлению проема в перегородке.

Сопротивление фильтрующего материала ФСВУ в зависимости от воздушной нагрузки может приниматься по графику на рис. II.3. Графиком можно пользоваться для определения сопротивления фильтра в целом.

Номинальные пропускные способности фильтров, указанные в табл. II.13, следует считать условными. Как правило, верхний предел располагаемого давления системы, которое может расходоваться на преодоление сопротивления фильтров, ограничен. Вследствие этого для лучшего использования способности материала накапливать в себе пыль при проектировании следует выбирать воздушные нагрузки меньше 10 тыс. $м^3/ч \cdot м^2$, желательно не более 8 тыс. $м^3/ч \cdot м^2$. Это позволит лучше использовать пылеемкость материала и сократить его расход, тем самым удешевляя эксплуатацию систем.

Эффективность фильтра остается практически постоянной во все время использования материала. При очень большом перенасыщении материала пылью, когда его сопротивление достигает 70—100 $кгс/м^2$, может происходить продавливание и осыпание уловленной пыли. В этих условиях эффективность фильтров снижается, поэтому доводить сопротивление фильтра до слишком больших величин не рекомендуется.

В процессе заправки фильтрующего материала, а иногда при его перемотке (если материал имеет недостаточно высокое ка-

чество или механические повреждения) возможен срыв фрагментов материала или отдельных волокон. Для предупреждения их выноса в вентилируемые помещения рекомендуется устанавливать в пределах камеры или в магистральных воздуховодах предохранительные сетки с размером ячеек 1—2 мм*.

Рулонные фильтры типа ФРП. Эти фильтры предназначаются главным образом для очистки воздуха от волокнистой пыли на предприятиях текстильной промышленности. В них предусмотрена возможность частичной регенерации фильтрующего материала.

По устройству фильтры типа ФРП (рис. II.20), выпускаемые Серпуховским механическим заводом, идентичны фильтрам типа ФРУ. Их особенностью является наличие системы пневматической регенерации фильтрующего нетканого материала. Система состоит из щелевого пневматического пылеподборника *5*, выполненного в виде короба, расположенного над нижними катушками за пределами живого сечения фильтра. К коробу присоединен вертикальный воздуховод *4*, имеющий фланец для присоединения к системе отсоса. По мере загрязнения материал перематывается с верхних катушек на нижние, очищаясь при этом от пыли, и затем может быть использован вторично. Перемотка материала производится при достижении им величины сопротивления, устанавливаемой потребителем исходя из располагаемого давления вентиляционной системы. Система пневматической регенерации обеспечивает шести-семикратное использование материала. Она может либо обслуживаться специально установленным вентилятором, либо присоединяться к централизованной системе пневмоуборки.

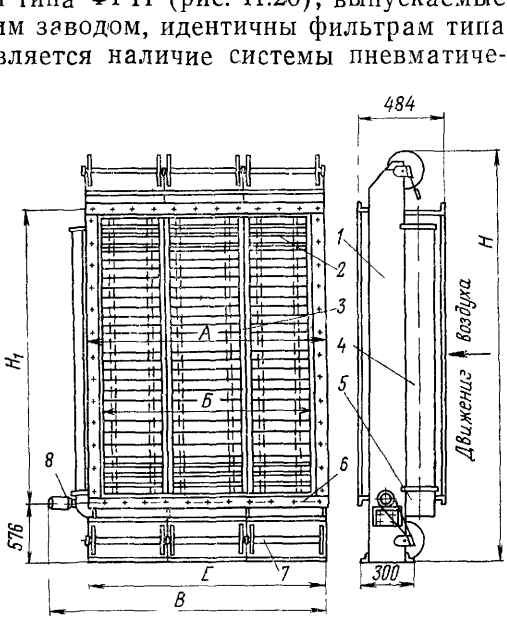


Рис. II.20 Фильтр типа ФРП

1 — фильтр; *2* — подвижная решетка; *3* — прошива; *4* — воздуховод; *5* — щелевой пылеподборник; *6* — фланец; *7* — катушка; *8* — привод

В фильтрах используются маты нетканого фильтрующего ма-

---

* Вынос фрагментов наблюдается также в фильтрах типа Ролл-о-матик [109].

ТАБЛИЦА II.15

Технические показатели фильтров типа ФРП

Показатели	Ф12РП1	Ф8РП2	Ф6РП6	Ф4РП4	Ф2РП7
Пропускная способность, тыс. м³/ч	120	80	60	40	20
Число секций шириной, мм:					
1050	3	3	1	2	—
800	—	—	2	—	2
Площадь рабочего сечения (округленно), м²	12	8	6	4	2
Ширина фильтрующего материала, мм	1015	1015	1015; 764	1015	764
Число катушек	6	6	6	4	4
Масса, кг	970	717	623	408	353
Необходимый расход воздуха на пневмоочистку, м³/ч	1500	1500	1200	1000	800

териала типа ФВН производства Моршанской суконной фабрики длиной 100 м. Фильтрующий материал представляет собой слой из смеси натуральных и синтетических волокон толщиной 0,6 мм, связанных в процессе изготовления специальными склеивающими веществами (ТУ РСФСР 17-2803-69).

Фильтры типа ФРП (табл. II.15) устанавливаются в кондиционерах так же, как и фильтры типа ФРУ (см. табл. II.14). При использовании материала типа ФВН такая установка целесообразна только в случаях, когда кондиционер эксплуатируется с нагрузкой, значительно меньшей номинальной.

Начальное сопротивление фильтров определяется по графику на рис. II.3 в зависимости от принятой воздушной нагрузки. Следует учитывать, что при регенерации фильтрующего материала типа ФВН в процессе перемотки его начальное сопротивление восстанавливается неполностью. Прирост сопротивления после каждой регенерации можно принимать в среднем равным 30% начального. Суммарная пылеемкость материала в условиях прядильных цехов составляет около 1000 г/м².

Для эффективной очистки материала разрежение в отсасывающей щели должно быть не менее 300 кгс/м².

Механизм перемотки материала включается по показаниям микроманометра вручную. Сигнал о необходимости проведения перемотки фильтрующего материала может подаваться в диспетчерскую с помощью приборов СПД-2 (сигнализатор падения давления) или ДПН-100.

Фильтрующий материал должен быть заменен, когда сопротивление его после регенерации не снижается, что может сказаться на производительности кондиционера, а также в случае его разрушения.

Рулонные фильтры типа ФРП могут быть снаряжены и другими фильтрующими материалами, например капроновыми сетками.

Рулонные фильтры типа Ролл-о-матик. Фирма «ААФ» (США)

выпускает рулонные фильтры типа Ролл-о-матик, получившие распространение во многих странах. Конструкция фильтра показана на рис. II.21. В отличие от фильтров типа ФРУ здесь катушки *1* установлены непосредственно в сечении фильтра. Для предотвращения загрязнения чистого фильтрующего материала пылью, содержащейся в омывающем катушку воздушном потоке, верхняя катушка укрыта съемным кожухом *2* обтекаемой формы. С фронта фильтра материал поддерживается легкой трубчатой направляющей решеткой *3*, вертикальными направляющими *4* и горизонтальной планкой *5*. Механический привод фильтра *6* установлен в нижней части каркаса. Сбоку на каркасе фильтра в ящике *7* установлены приборы управления фильтра. Автоматизация управления механизмом перемотки осуществляется по перепаду давления с помощью контактного микроманометра.

Рулонные фильтры типа ЛФР. Фирма «Свенск Флактфабрикен» (Швеция) выпускает рулонные фильтры типа ЛФР. В данном случае полотнище фильтрующего материала образует складки, что позволяет развить поверхность фильтрации и снизить сопротивление. С этой целью фильтрующий материал огибает серию валиков, которые приводятся в движение посредством цепи от приводного механизма. Конец полотнища закреплен на нижней катушке, приводимой в движение от того же привода. Вспо-

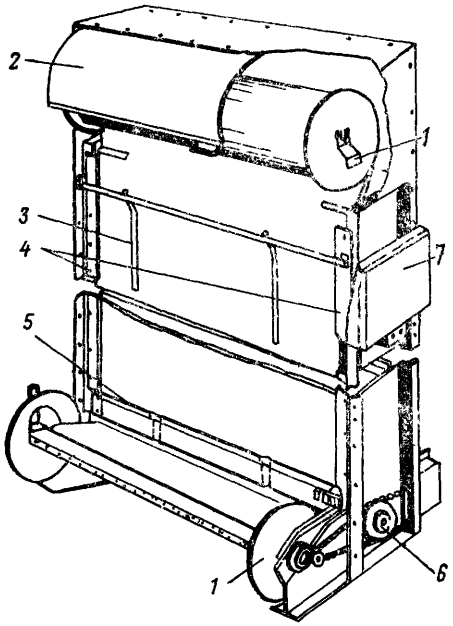


Рис. II.21. Рулонный фильтр типа Ролл-о-матик

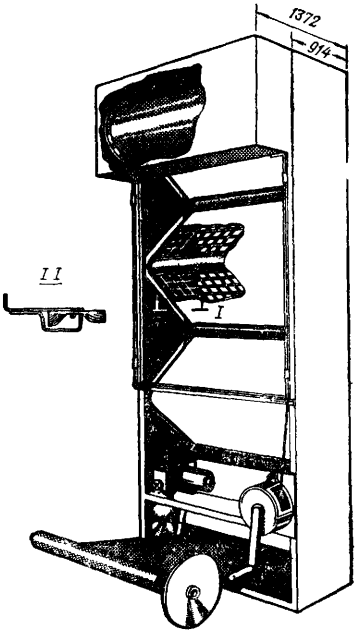


Рис II 22 Рулонный фильтр Ауто-Ви

могательные валики имеют облегченную корзиночную конструкцию, что улучшает их сцепление с рыхлым и упругим фильтрующим материалом.

Рулонные фильтры Ауто-Ви. Фирма «Воукс» (Англия) выпускает рулонные фильтры, общий вид которых показан на рис. II.22. В данном случае поверхность фильтрующего материала также увеличена, что позволяет несколько уменьшить сопротивление. С этой целью фильтрующий материал, обладающий надлежащей прочностью, огибает несколько промежуточных валов, нижний из которых приводится во вращение с помощью электродвигателя или вручную.

Существует ряд других модификаций рулонных фильтров

4. ГУБЧАТЫЕ ВОЗДУШНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Общие сведения

Губчатые фильтры снаряжаются фильтрующими слоями губчатой структуры из полимерных материалов, которые в последние годы в больших количествах и в разнообразном ассортименте начала выпускать химическая промышленность.

Наибольшее распространение в качестве фильтрующего материала получил пенополиуретан (ППУ). Для изготовления фильтрующего материала применяют среднепористый ППУ по МРТУ 6-05-1150-68. ППУ выпускается кусками размером 2000×1000×400 мм. Куски разрезаются на слои разной толщины. Плотность ППУ от 35 до 55 кг/м^3; предел прочности на разрыв — не менее 1 кгс/см^2. Он устойчив к воздействию смазочных масел и бензина, негигроскопичен.

Поры ППУ образованы тонкими упругими перегородками, поэтому его сопротивление при воздушных нагрузках, применяемых в практике очистки воздуха, очень велико (см. рис. II.3)

Для возможности использования ППУ в воздушных фильтрах его подвергают специальной обработке, направленной на разрушение перегородок, образующих поры. Для этого материал погружают в 20%-ный раствор едкого натра. Погружение материала в раствор должно сочетаться с его механической обработкой, способствующей заполнению пор раствором и разрушению их перегородок. Механическая обработка заключается в многократном обжатии ППУ в установке Фр50М с помощью двух обжимающих валков, вращающихся навстречу друг другу. Валки погружены в ванну, заполненную раствором щелочи. Очень важно чтобы обжатый материал, совершающий в ванне возвратно-поступательное движение, также был погружен в раствор. В противном случае поры могут заполняться воздухом, и щелочь не сможет проникнуть в них.

Для получения хорошей повторяемости результатов обработки необходимо соблюдать определенный режим обработки Удобно принять за единицу технологического режима цикл включающий в себя 20 обжимов и выдержку в течение 30 мин

При температуре более 30°С наряду с перегородками интенсивно разрушается и основная структура скелета ППУ. Механические показатели такого материала — прочность и упругость — значительно снижаются. Растворение щелочи происходит с выделением тепла. В дальнейшем раствор охлаждается. Для поддержания постоянной температуры раствора ванна оборудована подогревателем.

Получаемый в результате такой обработки материал по внешнему виду очень напоминает волокнистый, но отличается исключительно однородной структурой. Толщина нитевидных элементов материала около 50 мкм, расстояние между ними при обработке среднепористого ППУ примерно 300 мкм.

Воспринимая наибольшую пылевую нагрузку, начальный участок фильтрующего материала быстро насыщается пылевыми частицами и из-за его возрастающего сопротивления уменьшается срок использования всего фильтра до регенерации.

Для выявления оптимальной толщины фильтрующего материала было исследовано распределение осаждающейся пыли в фильтре, собранном из пяти слоев ППУ толщиной по 10 мм каждый. Результаты испытания приведены на рис. II.5, из которого видно, что примерно 90% общей массы уловленной пыли было задержано в первых нескольких миллиметрах толщины фильтрующего слоя.

Как основной вариант фильтрующего материала для очистки воздуха от пыли выбран слой ППУ толщиной 20—25 мм, обработанный за шесть циклов

Регенерация фильтров производится путем промывки их в воде. Желательно применять теплую воду и еще лучше промывать фильтры с мылом, однако в этом случае механическая прочность фильтров с течением времени несколько ухудшается. Удалять осевшую пыль можно также пылесосом. Свойства материала после регенерации практически остаются неизменными.

Конструкции губчатых фильтров

Ячейковые губчатые фильтры

Фильтрующий материал из модифицированного ППУ можно применять для снаряжения фильтров плоской, складчатой и другой конструкции. Впервые такой материал был использован в виде слоя толщиной 10—15 мм в электрическом фильтре, установленном в системе воздушного отопления жилого здания, для предупреждения уноса частиц, срывающихся с осадительных электродов[1]. Фильтр успешно эксплуатируется на протяжении ряда лет.

В 1965 г. фильтры с фильтрующим материалом из модифицированного ППУ слоем толщиной 20 мм были установлены в системах воздушного отопления нескольких жилых зданий Москвы.

[1] Подробнее о противоуносных фильтрах см. далее.

Очистка фильтров в течение всего периода их эксплуатации производилась переносным пылесосом без демонтажа фильтрующего материала: в осенне-весенний период 2—3 раза в месяц, в зимний период 1—2 раза в месяц [112]. Такой способ очистки значительно менее трудоемок, чем промывка; при этом достаточно производить очистку фильтра только со стороны наружного воздуха.

С 1965 г. Крюковский вентиляторный завод выпускает плоские ячейковые фильтры типа ФяП с заполнением из ППУ. Ячейка фильтров унифицированная (см. рис. II.6). Усредненная пылевая характеристика фильтров ФяП приведена на рис. II.4.

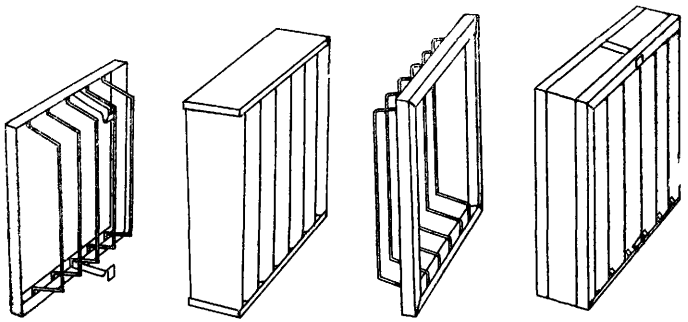


Рис. II.23. Складчатый губчатый фильтр

За рубежом губчатые фильтры применяются в местных кондиционерах, а также в виде отдельных фильтров. На рис. II.23 показан ячейковый губчатый фильтр фирмы «Дэвис» (Англия), которому придана сложная складчатая форма.

Губчатые фильтры с автоматической регенерацией фильтрующего слоя

Исследования показали, что при увеличении сопротивления сухих фильтров в результате накопления пыли их эффективность снижается, причем рост сопротивления начиная с определенного времени прекращается. Особенно отчетливо это проявляется при улавливании фильтрами крупных частиц.

Ввиду однородности фильтрующего слоя некоторая часть пыли задерживается на его входной поверхности. При возрастании сопротивления фильтра перепад давления в слое увеличивается и отложившаяся пыль вновь срывается. Вначале она передвигается в глубь слоя, а затем выносится из него.

Область применения губчатых фильтров можно расширить организовав их пневматическую регенерацию, что позволяет своевременно удалять пыль из поверхностных слоев и поддерживать сопротивление фильтра на постоянном и невысоком уровне.

Конструкция фильтра такого вида, изготовленного Симферо-

польским машиностроительным заводом, показана на рис. II.24. Фильтр представляет собой жесткий металлический корпус *1*, живое сечение которого перекрыто губчатым фильтрующим слоем *2*, опирающимся на решетку. Фильтрующий слой прикрепляется к корпусу фильтра по всему периметру при помощи прижимных планок. Очистка фильтрующего материала от уловленной пыли производится щелевым насадком *3*, соединенным гибким шлангом (на рисунке не показан) с вакуумной системой. Расход воздуха в насадке 100—150 м³/ч, необходимое разрежение 200—300 кгс/м². Насадок перемещается последовательно по всей площади фильтрующего материала. Механизм перемещения состоит из привода *4*, двух вертикальных направляющих и горизонтальной траверсы *5*. Насадок, совершая вместе с траверсой возвратно-поступательное движение в вертикальной плоскости, а в крайних точках еще и горизонтальное перемещение, последовательно обходит входную фильтрующую поверхность и очищает ее от уловленной пыли.

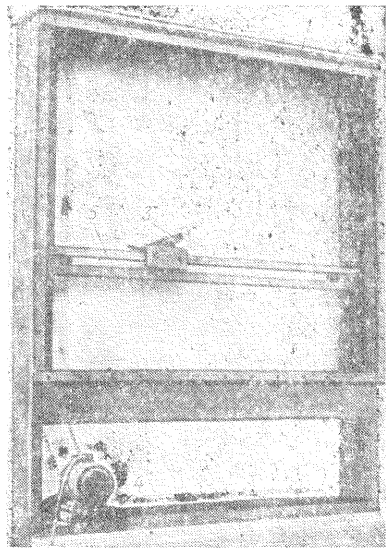


Рис II 24 Губчатый фильтр ФПР с автоматической регенерацией фильтрующего материала

В зависимости от условий эксплуатации, и прежде всего от степени начальной запыленности воздуха, механизм перемещения насадка может быть включен постоянно либо включаться периодически — вручную или автоматически.

Эффективность и сопротивление фильтров могут приниматься по соответствующим характеристикам обработанного ППУ (см. рис. II.3 и II.4).

5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВОЗДУШНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Общие сведения

По устройству электрические фильтры значительно отличаются от электрических пылеуловителей, применяемых для очистки газовых выбросов, содержащих пыль в больших концентрациях.

Принципиальная схема электрического фильтра представлена на рис. II.25. Поток очищаемого воздуха вначале протекает через

ионизационную зону *1*, которая имеет вид решетки из металлических пластинок с натянутыми между ними вертикальными коронирующими электродами из тонкой проволоки. К коронирующим электродам подводится напряжение 13—15 кВ от положительного полюса специального питающего электрического агрегата *2*, который выпрямляет переменный электрический ток осветительной сети и повышает его напряжение. В ионизационной зоне частицы приобретают электрический заряд. Далее воздух проходит через осадительную зону *3*, которая представляет собой пакет металлических пластинок, установленных параллельно друг другу на расстояниях от 8 до 12 мм. К пластинкам, через одну, подводится напряжение 6,5—7,5 кВ положительного знака. Пыль осаждается на промежуточных заземленных пластинках.

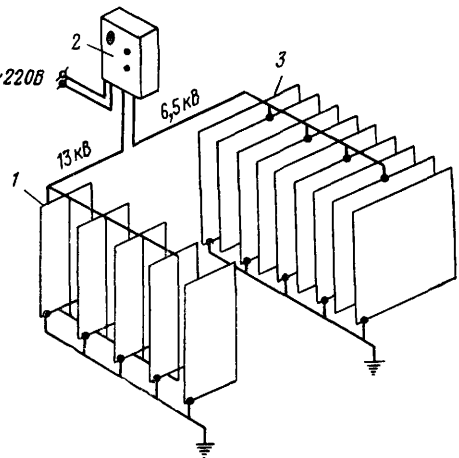


Рис. II.25. Принципиальная схема двухзонального электрического фильтра

1 — зона ионизации воздуха, *2* — источник питания; *3* — осадительная зона

При подаче на фильтр напряжения в пространстве вокруг находящихся под высоким напряжением коронирующих электродов образуется неоднородное электрическое поле и происходит коронный электрический разряд. Те из электронов, которые не получили от электрического поля достаточно энергии, возвращаются на первоначальный уровень энергии, отдавая аккумулированную энергию в виде ультрафиолетовых лучей. Вследствие этого коронный разряд характеризуется легким свечением электродов.

В нормальных условиях работы аппаратов должен иметь место коронный разряд, однако временами при нарушениях электрического режима могут происходить искровые разряды-пробои.

Электрические разряды сопровождаются изменением состава воздуха. В процессе ионизации воздуха внутримолекулярные связи настолько нарушаются, что в течение коротких мгновений могут существовать свободные атомы кислорода. Они быстро рекомбинируют в молекулы обычного кислорода O_2, а некоторая, очень малая часть атомов образует озон O_3. Образуется также небольшое количество окислов азота. Эти газы являются нежелательными примесями в воздухе, очищаемом в гигиенических целях.

Количество образующихся побочных продуктов зависит от напряжения на коронирующих электродах. В промышленных

пылеуловителях применяется напряжение 80—100 кВ и даже больше и образуется много озона и окислов азота, что является одной из причин невозможности их использования для очистки вентиляционного воздуха.

В фильтрах величина напряжения в коронирующих электродах не должна превышать 13—15 кВ. В отличие от промышленных пылеуловителей здесь к коронирующим электродам подводится напряжение не отрицательного, а положительного знака. Подвижность положительных ионов меньше, чем отрицательных, приблизительно на 30%, вследствие чего такое питание фильтров примерно на 5% снижает их эффективность. Тем не менее оно принято во всех конструкциях электрических фильтров, ввиду того что положительная корона является более благоприятной в гигиеническом отношении, чем отрицательная [88]. Известно, что положительная корона равномерна по всей длине проводника, а отрицательная корона пульсирует, создавая большое количество видимых узлов интенсивного образования и рекомбинации ионов, и, по некоторым данным, образует в 8 раз больше вредных побочных продуктов.

По данным Пенроуза [68], в воздухе, прошедшем через электрический фильтр, может содержаться озон в количестве от 0,002 до 0,005-миллионных долей объемного процента при допускаемой концентрации в 1-миллионную долю. Сильверман и Денис [95] определили, что содержание озона в воздухе, рециркулирующем через электрический фильтр, не превышает 10% допускаемой в США концентрации этого газа в воздухе рабочих помещений.

При испытаниях электрических фильтров в лаборатории ЦНИИПромзданий окислов азота у выходного отверстия фильтра не было обнаружено совсем. Из-за очень малого содержания озона (следы) вычислить его концентрацию оказалось невозможным. В помещении, в которое выпускался воздух, очищенный в электрическом фильтре с многократной рециркуляцией, озон не был обнаружен совсем.

Попутно следует отметить, что атомарный кислород, образующийся при ионизации воздуха, как и озон, является мощным окислителем. Воздействие этих агентов на молекулы органических веществ, являющихся носителями запахов рециркуляционного воздуха, создает эффект дезодорации. Отчасти вследствие этого воздуху, очищенному в электрических фильтрах, присуща приятная свежесть.

Представляет интерес также вопрос о влиянии электрических фильтров на ионную характеристику воздуха. Для выяснения этого вопроса были поставлены специальные эксперименты, при которых воздух из фильтра выпускался в то же помещение, из которого он забирался. Кратность воздухообмена превышала 30 раз в 1 ч. Подсчет содержания ионов производился счетчиками

системы проф. Тверского малой модели[1]. Оказалось, что после включения фильтра содержание положительных ионов начало закономерно возрастать и увеличилось примерно в 3 раза за 1 ч Максимальная концентрация положительных ионов составила 694 иона на 1 см³. В то же время количество отрицательных ионов уменьшилось до 116 ионов на 1 см³. Достигнув этого максимального и, по мнению гигиенистов, совершенно безвредного уровня, количество ионов далее сохранялось постоянным. После выключения фильтра количество ионов очень быстро возвращалось к исходному уровню. При наличии металлических каналов, калориферов и в особенности промывных камер влияние электрических фильтров на ионизацию воздуха в помещениях еще меньше [46].

Из-за несимметричности электрического поля коронирующие электроды вибрируют. Для ограничения их вибрации свободные участки проволоки должны быть не длиннее 300—500 мм.

Расстояние между коронирующим электродом и ближайшими к нему заземленными электродами ионизационной зоны должно быть мало для достижения максимальной интенсивности коронного разряда В то же время должна исключаться возможность искровых пробоев. Практически это расстояние составляет около 30 мм против 250—300 мм в однозональных аппаратах электрической очистки промышленных газов.

Частые обрывы тонких электродов затрудняют эксплуатацию электрических фильтров. В связи с этим исследовалась возможность применения более прочных электродов. Сравнивались вольт-амперные характеристики одножильного (0,3 мм), трехжильного (3×0,2 мм) и пилообразного электродов. В качестве последнего была использована стальная пилка лобзика. Исследование показало, что удельный ток во всех трех случаях примерно одинаковый. Некоторым преимуществом обладает пилообразный электрод, являющийся к тому же самым прочным.

Напряжение, подаваемое на осадительные электроды, обычно составляет 6,5—7,5 кВ. Использование меньшего напряжения компенсируется частотой расстановки осадительных электродов Учитывая постепенное сокращение расстояния между электродами в результате накопления на них оседающей пыли, в современных фильтрах его принимает равным 8—10 мм.

Достигнув поверхности осадительного электрода и отдав ему свой заряд, частица удерживается на поверхности только молекулярными силами, которым приходится преодолевать размывающее действие воздушного потока, стремящегося оторвать осевшую частицу от электрода. Этот фактор заметно влияет на эффективность электрических фильров. При подборе электрических фильтров скорость воздуха в их сечении принимают равной 2 м/с.

[1] В проведении экспериментов и в оценке их результатов принимал участие канд. мед. наук В. Ф. Кириллов.

Экспериментальные исследования на модели показали, что при уменьшении скорости до 1 м/с эффективность фильтров повышается на 11%, а при увеличении до 3 м/с она снижается на 14%. Однако и в последнем случае электрические фильтры еще могут конкурировать с масляными и волокнистыми благодаря их более простой эксплуатации.

Другим важным фактором являются электрические пробои. По мере накопления пыли на осадительных электродах расстояние между ними сокращается и, если своевременно не очистить электроды, начинаются пробои. Причиной пробоев может быть также попадание в осадительную зону волокон или крупных частиц. В результате пробоев происходит лункообразный вырыв отложившейся пыли, которая уносится воздушным потоком, снижая эффективность фильтра.

Для улавливания частиц, срывающихся при пробоях и срываемых потоком, за осадительной зоной устанавливают противоуносные фильтры — волокнистые или губчатые.

Движение крупных вырванных агломератов в межэлектродном пространстве может повлечь за собой дальнейшие пробои.

Пробои сопровождаются кратковременным значительным увеличением тока. Источники питания электрических фильтров обычно снабжены защитой от перегрузок и поэтому при пробоях отключаются. Продолжительность пробоев измеряется долями секунды, однако ввиду того, что число их может доходить до десятков и сотен за 1 мин, они могут привести к существенному снижению эффективности фильтров. Пробои отражаются также на состоянии электродов.

Электрические фильтры являются эффективными коагуляторами. Например, табачный дым, вдуваемый с небольшой скоростью достаточно концентрированной струей в фильтр, на выходе из него делается малозаметным. Просветление дыма в значительной мере должно быть объяснено его коагуляцией в электрическом поле, хотя имеет место и осаждение дымовых частиц, размер которых равен около 0,3 мкм.

Используемые в электрических фильтрах сила тока и потребляемая мощность очень невелики и в среднем не превышают соответственно 0,8 мА и 10 Вт на 1000 м³/ч их пропускной способности.

Конструкции электрических фильтров

В конструктивном отношении двухзональные электрические фильтры подразделяются на самоочищающиеся и промывные. Последние, в свою очередь, могут быть шкафного и ячейкового исполнения.

Самоочищающиеся электромасляные фильтры

Одним из путей борьбы с вторичным уносом пыли, отделенной от потока и осажденной на электродах силами электрического

поля, является замасливание осадительных пластинок и их периодическая промывка в масляной ванне наподобие масляных самоочищающихся фильтров. Практика показала, однако, что чрезмерная сложность конструкции этих фильтров снижает их надежность.

Промывные электрические фильтры

Промывные фильтры характеризуются более простой конструкцией, чем самоочищающиеся. Осадительные электроды в дан-

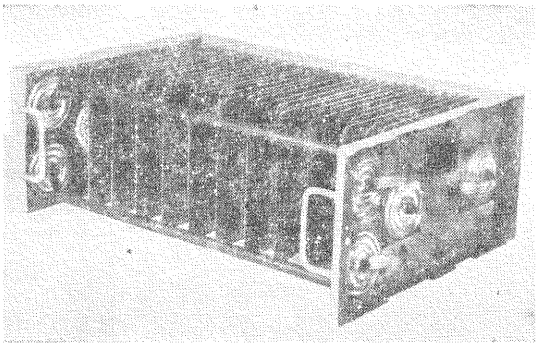


Рис II 26 Ячейка электрофильтра типа ФЭ

ном случае неподвижны, а удаление с них осевшей пыли производится путем промывки их водой из водопровода. В фильтрах малой пропускной способности для промывки используются обычные наконечники или ручные пульверизаторы-пистолеты, подсоединяемые к водопроводу гибким шлангом, а также гидравлические форсунки, укрепляемые во входном сечении фильтра так, чтобы дождевые факелы перекрывали все его сечение. В фильтрах большой пропускной способности промывка производится форсунками, автоматически перемещающимися вдоль и поперек сечения.

Для предотвращения выноса брызг воды из фильтров в некоторых их конструкциях применяют подвижные жалюзийные решетки, автоматически закрывающиеся при промывке. Чаще всего брызгоуловителями служат противоуносные фильтры различной конструкции.

Периодическая промывка способствует уменьшению уноса отложившейся пыли. Чем чаще промывка, тем выше эффективность фильтра. Испытания аппаратов, снабженных противоуносными волокнистыми фильтрами, показали, что они долго сохраняют высокий уровень эффективности электрических фильтров. При этом оказалось, что противоуносными фильтрами задерживается до 30% всей уловленной пыли.

Наибольшее применение получили волокнистые противоуносные фильтры, применяются также губчатые фильтры.

Для более надежного связывания осевшей пыли на электроды наносят специальные, медленно испаряющиеся масла. Для промывки фильтров в этом случае следует применять горячую воду с температурой до 60°С. Промывку достаточно повторять 1 раз каждые 4—6 недель.

Электрические фильтры типа ФЭ. Фильтры типа ФЭ собираются из унифицированных ячеек (рис. II.26) размерами 758×250×465 и 965×250×465 мм. Максимальная пропускная способность ячеек составляет соответственно 1200 и 1700 м³/ч.

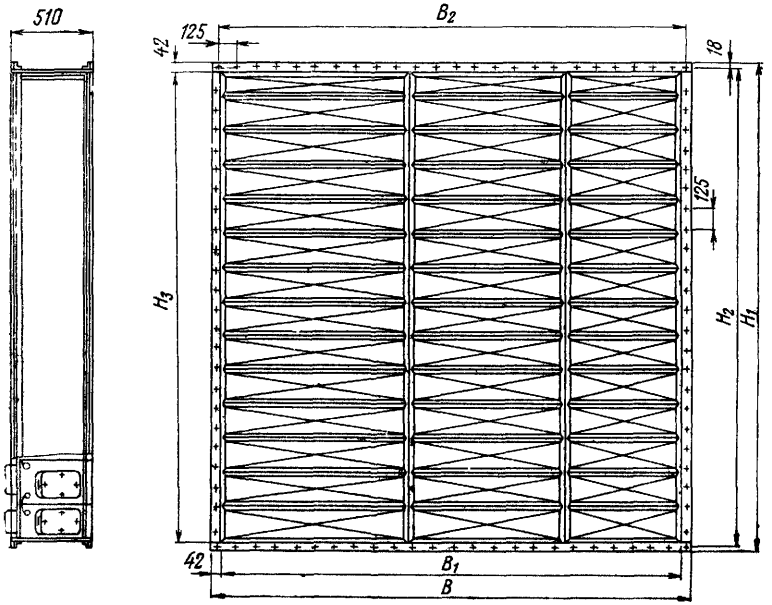


Рис II 27. Компоновка ячеек фильтра типа ФЭ

Каждая ячейка фильтра имеет ионизационную зону из коронирующих проволочных электродов, прикрепленных с помощью упругих подвесок к токопроводящим траверсам. Траверсы изолированы от корпуса ячейки тарельчатыми гофрированными изоляторами проходного типа. Высокое напряжение подводится к траверсам через клеммы и откидные перемычки [78].

Коронирующие электроды разделены выступающими удлиненными пластинками осадительной зоны, которые монтируются на стержнях круглого сечения с помощью втулок, закрепляющих пластинки на расстоянии 9—10 мм друг от друга.

Стержни с заряженными электродами устанавливаются на изоляторах, а с заземленными электродами крепятся непосредственно к боковым стенкам ячейки. За осадительным пакетом устанавливается противоуносный пористый фильтр.

Компоновка ячеек фильтров типа ФЭ в металлическом корпу-

ТАБЛИЦА II 16

Основные размеры, мм, типовых сборок фильтров типа ФЭ (см. рис. II.27)

Типоразмеры	B	B_1	B_2	H_1	H_2	H_3
Ф1Э1	856	772	820	1840	1804	1756
Ф3Э2	1616	1532	1580	1840	1804	1756
Ф5Э3	2126	2042	2090	2344	2308	2260
Ф8Э4	2661	2577	2625	3098	3062	3014
Ф10Э5	3161	3077	3125	3098	3062	3014
Ф14Э6	3161	3077	3125	4598	4562	4514
Ф18Э7	4161	4077	4125	4598	4562	4514

се показана на рис. II.27, а основные размеры фильтров даны в табл. II.16.

Противоуносный фильтр представляет собой разъемную рамку, заполняемую фильтрующим материалом типа ФСВУ или пенополиуретаном. Рамка крепится к корпусу электрического фильтра. В случае надобности на входе в этот фильтр устанавливается защитная проволочная сетка.

Фильтры устанавливаются непосредственно на бетонном основании (рис. II. 28). Для обслуживания фильтра сконструиро-

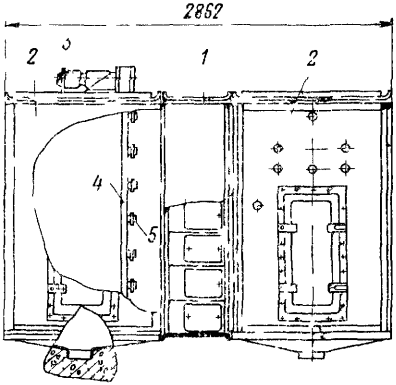


Рис II.28 Установка фильтра типа ФЭ

1 — фильтр; *2* — переходная камера; *3* — привод промывного устройства; *4* — вертикальная штанга; *5* — форсунки

ваны специальные переходные камеры, соответствующие по своим присоединительным размерам кондиционерам Кд. Камеры могут быть снабжены механизированным промывным устройством, состоящим из вертикальной штанги — трубы *4* с закрепленными на ней форсунками — и привода. Штанга, укрепленная на ролике, насаженном на горизонтальный уголок, перемещается по поперечному сечению переходной камеры. Нижняя часть штанги снабжена упорным роликом с одной стороны и скобой с другой, скользящими по направляющей. Вода подается в штангу через гибкий шланг. Дверцы камер снабжены защитной электрической блокировкой и лампочкой, сигнализирующей

о наличии напряжения. Максимальная пропускная способность фильтра типа ФЭ ограничена величинами, указанными в табл. II.17, где приведены основные технические показатели сборок (удельная воздушная нагрузка 7200 м³/ч·м² входного сечения).

ТАБЛИЦА II 17

Основные технические показатели типовых сборок фильтров типа ФЭ

Показатели	ФЭ1	ФЭ2	ФЭ3	ФЭ4	ФЭ5	ФЭ6	ФЭ7
Номинальная пропускная способность, тыс. м³/ч	10	19	33	55	66	100	130
Площадь рабочего сечения (округленно), м²	1	3	5	8	10	14	18
Количество ячеек шириной, мм:							
758	7	14	—	24	—	—	—
965	—	—	18	12	36	54	72
Потребляемый ток, мА	7	14	24	42	54	81	110
Потребляемая мощность, Вт	100	200	350	600	800	1100	1500
Масса, кг	205	367	583	363	1120	1640	2125

Сопротивление электрического фильтра без противоуносного фильтра при максимальной нагрузке составляет примерно 1 кгс/м². При наличии противоуносного фильтра сопротивление принимается по графику на рис. II.3.

Пылеемкость фильтра зависит от заполнителя противоуносного фильтра. Пылевая характеристика при стекловолокнистом противоуносном фильтре представлена на графике рис. II.4. После замены запыленного противоуносного фильтра чистым сопротивление электрического фильтра восстанавливается до первоначального значения.

Для питания электрических фильтров типа ФЭ выпрямленным током высокого напряжения применяются полупроводниковые электроагрегаты типа В-13/6, 5-30. Агрегаты собраны по схеме выпрямления с удвоением напряжения и заземленным отрицательным полюсом. Максимальный ток нагрузки агрегатов составляет 30 мА при напряжении положительной полярности 13 и 6,5 кВ.

Один электроагрегат В-13/6,5-30 может обеспечить питанием фильтры общей пропускной способностью до 20 тыс. м³/ч. Ячейки фильтра соединяются между собой параллельно с помощью клемм и перемычек, предусмотренных в конструкции фильтра.

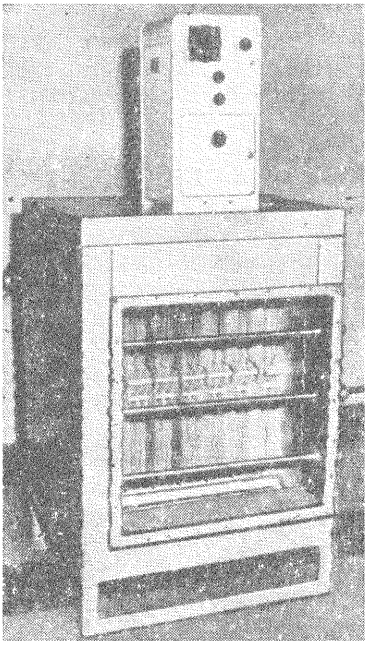
Фильтр включается кнопкой, расположенной на лицевой панели агрегата питания. О включении фильтра сигнализирует свечение лампы.

Расход воды на промывку составляет 0,5 м³ на 1 м² входного сечения фильтра или 0,08 м³ на 1000 м³/ч пропускной способности фильтра при давлении воды 3 кгс/см². Промывка ведется при полностью открытом вентиле до возвращения промывного ус-

тройства в исходное положение После промывки необходимо дать воде стечь в течение 5—10 мин, а затем рекомендуется включить вентилятор для сдувания оставшихся на пластинках крупных капель, могущих послужить причиной короткого замыкания, и для подсушки фильтра.

Несмотря на малую мощность агрегата питания, заряд, накапливающийся в конденсаторах и конструкции фильтра, достигает величины, опасной для человека. При выключении фильтра заряд стекает не мгновенно, и прикасаться к токопроводящим элементам можно не раньше чем через 30—60 с после отключения питания

Электрический фильтр ЭФ-2. Фильтр ЭФ-2 производства Казанского завода медаппаратов представляет собой модификацию фильтра типа ФЭ на пропускную способность до 2 тыс $м^3/ч$ (рис II 29) Фильтр выполнен в жестком корпусе тумбочного типа Ионизационная и осадительная части фильтра объединены в одном узле, который устанавливается в корпус фильтра через монтажную дверцу Входной патрубок может снабжаться предохранительной сеткой В выходном патрубке корпуса установлена разъемная ячейка противоуносного фильтра Водоразделительная гребенка также выполнена в виде ячейки Ячейки извлекаются и устанавливаются через проемы в корпусе фильтра Переставляя эти ячейки и соответственно узел элект



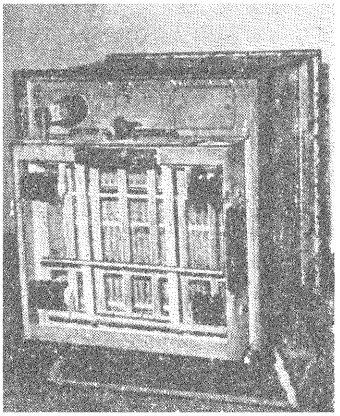


Рис II 30 Электрофильтр фирмы «Конкордия»

Рис II 29 Электрофильтр ЭФ-2 с агрегатом питания В-13/6,5-30

родов внутри корпуса, можно пользоваться фильтром как для правого, так и для левого подсоединения к воздуховодам.

В днище корпуса фильтра установлен сифон для спуска промывочной воды в канализацию.

Сопротивление фильтров определяется так же, как в случае фильтров типа ФЭ.

Электрические фильтры фирмы «Конкордия». Фирма «Конкордия» (ФРГ) выпускает секционные электрические фильтры шкафного типа. Каждая секция представляет собой металлический шкаф, в который устанавливаются раздельные плюсовые и минусовые пакеты (рис. II.30).

Ионизационная зона выполнена в виде металлической дверки, подвешенной на массивных шарнирных подвесках. Такое устройство позволяет извлекать пакеты осадительных электродов с фронта фильтров без их разборки. На тыльной стороне аппаратов подвешена аналогичная конструкция, служащая для закрепления противоуносного фильтра. В качестве противоуносного фильтра применяются маты из упругого стекловолокна.

ГЛАВА III

ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ЗАПЫЛЕННЫХ ВОЗДУШНЫХ ВЫБРОСОВ

1 КЛАССИФИКАЦИЯ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ

Для очистки запыленных воздушных выбросов создан большой ассортимент пылеуловителей, который в большинстве случаев позволяет произвести оптимальный выбор средств очистки соответственно ее задачам. Пылеуловители в зависимости от размеров эффективно улавливаемых частиц и эффективности их улавливания целесообразно подразделять на пять классов (табл. III.1).

Характеристика пылеуловителей, наиболее широко применяемых в нашей стране, дана в табл. III.2*. Из-за очень большого разнообразия конструктивных модификаций пылеуловителей в таблице не приведены их конкретные наименования.

Указанная в табл. III.1 эффективность позволяет оценить остаточное содержание пыли из условия отделения от воздуха только практически полностью улавливаемых частиц, размер которых указан во второй графе этой таблицы. Действительная эффективность пылеуловителей будет больше за счет частичного улавливания частиц меньшего размера Полная эффективность E улавливания частиц должна рассчитываться по дисперсному составу конкретной пыли с учетом фракционной эффективности $E_ф$ пылеуловителей.

$$E = E_0 + \Phi_1 E_{ф_1} + \Phi_2 E_{ф_2} + \ldots ,$$

где E_0 — процентное содержание в пыли эффективно улавливающихся частиц; $E_{ф_1}$, $E_{ф_2}$ и т. д. — эффективность улавливания фракций Φ_1, Φ_2 и т. д., не улавливающихся полностью.

ТАБЛИЦА III 1

Классификация пылеуловителей по их эффективности

Класс пылеуловителя	Размеры эффективно улавливаемых пылевых частиц, мкм	Эффективность в зависимости от дисперсности пыли	
		группа пыли по дисперсности	эффективность, %
I	Более 0,3—0,5	V	<80
		IV	99,9—80
II	» 2	IV	92—45
		III	99,9—92
III	» 4	III	99—80
		II	99,9—99
IV	» 8	II	99,9—95
		I	>99,9
V	» 20	I	>99

Номенклатура пылеуловителей

ТАБЛИЦА III 2

Вид пылеуловителя	Тип пылеуловителя	Класс пылеуловителя по эффективности	Область наиболее целесообразного применения пылеуловителя: классификационная группа пыли по дисперсности I	II	III	IV	V	сопротивление, кгс/м²
Гравитационные	Пылеосадочные камеры	V	+	+	—	—	—	20
Инерционные	Циклоны большой производительности (одиночные и групповые)	V	+	+	—	—	—	60
	Циклоны высокой эффективности	IV	—	+	+	—	—	200
	Батарейные* циклоны*	IV	—	+	+	—	—	200
	Центробежные скрубберы и циклоны-промыватели	IV	—	+	+	—	—	100
	Струйные мокрые типа Ротоклон и ПВМ .	II	—	—	+	+	—	350
		III	—	—	+	—	—	120
	Типа Вентури* . . .	I	—	—	—	+	+	⩾1000
		II	—	—	+	+	—	350
		III	—	—	+	—	—	135
Промыватели	Пенные*	II	—	—	+	+	—	200
Тканевые	Сетчатые (для улавливания волокнистой пыли)	V	+	—	—	—	—	40—80
	Матерчатые (рукавные)*	I	—	—	—	+	+	250
		II	—	—	+	+	—	150
		III	—	+	—	—	—	60
Электрические*	Электрические пластинчатые многопольные	I	—	—	+	+	+	60
	То же, однопольные .	II	—	—	+	—	—	30

Примечание Пылеуловители, отмеченные звездочкой, применяются главным образом для технологической очистки газов и в данной книге не описываются Данные по батарейным циклонам приведены в работе [90], по пылеуловителям типа Вентури и пенным — в работе [108], по матерчатым (рукавным) пылеуловителям — в работе [107], по электрическим пылеуловителям — в работе [106]

Пылеуловители применяются главным образом для улавливания из воздуха пылей II, III и IV групп по дисперсности. Пыли V группы, как правило, не могут эффективно улавливаться в пылеуловителях вследствие их высокой дисперсности. Из рис. I.1 можно видеть, что для достижения эффективности порядка 90–95% должны улавливаться полностью частицы крупностью

0,1—0,2 мкм. Такая эффективность достижима только в воздушных фильтрах I класса. К I группе пылей по дисперсности относятся порошки, легко осаждающиеся под действием силы тяжести.

Пылеуловители I класса предназначены для эффективного улавливания пылей IV группы по дисперсности. Верхняя граница дисперсности этой группы пылей соответствует дымам металлургических печей, а также конденсационным туманам кислот и масел.

В п. 3 главы I было показано, что частицы размером 0,3—0,5 мкм могут улавливаться пленками воды при скоростях столкновения порядка 10^2 м/с. Такие условия могут быть созданы в так называемых высоконапорных пылеуловителях типа Вентури, для использования которых необходимо располагать давлениями порядка 1500 кгс/м^2.

Требованиям этого класса могут удовлетворять также рукавные пылеуловители некоторых конструкций при соответствующем выборе фильтровальных тканей, режима использования и способа регенерации и, кроме того, многопольные электрические пылеуловители. В практике очистки вентиляционных выбросов пылеуловители этого класса применяются редко.

Улавливание частиц размером более 2 мкм из пылей III группы легко осуществляется в пылеуловителях типа Вентури II класса, а также в многочисленных разновидностях тканевых и электрических пылеуловителей II класса при обычном режиме их использования. Из инерционных пылеуловителей требованиям II класса могут удовлетворять также струйные пылеуловители типа Ротоклон, ПВМ и т. п. при сопротивлении 300—350 кгс/м^2.

Частицы размером 4 мкм и более улавливаются струйными пылеуловителями при потерях давления 80—120 кгс/м^2. Требованиям III класса эффективности при таких же потерях давления удовлетворяют также многочисленные разновидности пылеуловителей циклонного типа, смачиваемых водой, и пенные пылеуловители. Электрические пылеуловители для улавливания частиц данной крупности, как правило, не применяются. Матерчатые пылеуловители с рукавами из облегченных тканей иногда применяются для улавливания пылей II и III группы органического и синтетического происхождения, которые вследствие небольшой плотности и других специфических особенностей не могут эффективно улавливаться в инерционных пылеуловителях (волокнистая пыль текстильных предприятий, некоторые разновидности древесной пыли и т. п.).

Пылеуловители IV класса представлены простейшими мокрыми пылеуловителями с перепадом давления примерно 100 кгс/м^2, высокоэффективными циклонами СН, СКН, УЦ, СИОТ и батарейными циклонами, расходующими напор 200 кгс/м^2 и больше. Пылеуловители IV класса улавливают достаточно полно пыли II группы, а некоторые из них применяются и для улавливания

пылей III группы, хотя, например, эффективность циклонов при улавливании цементной пыли редко превышает 70%.

К пылеуловителям V класса можно отнести циклоны средней эффективности большого диаметра, например ЦП-24, хорошо приспособленные к большим пылевым нагрузкам, пылеосадочные камеры и т. д.

Выявление сравнительных показателей эффективности пылеуловителей все еще представляет большие трудности. Эффективность пылеуловителей в первую очередь зависит от дисперсности пыли. При лабораторных определениях дисперсности пыли путем анализа осажденной пыли не учитывается, что в действительности часть пыли двигалась в потоке в виде комков той или иной величины и плотности, улавливаясь легче, чем отдельные частицы. При оценке эффективности пылеуловителей нужно иметь в виду истинный дисперсный состав пыли. В связи с этим дисперсный состав должен определяться пылеизмерительными приборами (трехциклонным пылемером, каскадным импактором и т. п. [121]) непосредственно в потоке перед входом в пылеуловитель. Техника исследований состава пыли в потоке в настоящее время энергично развивается, однако данных о дисперсном составе пыли в потоке накоплено все еще недостаточно. Большинство показателей эффективности, определенных при испытаниях, справедливо лишь для конкретных условий и методики проводившихся испытаний. Они определяют только порядок величины эффективности и в принципе пригодны лишь для сравнения пылеуловителей.

Сопоставимых объективных данных об эффективности пылеуловителей не имеется. Показатели эффективности, опубликованные в литературе, как правило, завышены. В ряде случаев запыление производится механическим дозированием, и пыль движется в виде комков, только частично распадающихся в воздушном потоке. Иногда запыленный таким образом воздух пропускают через канал с суженной горловиной типа трубы Вентури, с тем чтобы использовать для дезагрегации пыли развивающуюся здесь турбулентность. Более эффективным является, по-видимому, использование струи сжатого воздуха, вытекающей из сопла с большой скоростью и дезагрегирующей подаваемую в нее пыль. Степень дезагрегации, достигаемой благодаря такому способу распыла, зависит от скорости истечения воздуха из соп-

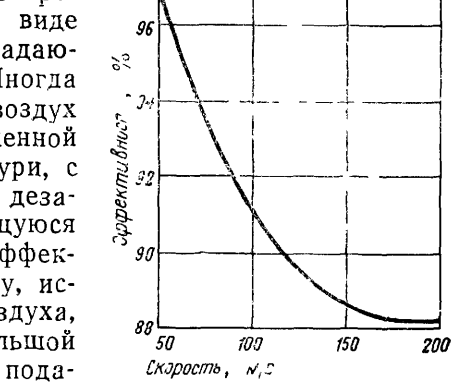


Рис. III.1. Влияние скорости истечения воздуха из сопла генератора аэрозоли на эффективность пылеуловителя

ла. На рис. III.1 показано изменение эффективности одного и того же пылеуловителя в процессе лабораторных испытаний, когда при примерно постоянной концентрации одной и той же пыли [пылевидный кварц, дополнительно измельчавшийся в течение 60 мин в шаровой мельнице типа М-1 (линия *6* на рис. I.1)] изменялся расход сжатого воздуха. Уменьшение эффективности пылеуловителя с увеличением скорости струи, вытекающей из сопла, свидетельствует о повышении степени дезагрегации пыли. В соответствии с результатами этих исследований при проведении испытаний в ЦНИИПромзданий скорость истечения поддерживалась на уровне 150—180 м/с.

Отбор проб при испытаниях производился при помощи пылеизмерительных трубок с внутренней фильтрацией, снабженных удлинителями (см. п.1 главы II).

2. ПЫЛЕОСАДОЧНЫЕ КАМЕРЫ

В пылеосадочных камерах отделение пыли происходит в результате ее осаждения под действием собственного веса. Как было показано в п. 3 главы I, длина камеры, необходимая для полного осаждения из ламинарного потока всех частиц со скоростью витания v_s, определяется формулой

$$L = \frac{w H}{v_s}.$$

При этом эффективность осаждения пыли не зависит от распределения скоростей w по поперечному сечению камеры, если поток полностью заполняет это сечение. Поскольку, как правило, поток запыленного воздуха вводится в камеру через отверстие сравнительно небольшого размера, для соблюдения этого условия необходимо предусматривать соответствующие воздухораспределительные устройства, иначе поток будет протекать через камеру с большой скоростью в виде струи ограниченного сечения.

В широко применявшихся ранее камерах большой пропускной способности с этой целью устраивалось несколько рядов вертикальных завес из металлических цепей, стержней и т.п., своим сопротивлением вынуждавших поток заполнять все сечение. Пыль, оседавшая на таких завесах, периодически стряхивалась либо ссыпалась под действием собственного веса.

Вследствие большого размера камер течение в них практически всегда является турбулентным. Выше было показано, что турбулентная структура потока вносит существенные коррективы в закономерности гравитационного осаждения.

Определим по уравнению (I.31) граничный размер частиц для конкретной пылеосадочной камеры неограниченной длины высотой 1,5 м. Учтем при этом, что величины a и k_1, зависящие от отношения $l/R_г$, изменяются по опытным данным в пределах $1 \leqslant a \leqslant 2$ и $0{,}2 \leqslant k_1 \leqslant 0{,}5$ и примем для нашего случая $a = 1{,}5$ и $k_1 = 0{,}25$ [16]. Коэффициент трения λ, зависящий от скоро

сти потока, для гладких стенок при скорости примерно 1 м/с можно принять равным 0,0177. После вычислений получим.

$$d_l = 4{,}55 \sqrt{\frac{w}{\rho}}.$$

На рис. III 2 показана зависимость граничного размера частиц от средней скорости потока для указанных условий, построенная в предположении полного увлечения частиц пульсациями скоростей. Приближенный учет степени увлечения частиц крупнее 30 мкм отражен пунктирной частью кривой. График построен для скоростей в пределах до 2 м/с, которые могут наблюдаться в пылеосадочных камерах и коллекторах для запыленного воздуха, а также в некоторых запыленных помещениях, вентилируемых путем создания организованного протекания воздуха по всему сечению.

Необходимо учитывать, что частицы, находящиеся вблизи границ потока, в частности у дна камеры, могут получить импульс, достаточный для того, чтобы достигнуть дна. Поэтому частичное оседание частиц размером меньше граничного все же происходит.

График на рис. III.2 оценивает предельные возможности пылеосадочных камер и может быть использован для составления предварительного суждения о целесообразности применения камер.

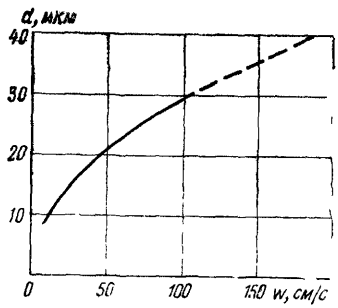


Рис. III.2. Зависимость граничного размера оседающих частиц от средней скорости турбулентного потока в пылеосадочной камере

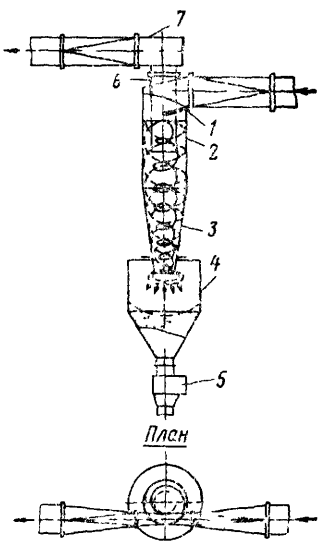


Рис. III.3. Схема циклона

1 — входной патрубок; *2* — цилиндрическая часть циклона; *3* — конусная часть циклона, *4* — пылеосадочный бункер; *5* — пылевой затвор; *6* — выхлопная труба; *7* — раскручивающий аппарат для выброса очищенного воздуха

Ранее применялись камеры полочного типа, разбитые по высоте потока полками для уменьшения времени, требуемого для осаждения частиц. Использование таких камер значительно затруднялось необходимостью непрерывного или во всяком случае достаточно частого удаления оседающей пыли, поскольку она

уменьшает просвет между полками, что приводит к увеличению скорости потока воздуха и заметному снижению эффективности пылеуловителя.

Известны также лабиринтные камеры В. В. Батурина с удлиненным, путем введения поперечных перегородок, газовым трактом. В данном случае скорость запыленной струи гасится поперечными перегородками, причем скорость уменьшается очень быстро вследствие растекания струи во все стороны. В то же время отделению пыли способствуют образующиеся здесь «водовороты» с вертикальной осью вращения.

3. ЦИКЛОНЫ

Общие сведения об аэродинамике циклонных пылеуловителей

Сухие инерционные пылеуловители, как правило, имеют простую конструкцию, обладают большой пропускной способностью и несложны в эксплуатации. Ввиду этих преимуществ некоторые виды инерционных пылеуловителей получили широкое распространение. Наиболее характерными представителями этих пылеуловителей являются циклоны.

Общая схема циклона представлена на рис. III.3. Запыленный воздух вводится тангенциально в верхнюю часть циклона, представляющую собой закручивающий аппарат. Сформировавшийся здесь вращающийся поток опускается по кольцевому пространству, образуемому цилиндрической частью циклона и выхлопной трубой, в его конусную часть, а затем, продолжая вращаться, выходит из циклона через выхлопную трубу. Схематическое изображение токов на рисунке для наглядности несколько упрощено. В действительности на основное течение накладываются специфические циркуляционные течения (см. далее).

Аэродинамические силы искривляют траектории частиц. Те из частиц, масса которых достаточно велика, успевают достигнуть стенок циклона, т. е. отделяются от потока. Под влиянием силы тяжести и увлекающего действия осевого течения отделившиеся частицы опускаются и через пылевыпускное отверстие проходят в бункер, где оседают.

На рис. III.4 изображены схемы циклонов нескольких типов одинакового назначения. Схемы построены в одном масштабе, причем размеры всех представленных циклонов выбраны из условия примерно одинаковой их производительности. Обращает на себя внимание разнообразие конструктивных форм циклонов, которое далеко не исчерпывается изображенными на рисунке аппаратами. В частности, существуют циклоны с прямоточным движением воздуха, с осевым вводом запыленного потока через закручивающий аппарат и ряд других конструктивных модификаций, не показанных на рисунке. Единого критерия для выбора

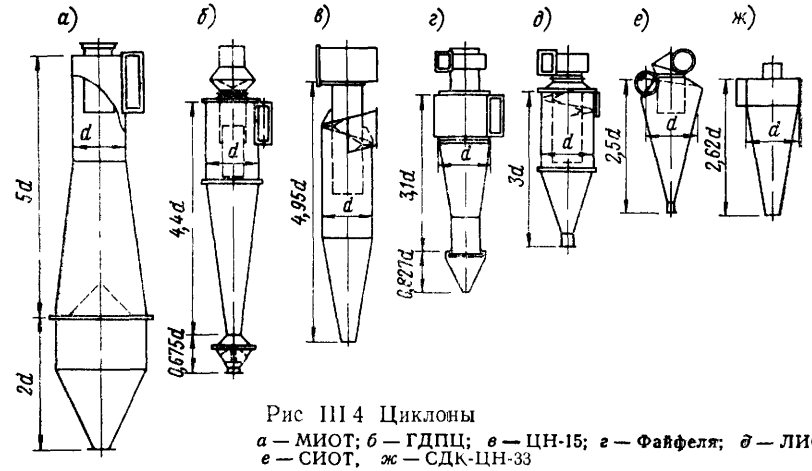


Рис III 4 Циклоны
а — МИОТ; *б* — ГДПЦ; *в* — ЦН-15; *г* — Файфеля; *д* — ЛИОТ; *е* — СИОТ, *ж* — СДК-ЦН-33

оптимальной формы циклонов еще не существует, однако в конструкциях наиболее современных циклонов все четче проявляется тенденция развития конусной части. В связи, существующей между геометрической формой циклонов и их эффективностью, проявляется влияние на последнюю сложной аэродинамики течений, возникающих в этих аппаратах.

Рассмотрим прежде всего распределение скоростей по радиусу циклона. Можно принять, что в периферийной части течения, которая представляет собой внешнее поле вихря, скорости изменяются по закону площадей. Внутренняя часть течения, или ядро вихря, по многочисленным наблюдениям вращается как твердое тело, т. е. отличается постоянством ω.

Согласно Барту [6], радиус $R_в$ ядра вихря в циклонах равен диаметру выхлопной трубы R_1; по Стойрманду, он равен $^1/_2\ R_1$ [98]; по Тер-Линдену — $^2/_3\ R_1$ [103]. Полагая, что эта величина может быть различна в зависимости от условий эксперимента, примем ее ввиду неопределенности равной R_1.

Изменение скорости газового потока всегда сопровождается изменением существующего в потоке статического давления. В криволинейном потоке наличие центробежных сил обусловливает изменение давления также в направлении, перпендикулярном линиям тока. Градиент статического давления определяется при этом выражением

$$dp = \rho\ \frac{w^2}{R}\ dR. \qquad \text{(III.1)}$$

Пользуясь этим выражением, можно определить давление в заданной точке криволинейного потока. В частности, когда распределение скоростей в потоке определяется гиперболическим законом,

$$w = \frac{k}{R} \quad \text{и} \quad p = \rho\ \frac{k^2}{2R^2} + c.$$

Постоянную интегрирования можно выбрать из условия, что у стенки циклона, т. е. при $R=R_2$, давление достигает наибольшей величины $p=p_2$. Тогда

$$p = p_2 - \rho \frac{k^2}{2}\left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{R_2^2}\right). \qquad \text{(III 2)}$$

Как видно из последней формулы, давление непрерывно уменьшается по мере уменьшения радиуса или приближения к ядру вихря.

Исследование изменения давления в области $R<R_в$, занятой ядром вихря, может быть произведено с помощью уравнения Эйлера для движения идеальной жидкости. Если пренебречь объемными силами, то для движения в плоскости, параллельной плоскости XOY, это уравнение в данном случае будет иметь следующий вид:

$$\omega^2 x = \frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial p}{\partial x},$$

$$\omega^2 y = \frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial p}{\partial y},$$

или после интегрирования

$$p = \rho \frac{\omega^2}{2} R^2 + c. \qquad \text{(III.3)}$$

На границе вихревого ядра, т. е. при $R=R_в$, и $w=w_в$ давление определяется выражением (III.2). Определяя из этого условия постоянную интегрирования и подставляя ее значение в уравнение (III.3), находим:

$$p = p_2 - \rho \frac{k^2}{2}\left(\frac{1}{R_в^2} - \frac{1}{R_2^2}\right) - \rho \frac{\omega^2}{2} R_в^2 + \rho \frac{\omega^2}{2} R^2 \qquad \text{(III 4)}$$

Это выражение показывает, что давление продолжает убывать по мере уменьшения R также и внутри вихря. На оси вращения $R=0$ и давление равно:

$$p_0 = p_2 + \rho \frac{w_2^2}{2} - \rho w_в^2. \qquad \text{(III 5)}$$

Последняя формула дает величину минимального избыточного давления, достигаемого в циклонном аппарате.

На рис. III.5 представлено изменение статического давления и тангенциальных составляющих скоростей, замеренное Тер-Линденом в нескольких поперечных сечениях циклона [103]. Оказалось, что в сечениях, не слишком удаленных от входного, вблизи стенок ($R=R_2$) давление мало отличается от давления во входном патрубке (90 кгс/м^2), а тангенциальная составляющая скорости примерно равна средней скорости входа в циклон (10,7 м/с). Ниже, в особенности в конической части, тангенциаль-

ные составляющие скоростей возрастают. Соответственно увеличивается скоростное давление и уменьшается статическое.

Во всех сечениях в периферийной части потока наблюдается увеличение тангенциальной составляющей скорости по радиусу по мере удаления от стенок циклона, причем форма кривой распределения скорости действительно близка к гиперболе. В средней части потока распределение скорости характеризуется посто-

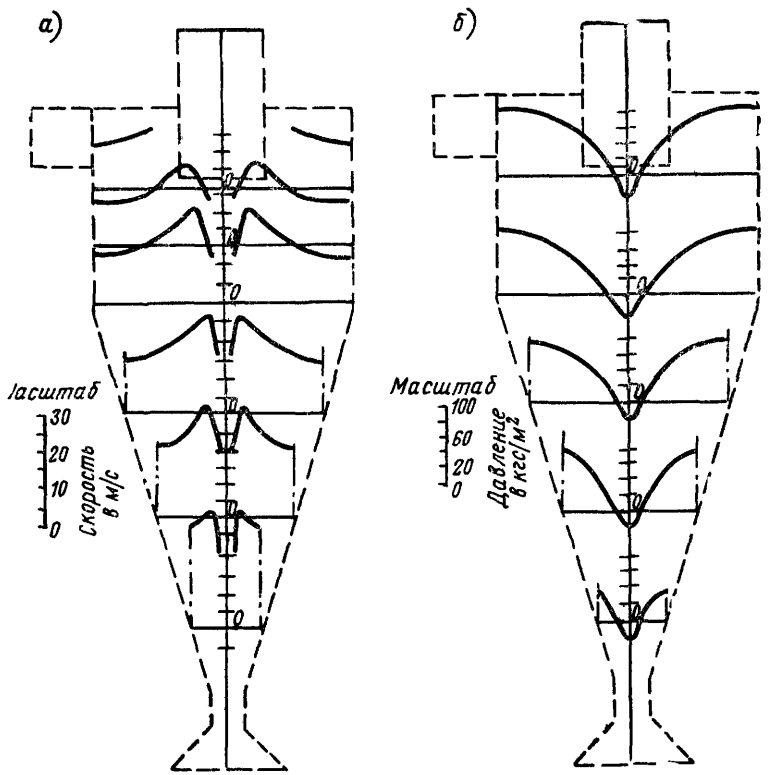


Рис III 5. Изменение тангенциальных составляющих скоростей (*а*) и статического давления (*б*) в поперечных сечениях циклона

янством угловой скорости. Давление падает по радиусу к центру циклона, достигая минимума на оси вращения. В пылевыпускном отверстии давление составляет —30 кгс/м². Расчеты показывают, что разрежение на оси соответствует величине, получаемой по формуле (III.5). Пользуясь этой формулой, а также формулой (I.4), можно с достаточной для практических целей точностью определить разрежение, которое устанавливается в пылесборном бункере циклона.

Из практики хорошо известно, что при недостаточной герметизации пылевыпускного тракта через него происходит интенсивный подсос воздуха, сводящий на нет эффект сепарации.

Для частиц воздуха, находящихся в плоскости, удаленной от днища циклона, радиальный градиент давления уравновешивается центробежной силой. Вблизи же неподвижных поверхностей тангенциальная составляющая скорости воздуха вследствие трения уменьшается и, следовательно, уменьшается также центробежная сила. Так как радиальный градиент статического давления здесь такой же, как и на большом расстоянии от поверхностей, равновесие между силами статического давления и центробежной силой нарушается и возникает радиальное течение, направленное к оси вращения, т. е. радиальный или осевой сток. Из условия неразрывности этот сток, в свою очередь, вызывает осевое течение, направленное по внешней нормали к днищу, и подтекание воздуха вдоль образующих цилиндрической части циклона. У. Бёдлвадт исследовал случай, когда вращение жидкости происходит с постоянной угловой скоростью [117]. Оказалось, что максимальное значение радиальной составляющей скорости равно половине значения тангенциальной составляющей скорости в удалении от днища.

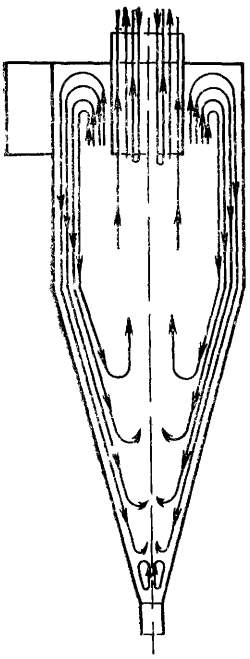


Рис. III.6. Схема вторичных токов в циклоне

На рис. III.6 показана схема циркуляции, возникающей в циклонном аппарате. В верхней части аппарата вторичные токи сливаются с парным вихрем, образующимся при тангенциальном втекании струи в циклон.

Образование парного вихря объясняется тем, что по мере удаления от оси вращения скорость газа уменьшается, вызывая возрастание давления. Повышение давления достигает наибольшей величины в слоях воздуха, прилегающих к внешней границе потока. Под влиянием этого давления воздух перетекает вдоль внешних границ в сторону низких давлений, образуя парный вихрь, который может быть назван вторичным, так как вызван основным вихревым течением в циклоне.

Верхняя часть вторичного вихря циклона устремляется по кратчайшему пути к устью выхлопной трубы, а нижняя, распространяясь вдоль образующих циклона, формирует восходящий поток циклона, как это показано на рис. III.6.

Эффективность циклонов

Вторичные токи оказывают большое влияние на эффективность циклонов, причем верхняя ветвь вихря является кратчайшим путем для выноса пыли в выхлопную трубу. Для ослабления

влияния этого течения увеличивали глубину погружения выхлопной трубы. Исследования показали, что с увеличением глубины ее погружения действительно наблюдается повышение эффективности, связанное, по-видимому, с уменьшением выноса вторичным течением пыли, не успевавшей при меньшем погружении за короткое время формирования вращающегося потока перейти из слоев воздуха, опускающихся вдоль выхлопной трубы, в более удаленные слои. При дальнейшем погружении эффективность вновь падает.

Более детальные исследования показали, что для каждой схемы циклонов существует оптимальная глубина погружения выхлопной трубы. После превышения этой глубины эффективность начинает снижаться, что может быть объяснено усилением радиальных составляющих скоростей. Ниже устья выхлопной трубы от основной массы опускающегося вниз потока постепенно отделяются внутренние слои, так что в конце концов весь объем воздуха переходит из нисходящего потока в восходящий. При благоприятных условиях эти слои очищены от пыли, концентрация которой в опускающемся потоке возрастает. При глубоком погружении выхлопной трубы высота участка, на котором происходит переток воздуха из нисходящего в восходящий поток, уменьшается, а скорости перетока возрастают. Радиальные составляющие скорости препятствуют сепарационному движению частиц к периферии, определяя своей величиной крупность частиц, которые будут ими вынесены в выхлопную трубу циклона.

Увеличение высоты конической части, по-видимому, способствует большей равномерности скоростей стока. Большое влияние на эффективность циклонов оказывает радиальный сток в самом нижнем сечении циклона — на поверхности уже отложившейся пыли. Возникающее здесь донное течение размывает отложившуюся пыль и перемещает ее к оси подобно тому, как течения, образующиеся в стакане с чаем при его перемешивании, перемещают чаинки или сахарный песок. Взмученная пыль подхватывается осевым потоком и выносится из циклона.

Рассмотрим влияние радиального стока на примере криволинейного канала, показанного на рис. I.2. Будем считать этот канал элементом циклона с наружным диаметром 1000 мм, а скорость стока — постоянной по высоте циклона. Аэродинамическая сила, приложенная к частице, находящейся на расстоянии x от оси циклона, вследствие этого равна:

$$F = 6\pi r \mu_в \frac{\Phi}{x},$$

где Φ — сток на единице высоты H циклона, т. е.

$$\Phi = \frac{Q}{2\pi H}.$$

Под влиянием этой силы частицы приобретают некоторое дополнительное радиальное ускорение.

Стойрманд, а затем Барт предлагали учитывать радиальный сток, вводя второе необходимое условие сепарации частиц, а именно: условие равенства центробежной силы частицы, находящейся на границе осевого течения, увлекающей силе радиального стока. По этой концепции уравновешенные таким образом частицы вращаются на стационарной кольцевой орбите и имеют равную вероятность быть снесенными в выхлопную трубу или остаться в циклоне и быть уловленными.

Радиальный сток может быть учтен в дифференциальных уравнениях движения частиц (I.22) и (I.23):

$$\frac{d^2R}{dt^2}+\frac{1}{\tau}\cdot\frac{dR}{dt}-\frac{(k+c_0e^{-\frac{t}{\tau}})^2}{R^3}+\frac{\Phi}{\tau R}=0; \qquad \text{(III.6)}$$

$$\frac{d^2R}{dt^2}+\frac{1}{\tau}\cdot\frac{dR}{dt}-\frac{k^2}{R^3}+\frac{\Phi}{\tau R}=0. \qquad \text{(III.7)}$$

Снос частиц под влиянием радиального стока был определен в работе [75] путем приближенного расчета некоторой части траекторий частиц с разложением функции в ряд. Впоследствии расчет был проверен с применением аналоговой модели Н. В. Киселевым, И. С. Нагорским и С. П. Волкусом [45]. Результаты этого исследования, показанные на рис. III.7, хорошо совпадают с результатами расчетов, проведенных автором позже на ЭВЦМ. Штрихпунктирными линиями показано влияние стока.

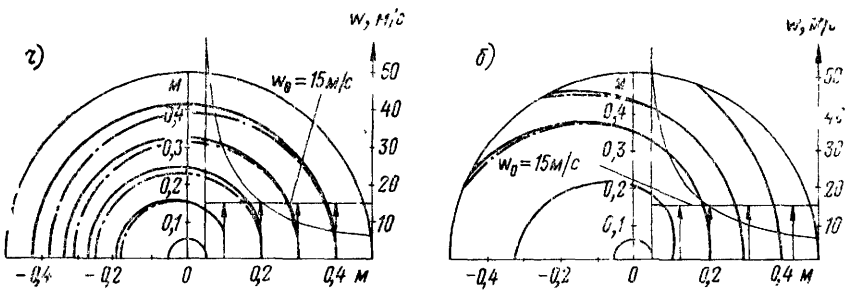


Рис. III.7. Расчетные траектории частиц диаметром 20 мкм (*а*) и 150 мкм (*б*) с учетом радиального стока

На рис. I.5 показана качественная картина изменения радиальной составляющей скорости частицы под влиянием стока в фазовой плоскости (кривая *3*). В данном случае скорость частицы, при прочих равных условиях, не достигает значения $v_{R_{макс.}}$. Постепенно убывая, она становится равной нулю на расстоянии максимального удаления от оси вращения, равном R_*. Если

$_* > R_1$, то частица будет вращаться по стационарной орбите, периодически отклоняясь от нее, как показано на рис. I.5, под влиянием сил инерции; при $R_* < R_1$ частица выносится в осевой поток.

Рассмотрим вход частицы в циклон ($t=0$, $R=R_0$). Как видно из рис. III.8, радиальная составляющая скорости $dR/dt=0$. Тогда из уравнения (III.6) следует, что в зависимости от размера частицы могут двигаться к наружной стенке ($\tau > \Phi/w_0^2$, см. рис. III.8,*а*) или, наоборот, сноситься к оси вращения ($\tau < \Phi/w_0^2$, см. рис. III.8,*б*). Из рис. III.8, где схематично показаны также контуры циклона, видно, что для соприкосновения частицы со стенкой в обоих случаях необходимо соблюдение условия $R_* \geqslant \geqslant R_1$.

На рис. III.8 показана также качественная картина изменения первых трех производных радиуса R, из которой следует, что значению R_* соответствуют $dR/dt = d^3R/dt^3 = 0$.

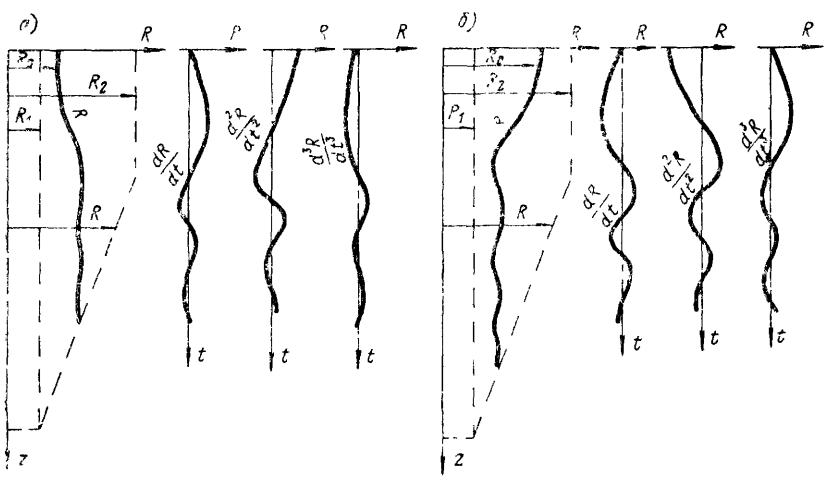


Рис. III.8. Качественная картина изменения величины R и ее производных

Продифференцировав уравнение (III.6) и введя в него и в полученное дифференциальное уравнение третьего порядка эти значения, получим:

$$R_*^2 = \frac{\tau}{\Phi}\,(k + c_0 e^{-t_*/\tau})\,(k + 3\,c_0 e^{-t_*/\tau}). \qquad \text{(III.8)}$$

Если принять $R_* = R_2$, получим связь между аэродинамическими и геометрическими параметрами циклона и размером частиц, улавливаемых с эффективностью 100%:

$$\frac{d}{D} = c\left(\frac{\Phi}{k_*}\right)^{0,5}, \qquad \text{(III.9)}$$

где

$$c = \left(\frac{9}{2}\cdot\frac{\mu_в}{\rho}\right)^{0,5};$$

$$k_* = (k + c_0 e^{-t_*/\tau})\ (k + 3c_0 e^{-t_*/\tau}).$$

Если частица оказывается на расстоянии R_* в начальный период движения, т. е. при $t_* \ll \tau$, например в случае крупных частиц и $R_0 > R_м$, то $k_* = w_0 R_0\ (3w_0 R_0 - 2k)$, а при $t_* \gg \tau$, например для мелких частиц, $k_* = k^2$.

При $t_* \gg \tau$ из выражения (III.8) получим:

$$R_* = k\left(\frac{\tau}{\Phi}\right)^{0,5}. \qquad \text{(III.10)}$$

При определении стока Φ следует учитывать, что он неодинаков в цилиндрической и конической частях циклона.

Влияние стока $\Phi_ц$ сказывается на всей протяженности траектории частиц в циклоне, поэтому основное дифференциальное уравнение движения частиц (III.6) несколько меняет свой вид. Пользуясь интегралом Дирихле, его можно представить следующим образом:

$$\frac{d^2R}{dt^2} + \frac{1}{\tau}\cdot\frac{dR}{dt} - \frac{(k + c_0 e^{-t/\tau})^2}{R^3} +$$

$$+ \frac{\Phi_ц + \Phi_к}{2} + \frac{\Phi_ц - \Phi_к}{2}\cdot\frac{2}{\pi}\int_0^\infty \frac{\sin\,(R - R_2)}{x}\,x\,dx = 0. \qquad \text{(III.11)}$$

Учитывая, что на входе в цилиндрическую часть циклона частицы распределены по сечению равномерно, фракционную эффективность можно выразить формулой

$$E_\Phi = \frac{R_* - R_1}{b}. \qquad \text{(III.12)}$$

С помощью зависимостей (III.9)—(III.12) можно оценить фракционную эффективность конических циклонов.

В качестве примера рассчитаем эффективность циклона СДК-ЦН-33 диаметром $D = 2R_2 = 30$ см, график фракционной эффективности которого, полученный в результате экспериментального исследования, приведен в работе [115].

В соответствии с условиями экспериментов и схемой циклона (см. рис. III 11) примем $w_ц = 200$ см/с; $\rho = 2{,}67$ г/см^3; $\mu = 1{,}81\cdot10^{-4}$ г·с/см^2; $Q = \pi R_2^2 w_ц = 14{,}15\cdot10^4$ см^3/с; $H_ц = 0{,}535D \approx 16$ см; $H_к = 3D = 90$ см; $b = 0{,}264D \approx 7$ см; $D_{вып} = 0{,}334\,D \approx 10$ см;

$$k = \frac{Q}{0{,}535\,D \ln\dfrac{R_2 + b}{R_2}} = 2{,}07\cdot10^4 \text{ см}^2/\text{с}.$$

В цилиндрической части циклона со спиральным закручивающим аппаратом, где периферийная часть течения отделена от ядра стенкой выхлопной

трубы, сток обусловлен воздействием на поток стенки закручивающего аппарата. Как видно из схемы на рис. III.11, за один оборот поток полностью оттесняется на расстояние от R_2+b до R_2. В соответствии с этим сток в цилиндрической части циклона равен:

$$\Phi_{\text{ц}} = \frac{Q}{2\pi a D} = 1400 \text{ см}^2/\text{с}.$$

Определим размер частиц, достаточно полно, например на 99,5%, достигающих стенки циклона в его цилиндрической части

Из выражения (III.12) следует, что в данном случае радиус стационарной орбиты таких частиц должен быть не менее величины

$$R_* = R_2 + 0{,}995\, b \approx 23 \text{ см}.$$

Подставляя в формулу (III 9) значение $D=2R_*$, получим:

$$d_{0,995} = 3{,}6 \cdot 10^{-2}\ 23\ \frac{1400^{0,5}}{2{,}07 \cdot 10^4} = 13 \cdot 10^{-4} \text{ см}.$$

Допустив, что $k=\text{const}$ для всего нисходящего течения, можно оценить также граничный размер частиц, эффективность отделения которых в конической части циклона близка к нулю, например равна 0,5%. Очевидно, что значение $2R_*$ для этих частиц меньше диаметра восходящего потока в нижней части циклона на уровне пылевыпускного отверстия ($D_{\text{вып}}$).

Специальных исследований для выявления этого размера не проводилось, однако, согласно работе [103], можно принять его примерно равным $0{,}1\, D_{\text{вып}} \approx 1$ см.

Радиальный сток в конической части равен:

$$\Phi_{\text{к}} = \frac{Q}{2\pi H_{\text{к}}} = 250 \text{ см}^2/\text{с}.$$

Принимая для приближенной оценки, что равномерность распределения частиц сохраняется и на входе в коническую часть циклона, формулу (III.12) можно написать в виде

$$E_{\Phi} \approx \frac{R_* - 0{,}1\, R_{\text{вып}}}{R_2 - 0{,}1\, R_{\text{вып}}},$$

после чего, пользуясь формулой (III.9), получим:

$$d_{0,05} \approx 3{,}6 \cdot 10^{-2} \cdot 1{,}2\ \frac{250^{0,5}}{2{,}07 \cdot 10^4} = 0{,}33 \cdot 10^{-4} \text{ см}.$$

Таким образом, расчетом установлены две точки зависимости фракционной эффективности циклона $E_{\Phi}(d)$, которая в вероятностно-логарифмической сетке имеет вид прямой [2]; размер частиц, полностью отделяющихся из потока, $d>13$ мкм и размер частиц, совершенно не улавливаемых циклоном, $d<0{,}3$ мкм. На рис. III.9 показана расчетная зависимость $E_{\Phi}(d)$ — линия *7*, удовлетворительно совпадающая с экспериментальной зависимостью (линия *5*).

На практике часто применяют циклоны значительно большего размера. Из уравнения (III.9) следует, что с увеличением диаметра циклона размер улавливаемых частиц должен увеличиваться пропорционально $D^{0,5}$. Таким образом, циклоном, диаметр которого равен, например, 280 см, будут эффективно уловлены частицы крупнее примерно 40 мкм.

На рис. III.9 показаны расчетная зависимость циклона СК-НИИОГаз диаметром 280 см (линия *8*), по схеме мало отличающегося от рассмотренного, и экспериментальные точки, определенные в работе [91], подтверждающие это положение.

Некоторое расхождение с экспериментальными данными в нижней части линий может быть обусловлено тем, что при построении эксперимен-

тальных графиков в области малых значений $E_ф$, где получить достоверные данные чрезвычайно сложно, обычно исходят из предположения, что начало функции $E_ф(d)$ совпадает с началом координат Как видно из приведенного анализа, существуют частицы, которые вследствие своей малости совершенно не улавливаются циклонами.

В приведенном анализе не учитывалось возможное влияние упругого отскока от стенок циклона и влияние турбулентности потока Влияние первого фактора смягчается быстрым затуханием v_R и большой концентрацией частиц вблизи стенок, в особенности в конической части циклонов с возратным течением. Турбулентные пульсации могут оказывать определенное влияние на движение частиц по стационарной орбите в опасной зоне, вблизи R_1. Исследования В. Ю. Падва дают основание полагать, что оно может быть положительным, так как уменьшает долю частиц, сносимых к центру течения [65].

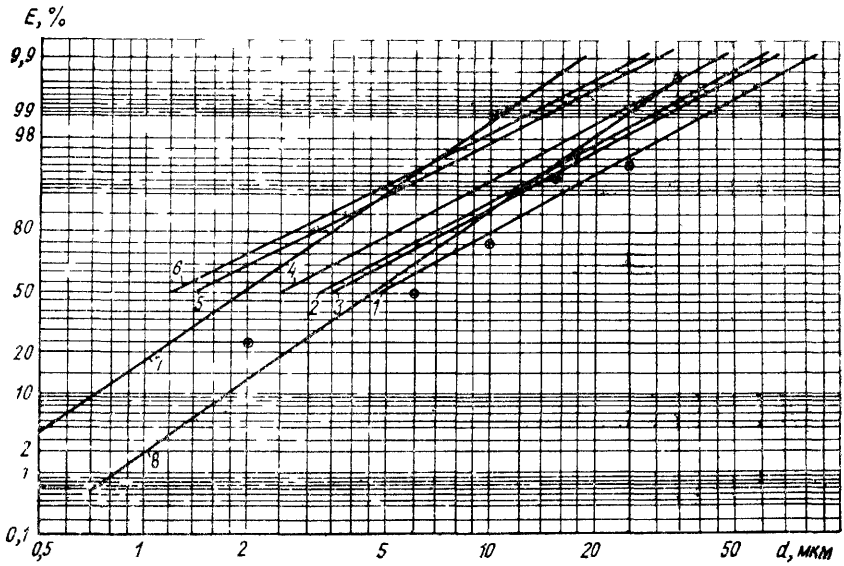


Рис III 9 Фракционная эффективность циклонов НИИОГаза

экспериментальная (циклонов диаметром 300 мм при $\rho = 2{,}67$ г/см³) *1* — ЦН 24, *2* — ЦН 15у *3* — ЦН 15, *4* — ЦН 11, *5* — СДК ЦН 33 *6* — СК ЦН 34 расчетная *7* — СДК-ЦН 33 диаметром 300 мм, *8* — СК-НИИОГаз диаметром 2800 мм, точки — экспериментальные данные по работе [91]

На основании изложенного сепарационный процесс, происходящий в циклонных аппаратах, можно представить следующим образом. При входе в циклон пылевые частицы в силу инерции вначале движутся по прямолинейным траекториям. Затем увлекающее воздействие вращающегося воздушного потока искривляет их траектории, причем тем больше, чем больше расстояние от места входа частиц до наружной стенки циклона. Начальный

участок движения характеризуется энергичной сепарацией наиболее крупных частиц из периферийной части потока. При дальнейшем движении частиц тангенциальная составляющая их скорости приближается к скорости потока воздуха. Здесь сепарация частиц определяется непрерывным изменением вектора тангенциальной составляющей скорости воздуха и, вследствие этого, наличием радиальной составляющей скорости частицы относительно среды. При достаточной продолжительности движения из потока могли бы быть выделены частицы любого размера. Этому, однако, препятствуют некоторые факторы. В циклонах с возвратным движением потока сепарация частиц закономерно ограничивается радиальным стоком, который препятствует центробежному движению крупных частиц и увлекает мелкие частицы в направлении восходящего потока. Те из частиц, для которых увлекающая сила стока уравновешивается силой инерции на стационарной орбите вращения в пределах нисходящего потока, вступают в соприкосновение со стенками циклона и могут быть уловлены, а более мелкие выносятся в восходящий поток и покидают циклон с осевым течением.

В результате сепарационного процесса периферийные слои циклонного течения обогащаются пылевыми частицами. Чем больше концентрация частиц в очищаемом воздухе, тем больше плотность частиц в периферийном слое и тем больше вероятность их столкновений. В результате этих столкновений неупорядоченные движения одиночных частиц, в частности при их отскоке, в некоторой мере амортизируются другими частицами. Таким образом, с повышением начальной концентрации эффективность сепарации должна возрастать, как это и наблюдается на практике.

Конструкции циклонов

Подразделение циклонов на аппараты большой производительности и аппараты повышенной эффективности возникло сравнительно недавно и носит качественный характер. К циклонам большой производительности принято относить аппараты с диаметром более 600 мм, а к высокоэффективным — аппараты с меньшим диаметром и, как правило, с более развитой конической частью, иногда объединяемые для получения нужной пропускной способности в групповые установки.

Результаты многочисленных испытаний циклонов показали наличие связи между эффективностью циклонов и их сопротивлением, а именно: эффективные циклоны обладают бо́льшим сопротивлением.

Циклоны НИИОГаза. Различают две группы циклонов НИИОГаза: цилиндрические и конические[1].

[1] Описание циклонов НИИОГаза дается в соответствии с работой [115].

ТАБЛИЦА III 3

Основные размеры цилиндрических циклонов НИИОГаза (в долях от диаметра циклона D)

Размеры	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-15у	ЦН-24
Внутренний диаметр циклона D	1	1	1	1
Высота:				
входного патрубка a	0,48	0,66	0,66	1,11
выхлопной трубы $h_т$	1,56	1,74	1,5	2,11
цилиндрической части $H_ц$	2,06	2,26	1,51	2,11
конической части $H_к$	2	2	1,5	1,75
внешней части выхлопной трубы $h_в$	0,3	0,3	0,3	0,4
Внутренний диаметр:				
выхлопной трубы $D_{вых}$	0,59			
пылевыпускного отверстия циклона $D_{вып}$	0,3—0,4			
Ширина входного патрубка b	0,26			
Длина входного патрубка l	0,6			

В системах вентиляции применяют главным образом цилиндрические циклоны серии ЦН (ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24) с удлиненной цилиндрической частью (рис. III.10 и табл. III.3), которые характеризуются умеренным сопротивлением. Верхней плоскости циклона придана винтовая форма, причем наклон

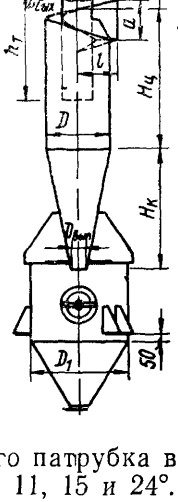


Рис III 10. Схема цилиндрического циклона НИИОГаза

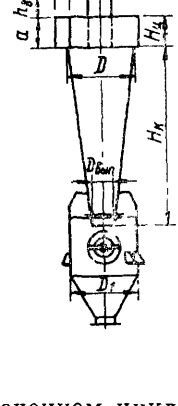


Рис III 11 Схема конического циклона НИИОГаза

входного патрубка в соответствие с обозначением циклонов составляет 11, 15 и 24°. Отношение диаметров выхлопной трубы и цилиндрической части $D_{вых}/D$ во всех циклонах составляет 0,59 [38]. Циклоны ЦН-15у отличаются от ЦН-15 только меньшей высотой.

Пылесборный бункер, как правило, выполняется цилиндриче-

ским с диаметром $D_1 \approx 1{,}5D$. Высота цилиндрической части бункера принимается равной $0{,}8D_1$. Коническое днище бункера выполняется с углом наклона стенок 60°. Для установки на опорные конструкции бункера снабжаются опорными лапами по МН 5128-63. Плоские крышки цилиндрических бункеров снабжаются ребрами жесткости с учетом разрежения, которое может возникать в бункере.

Диаметр отверстия для выгрузки пыли принимается в зависимости от емкости бункеров от 0,2 до $0{,}5D_1$. Как правило, диаметр отверстия не должен быть меньше 200 мм, однако в бункерах диаметром меньше 500 мм иногда делают отверстия диаметром 150 и даже 100 мм. При улавливании слипающейся и плохо ссыпающейся пыли размер пылевыпускных отверстий бункеров и самих циклонов диаметром <500 мм следует принимать равным $0{,}55D$. Общая высота циклона в сборе с бункером составляет от 6 до 7 D.

Конические циклоны серии С (сажевые) типов СДК-ЦН-33 и СК-ЦН-34 отличаются от цилиндрических циклонов серии ЦН значительно большим сопротивлением, но и существенно большей эффективностью и в некоторых случаях могут обеспечить надлежащую очистку выбросов, заменяя более сложные в эксплуатации мокрые пылеуловители.

Внешне циклоны серии С отличаются более удлиненной конической частью, спиральным входным патрубком и меньшим диаметром выхлопной трубы (рис. III.11 и табл. III.4): отношение $D_{вых}/D$ в рассматриваемых циклонах составляет соответственно 0,334 и 0,34.

ТАБЛИЦА III.4

Основные размеры конических циклонов НИИОГаза (в долях от диаметра D цилиндрической части циклона)

Размеры	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34
Внутренний диаметр цилиндрической части D	1	1
Высота:		
входного патрубка a	0,535	0,515
цилиндрической части $H_ц$	0,535	0,515
конической части $H_к$	3	2,11
внешней части выхлопной трубы $h_в$	0,2—0,3	0,2—0,3
Внутренний диаметр:		
выхлопной трубы $D_{вых}$	0,334	0,34
пылевыпускного отверстия $D_{вып}$	0,334	0,229
Ширина входного патрубка b	0,264	0,214
Текущий радиус улитки ρ	$\frac{D}{2} + b\frac{\varphi}{2\pi}$	$\frac{D}{2} + b\frac{\varphi}{\pi}$

Примечание: φ — угол разворота спирали.

Бункера конических циклонов конструируются так же, как и цилиндрических.

Эффективность циклонов НИИОГаза характеризуется графиком, представленным на рис. III.9. Как видно из графика, в циклонах серии *С* (линии *5* и *6*) может быть обеспечено эффективное улавливание пылевых частиц >8 мкм (IV класс эффективности), а в циклонах серии ЦН (линии *1—4*) — >20 мкм (V класс эффективности). Эффективность циклонов ЦН уменьшается по мере возрастания угла входа воздуха в них.

Эффективность циклонов определена при $D=300$ мм и скорости воздуха в плане для цилиндрических циклонов $w_ц=3{,}5$ м/с, для циклонов СДК-ЦН-33 $w_ц=2$ м/с и для циклонов СК-ЦН-34 $w_ц=1{,}75$ м/с.

Коэффициенты сопротивления циклонов, отнесенные к скорости в плане, приведены в табл. III.5. Эти данные получены при испытаниях циклонов диаметром 500 мм при скорости $w_ц=3$ м/с. С уменьшением диаметра циклонов сопротивление несколько уменьшается. Для циклонов $D>500$ мм сопротивление практически не меняется.

ТАБЛИЦА III.5

Коэффициенты сопротивления циклонов НИИОГаза

Марка циклона	Коэффициенты сопротивления циклонов		
	с выбросом в атмосферу без раскручивателей	с улиточным раскручивателем	с кольцевым диффузором
ЦН-11	250	235	215
ЦН-15	163	150	140
ЦН-15у	170	158	148
ЦН-24	80	73	70
СДК-ЦН-33	600	500	—
СК-ЦН-34	1150	—	—

Для очистки больших объемов воздуха цилиндрические циклоны НИИОГаза могут компоноваться в группы, объединенные общим пылесборником и коллектором очищенного воздуха[1]. Разработаны прямоугольные компоновки циклонов ЦН-15 с установкой двух циклонов в один ряд, четырех, шести и восьми циклонов в два ряда, а также круговые компоновки на 10, 12 и 14 циклонов (табл. III.6 и III.7) [115].

На рис. III.12 показана прямоугольная компоновка восьми циклонов ЦН-15, смонтированных на общем бункере. Отвод очищенного воздуха производится с помощью кольцевого диффузора, а подвод очищаемого воздуха — с помощью коллектора прямоугольного сечения, от которого отходят ответвления к каждому из циклонов. Разработаны также компоновки с отводом очищенного воздуха через улиточные раскручиватели и далее через

[1] Конические циклоны объединять в группы не рекомендуется.

ТАБЛИЦА III.6

Технические показатели групповых циклонов ЦН-15 (прямоугольные компоновки)

Диаметр циклона, мм	Пропускная способность, тыс м³/ч, при числе циклонов в группе				Общая высота установки $H_{общ}$, мм, при числе циклонов в группе				Размер бункера в плане D_1 или $A = Б$, мм, при числе циклонов в группе			
	2	4	6	8	2	4		8	2	4		8
									D_1		$A = Б$	
200	0,8	1,6	2,4	3,2	2169	2694	2710	3207	500	800	900	1200
300	1,8	3,6	5,4	7,2	3250	3735	3860	4410	800	1000	1200	1600
400	3,2	6,4	9,6	12,8	4240	5011	5066	5766	1000	1400	1600	2000
500	5	10	15	20	4850	6046	5975	6556	1000	1600	1700	2300
600	7,1	14,2	21,2	28,4	5807	7072	7067	7847	1200	1800	2000	2700
700	9,7	19,4	29,1	38,8	6733	8208	7858	8753	1400	2000	2300	3000
800	12,7	25,4	38,1	50,8	7755	9569	9155	10 110	1600	2400	2700	3450
900	16	32	48	64	8750	10 950	10 055	11 285	1800	2800	3000	3850
1000	19,9	39,8	59,7	79,6	9650	11 794	11 105	12 589	2000	3000	3300	4250

ТАБЛИЦА III.7

Технические показатели групповых циклонов ЦН-15 (круговые компоновки)

Диаметр циклона мм	Пропускная способность, тыс м³/ч, при числе циклонов в группе			Общая высота установки $H_{общ}$, мм, при числе циклонов в группе			Размер бункера в плане D_1, мм, при числе циклонов в группе		
	10	12	14	10	12	14	10	12	14
600	35,5	42,4	49,6	7670	8200	8740	2800	3200	3600
800	63,5	76,2	89	10 393	11 253	12 013	3900	4500	5000
1000	99,5	120	140	13 330	14 109	14 750	5000	5500	6000

коллекторы с самостоятельным подключением каждого циклона. Для доступа в бункеры и коллекторы предусмотрены люки.

Бункера для установки двух и четырех циклонов цилиндрические, а для установки шести и восьми циклонов прямоугольные (см. табл. III.6)[1].

Коэффициент сопротивления групповых циклонов ЦН-15 с прямоугольной компоновкой при учете подводящих коллекторов и сборников очищенного воздуха для расчетов следует принимать $\zeta \approx 175$.

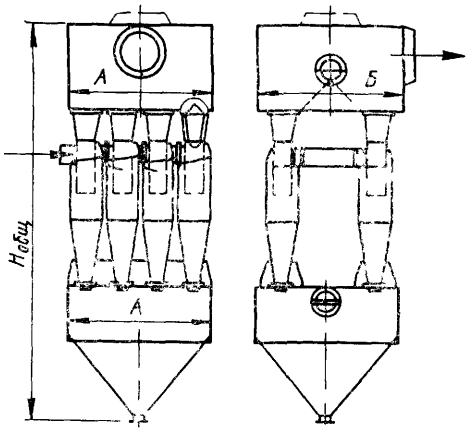


Рис. III 12. Прямоугольная групповая компоновка восьми циклонов ЦН-15

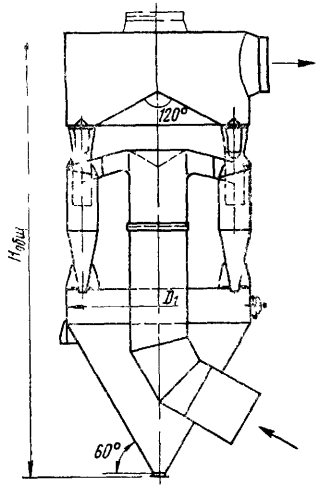


Рис. III 13 Круговая групповая компоновка 14 циклонов ЦН-15

На рис. III.13 показана круговая компоновка 14 циклонов ЦН-15. В данном случае очищаемый газ подводится снизу через пылесборный бункер, что связано с некоторым усложнением конструкции и увеличением коэффициента сопротивления ($\zeta \approx 200$), но может представлять удобство для более рационального размещения воздуховодов.

Циклоны СИОТ. Циклоны Свердловского института охраны труда отличаются высокой эффективностью. Они совсем не имеют цилиндрической части, поэтому их выхлопная труба вводится в конус. Особенностью циклонов СИОТ является также треугольное сечение входного патрубка (см. рис. III.4,*е*). Коэффициент местного сопротивления циклона с улиточным раскручивателем равен 3,9 (по скорости во входном сечении циклона). Рекомендуемая скорость входа воздуха 15—18 м/с.

Циклоны МИОТ. В циклонах Московского института охраны труда к цилиндрической части примыкает не коническая часть,

[1] В табл III 6 в соответствии с вентиляционной практикой максимальный диаметр циклонов, применяемых в группах, ограничен 1000 мм. В руководстве [115] разработаны компоновки циклонов и большего размера.

как обычно, а наоборот, расширяющаяся (см. рис. III.4,*а*). Несомненно, что такая форма нижней части циклона ослабляет влияние вторичных циркуляционных течений и уменьшает износ корпуса. В некоторых случаях предупреждается «зависание» слипающейся пыли [54].

Другой особенностью циклонов МИОТ является устройство в их нижнем сечении, выше бункера, конусного днища в виде обращенной вверх воронки с отверстием по оси. Внутренний конус образует кольцевую щель вдоль стенок корпуса циклона, способствующую отделению периферийных слоев течения, обогащенных пылевыми частицами, для пропуска их в бункер. Благодаря этому в бункере уменьшается интенсивность циркуляции и облегчается осаждение пыли. Воздух выходит из бункера через осевое отверстие под влиянием разрежения. Над поверхностью внутреннего конуса возникает своего рода донное течение, которое, однако, уже не может увлечь осевшую пыль, защищенную от него внутренним конусом. Сопротивление циклона высокое. Коэффициент местного сопротивления циклона МИОТ без улиточного раскручивателя равен 6,7 (по скорости во входном сечении).

Циклон Файфеля. На некоторых предприятиях топливной промышленности с успехом эксплуатируются циклоны Файфеля. Схема циклона представлена на рис. III.4,*г*. В нижней части циклона имеется устройство, способствующее отделению периферийных, обогащенных пылью, слоев течения, аналогичное такому же устройству в циклоне МИОТ. В данном случае это устройство выполнено в виде плоского щита с центральным отверстием для рециркуляции воздуха в бункере.

Корпус циклона выполнен с двумя переходами от цилиндрической к конической конфигурации. Согласно В. В. Батурину [8], цилиндрическая вставка в коническую часть циклона уменьшает интенсивность вихря в нижней части циклона и в некоторой мере ослабляет размывающие донные течения. Воздух входит в циклон через спиральный закручивающий аппарат. Сопротивление циклона высокое — $\zeta = 6{,}7$.

4. ЖАЛЮЗИЙНЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ СУХОГО ТИПА

Основным элементом жалюзийных пылеуловителей является пластинчатая решетка, пластинки которой располагаются под углом к направлению потока воздуха. Решетка устанавливается так, что обтекающий ее поток запыленного воздуха разбивается на тонкие плоские струйки. Каждая из струек совершает поворот, при этом крупные частицы под влиянием сил инерции ударяются о пластинки. Упругие частицы отражаются от пластинок под углом, близким к углу падения, и не проходят через жалюзи, а, отскакивая, увеличивают концентрацию в основном потоке, который отводится из аппарата в циклон. Менее упругие частицы и частицы, движущиеся под большим углом к линии жа-

люзи, увлекаются потоком и остаются в очищенном воздухе. Как видно из описанного механизма сепарации, эффективность жалюзийных пылеуловителей зависит не только от крупности, но и от упругих свойств пыли: она очень низка в области частиц размером 20 мкм, достигая 95—97% при упругих частицах размером 40—50 мкм [111].

Окончательное осаждение пыли происходит в циклоне.

Компактность жалюзийных пылеуловителей вновь вызвала к ним интерес в 40-е годы[1]. С 1943 г. получили распространение так называемые инерционные пылеуловители типа ИП (рис. III.14) [85].

Воздух проходит через жалюзийную решетку пылеуловителя, которая представляет собой конус, выполненный под углом 14° из стальных конусных колец убывающего диаметра, изготовленных из стальных пластин толщиной 2 мм. Кольца установлены так, что образуют угол 120° с направлением движения воздуха. Зазоры между кольцами составляют около 4 мм. Выделенный здесь пылевой концентрат объемом до 10% общего количества очищаемого воздуха отводится в небольшой циклон, в котором происходит отделение пы-



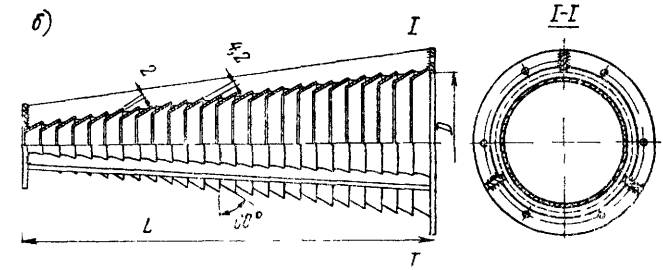


Рис. III.14. Жалюзийный пылеуловитель типа ИП

а — схема; *б* — конструкция жалюзийной решетки; *1* — вентилятор; *2* — циклон, *3* — жалюзийная решетка

ли. Очищенный в циклоне воздух присоединяется к основному потоку и выбрасывается вентилятором.

При установке пылеуловителей после вентилятора на нагнетательной части аспирационной системы пылевой концентрат вводится в циклон под напором вентилятора, а воздух, очищенный в циклоне, отводится к всасывающему отверстию вентилятора.

Пылеуловители типа ИП производства Лисичанского литейно-механического завода имеют девять типоразмеров (табл. III.8).

[1] Одно из первых описаний жалюзийных пылеуловителей относится к 1930 г.

ТАБЛИЦА III 8

Технические показатели пылеуловителей типа ИП

Типоразмер	Основные размеры, мм		Пропускная способность, м³/ч, при скорости воздуха во входном сечении, м/с			Масса, кг
	диаметр входного отверстия *D*	длина с фланцами *L*	15	20	25	
ИП-1-115	115	342	560	746	934	2,7
ИП-2-135	135	405	772	1030	1290	3,5
ИП-3-175	175	532	1300	1730	2160	5,5
ИП-4-215	215	661	1950	2600	3260	10,1
ИП-5-255	255	788	2760	3670	4580	13,2
ИП-6-355	355	1042	4750	6340	7920	20,9
ИП-7-415	415	1298	7300	9400	12 150	39,8
ИП-8-475	475	1488	9550	12 750	15 930	49,5
ИП-9-515	515	1615	11 250	15 000	18 750	56,2

Коэффициент местного сопротивления конусов, отнесенный к скорости во входном сечении, принимают равным 2.

Пылеуловители типа ИП комплектуются циклонами типа ЦИП. Для пылеуловителей от ИП-1 по ИП-7 включительно применяются циклоны с соответствующими обозначениями — от ЦИП-1 по ЦИП-7. Пылеуловитель ИП-8 агрегируется с двумя циклонами ЦИП-6, а пылеуловитель ИП-9 — с двумя циклонами ЦИП-7. Коэффициент местного сопротивления циклонов, отнесенный к скорости воздуха во входном патрубке, равен 3,6. По данным Е. В. Рекка, эффективность пылеуловителей при искусственном запылении воздуха цементом составляет 92%.

С течением времени практика показала, что, будучи по эффективности равноценны циклонам, жалюзийные пылеуловители несколько уступают им по надежности. В связи с этим применение пылеуловителей типа ИП в аспирационных системах сократилось.

В последние годы в связи с широким освоением пустынных и полупустынных районов, характеризующихся высокой запыленностью воздуха во время пыльных бурь, а также в связи с созданием мощных строительных машин, вызывающих сильное пылеобразование при рыхлении и погрузке грунтов, возникла потребность в простых и прочных пылеотделителях для защиты оборудования от крупнодисперсной пыли. В отличие от пылеуловителей в этих аппаратах улавливания отделенной пыли не производится. При необходимости их объединяют с уловителями, например, циклонного типа.

Жалюзийные решетки по своим компоновочным и другим особенностям оказались очень удобными для применения в качестве пылеотделителей, в связи с чем они начали вновь получать распространение. Не исключается применение таких решеток также для предварительной очистки воздуха в вентиляционных системах. Один из случаев применения жалюзийной решет-

ки для очистки воздуха, потребляемого компрессорной установкой, описан в главе IV.

Жалюзийные пылеотделители Даст Лавр фирмы «ААФ». Пылеотделитель Даст Лавр представляет собой клиновидную конструкцию, образованную двумя плоскими жалюзийными решетками (рис. III.15). Для повышения жесткости внутреннее пространство разделено плоскими перегородками. К вершине клина подсоединен воздуховод для отсоса пылевого концентрата. Фирма рекомендует отсасывать с пылью 10% воздуха.

Пылеотделители предлагается применять для очистки загрязненного атмосферного воздуха при пыльных бурях в степях запада и юго-запада США, Аравии и Сахары, а также воздуха, забираемого на запыленных территориях промышленных предприятий. Пылеотделители Даст Лавр устанавливаются на компрессорных установках в пустынных районах в качестве первой ступени очистки перед воздушными фильтрами и при очистке воздуха в турбинах железнодорожных локомотивов в Южной Африке.

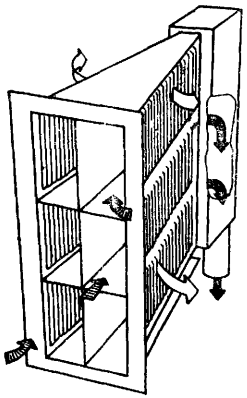


Рис III 15 Жалюзийный пылеотделитель Даст Лавр

Жалюзийные пылеотделители Дина — ФЭН. Фирма «Фэрр» (США) выпускает жалюзийные пылеотделители, предназначенные для очистки воздуха, подаваемого в кабины локомотивов и потребляемого их двигателями.

При испытаниях этих пылеотделителей на воздухе, запыленном стандартной пылью США «Аризона-крупная» и «Аризона-мелкая» (см. рис. I.1), эффективность их составляла соответственно 95 и 80%. Начальная концентрация пыли 84 мг/м^3, объем отсасываемого концентрата примерно 10%. Скорость потока запыленного воздуха 11 м/с. Сопротивление пылеотделителя в этих условиях 50 кгс/м^2 [35].

5. ПРОТИВОТОЧНЫЕ ИНЕРЦИОННЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ

В противоточных пылеуловителях воздушный поток движется в направлении, противоположном направлению действия инерционных сил, и частицы пыли приобретают отрицательное ускорение, т. е. тормозятся.

На рис. III.16 представлена принципиальная схема противоточного пылеуловителя типа ЦРП [89]. Вентиляторное колесо, развивающее большее разрежение, просасывает запыленный воздух через второе колесо в направлении, противоположном естественному течению воздуха в рабочих колесах вентиляторов, а именно — от периферии к центру.

Как известно, распределение скоростей по поперечному сечению каналов центробежных машин отличается неравномерностью, связанной с действием кориолисовых сил и вторичной циркуляцией. Очевидно, что неравномерное распределение скоростей имеет место и в каналах радиального пылеотделителя. Вследствие этого значительная часть пылевых частиц увлекается воздушным потоком, преодолевающим действие инерционных сил и попадает в очищенный воздух.

На реальную эффективность пылеуловителей ЦРП, кроме того, оказывают влияние неблагоприятные условия осаждения отделившейся пыли в бункере аппарата.

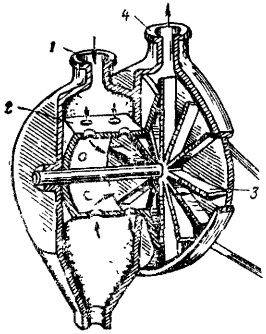


Рис. III.16. Схема противоточного пылеуловителя ЦРП

1 — патрубок для входа запыленного воздуха; *2* — ротор пылеуловителя; *3* — рабочее колесо вентилятора; *4* — патрубок для выхода очищенного воздуха

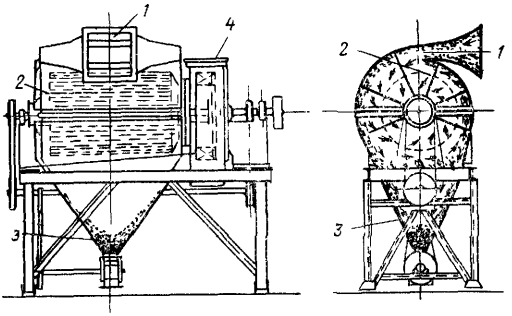


Рис. III.17. Общий вид противоточного пылеуловителя фирмы «Холмс-Джаффер»

1 — патрубок для входа запыленного воздуха; *2* — вращающийся барабан; *3* — пылесборный бункер; *4* — вытяжной вентилятор

Аналогичный противоточный пылеотделитель В. С. Грищенко представляет собой барабан, собранный с небольшими зазорами из кольцевых дисков, насаженных на вал вентилятора. Торцовой диск делается глухим. Воздух, засасываемый вентилятором, может пройти во всасывающее отверстие только через зазоры между дисками, где закручивается и очищается от пыли. Чем меньше зазор между дисками, тем больше скорость закручивания, и, следовательно, центробежные силы и эффективность пылеотделения. В то же время с уменьшением зазоров возрастает расход энергии как на преодоление сопротивления трения, так и на создание скорости закручивания.

На рис. III.17 представлен аналогичный пылеуловитель фирмы «Холмс—Джаффер» [66]. Запыленный воздух просасывается с помощью вентилятора через вращающийся барабан, снабжен-

ный продольными лопатками. Отделяющаяся при этом пыль скапливается в бункере.

Существенным недостатком противоточных пылеотделителей является большой расход энергии. Эти аппараты представляют собой центробежный нагнетатель. Полный напор очищаемого газа при прохождении через пылеотделитель уменьшается на величину напора, создаваемого самим пылеотделителем.

Противоточные пылеуловители не получили широкого распространения, однако в последние годы большую популярность приобрели приборы БАКО для анализа дисперсного состава пыли, построенные по принципу противоточных пылеотделителей.

6. РОТАЦИОННЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ СО СТЕРТЫМ ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ

Примером таких пылеуловителей служит пылеуловитель Вертекс, представляющий собой вращающуюся газовую центрифугу непрерывного действия. Аппарат выполняется в виде нескольких концентрически установленных барабанов длиной около 3 м, вращающихся вокруг общей оси. Диаметр наружного барабана равен 2 м. Запыленный воздух подводится по касательной к распределительной камере, закручивается в ней и, вращаясь, проходит в кольцевые полости, образуемые барабанами. Движение стенок барабанов поддерживает вращение воздуха, а возникающее трение уравнивает скорость его вращения со скоростью барабана Под влиянием центробежных сил пылевые частицы осаждаются на внутренних поверхностях барабанов. При этом мелкие частицы комкующейся пыли могут налипать на них.

Пылеуловители Вертекс устанавливаются параллельно в количестве не менее двух агрегатов и работают попеременно.

Можно полагать, что высокая эффективность пылеуловителей Вертекс в значительной мере обусловлена отсутствием или незначительным выражением пограничного слоя. В пылеуловителях Вертекс тангенциальные составляющие скорости воздуха мало отличаются от скоростей движения стенок барабанов Вследствие этого частицы, осевшие на их поверхности, не отрываются, а остаются прижатыми или налипшими к ним. В пылеуловителях Микроплекс в отличие от описанного пылеуловителя вращаются плоские верхнее и нижнее днища. Для предотвращения торможения воздуха у днища и возникновения циркуляционных течений скорость вращения днища должна быть равна тангенциальной составляющей скорости потока воздуха.

7. ВЕНТИЛЯТОРНЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ

Общие принципы устройства вентиляторных пылеуловителей

Движение запыленного воздуха в рабочем колесе вентилятора и его направляющем аппарате происходит в условиях, благоприятствующих сепарации пылевых частиц. Идея использования

центробежных вентиляторов в качестве своего рода обогатительных аппаратов для попутного выделения из перемещаемого ими воздуха пылевого концентрата осуществлена в ряде пылеотделителей. Неоспоримым преимуществом этих аппаратов является их компактность.

В наиболее простых конструкциях пылеуловителей этой группы выделение пыли из воздушного потока происходит в кожухе вентилятора. Значительно больший интерес представляют вентиляторные пылеуловители, в которых используются инерционные процессы, происходящие в каналах лопаточных рабочих колес центробежных вентиляторов.

Известно, что лопатки центробежных вентиляторов, перемещающих газы, содержащие твердые частицы, подвержены сильному износу. При мелкодисперсных аэрозолях, способных к налипанию, на поверхностях лопаток образуются корки. Так, при перекачке коксового газа на коксохимических заводах наблюдалось выпадение из него смолы, скапливающейся в кожухе эксгаустеров, что сильно затрудняло их эксплуатацию [11].

При вращении рабочего колеса воздух, находящийся в пространстве между лопатками, закручивается, а затем вытекает из рабочего колеса в кожух и далее в атмосферу; на его место через всасывающее отверстие вентилятора поступают новые объемы воздуха — вентилятор «подает» воздух. Закручивание воздуха происходит в результате преодоления его давления на поверхность лопаток и определяется в основном кориолисовыми силами инерции [84]. При этом воздух приобретает скорость, которая может быть разложена на две составляющие: переносную скорость вращения, равную скорости вращения рабочего колеса ω, и относительную скорость протекания воздуха в рабочем колесе w (рис. III.18). Если в перемещающемся таким образом воздухе содержатся пылевые частицы, то они вовлекаются в это движение, причем прямолинейность движения частицы, входящей в межлопаточный канал, нарушается аэродинамической силой, приложенной к ней со стороны потока, уже получившего вращательное движение. Так как инерция пылевых частиц значительно больше инерции воздуха, скорость вращения частиц несколько меньше скорости воздуха. Отставание частиц от потока в его вращательном движении приводит к тому, что они как бы отжимаются к набегающей поверхности лопатки.

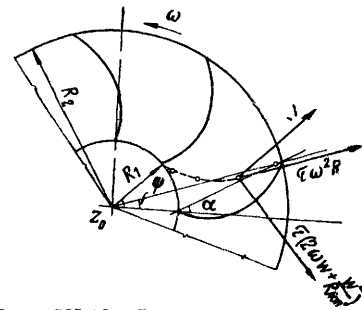


Рис. III.18. Схема движения пылевой частицы в межлопаточном пространстве рабочего колеса центробежного вентилятора

Сепарация пылевых частиц из потока всегда происходит при

перемещении вентилятором запыленного воздуха. Эффективность сепарации определяется размером наименьших частиц, успевающих достичь поверхности лопатки при самых неблагоприятных условиях их входа в межлопаточный канал. Более крупные частицы отделяются полностью, менее крупные — только частично, пропорционально их размеру и плотности.

Движение частицы в криволинейном канале, образуемом лопатками колеса, в случае, когда оно не вращается, определяется уравнением (I.15).

Представим теперь, что колесо начало вращаться с окружной скоростью $u=\omega_к R_к$, где $\omega_к$ — угловая скорость вращения рабочего колеса; $R_к$ — расстояние от центра вращения колеса до произвольной точки в плоскости вращения. Очевидно, что рассматриваемая частица будет вращаться со скоростью, незначительно отличающейся от u. Примем для упрощения, что эти скорости равны. При этом условии инерция частицы возрастает на величину равнодействующей центробежной и кориолисовой сил, связанных с вращением колеса. Сохраняя для изменившейся скорости потока обозначение $\mathbf{w}$, примем, что скорость $\mathbf{v}_c$ достигается частицей мгновенно и сохраняется постоянной все короткое время ее движения. Опустим также член уравнения (I.16), отражающий влияние кориолисовой силы, связанной с движением частицы относительно лопаток колеса, значительно меньший, чем член, отражающий вращение колеса. Тогда относительное движение частицы в межлопаточном канале определяется уравнением

$$\omega\times(\omega\times\mathbf{R})+\omega_к\times(\omega_к\times\mathbf{R}_к)+2\,(\omega_к\times\mathbf{w})+\frac{1}{\tau}\,\mathbf{v}_c=0. \qquad \text{(III.13)}$$

Обозначим абсолютную скорость воздушного потока в канале через $\mathbf{c}=\mathbf{w}+\mathbf{u}$. Скорость частицы в тех же условиях вследствие ее большей плотности будет равна: $\mathbf{c}_a=\mathbf{w}+\mathbf{u}+\mathbf{v}_c$.

В системе координат, вращающейся вместе с колесом, относительная скорость частицы приближенно равна $\mathbf{v}=\mathbf{w}+\mathbf{v}_c$ или в координатной форме с учетом уравнения (III.13)

$$\left.\begin{aligned}\frac{dx}{dt}&=w\cos\alpha+\tau\,\omega^2 x+\tau\left(2\,\omega\,w+\frac{w^2}{R_{лоп}}\right)\sin\alpha;\\ \frac{dy}{dt}&=w\sin\alpha+\tau\,\omega^2 y-\tau\left(2\,\omega\,w+\frac{w^2}{R_{лоп}}\right)\cos\alpha.\end{aligned}\right\} \qquad \text{(III.14)}$$

Исследования показали, что криволинейный диффузор, образуемый лопатками колеса, не заполняется полностью воздушным потоком; активное сечение потока при работе колеса на оптимальном режиме остается более или менее постоянным [84].

В вентиляторах с прямыми радиальными лопатками, кроме того, является постоянной величиной угол α (см. рис. III.18) и из уравнений (III.14) легко получить траектории пылевых частиц. Практически лопатки профилируются по различным кривым. Ре-

шение уравнений в этом случае может быть достигнуто путем некоторых упрощений.

Зависимость между минимальным размером частиц, полностью осаждающихся из потока на поверхностях лопаток, и геометрическими и кинематическими параметрами рабочего колеса вентилятора была получена в виде [73]

$$\tau = \frac{w\,[R_2 \sin(\alpha+\psi) - R_1 \sin(\alpha - z)]}{\left(2\omega w + \frac{w^2}{R_{\text{лоп}}}\right)[R_2 \cos(\alpha+\psi) - R_1 \cos(\alpha - z)] + \omega^2 R_1 R_2 \sin(\psi - z)}. \quad \text{(III.15)}$$

Если в уравнении (III.15) значения z меняются в интервале $0 \leqslant z \leqslant z_0$, то оно выражает собой зависимость $\tau = f(z)$ или при соответствующем изменении масштаба $\tau = f(z/z_0)$.

В момент входа в межлопаточный канал частицы распределены по сечению потока равномерно. Вследствие этого отношение z/z_0 определяет долю частиц любого размера, содержащуюся в части потока, ширина которого определяется углом z. Поэтому, если указанную зависимость решить относительно z/z_0, то получим фракционную эффективность $E_\Phi = \varphi(\tau)$.

Из уравнения (III.15) видно, что чем меньше вентилятор, тем эффективнее происходит сепарация пыли на его лопатках [74].

При движении осевших твердых пылевых частиц по поверхности лопаток последние изнашиваются. Из этого следует, что при прочих равных условиях небольшие вентиляторы изнашиваются скорее, чем большие. Этот вывод подтверждается практикой.

Из уравнения (III.15) следует также, что, уменьшая число лопаток, теоретически можно получить колесо такой конструкции, в котором вообще не будет происходить осаждение частиц. Таким образом, подтверждается давно установленная практикой целесообразность применения в аспирационных системах колес с небольшим числом лопаток.

Представляет интерес также исследование влияния радиальной протяженности лопаток на эффективность сепарации. Дифференциальные уравнения движения частиц при радиальных лопатках имеют вид

$$\frac{dx}{dt} = \tau\,\omega^2 x + w; \qquad \frac{dy}{dt} = \tau\,\omega^2 y - \tau\, 2\,\omega\, w.$$

Уравнение траектории пограничной частицы представляет собой прямую, а уравнение эффективности имеет вид

$$\tau = \frac{w R_1 \sin z}{2\omega w\,(R_2 - R_1 \cos z) - \omega^2 R_1 R_2 \sin z}. \quad \text{(III.16)}$$

Из этого уравнения видно, что с увеличением длины лопаток количество осаждающейся пыли возрастает. Отсюда следует, что

центробежные вентиляторы высокого давления с протяженными лопатками больше подвержены износу, чем вентиляторы низкого давления, имеющие короткие лопатки.

Для плоских наклонных лопаток ($z_0=\psi$) уравнение эффективности имеет простой вид:

$$\tau=\frac{\operatorname{tg}\beta_2}{2\omega},$$

где $\beta_2=\alpha-z$.

Из этого уравнения видно, что чем больше наклон лопаток в сторону вращения колеса, тем выше эффективность осаждения.

Исследования, кроме того, показывают, что при цилиндрических круто загнутых вперед лопатках эффективность осаждения и износ значительно больше, чем при плоских лопатках, особенно радиальных. В самом деле, разрушение криволинейных лопаток, в особенности их выходных кромок,— явление, хорошо известное в практике эксплуатации дымососов.

Очень велико влияние направления отгиба лопаток. При лопатках, отогнутых назад, направления действия кориолисовых и центробежных сил относительного движения не совпадают. В результате этого уменьшается сила, под влиянием которой частица приближается к набегающей поверхности лопатки. Таким образом, колеса с лопатками, загнутыми назад, являются оптимальными в отношении абразивного износа.

В обычных центробежных вентиляторах пыль, отделившаяся на лопатках, в дальнейшем вновь диспергируется в потоке. Как будет показано далее, соответствующим устройством колеса и кожуха вентилятора можно добиться отделения этой пыли от потока. При пыли, не обладающей высокой абразивностью, достигаемый при этом эффект компенсирует небольшой износ лопаток

Простейшие вентиляторные пылеуловители

Аппараты, описываемые в этом разделе, только в редких случаях могут сравниться по эффективности с циклонами, однако простота очистных установок, которая достигается при их применении, вынуждает иногда обращаться к ним.

Общим признаком простейших вентиляторов-пылеотделителей является использование инерционных сил, возникающих в результате воздействия на поток неподвижных элементов вентилятора

На рис. III.19 показан пылеуловитель Турбокаптер фирмы «Прат-Даниель» (Франция). По своему устройству этот пылеуловитель мало отличается от циклона. Отделение пыли здесь происходит под влиянием центробежных сил, вызванных искривлением траектории воздуха, следующего профилю спиралевидного кожуха *1*, на торцевых стенках которого она сепарируется Выделившиеся таким образом твердые частицы вместе с обогащенным ими слоем воздуха направляются шибером *2* в небольшой циклон *3*, где и происходит их окончательное осаждение.

Воздух, отходящий от циклона, вновь соединяется с основным потоком воздуха на напорной стороне пылеуловителя. Объем воздуха, участвующего в замкнутом цикле, регулируется шибером.

По литературным данным, расход энергии у пылеуловителя Турбокаптер больше, чем у обыкновенного вентилятора-дымососа, на 35%. Эффективность его при очистке дымовых газов составляла до 75%.

Из рис. III.19 видно, что в пылеуловителе Турбокаптер в целях пылеотделения использован процесс трансформации кинетической энергии воздуха в статическую, происходящий в спирале-

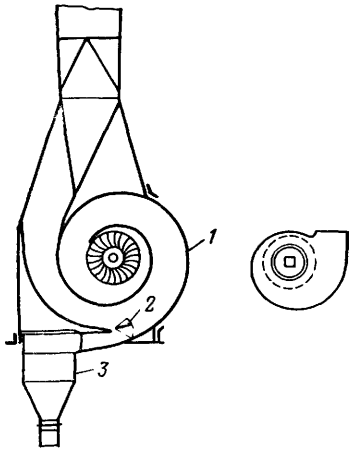


Рис III.19. Вентиляторный пылеуловитель Турбокаптер (справа обычный центробежный вентилятор)

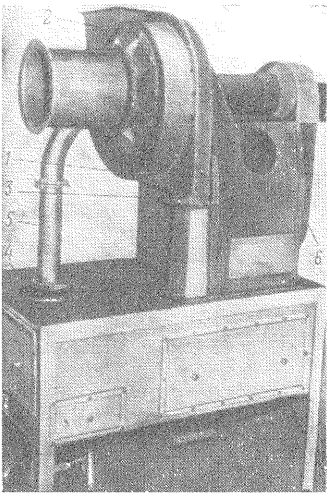


Рис III 20 Кориолисовый пылеуловитель типа ПВК

видном кожухе вентилятора. Сопровождающие этот процесс вредные потери энергии в пылеуловителе Турбокаптер искусственно увеличиваются, что видно при сравнении его кожуха с кожухом обычного центробежного вентилятора, представленным на том же рисунке.

Известны конструкции вентиляторов-пылеуловителей, в которых пылеулавливающая часть выполняется в виде приставки к вентилятору (Центриклон, Скиммер и др) для защиты его от износа крупными частицами пыли, легко отделяющимися в подобных простых устройствах.

В НИИОГазе разработан улиточный золоуловитель аналогичного назначения [42].

Вентиляторные пылеуловители с сепарирующим рабочим колесом

Вентиляторные пылеуловители типа КП (кориолисовый пылеотделитель). На рис. III.20 показан кориолисовый пылеуловитель типа ПВК, изготовленный Крюковским вентилятором заводом Основным элементом пылеуловителя является кориолисовый пылеотделитель *1,* отделяющий пыль от воздуха. Очищенный воздух выбрасывается через выхлопной патрубок *2,* а пыль с небольшим количеством воздуха через второй выхлопной патрубок *3* подается в бункер *4,* где происходит ее окончательное улавливание. Воздух из бункера может быть возвращен к всасывающему отверстию пылеотделителя по патрубку *5* для повторной очистки. Спиралеобразный кожух вентилятора-пылеотделителя делится на две части вертикальной диафрагмой. Одна часть предназначена для пылевого концентрата и связана с пылевым выхлопом кожуха, а вторая служит для отвода потока очищенного воздуха.

На рис. III.21 показан один из вариантов исполнения рабочего колеса пылеотделителя типа КП. Как видно по фотографии, лопатка имеет двойной профиль с переломом. Нижняя, «пылевая», часть лопатки примыкает к заднему диску колеса, на ее поверхности осаждается и далее движется сепарирующаяся пыль, верхняя, «маховая» часть лопатки выполняет только функцию закручивания воздуха. Пылевая часть лопатки выполняется цилиндрической с максимальной возможной кривизной и углом выхода не менее 15°.

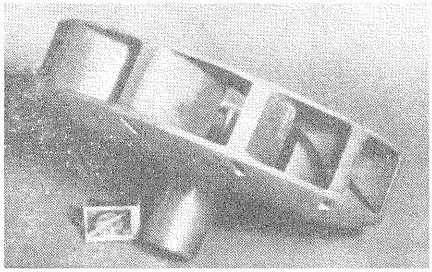


Рис III 21 Рабочее колесо вентилятора-пылеотделителя типа КП

Пылевые частицы сближаются с набегающими поверхностями лопаток и перемещаются вдоль них, оттесняясь плоскостью перелома лопаток к заднему диску колеса Пылевой концентрат, образующийся у выходной кромки пылевой части лопатки, проходит через отверстия в диске колеса в пылевую часть кожуха, откуда отводится в бункер, а очищенный воздух проходит во вторую половину кожуха и далее через выхлопное отверстие выбрасывается наружу.

Бункер разделен вертикальной перегородкой на два отсека Пылевой концентрат из пылеотделителя попадает в первый отсек бункера, где оседает наиболее крупная пыль. Частично очищенный воздух поступает в плоскодонный циклонный элемент типа ПЦ-6, где отделяются мелкие фракции пыли; очищенный

воздух возвращается к всасывающему отверстию пылеотделителя. Возможен также выброс этого воздуха в общую шахту. Пыль, отделенная циклоном, оседает во втором отсеке бункера.

Разработаны три типоразмера пылеуловителей ПВК (табл. III.9). Диаметр циклона 100 мм. Закручивающий аппарат в циклоне выполнен в виде колеса вентилятора с прямолинейными лопатками, загнутыми назад по касательной к сечению циклона (рис. III.22).

ТАБЛИЦА III.9

Технические показатели пылеуловителей типа ПВК

Показатели	ПВК № 3,2	ПВК № 5	ПВК № 6,8
Производительность, тыс. м³/ч	2,5	7	10
Полное давление, кгс/м²	175	170	200
Частота вращения, об/мин	3000	2200	1700
Число циклонных элементов	1	2	3

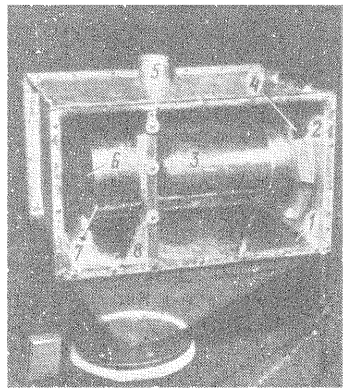


Рис III 22 Установка циклонного элемента в моделе пылесборного бункера типа ПВК

1 — первое отделение пылеосадительного бункера, *2* — выхлопная труба, *3* — циклонный элемент; *4* — закручивающий аппарат, *5* — патрубок для входа воздуха; *6* — циркуляционное осевое отверстие; *7* — пылевыпускные щели *8* — второе отделение пылеосадительного бункера

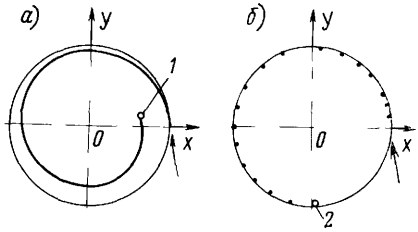


Рис III 23 Расчетные траектории частиц диаметром 5 мкм (*а*) и 10 мкм (*б*) в циклонном элементе

1 — точка касания частицы с дном циклона, *2* — точка выхода частицы (здесь траектория условно показана точками)

Эффективность плоскодонного циклона исследовалась при помощи ЭВЦМ. В результате расчета получены траектории частиц, показанные на рис. III.23. Движение частиц прослежено от момента входа в циклон до момента достижения ими боковых отверстий. Частицы размером 10 мкм достигают стенки циклона, сделав примерно 0,5 оборота, а частицы размером 5 мкм не могут быть отделены полностью из всего потока, втекающего в циклон.

При испытаниях пылеуловителя типа ПВК в лабораторных условиях была получена следующая эффективность (%) в зависимости от вида пыли:

Формовочный песок (ГОСТ 2138—56) при начальной концентрации пыли 0,3—0,4 г/м³	93,8
Пылевидный кварц при начальной концентрации пыли до 0,9 г/м³	77
«Литейная» пыль при начальной концентрации 0,6—1 г/м³	94
Торфяная пыль, просеянная через сито, при начальной концентрации до 0,8 г/м³	84

Количество пыли, оседавшей в разных отсеках бункера, зависело от ее дисперсного состава: чем мельче была пыль, тем больше ее оседало во втором отсеке. При испытаниях на формовочном песке количество пыли, оседавшей во втором отсеке бункера, достигало 2%, на пылевидном кварце—30%, на «литейной» пы-

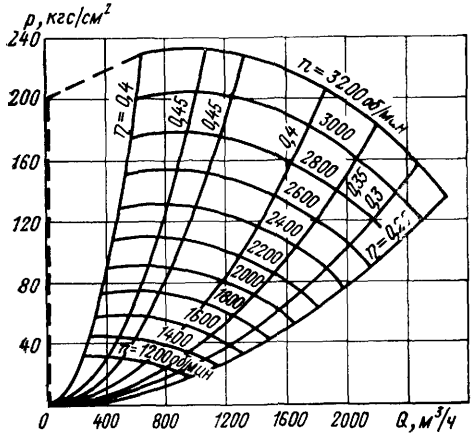


Рис. III.24 Аэродинамическая характеристика вентиляторного пылеуловителя ПВК № 3,2

ли — 8%, на торфяной пыли — 69% общего количества осевшей пыли.

Аэродинамические характеристики пылеуловителей определялись по стандартной методике (ГОСТ 10921—64) при помощи камеры с наддувом.

Пылеуловители типа ПВК представляют собой вентиляторные агрегаты с присущими последним аэродинамическими характеристиками. Представленная на рис. III.24 аэродинамическая характеристика пылеуловителя ПВК № 3,2 с рабочим колесом диаметром 320 мм показывает, что по своим вентиляторным параметрам агрегат относится к центробежным вентиляторам среднего давления. В левой части графика пунктирными линиями обозначена область неустойчивой работы пылеуловителя. При режимах работы с пониженной производительностью, например при большом сопротивлении сети, сначала наблюдается неустойчивая работа пылевого выхлопа, а при дальнейшем дросселиро

вании воздух начинает засасываться через отверстие пылевого выхлопа в пылевую часть кожуха. Характеристики слева от границы устойчивой работы снимались в процессе испытаний при заглушенном пылевом выхлопе, т. е. на чисто вентиляторном режиме.

Эксплуатационные испытания вентиляторных пылеуловителей ПВК № 3,2 проводились на Московском чугунолитейном заводе им. Войкова. Один из пылеуловителей отсасывал и очищал воздух от барабана для размола бракованных стержней. Производительность пылеуловителя при частоте вращения 2800 об/мин находилась в пределах 2510—3080 м³/ч. Эффективность пылеулавливания в среднем составляла 89,7% при начальной запыленности воздуха 1,38—2,43 г/м³. Второй пылеуловитель ПВК № 3,2 был установлен для отсоса и очистки воздуха, удаляемого от заточного станка ВК-11Т. Пылеуловитель был сблокирован со станком, причем частота вращения вентилятора для уменьшения шума была снижена до 900 об/мин. Эффективность составила 94,6—95,5%.

Для определения эффективности пылеулавливания в некоторых случаях применялся матерчатый фильтр из плотной ворсистой ткани, который устанавливался на выхлопе пылеуловителя. Фильтр взвешивался до и после эксперимента. Объем отсасываемого воздуха при установке матерчатого фильтра составил до 850 м³/ч.

Пылеуловитель ПВК применяли также для отсоса и очистки воздуха, удаляемого от металлообрабатывающих станков. Система аспирации обслуживала пять станков. К каждому станку был подведен воздуховод с пылеприемным насадком, расположенным в зоне обработки деталей. Эффективность пылеулавливания составила 92,5—96,3%.

Были испытаны различные варианты кориолисовых пылеотделителей, разработанные для случаев, когда не требовалось улавливать отделенную пыль.

Пылеотделитель КП-3 двустороннего всасывания, изготовленный Коломенским тепловозостроительным заводом, предназначен для очистки воздуха в системе охлаждающей вентиляции электрических машин большой мощности. Производительность пылеотделителя КП-3 составляет 20—24 тыс. м³/ч [99].

Вентилятор-пылеотделитель КП-320 с колесом диаметром 320 мм был применен для очистки воздуха в системе охлаждения электроагрегатов (мотор-колес) автомобилей с электротрансмиссией постоянного тока. Испытания проводились в лабораторных и полевых условиях при движении автомобиля с установленным на нем пылеотделителем по грунтовой дороге.

Для определения запыленности воздуха перед пылеотделителем и после него устанавливались пылезаборные трубки (см. п. 1 главы II). Воздух через трубки отсасывался эжектором, присоединенным к компрессору автомобиля. Начальная запылен-

ность составляла от 27 до 430 мг/м³, а эффективность пылеотделения — соответственно от 91 до 96%. Производительность по чистому выхлопу составляла 2300 м³/ч, а полное давление было равно 220 кгс/м².

Совместно с НАТИ была разработана конструкция вентилятора-пылеотделителя ВПК-150 по схеме КП-4. Рабочие чертежи пылеотделителя разработаны НАТИ, опытная партия пылеотделителей изготовлена на Алтайском тракторном заводе [5, 60] Вентилятор-пылеотделитель предназначен для очистки воздуха от пыли и подачи его в кабину тракториста. Пылеотделитель установлен на одной оси с электродвигателем мощностью 25 Вт. Колесо пылеотделителя диаметром 150 мм изготовлено из полиамида. Эффективность очистки воздуха составила в среднем 90%, причем запыленность в кабине тракториста удовлетворяла санитарным нормам.

На рис. III.25 показана установка вентилятора-пылеотделителя КП-5 на пневмоуборочном торфяном комбайне БПФ-40 при добыче фрезерного торфа. Комбайн производит подборку разрыхленного торфа всасывающими соплами, двигаясь со скоростью от 3 до 5 м/ч. Торфяная крошка транспортируется воздушным потоком в циклоны, где бо́льшая часть торфа выпадает, а воздух, содержащий торфяную пыль в количестве 25—35 г/м³, очищается в пылеотделителе КП-5. Очищенный воздух в объеме 30—35 тыс. м³/ч выбрасывается в атмосферу, а пылевой концентрат направляется в бункер комбайна для осаждения.

По опытным данным, эффективность очистки в данном случае составляла 90% [69].

По своему энергетическому к.п.д. пылеотделители типа КП мало уступают центробежным вентиляторам общего назначения с лопатками, загнутыми вперед, благодаря чему применение этих пылеотделителей позволяет достичь экономии энергии, расходуемой в других случаях на специально установленные пылеуловители.

Энергия, расходуемая на очистку, не пропадает, а трансформируется в давление воздуха, которое в дальнейшем расходуется на его перемещение.

Вентиляторный пылеуловитель фирмы «Стюртевант». Пылеуловитель фирмы «Стюртевант» является, по-видимому, первым из аппаратов подобного рода. Как видно из рис. III.26, на конце лопаток рабочего колеса этого аппарата расположены желобакарманы V-образной формы. Пыль, захватываемая этими карманами из обтекающего их воздуха, скользит к наружным краям лопаток и поступает в кольцеобразные каналы, расположенные на вертикальных стенках кожуха, а оттуда — в сборные бункера

Пылеуловитель с таким колесом был построен в 1916 г. для одной из нью-йоркских электростанций [116]. Известен также вентиляторный пылеуловитель Кориоло-геблазе, очень сходный с описанным [4].

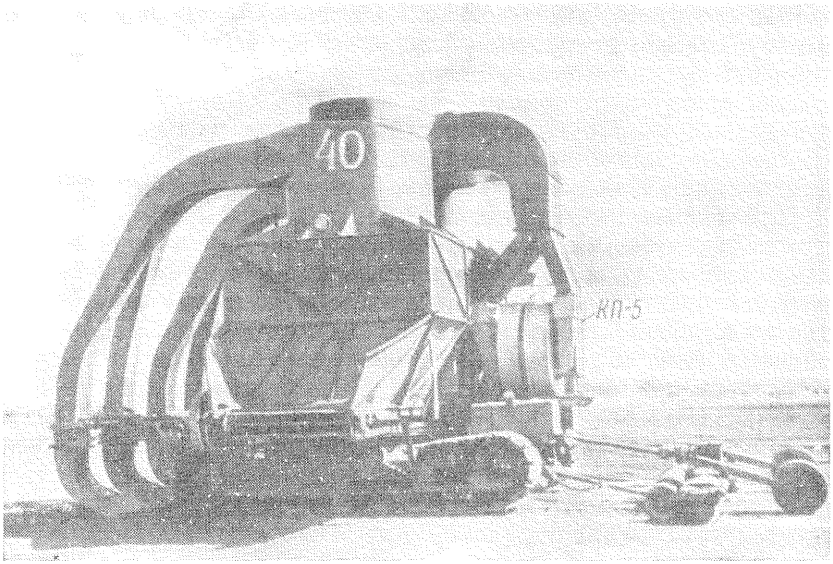


Рис III 25 Установка вентилятора-пылеотделителя КП 5 на пневмоуборочном торфяном комбайне

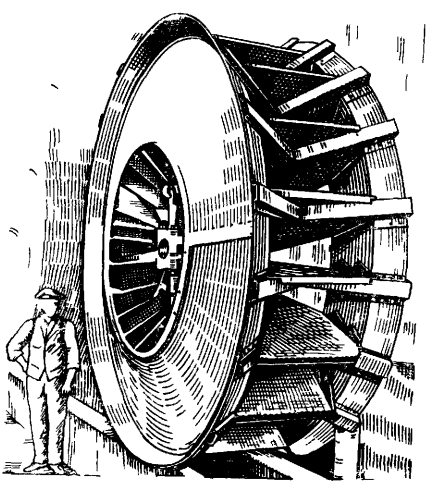


Рис III 26 Рабочее колесо вентиляторного пылеуловителя фирмы «Стюртевант»

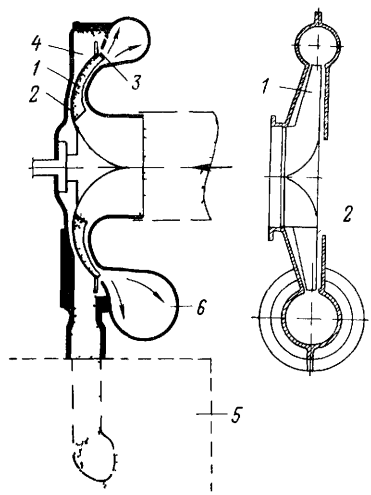


Рис III 27 Принципиальная схема пылеотделяющего колеса пылеуловителя Ротоклон D (справа центробежный вентилятор)

Вентиляторный пылеуловитель Ротоклон D. Очистка воздуха в пылеуловителе Ротоклон D фирмы «ААФ» (США), представляющем собой сравнительно распространенную конструкцию, происходит следующим образом (рис. III.27). Поток запыленного воздуха, закрученный лопатками *1* при его входе в рабочее колесо, обтекает диск *2*, поворачиваясь при этом на 90°. Силы инерции сообщают пылевым частицам ускорение в направлении диска. Для достижения большего эффекта диску придана вогнутая форма. Такая форма диска в совокупности с криволинейной передней стенкой кожуха обусловливает более длительное искривление потока, остающегося изогнутым до момента выхода воздуха из колеса. При этом удлиняется время воздействия центробежных сил, но одновременно увеличиваются потери энергии. Для сравнения на рисунке справа представлено колесо обычного вентилятора.

Другая конструктивная особенность рабочего колеса пылеуловителя Ротоклон D выражается в установке лопаток под углом к поверхности диска, а также в сравнительно большом количестве лопаток. Узкие концы лопаток удлинены так, что выходят за пределы диска.

Пылевые частицы, приторможенные наклонными поверхностями лопаток, скользят по диску и через кольцевой зазор *3* проходят с частью воздуха в пылевую полость *4* кожуха, а затем в пылесборный бункер *5*. Очищенный воздух проходит в чистую полость *6* кожуха и далее на выхлоп. Из бункера воздух возвращается вновь в полость *4* либо присоединяется к основному потоку на линии всасывания, т. е. совершает замкнутый цикл.

Производительность ротоклонов достигает 60 тыс. м^3/ч. Они применяются для очистки воздуха от зернистой пыли всех видов и для золоулавливания. К достоинствам их относятся компактность, высокая эффективность и дешевизна установок, обусловленные тем, что, совмещая функции пылеотделителя и вентилятора в одном агрегате, они не требуют дополнительного расхода электроэнергии на пылеотделение.

8. ИНЕРЦИОННЫЕ КОНТАКТНЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ МОКРОГО ТИПА С ПОДВОДОМ ВОДЫ В ЗОНУ КОНТАКТА ИЗВНЕ

Общие сведения

В инерционных пылеуловителях сухого типа отделившаяся пыль всегда отводится вместе с частью воздуха из пылеотделителя в пространство, где происходит ее окончательное осаждение под действием собственного веса, т. е. ее улавливание. В отличие от этого в пылеуловителях мокрого типа процесс сепарации за-

канчивается при контакте частиц со смачивающей жидкостью, причем этот контакт осуществляется на смоченных стенках или перегородках, обтекаемых воздухом, на каплях или на свободной поверхности воды.

Эффективность такого улавливания значительно выше, чем сухого, при условии, если поверхности сепарации непрерывно омываются водой или обновляются, так как в противном случае они покрываются сплошной пленкой уловленной пыли и перестают удерживать осаждающиеся частицы. В пылеуловителях рассматриваемого здесь вида соблюдение этого условия достигается нагнетанием воды извне, причем вся вода, участвующая в процессе, непрерывно отводится из пылеуловителя и вновь в него подается. Удельный расход воды доходит до 2,5 л на 1 м^3 воздуха. Общее количество воды, циркулирующей во внешней системе водоснабжения таких пылеуловителей, часто очень велико.

Мокропленочные циклоны

Характерными представителями пылеуловителей данного типа являются центробежные скрубберы или циклоны с водяной пленкой.

Центробежные скрубберы. Принципиальная схема скруббера представлена на рис. III.28. Очищаемый воздух подается в нижнюю часть аппарата тангенциально. Очищенный воздух отводится из верхней части аппарата, как правило, также тангенциально — по направлению вращения воздушного потока. Отсутствие выхлопной трубы позволяет уменьшить диаметр центробежного скруббера по сравнению с циклоном.

Внутренняя поверхность скруббера непрерывно орошается

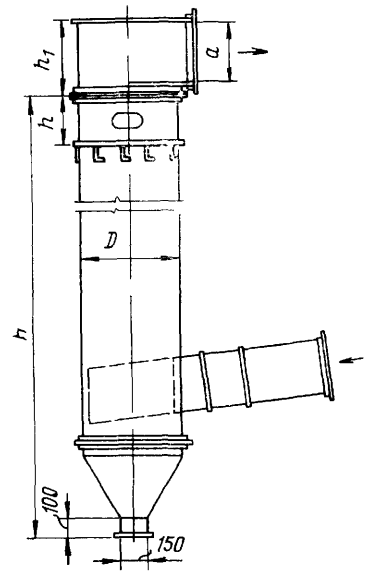


Рис. III.28. Центробежный скруббер (циклон с водяной пленкой)

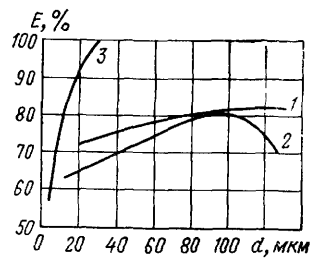


Рис. III.29. Фракционная эффективность прямоточного циклона Т. Даниельса

1 — при пропуске через циклон расхода 85 м^3/ч; *2* — то же, 130 м^3/ч; *3* — при пропуске через циклон со смоченными стенками расхода 85 м^3/ч

водой из сопел, размещенных по окружности и объединенных водораспределительным кольцом из трубы диаметром 50 мм с двусторонним подводом воды. Сопла установлены так, что струи воды направлены тангенциально к внутренней поверхности аппарата в сторону вращения потока, в связи с чем смачивание ее происходит без образования брызг. Давление воды у оросительных сопел должно быть не менее 0,1—0,15 кгс/см^2. Во входном патрубке для смыва отложений пыли предусмотрены дополнительные сопла.

В скрубберах ВТИ несколько выше сопел установлен кольцевой предохранительный козырек, уменьшающий вынос брызг из аппарата при нарушении работы оросительных сопел.

Исследования Н. Ф. Дергачева показали, что у стенок скруббера формируется вращающийся восходящий поток, а в центральной части аппарата — нисходящий поток. Вблизи входного патрубка оба потока сливаются в один, характеризующийся приблизительно постоянной угловой скоростью [30].

Эффективность центробежных скрубберов значительно выше, чем сухих циклонов, что объясняется отсутствием тех помех сепарационному процессу, которые характерны для циклонов. главным образом, радиального стока и вторичного уноса пыли, отсепарировавшейся под влиянием инерции к стенкам пылеуловителя. Это обстоятельство было подтверждено экспериментами Т. С. Даниельса на модели прямоточного циклона [28]. Исследования проводились при пропуске через циклон расходов воздуха 85 и 130 м^3/ч. Результаты эксперимента приведены на рис. III.29, из которого видно, что при расходе 85 м^3/ч имеется тенденция к уменьшению эффективности сепарации с увеличением размера частиц — угол наклона кривой *1* слева направо уменьшается. При расходе 130 м^3/ч, т. е. при большей скорости входа воздуха в циклон, падение эффективности сепарации крупных частиц проявляется совершенно отчетливо — правая часть кривой *2* круто падает в области $d > 100$ мкм.

Уменьшение фракционной эффективности сепарации крупных частиц объясняется их рикошетированием в результате упругого удара о стенку. Отскок частиц проявляется тем эффективнее, чем больше начальная скорость потока воздуха и соответственно скорость транспортируемых этим потоком пылевых частиц. Общая эффективность опытного циклона при расходе 85 м^3/ч составляла 71,2%.

В следующем эксперименте, когда стенки циклона смачивались водой (кривая *3*), эффективность сепарации резко увеличилась и составила 91,5%.

Исходя из теоретических соображений, изложенных в п. 3 данной главы, процесс пылеулавливания в скруббере можно представить происходящим следующим образом. Крупные пылевые частицы достигают стенок скруббера вблизи места входа (см. рис. I.4). Их скорость еще мало отличается от w_0, поэтому

соударение их с водяными пленками происходит при сравнительно больших числах Re. В зависимости от размера и скорости частицы либо погружаются в пленку стекающей воды и смываются ею, либо, пробивая пленку, отскакивают от стенки и возвращаются в воздушный поток. Частицы этой категории могут быть вынесены из пылеуловителя или, потеряв в результате серии отражений скорость, могут погрузиться в пленку. Наряду с крупными частицами в этом районе эффективно улавливаются мелкие частицы из слоев течения, достаточно близко расположенных от стенок. Вступают в контакт с водой и улавливаются также плохо смачиваемые частицы, в том числе частицы размером менее 5 мкм, если в момент контакта центробежное движение их в воздухе характеризуется числом $Re>5$. В противном случае частицы недостаточно погружаются в воду и могут быть сорваны с ее поверхности потоком воздуха. Несмачиваемые частицы сближаются с поверхностью воды под малыми углами, рикошетируют от нее и могут быть вынесены из аппарата.

Условия улавливания частиц, вступающих в контакт с водой за пределами начального участка своего движения, менее благоприятны. Радиальная составляющая скорости таких частиц в момент их контакта с водяной пленкой, определяемая выражением (I.27), недостаточна для обеспечения необходимого погружения. Подсчеты показывают, что в аппарате диаметром 1000 мм для условий, рассмотренных в п. 3 главы I, предельное значение $Re>5$ достигается только частицами крупнее 12 мкм. Таким образом, за пределами начального участка практически не улавливается вся мелкодисперсная пыль. Действительно, Н. Ф. Дергачев установил, что увеличение высоты орошаемой части скруббера сверх трех его диаметров не влияет на эффективность пылеулавливания.

Некоторая часть воды, подаваемой в скруббер, распыляется воздушным потоком, особенно в турбулентном течении, возникающем в районе сопряжения входного патрубка с корпусом. Столкновения пылевых частиц с образующимися каплями и конденсация водяных паров на частицах являются дополнительными факторами, стимулирующими очистку воздуха.

Как правило, эффективность циклонов при увеличении скорости входа растет только до известных пределов, после чего под влиянием возмущающих факторов она начинает снижаться. В центробежных скрубберах это возрастание эффективности, как и следовало ожидать, проявляется более закономерно. Однако ввиду того, что с увеличением скорости растет также сопротивление аппарата и брызгоунос, расчетная скорость входа принимается не более 20 м/с, а средняя скорость в поперечном сечении скруббера — не более 5,5 м/с.

---

* Точками отмечена область, исследованная в экспериментах.

Эффективность улавливания различных фракций пыли в пылеуловителе ВТИ диаметром 1000 мм при двух разных скоростях входа показана, по данным Н. Ф. Дергачева, на рис. III.30*

Расход на орошение центробежных скрубберов определяется в основном толщиной водяной пленки, образующейся на стенках. Установлено, что в среднем она равна примерно 300 мкм [30]. Под влиянием вращающегося воздушного потока пленка смачивает стенки неравномерно.

В соответствии с особенностями процесса сепарации в центробежных скрубберах они применялись ранее главным образом для улавливания капель. Очевидно, что их улавливание по сравнению с улавливанием пыли значительно меньше осложняется рассмотренными в главе I поверхностными явлениями. Применение скрубберов этого типа для улавливания пыли целесообразно при одновременном поглощении из очищаемого воздуха газовых примесей. В связи с этим на тепловых станциях широко используются скрубберы ВТИ, футерованные изнутри кислотоустойчивыми материалами.

В вентиляционных системах применяются нефутерованные центробежные скрубберы типа ВТИ-ПСП идентичной конструкции (табл. III.10).

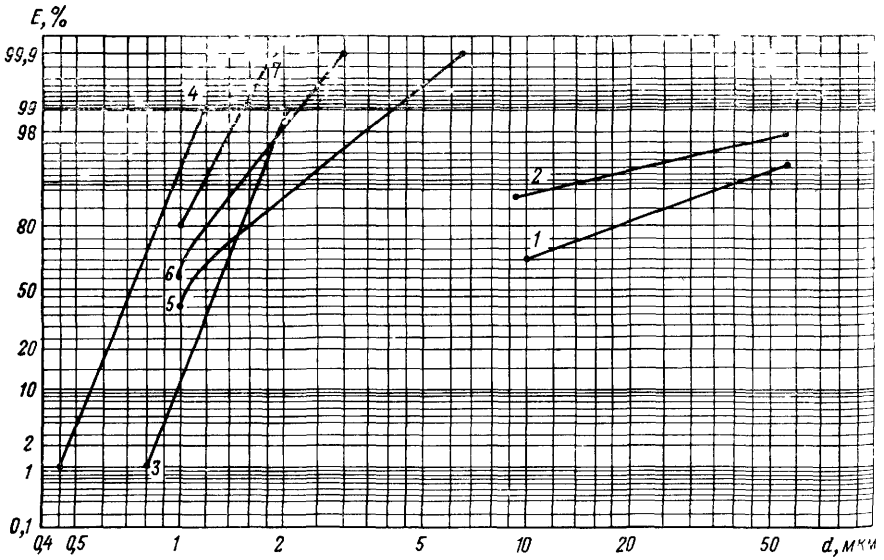


Рис. III.30 Фракционная эффективность мокрых пылеуловителей

1 и *2* — центробежного скруббера ЦС-ВТИ (ВТИ-ПСП) при скорости во входном патрубке соответственно 15 и 23 м/с; *3* и *4* — для струйного осаждения на пластинке имитатора при скорости в сопле соответственно 20 и 34 м/с; *5*, *6* и *7* — пылеуловителя типа ПВМ соответственно при δ =40, 200 и 300 мм

Технические показатели центробежных скрубберов типа ВТИ-ПСП

Марка скруббера	Пропускная способность, тыс. м³/ч	Расход, л/с, воды на орошение		Размеры, мм (см. рис. III.28)					Число сопл	Масса с улиткой, кг
		стенок	решетки	H	h	h_1	D	a		
ЦС-9	10—11	0,35	0,12	3240	440	756	1140	400	7	642,2
ЦС-11	13—16	0,4	0,18	3800	440	905	1350	500	8	880,6
ЦС-13	17—22	0,45	0,24	4325	505	1056	1530	550	10	1084,8
ЦС-15	23—27	0,5	0,32	4800	540	1166	1700	650	11	1409,3
ЦС-16	28—35	0,55	0,4	5680	640	1266	1830	700	12	1644,4
ЦС-19	36—45	0,67	0,52	6530	790	1466	2080	800	14	2101,7
ЦС-21	46—50	0,73	0,64	7170	840	1566	2300	900	15	2528,2

Примечание. Сопротивление скрубберов в указанном диапазоне производительности равно 60—90 кгс/м².

ТАБЛИЦА III.11

Основные размеры, мм, пылеуловителей ЦВП-ЛИОТ

Марка циклона	Размеры циклона		Размеры патрубка		Масса, кг
	диаметр	высота	ширина	высота	
ЦВП-3	315	2434	110	195	63,9
ЦВП-4	400	3014	140	250	106,7
ЦВП-5	500	3684	175	310	161
ЦВП-6	630	4554	220	390	237
ЦВП-8	800	5699	280	495	369,7
ЦВП-10	1000	7044	350	620	569,5

Эффективность скрубберов повышается при распылении воды во входном патрубке. С этой целью в так называемых прутковых скрубберах МП-ВТИ во входном патрубке, устроенном с наклоном в сторону скруббера, размещают решетку из четырех рядов прутьев, установленных в шахматном порядке, орошаемую водой с помощью форсунок. При проходе через решетку воздух турбулизируется, что способствует его лучшей очистке. Как показала практика, решетка сравнительно быстро изнашивается и забивается отложениями пыли. Во входном патрубке на границе между сухим и мокрым участками образуются отложения пыли, для удаления которых нужны специальные смывные устройства.

Циклоны с водяной пленкой ЦВП-ЛИОТ. В вентиляционных системах применяются циклоны с водяной пленкой ЦВП-ЛИОТ (табл. III.11), аналогичные по устройству скрубберам типа ВТИ-ПСП. К нижней части корпуса этих циклонов приварен прямоугольный фланец с прикрепленным к нему при помощи петли и откидного болта с барашком конусом, который, по данным разработчиков, при заполнении его шламом образует гидравлический затвор [50].

Вода для орошения внутренней поверхности циклонов подается к соплам под давлением 0,2—0,25 кгс/м^2 по резиновым трубкам, присоединенным к кольцевому коллектору. Для наблюдения за состоянием внутренней поверхности и для ревизии сопл в крышке улитки устроен застекленный люк.

В воздухоподводящем патрубке этих циклонов имеется смывное устройство для удаления пылевых отложений, образующихся в патрубке начиная от места его сопряжения с корпусом циклона. Устройство состоит из прямой трубы с соплами, находящимися в сечении потока. Вода к трубе подводится по резиновому шлангу. Смыв отложений производится вручную периодическим прокручиванием трубы с соплами вокруг ее оси. Очистку воздухоподводящего патрубка рекомендуется производить через каждые 4 ч.

Циклоны-промыватели СИОТ. В этих аппаратах турбулентная промывка выражена более четко. Очищаемый воздух вводится в нижнюю часть промывателя (рис. III.31). Вода подается

через перфорированную трубу во входной патрубок. Сток воды происходит через сливное отверстие, расположенное в центре конуса. Соответствующим выбором диаметра отверстия сток регулируется таким образом, чтобы в конусе промывателя скапливалось некоторое количество воды. Эта вода, подхваченная воздушным потоком, закручивается и под влиянием центробежных сил настилается на стенки корпуса аппарата. Благодаря большой толщине образующейся водяной пленки пылевые частицы надежно связываются водой [25].

В процессе эксплуатации выяснилось, что и здесь на границе между смоченным и сухим участками корпуса образуются пылевые наросты. Благодаря гигроскопичности пылевых отложений эти наросты непрерывно развиваются, так что с течением времени возможно почти полное зарастание аппаратов. Вследствие этого иногда предусматривается подача воды также и в верхнюю часть циклона для орошения всей поверхности стенок. При этом во входной патрубок циклона подается 20—30% воды.

Корпусу циклона придана коническая форма, что позволило уменьшить брызгоунос. Скорость входа воздуха выбирают в пределах от 15 до 21 м/с (табл. III.12).

ТАБЛИЦА III 12

Технические показатели циклонов-промывателей СИОТ (тип II)

Типоразмер циклона	Пропускная способность, м³/ч, при скорости входа воздуха, м/с		Расход воды, м³/ч, при скорости входа воздуха, м/с		Размеры, мм (см рис. III 31)		
	15	21	15	21	*Б*	*В*	*Н*
1	2550	3550	0,16	0 1	750	835	1441
2	4200	5900	0,27	0,16	961	1070	1765
3	6450	9050	0,41	0,24	1190	1325	2108
4	9850	13 100	0,62	0,34	1433	1595	2475
5	13 300	18 650	0,84	0,48	1708	1900	2910
6	18 750	26 450	1,18	0,66	2025	2260	3396
7	26 600	37 250	1,62	0,97	2407	2680	3968
8	37 500	52 500	2,36	1,37	2865	3690	4657

Циклоны-промыватели при небольших габаритах, в частности в 2,5—3 раза меньших, чем у центробежных скрубберов, имеют практически одинаковую с ними эффективность. Ввиду того что подача воды производится без применения легкозасоряющихся форсунок и сопел, система водоснабжения относительно более надежна. Энергичное движение воды исключает также опасность засорения нижней части промывателя.

Центробежный скруббер Пис-Антони. В скрубберах фирмы «Кемикл Констракшен» (США) используется капельная промывка. Вода подается по оси аппарата через центральную распределительную трубку и распыляется гидравлическими форсунками (рис. III.32). Капли воды закручиваются потоком воздуха

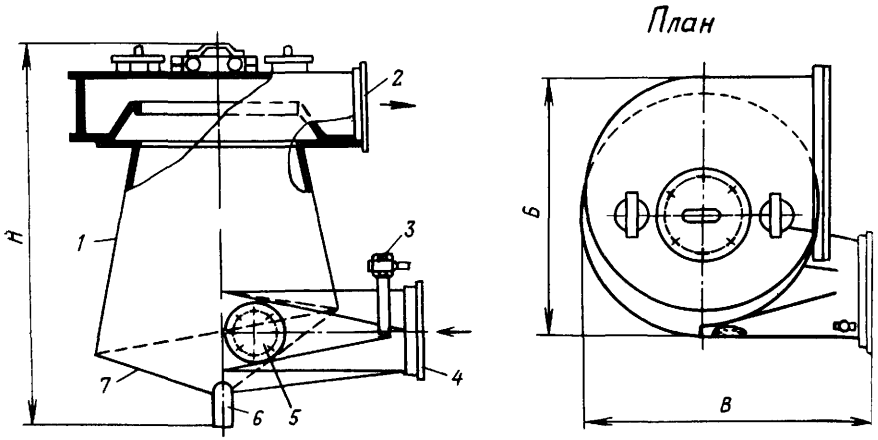


Рис. III.31. Циклон-промыватель СИОТ

1 — корпус циклона; *2* — патрубок для выхода воздуха, *3* — водоподводящая труба; *4* — патрубок для входа воздуха; *5* — смотровые люки; *6* — спускной патрубок; *7* — коническая часть циклона

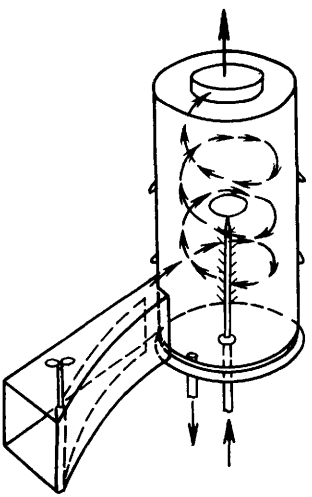


Рис. III.32. Центробежный скруббер Пис-Антони

и под влиянием центробежных сил инерции достигают внутренней поверхности аппарата, смачивая ее. Разница в скоростях движения капель и пылевых частиц способствует их столкновениям, в результате которых эффективность аппарата повышается. На входе очищаемого воздуха в аппарат установлена регулируемая направляющая лопатка, с помощью которой поток вместе с пылью отжимается к смоченной поверхности. Тем самым увеличивается скорость потока, сокращается путь сепарации частиц и повышается эффективность пылеуловителя [15].

Расход воды составляет от 0,8 до 1,6 л на 1 м^3 воздуха, скорость потока воздуха в плане — от 1,2 до 2,4 м/с.

Капельные пылеуловители-промыватели

При промывке воздуха капельной водой пыль улавливается главным образом в результате инерционного соударения капель с пылевыми частицами. Так как скорость частиц равна скорости потока воздуха, для их сепарации необходимо движение капель относительно воздуха.

Систему, состоящую из капель и движущегося относительно них воздуха, можно рассматривать как фильтр с заполнением из сферических препятствий. Осаждение пыли в таком фильтре обусловливается факторами, рассмотренными в п.3 главы I Вследствие больших расстояний между отдельными каплями и их больших размеров пылеулавливание определяется в основном инерционным механизмом.

В табл. I.1 приведены значения $d_{мин}$ частиц для нескольких характерных для практики случаев их осаждения на каплях. Как видно из таблицы, существенное значение имеет размер капель. При распыле воды образуются капли различных размеров. Гидравлические форсунки, обычно используемые в вентиляционной технике, образуют капли размером 500—1000 мкм и больше в зависимости от давления воды. При пневматическом распыле размер капель измеряется десятками микрометров, а различного рода «водяные завесы», создаваемые в некоторых пылеуловителях, содержат и крупные брызги размером в десятки миллиметров. Так же, как и в других пористых фильтрах, в принятой модели большое значение имеет «пористость» фильтра, в данном случае расстояние между каплями. Исследования показали, что расстояние между каплями должно быть более 4—5 $d_к$, в противном случае они сливаются в струи. Оптимальной считается концентрация капель в 1% по объему [108].

Эффективность одиночного слоя капель можно оценить с помощью табл. I.1. При $d_к=500$ мкм, расстоянии между ними $5d_к$ и $w=2{,}5$ м/с, что соответствует условиям промывной камеры кондиционера, $d_{мин}=1{,}04$ мкм. Вероятность улавливания частиц данного размера приближенно равна $1{,}04:(5\times500)$, т. е. ничтожно мала. Частицы мельче 1 мкм не будут улавливаться совсем.

Глубина рассматриваемого капельного фильтра в промывных камерах велика, однако улавливание происходит не на всем его протяжении, так как скорость движения капель быстро уравнивается со скоростью движения воздуха.

Экспериментальные исследования подтверждают, что в промывных скрубберах эффективно могут улавливаться только частицы крупнее 10 мкм.

Большое влияние на эффективность оказывает способность частиц смачиваться водой. Так, в опытах МакНИИ при орошении воздуха, запыленного угольной пылью, водой фракция <5 мкм улавливалась всего на 18%, а при добавке смачивателя ДБ (0,1%-ный раствор) она стала улавливаться на 50% [12].

Конденсация водяных паров на частицах существенно повышает эффективность процесса [21, 33].

Высокой эффективностью отличаются капельные промыватели, в которых орошение очищаемого воздуха производится в канале, по конфигурации сходном с расходомерной трубой Вентури. В горловине трубы движение воздуха вместе с частицами резко ускоряется, ускорение же капель воды, обладающих большей массой, значительно меньше. Разница в скоростях движения капель и пылевых частиц может превышать 100 м/с. Положительное влияние на эффективность оказывает турбулизация течения, а также конденсация пара вследствие падения давления в горловине, где скорость воздуха резко возрастает, и ряд других факторов [17, 53, 62, 102].

Промыватели Вентури отличаются большим сопротивлением и вследствие этого вначале применялись только для технологической очистки запыленных газов. В последние годы делаются попытки использовать пылеуловители этого вида при меньших расходах энергии [59, 94].

9. ИНЕРЦИОННЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ МОКРОГО ТИПА С ВНУТРЕННЕЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ВОДЫ

Общие сведения

Обильное орошение водой поверхностей сепарации или самого воздуха при подводе воды в пылеуловитель извне под давлением сопряжено с непрерывным расходованием большого количества воды из водопровода. Кроме того, загрязнившуюся в пылеуловителях воду нельзя сбрасывать без очистки в канализацию. Вследствие этого возникает необходимость в устройстве систем оборотного водоснабжения с очисткой воды.

Устройство и эксплуатация систем мокрой очистки воздуха значительно облегчаются, если подвод воды к зонам контакта осуществляется в результате ее циркуляции внутри самого аппарата. Скапливающийся в нем при этом шлам может отводиться непрерывно или периодически либо с помощью механических транспортеров — в этом случае необходимость в системе оборотного водоснабжения отпадает, либо гидравлическим путем — сливом части воды. В последнем случае устройство системы оборотного водоснабжения может оказаться целесообразным, но нагрузка на нее значительно меньше, чем при циркуляции всего объема воды.

Пылеуловители такого вида характеризуются наличием емкости, залитой водой. Очищаемый воздух контактирует с этой водой, причем условия контакта определяются взаимодействием струй воздуха и воды. Это же взаимодействие вызывает циркуляцию воды через зону контакта за счет энергии самого очищаемого воздуха.

Расход воды определяется потерями ее на испарение и с уда-

ляемым шламом. При удалении шлама механическими скребковыми транспортерами или вручную расход воды минимальный и составляет всего 2—5 г на 1 м³ воздуха. При периодическом сливе сгустившегося шлама расход воды определяется жидкоподвижностью шлама и составляет в среднем до 10 г на 1 м³ воздуха, а при постоянном сливе расход не превышает 200 г на 1 м³ воздуха[1].

Заполнение пылеуловителей водой должно регулироваться автоматически. Поддержание постоянного уровня воды имеет первостепенное значение, так как его колебания влекут за собой существенное изменение как эффективности, так и производительности системы.

Мокрые центробежные пылеуловители

В ряде пылеуловителей данного вида используются силы инерции, возникающие при плавном искривлении потока запыленного воздуха.

Характерный центробежный пылеуловитель показан на рис. III.33. Аппарат представляет собой вертикальный циклон с тангенциальным подводом очищаемого воздуха. Нижняя часть корпуса циклона заполнена водой, которая закручивается воздушным потоком, смачивая стенки аппарата и создавая, кроме того, по оси вращения «тромб» как в натуральных смерчах. Пыль улавливается на смоченных стенках.

В ряде случаев ось вращения удобно располагать горизонтально.

В сходном пылеуловителе Оельдер (ФРГ) воздух проходит три витка канала.

В пылеуловителе Айр Тумблер запыленный воздух движется по спиральным каналам (рис. III.34). Нижняя часть аппарата залита водой. Воздушный поток, обтекая поверхность воды, подхватывает ее, закручивает и разбрызгивает. При этом воздух промывается водой, а пылевые частицы, оседая на поверхностях каналов, удерживаются образующимися на них пленками воды.

Прямоточно-инерционные пылеуловители

В пылеуловителях этой группы контакт запыленного воздуха с водой также осуществляется в сопле типа трубы Вентури, в данном случае помещенном внутри аппарата. В отличие от пылеуловителей Вентури вода поступает в сопло за счет энергии струи воздуха в результате ее увлекающего или подсасывающего действия. В сопле вода дробится на капли и брызги, на которых оседают пылевые частицы.

На рис. III.35 показана принципиальная схема пылеуловителя Клайратор. В этом случае вода увлекается в сопло воздухом, подтекающим к нему над поверхностью воды, в то время как в

[1] Более детальные сведения см. в работе [82].

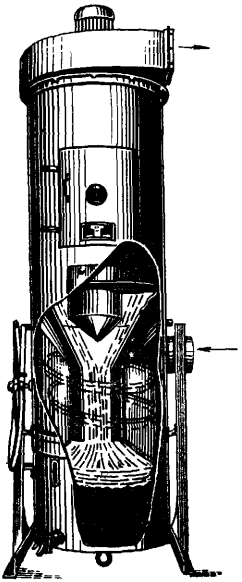


Рис. III.33. Вертикальный центробежный пылеуловитель фирмы «Якоб Хандте»

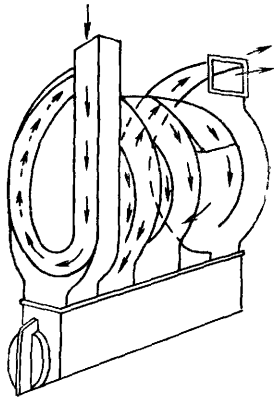


Рис. III.34. Горизонтальный центробежный пылеуловитель Айр Тумблер

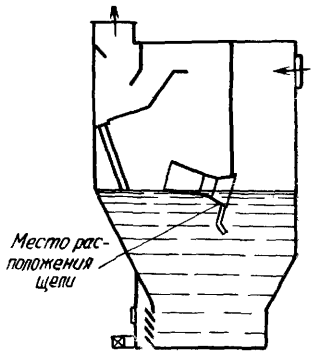


Рис. III.35. Прямоточно-инерционный пылеуловитель Клайратор

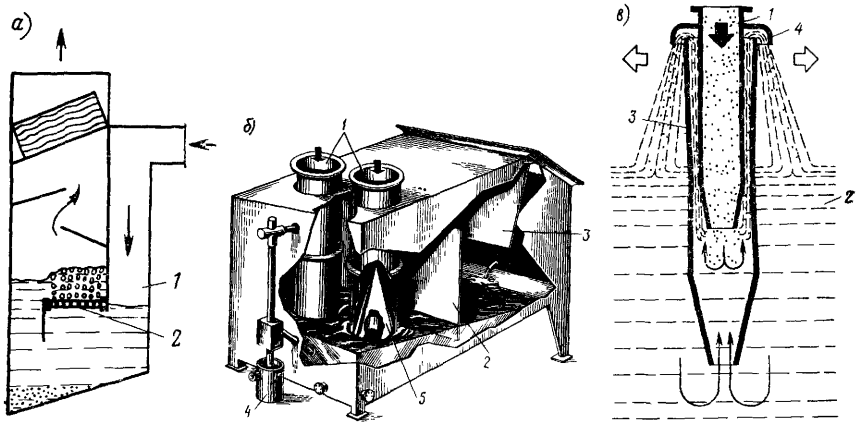


Рис. III 36. Барботажные пылеуловители
а — пылеуловитель Гинцветмета; *б* — скруббер Дойля; *в* — скруббер Турбон

очень сходном пылеуловителе Вентриет вода подсасывается в сопло через щели, создаваемые в месте примыкания сопла к перегородке, разделяющей входную и выходную полости аппарата, в результате эжектирующего действия струи воздуха. Положение щели в последнем аппарате условно показано на схеме пылеуловителя Клайратор.

Барботажные пылеуловители

При барботировании обычно воздух продувают через слой воды. Если слой воды достаточно велик, воздух движется через него в виде отдельных пузырьков разных размеров. В результате трения о поверхность воды, ограничивающую пузырек, заключенный в нем воздух приобретает циркуляцию, скорость которой пропорциональна скорости его подъема. Пылевые частицы, находящиеся внутри пузырьков, сепарируются к их поверхностям под действием инерционных сил, обусловленных этим движением, а также под влиянием диффузии и седиментации. Эффективность пылеуловителя при барботировании в обычных условиях очень невелика, но в условиях «турбулентного» барботирования, в частности, при образовании слоя пены увеличивается. Такие условия создаются при барботировании воздуха с повышенными скоростями через воду на решетке.

По мере увеличения скорости барботирования на поверхности воды сначала возникают отдельные пенные образования, а затем образуется сплошной слой пены, толщина которого все более увеличивается. При определенной скорости вся жидкость превращается в слой пены ячеистой, подвижной структуры. Развитая и непрерывно обновляющаяся межфазная поверхность слоя, высокая турбулентность и перманентное изменение направления струек воздуха способствуют эффективному улавливанию пыли. Пылеуловители такого рода называются пенными [83].

В обычных пенных газоочистителях вода подводится на пенообразующие решетки извне и полностью стекает в систему оборотного водоснабжения[1].

Институтом Гинцветмет был разработан пылеуловитель пенного типа с внутренней циркуляцией воды (рис. III.36, *а*). Запыленный воздух поступает по вертикальному каналу *1* под пенообразующую решетку *2*, установленную ниже уровня воды. Натекающая вода вспенивается воздухом и эффективно улавливает пыль [29].

К барботажным пылеуловителям часто относят также большую группу пылеуловителей, в которых барботирование в указанном выше понимании не происходит. Такими пылеуловителями в первую очередь являются очень простые устройства с затопленным в воде выбросом запыленного воздуха. Одним из наи-

[1] Летальные сведения по пенным газоочистителям см. в работе [105].

более совершенных устройств этого рода является скруббер Дойля (рис. III.36,*б*). Запыленный воздух подается в него через вертикальные патрубки *1*, выходное сечение которых немного погружено в воду [34, 119]. Барботирование в данном случае не происходит: воздух оттесняет воду, образуя лунку, глубина которой зависит от скорости его истечения, и растекается в виде сплошной радиальной струи. Пылевые частицы при этом отделяются и попружаются в воду. Очищенный воздух с целью отделения капель обтекает сначала перегородку *2* (сверху), а затем перегородку *3* (снизу) и выходит через отверстие. Уровень воды поддерживается постоянным с помощью устройства *4*. Для увеличения скорости истечения воздуха и обеспечения ее равномерности в патрубках установлены конусы *5*.

Известно множество патентных модификаций описанных пылеуловителей с сужающейся или, наоборот, расширяющейся подводящей трубой, с различными усложнениями устья выхлопной трубы и т. п.—см. [82].

Среди других модификаций представляет интерес скруббер Турбон (рис. III.36,*в*). Патрубок *1*, по которому запыленный

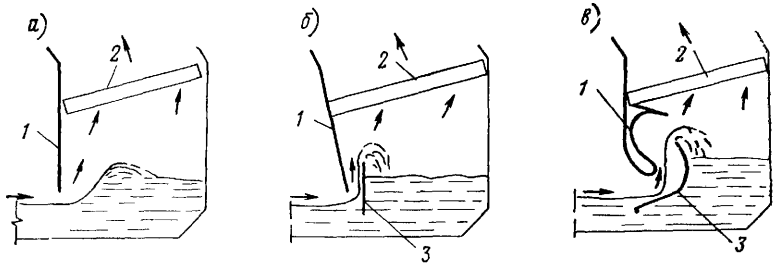


Рис. III.37. Принципиальные схемы струйных (щелевых) пылеуловителей *а* — однoперегородочного; *б* — двухперегородочного (ПВМ); *в* — ротоклона; *1* и *3* — перегородки; *2* — каплеуловитель

воздух нагнетается в воду *2*, заключен в обойму *3*. Жидкость, находящаяся в промежутке между трубами *1* и *3*, вспенивается и изливается, обтекая рефлектор *4*. Очистка происходит в слое пены, высоту которого можно регулировать, меняя длину обоймы *3* и соответственно уменьшая ее нижнее сечение, чтобы предупредить сквозной проход через него воздуха [49]. Выпускается три типа пылеуловителей, различающихся высотой слоя образуемой пены. Их сопротивление составляет соответственно 100—250, 150—350 и 300—800 кгс/м^2 в зависимости от расхода воздуха, причем с ростом сопротивления возрастает также эффективность.

В некоторых случаях наружная обойма имеет вид чаши, расположенной под выходным отверстием подводящего воздуховода [82].

Представляет интерес очень простая схема перегородочного

пылеуловителя, показанная на рис. III.37, *а*. Воздух протекает под перегородкой, оттесняя воду, которая образует криволинейную поверхность сепарации. Испытания показали удовлетворительную эффективность пылеулавливания [81, 92], однако циркуляция воды в данном случае сопровождается сильными пульсациями, затрудняющими водоподпитку.

Струйные пылеуловители

Механизм инерционного осаждения пылевых частиц из струй при обтекании пластинок, рассмотренный в п. 3 главы I, с успехом использован в пылеизмерительных приборах «щелевого» типа, например кониметрах Оуэнса и Цейса для счетного анализа запыленности воздуха, в каскадных импакторах и т. п. Отделение пыли в этих приборах происходит на пластинках, смоченных вязкими составами.

Большая скорость и резкое изменение направления струй, вытекающих из сопел этих аппаратов, создают условия для эффективного отделения самых мелких частиц. На рис. III.30 (кривые *3* и *4*) показана фракционная эффективность сепарации частиц ($\rho=2{,}5$ г/см^3) на пластинке импактора по экспериментальным данным Мейя [26]. Как видно из графика, при скорости истечения всего 34 м/с достигается эффективность, свойственная пылеуловителям Вентури[1].

Для возможности использования струйного механизма в практике пылеулавливания необходимо создать на обтекаемой поверхности пленку воды и обеспечить ее постоянное обновление. В некоторой мере к такой схеме приближается однoперегородочный пылеуловитель (см. рис. III.37,*а*). Действительно, когда при включении вентилятора уровни воды по обе стороны перегородки займут рабочее положение и под нижней кромкой перегородки откроется щель, образуется плоская струя воздуха, встречающая на своем пути наклонную поверхность воды, выполняющую ту же роль, что и смоченные пластинки щелевых приборов. Недостатком такой схемы по сравнению с щелевыми приборами является невозможность обеспечения оптимальной формы и положения поверхности сепарации относительно струи.

Введение второй перегородки, как это сделано в пылеуловителях ПВМ и ротоклоне, позволяет улучшить условия сепарации (см. рис. III.37,*б* и *в*).

Пылеуловители типа ПВМ. Пылеуловитель вентиляционный мокрый (рис. III.38) состоит из корпуса *1*, нижняя часть которо-

---

[1] Скорость истечения из сопл в щелевых приборах доходит до 150 м/с.

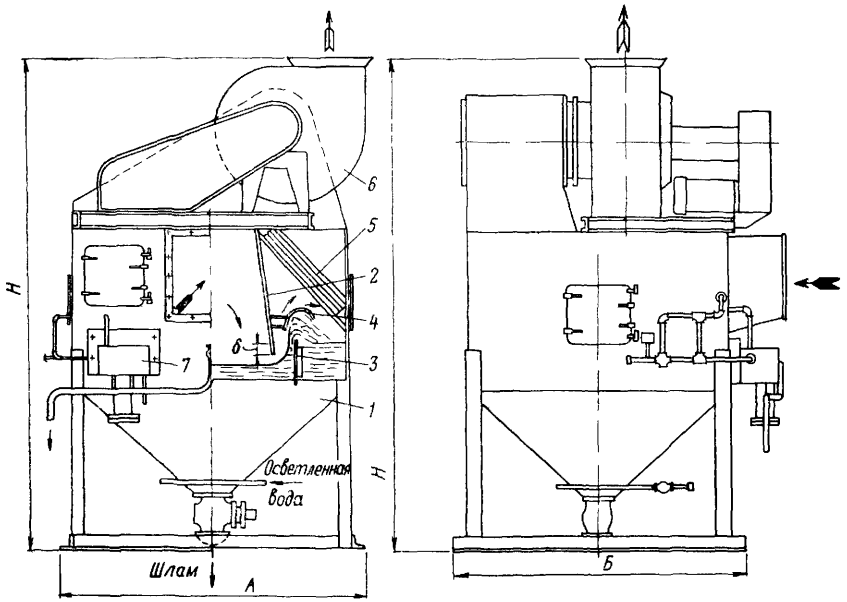


Рис. III.38. Пылеуловитель типа ПВМ

го заливается водой, укрепленных в нем перегородок *2* и *3*, водоотбойника *4*, каплеуловителей *5* и вентиляторного агрегата *6*. На стенке корпуса крепится устройство *7* для регулирования уровня воды. В нижней части бункера имеется устройство для взмучивания шлама.

Очистка воздуха происходит следующим образом. Запыленный воздух поступает в корпус через отверстие в его боковой стенке. При включении вентилятора уровень воды в среднем отсеке пылеуловителя между двумя симметричными перегородками *2* устанавливается ниже, чем за перегородками *3*. В результате этого между поверхностью воды и каждой перегородкой *2* образуется щель, через которую воздух устремляется с большой скоростью в виде плоской струи, частично увлекая за собой воду. Встречая на своем пути перегородку *3*, струя отклоняется вверх, причем на поверхность перегородки, обильно смоченную увлеченной водой, осаждаются сепарирующиеся из струи пылевые частицы. Увлеченная воздухом вода перетекает вверх по перегородке *3*, отклоняется водоотбойником и сливается в крайний отсек. Воздух проходит через каплеуловители и выбрасывается наружу вентилятором.

Эффективность пылеуловителя определяется условиями течения воды и воздуха в промежутке между перегородками *2* и *3*. Детальные наблюдения показали, что вода, увлеченная воздухом, образует на перегородке *3* слой, толщина которого зависит

Технические показатели пылеуловителей типа ПВМ

Показатели	Типоразмеры пылеуловителей ПВМ				
	3 С / 3 К	5 С / 5 К	10 С / 10 К	20 С / 20 К	40 С / —
Номинальная производительность по воздуху, тыс м³/ч	3	5	10	20	40
Установленный вентилятор	Ц13-50 № 3,2	ЦП7-40 № 5	ЦП7-40 № 6,	ЦП7-40 № 8	Ц4-76 № 10
Объем воды в бункере пылеуловителя, м³	0,45 / 1	0,65 / 1,75	1,45 / 2,3	2,2 / 3,5	5,5 / —
Масса пылеуловителя без воды и электродвигателя, кг	754 / 1680	1208 / 2210	1998 / 2800	3050 / 3750	4737 / —
Габаритные размеры, мм:					
ширина *А*	1300 / 1320	1359 / 1420	1514 / 1660	2314 / 2445	2416 / —
длина *Б*	1250 / 2694	1650 / 3080	2500 / 3504	2510 / 3755	4750 / —
высота *Н*	2848 / 3228	3080 / 3563	3412 / 3912	3680 / 4380	4110 / —

Примечание В числителе даны показатели пылеуловителей со сливом шлама, в знаменателе — со скребковыми механизмами. Конструкция пылеуловителя номинальной производительностью 40 тыс м³/ч разработана только в сливном исполнении с раздельной установкой вентилятора.

от воздушной нагрузки на щель и уровня воды в бункере, составляя несколько миллиметров. Надлежащим выбором этих параметров можно обеспечить нужную толщину пленки воды, что важно для предупреждения отскока от перегородки крупных частиц, скорость которых в месте контакта может превышать 30—40 м/с.

Отклонение плоскости нижних кромок перегородок *2* (см. рис. III.38) от горизонтального положения не должно превышать 0,5 мм на 1 м их длины.

В пылеуловителях, предназначенных для работы в режиме непрерывного слива шлама, количество поступающей воды должно быть равно количеству удаляемого жидкого шлама.

Пылеуловители типа ПВМ разработаны ЦНИИПромзданий в двух исполнениях: со сливным (дополнительный индекс С) и с механизированным скребковым удалением шлама.

На рис. III.38 показан пылеуловитель сливного исполнения, а в табл. III.13 даны технические показатели пылеуловителей обоих исполнений.

Вентиляторные агрегаты могут устанавливаться на крышках корпусов или отдельно в удобных для эксплуатации местах.

Сопротивление пылеуловителей типа ПВМ ориентировочно можно определять по расчетной формуле $\Delta H = \delta + 1{,}5\,Q^{0{,}5}$ кгс/м^2, где δ — превышение верхнего уровня воды над нижней кромкой перегородки *2* (см. рис. III.38), мм; Q — расход воздуха на 1 м длины щели пылеуловителя, м^3/ч. Устройство для водоподпитки служит и для поддержания заданного уровня воды в пылеуловителе (рис. III.39). Устройство состоит из бака, прикрепленного к стенке корпуса пылеуловителя и соединенного с ним отверстием и трубкой, служащими для выравнивания давлений и подачи воды в пылеуловитель. Трубка опущена в воду для предупреждения попадания грязной воды в бак. Подачу воды автоматически регулирует поплавковый клапан. Для поддержания заданного уровня воды и предотвращения подсоса воздуха из системы канализации или из атмосферы служит переливная труба с сифоном.

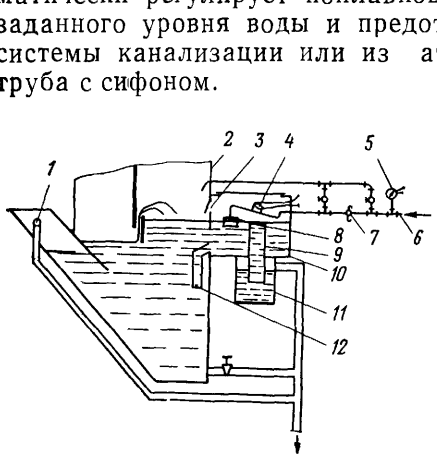


Рис III 39 Схема устройства для автоматической водоподпитки и поддержания уровня воды

1 — аварийная переливная труба, *2* — стенка корпуса пылеуловителя, *3* — отверстие, *4* — датчик уровня; *5* — реле давления, *6* — подводящий патрубок осветленной воды; *7* — электромагнитный клапан, *8* — поплавковый клапан; *9* — переливная труба; *10* — бак, *11* — сифон, *12* — трубка

Залив воды в бункер пылеуловителя и бак водоподпитки производится при выключенном вентиляторе и при закрытом магнитном клапане через дополнительный ввод на байпасе. Когда бункер и бак водоподпитки пылеуловителя наполнятся, вода начинает сливаться через сливной трубопровод в канализацию, что видно по ее струе. Дальнейшая подпитка пылеуловителя водой производится автоматически при работающем вентиляторе и открытом магнитном клапане только через штуцер поплавкового клапана узла водоподпитки.

Количество воды, подаваемой через поплавковый клапан, должно быть несколько больше, чем ее потери на испарение и на слив со шламом. Это позволяет предотвратить попадание загрязненной воды в бак водоподпитки и слив ее в канализацию, а также обеспечить поддержание заданного уровня воды. Избыток воды сбрасывается через переливную трубу бака водоподпитки в канализацию.

С целью предупреждения закупорки шламом сливного отверстия в нижнюю часть корпуса пылеуловителя по соплам, расположенным внутри бункера, через коллектор подается водопроводная или осветленная вода (см. рис. III.38). Слив шлама производится через запорный вентиль и конусную воронку, устанавливаемую на нижнем фланце вентиля.

Переливную трубу, сигнализирующую о полноте заполнения пылеуловителя, и узел водоподпитки закрепляют на высоте, соответствующей выбранному уровню воды в пылеуловителе.

При прекращении подачи воды из водопровода уровень воды

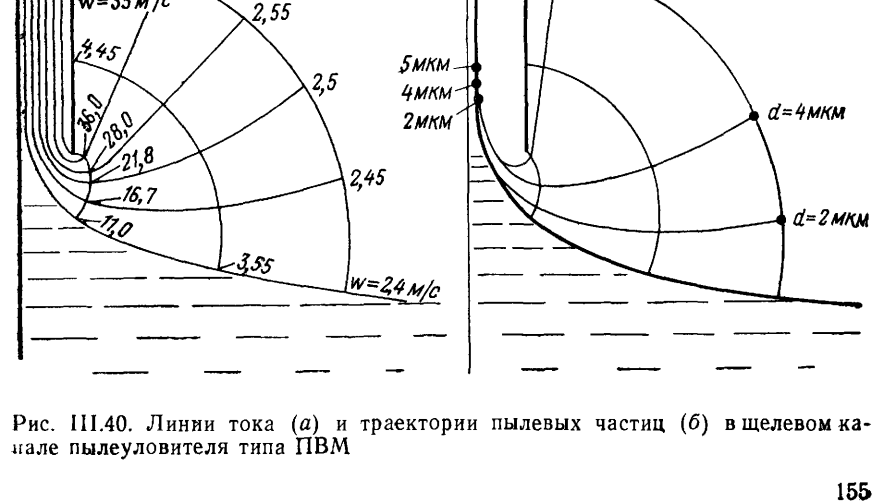


Рис. III.40. Линии тока (*а*) и траектории пылевых частиц (*б*) в щелевом канале пылеуловителя типа ПВМ

снижается, поплавковый клапан опускается, датчик, укрепленный на плече поплавкового клапана, срабатывает и вентилятор автоматически отключается. Вентилятор может быть отключен также с помощью реле давления в случае падения давления воды ниже 1,5—2 кгс/см² (в зависимости от его настройки).

Картина течения воздуха в щелевом канале пылеуловителя типа ПВМ была исследована с применением метода конформного отображения Н. Е. Жуковского [36], видоизмененного О. М. Киселевым [44]. Приближенная картина течения, полученная для случая, когда воздушная нагрузка составляла примерно 4 тыс. м³/ч на 1 м длины щели, а разность уровней $\delta=60$ мм (см. рис. III.38), дана на рис. III.40, *а*. Вдали от входа в щель линии тока представляют собой прямые лучи, сходящиеся к щели. Поворот линий тока начинается в основном вблизи от входа в щель, происходит резко и быстро заканчивается, чем создаются оптимальные условия сепарации.

Наименьшие скорости потока наблюдаются вблизи свободной поверхности воды; скорость возрастает к перегородке и достигает максимума на линиях тока, примыкающих к ней. Такое распределение скоростей способствует улавливанию частиц, находящихся в наиболее неблагоприятных условиях. Величины скоростей даны на рисунке; замеры, произведенные с помощью очень тонких пневмометрических трубок, подтвердили достоверность расчета.

Используя полученные значения скоростей потока w, были вычислены траектории сепарирующихся частиц. На рис. II.40,*б* показаны граничные траектории сепарирующихся частиц. Из области потока, расположенной между каждой из траекторий и поверхностью воды, сепарируются полностью все частицы размера, указанного на линии траектории, и в некоторой мере более мелкие

На рис. III.30 (линии *5*, *6* и *7*) показана действительная фракционная эффективность пылеуловителя типа ПВМ при воздушной нагрузке 4 тыс. м³/ч на 1 м длины щели для трех различных уровней: $\delta=40$ мм, что соответствует наиболее общему случаю для вентиляционной практики и пылеуловителей III класса (см табл. III.1 и III.2), $\delta=200$ и $\delta=300$ мм — для случаев, когда в целях достижения более высокой эффективности используется давление до 350—400 кгс/м² (пылеуловители II класса).

Из схемы течения (см. рис. III.40) следует, что уменьшение радиуса кривизны свободной поверхности воды (что можно осуществить, повышая уровень воды) способствует повышению эффективности процесса. Экспериментальные иссследования показали, что при увеличении воздушной нагрузки слой воды на перегородке утончается и, хотя перегородка всегда остается смоченной, эффективность при определенных условиях начинает падать. Это явление может быть объяснено отскоком частиц

Пылеуловители Ротоклон N. Принципиальная схема Ротокло-

на N показана на рис. III.37, *в*. Как видно из рисунка, этот пылеуловитель также может быть отнесен к типу струйных двухперегородочных. В отличие от пылеуловителя типа ПВМ обе перегородки здесь изогнуты. Судя по описаниям в литературе, искривлением перегородок преследуется цель возбудить центробежные силы и использовать их для сепарации частиц в пределах изогнутого канала — импеллера. Большое значение в отношении пылеулавливания приписывается также завесам капель и брызг, дважды пересекающим траекторию воздушного потока

При наблюдении через остекленный торец импеллера иногда может создаться впечатление, что весь канал заполнен пеной и брызгами воды. В действительности этот эффект, обусловленный торможением потока у торцевой стенки, характерен только для слоя, непосредственно примыкающего к стеклу. Фотографирование позволяет установить, что истинная картина течения не отличается от картины течения в пылеуловителе типа ПВМ и, если исключить пульсации, в одноперегородочном пылеуловителе. На рис III.41 показаны эти три течения при одинаковых удельных воздушных нагрузках и уровнях залива водой ($Q \approx 4$ тыс. м^3/ч; $\delta = 80$ мм). Видно, что воздушная струя (светлая полоса) как бы сама выбирает свою траекторию, стремясь кратчайшим путем пробиться через воду (на фото более темная окраска) Из фотографий видно также, что вторая по ходу воздуха перегородка пылеуловителя типа ПВМ при данных условиях ограничивает распространение воздушной струи, вынуждая ее совершить более резкий поворот, что несомненно благоприятствует сепарации

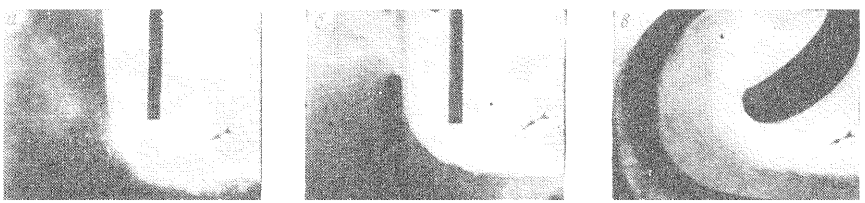


Рис III 41 Течения в струйных пылеуловителях
а — одноперегородочном; *б* — ПВМ, *в* — ротоклоне

Наблюдения показали также, что, будучи более глубоко погруженной в воду, эта перегородка хорошо стабилизирует течение. При исследовании импеллера ротоклона оказалось, что при некоторых соотношениях воздушной нагрузки и уровня воды струя не в состоянии перебросить через нависающую кромку криволинейной перегородки увлеченную ею воду.

Канал заполняется водой и можно наблюдать, как периодически водяные пробки перебрасываются за верхнюю кромку перегородки либо падают вниз В условиях такого пробкового

режима поддержание постоянного уровня воды и соответственно стабильной эффективности невозможно.

Нет оснований полагать, что промывка воздуха каплями и брызгами может оказать существенное влияние на эффективность процесса. Как видно из табл. I.1 и рис. III.30, частицы, которые могут быть уловлены большими каплями, крупнее частиц, эффективно улавливаемых при обтекании перегородки.

В ряде стран разработаны модификации ротоклонов, отличающихся преимущественно конструкцией импеллеров [82].

ГЛАВА IV

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЕСПЫЛИВАЮЩИХ УСТАНОВОК

1. ОЧИСТКА ВОЗДУХА, ПОДАВАЕМОГО В ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ СИСТЕМАМИ ПРИТОЧНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ

Задачи очистки воздуха

Атмосферный воздух всегда содержит некоторое количество мелкодисперсной пыли естественного происхождения. Воздушные выбросы промышленных предприятий и отопительных устройств, механическая и ветровая эрозия почвы и другие искусственные и естественные процессы, происходящие в природе, во многих случаях увеличивают запыленность воздуха до такой степени, что по гигиеническим или технологическим соображениям возникает необходимость в очистке воздуха, подаваемого в здания и сооружения.

В Англии воздуху городов, в которых жилые кварталы с каминным отоплением сочетаются с крупными промышленными предприятиями, свойственно пылесодержание до 0,5 мг/м^3. В США концентрация пыли в воздухе достигала 1,044 мг/м^3. В ФРГ наибольшая концентрация пыли отмечалась в городах Рура — до 0,7 мг/м^3.

Санитарные нормы СССР ограничивают среднесуточную предельно допустимую концентрацию нетоксичной пыли в атмосферном воздухе населенных мест величиной 0,15 мг/м^3, однако в действительности концентрация пыли часто бывает больше, поэтому лучше исходить из опытных данных о степени загрязнения воздуха в конкретном районе [58]. Обобщенные показатели запыленности атмосферного воздуха приведены в табл. IV.1.

ТАБЛИЦА IV 1

Обобщенные показатели запыленности атмосферного воздуха

Степень загрязнения воздуха	Среднесуточная концентрация атмосферной пыли, мг/м^3	Местности, которым свойственна указанная концентрация пыли
Чистый	До 0,15	Сельские местности и непромышленные города
Слабо загрязненный . .	» 0,5	Жилые районы промышленных городов
Чрезмерно загрязненный .	» 1	Индустриальные районы промышленных городов
Чрезмерно загрязненный	» 3*	Территории промышленных предприятий с большими пылевыми выбросами

* В отдельных случаях концентрация пыли может быть более 3 мг/м^3

Содержание пыли в воздухе во время пыльных бурь может составлять 10 мг/м³ и более [43]. Так, в районе Бухары в отдельные годы в течение 54—98% времени пылесодержание составляло 1 мг/м³ и менее, 2—31% времени — до 100 мг/м³ и примерно 3% времени — от 100 до 300 мг/м³.

Повышенные концентрации пыли в атмосферном воздухе, как правило, обусловливаются появлением в нем временами крупных пылевых частиц. Они определяют большую часть переменной нагрузки на фильтры и довольно легко поддаются отделению в простейших фильтрах. В отличие от этого постоянная запыленность определяет стабильную нагрузку на фильтры, мало изменяющуюся для различных населенных мест. Предельная крупность частиц постоянной запыленности 5—10 мкм, причем более 50% общей массы частиц составляют частицы размером меньше 1—2 мкм, а от общего числа частиц более 50% составляют частицы мельче 0,5 мкм (см. рис. I.1). Освобождение воздуха от присущей ему постоянной запыленности является более сложной задачей. Здесь следует иметь в виду, что основную опасность для человеческого организма представляют именно частицы размером от десятых долей микрометра до 10 и в особенности до 5 мкм.

Необходимость в очистке воздуха от пыли возникает также при его рециркуляции в системах вентиляции, практикуемой в широких размерах, особенно при кондиционировании воздуха. Непременным условием возможности использования воздуха, удаленного из помещений вытяжной вентиляцией, для рециркуляции является его достаточная чистота.

Частицы пыли крупнее 10 мкм в значительной мере успевают выпасть в помещениях, вследствие чего в воздухе, забранном вентиляционной системой для рециркуляции, содержатся более мелкие частицы. Некоторым исключением является пыль текстильных предприятий, содержащая много пуха и волокна, способных длительное время оставаться во взвешенном состоянии.

Там, где скопляется большое число людей, следует считаться с загрязнением рециркуляционного воздуха капельными аэрозолями, образующимися при кашле и т. п. Аэрозоли такого рода часто содержат болезнетворные микроорганизмы.

Как видно из изложенного, на воздушные фильтры возлагаются следующие задачи:

а) уменьшение содержания пыли в воздухе, подаваемом в вентилируемые здания, если среднесуточная или максимальная концентрация пыли в районе расположения здания или вблизи места забора воздуха систематически превышает предельно допустимые величины, установленные санитарными нормами;

б) защита теплообменников и другого оборудования вентиляционных камер и кондиционеров от запыления, снижающего теплотехнические показатели, увеличивающего сопротивление и т. д.;

в) предохранение ценной внутренней отделки и оборудования вентилируемых зданий от загрязнения отложениями мелкодисперсной пыли, содержащейся в воздухе, подаваемом в помещения;

г) поддержание в производственных помещениях предприятий точного приборостроения, радиоэлектронной, фармацевтической и других отраслей промышленности заданной в соответствии с технологическими требованиями чистоты воздуха.

Выбор и расчет воздушных фильтров

Основные показатели эффективности фильтров даны в табл. II.1. Выбор фильтров основывается на соответствии эффективности фильтров задачам очистки при учете начальной запыленности воздуха. Одновременно принимаются во внимание начальное сопротивление фильтра и изменение его сопротивления при запылении, конструктивные и эксплуатационные особенности фильтров, а также целесообразность применения сухих или смоченных фильтров.

Выбор фильтров по их эффективности можно производить согласно табл. II.1, руководствуясь следующими соображениями:

фильтры III класса применяют для выполнения задач, указанных в пп. «а» и «б»;

фильтры II класса применяют для выполнения задач, указанных в пп. «а», «б» и «в»; в случае необходимости продления сроков использования фильтров II класса их устанавливают в качестве II ступени после более пылеемких фильтров III класса;

фильтры I класса применяют для выполнения задач, указанных в п. «г» при наличии специального обоснования; в целях рационального использования их устанавливают в качестве последней ступени очистки после фильтров II или III класса.

В начальный период работы фильтров их эффективность в зависимости от их вида и конструкции может обнаруживать тенденцию как к росту (например, в большинстве масляных и волокнистых фильтров), так и к падению (например, в электрических фильтрах). Однако в дальнейшем после накопления в фильтрах некоторого критического количества пыли эффективность всех фильтров начинает снижаться. В то же время сопротивление фильтров закономерно возрастает, и через определенный период времени располагаемое давление вентиляционной системы оказывается исчерпанным.

Некоторые фильтры являются исключением из указанных правил. Так, эффективность масляных самоочищающихся фильтров и их сопротивление мало изменяются по мере накопления пыли в ванне до тех пор, пока последняя не переполнится шламом. В электрических фильтрах, не оборудованных противоуносными фильтрами, сопротивление практически не меняется, одна-

ко эффективность после достижения предельной пыленасыщенности падает.

При повышенной запыленности воздуха применяют главным образом механизированные фильтры III класса: при очистке больших объемов воздуха (более 20 тыс. м³/ч) с пылесодержанием 0,5 мг/м³ и более — масляные самоочищающиеся фильтры, если по условиям эксплуатации объекта допускается некоторое загрязнение воздуха парами замасливателя и не является совершенно обязательным полное исключение капельного выноса замасливателя[1]; при очистке в тех же условиях меньших объемов воздуха (до 10—20 тыс. м³/ч), особенно если необходимо исключить только капельный вынос масла, — ячейковые масляные фильтры.

При пылесодержании менее 0,5 мг/м³ при очистке больших объемов воздуха могут быть использованы рулонные волокнистые фильтры типа ФРУ, а при очистке небольших объемов воздуха — ячейковые фильтры с тем же фильтрующим материалом.

При пылесодержании менее 0,1 мг/м³ могут применяться также фильтры I класса.

Электрические фильтры могут применяться во всем диапазоне возможной начальной запыленности атмосферного и рециркуляционного воздуха.

Расчет фильтров с учетом их пылеемкости производят в такой последовательности. Исходя из сопротивления фильтра, которое может быть допущено в проектируемой системе, и аэродинамической характеристики фильтра, выбранного в соответствии с задачами очистки, принимают воздушную нагрузку и определяют типоразмер фильтра или площадь фильтрующей поверхности. По начальному пылесодержанию и эффективности фильтра определяют количество пыли, улавливаемой фильтром в единицу времени. По пылевой характеристике определяют период работы фильтра, в течение которого будет использован перепад между принятым начальным и допустимым конечным сопротивлением (для ячейковых и электрических фильтров), либо период работы фильтров, после которого должны меняться масло в ваннах (для самоочищающихся фильтров), катушки (для рулонных фильтров) и т. п. Если этот период окажется меньше, чем допустимо по условиям эксплуатации, нужно уменьшить воздушную нагрузку или применить другой тип фильтра с большей пылеемкостью, или рассмотреть возможность использования в фильтре большего давления.

В целях иллюстрации методики расчета рассмотрим подбор фильтров для санитарно-гигиенической очистки наружного воздуха, подаваемого в производственные помещения предприятия, расположенного в индустриальном районе промышленного города.

---

[1] Область применения масляных фильтров может быть расширена путем использования нелетучих и непахнущих синтетических замасливателей (см далее)

Объем подаваемого воздуха 200 тыс $м^3/ч$, располагаемое давление вентиляционной системы 15 $кгс/м^2$. Режим работы односменный. Начальное пылесодержание, согласно табл. IV.1, можно принять равным 1 $мг/м^3$.

Задача санитарно-гигиенической очистки, как правило, может быть выполнена фильтрами III класса. Учитывая большой объем очищаемого воздуха, целесообразно использовать механизированные фильтры. Рассмотрим прежде всего возможность применения рулонных фильтров типа ФРУ, эксплуатация которых менее трудоемка, чем масляных самоочищающихся фильтров При установке двух фильтров Ф12РУ площадью рабочего сечения около 12 $м^2$ каждый удельная воздушная нагрузка составит 8300 $м^3/ч \cdot м^2$; начальное сопротивление при этом равно 4 $кгс/м^2$.

Эффективность фильтров в условиях сравнительно высокой запыленности можно принять равной 85%; тогда количество пыли, отлагающейся на 1 $м^2$ фильтрующего материала, составит в сутки $0{,}001 \cdot 8300 \cdot 0{,}85 \cdot 8 = 56{,}4$ $г/м^2$.

Расчетная пылеемкость материала при увеличении сопротивления с 4 до 15 $кгс/м^2$ равна 350 $г/м^2$, а продолжительность работы фильтра до достижения проектного сопротивления — $350 : 56{,}4 \approx 6$ суток. Таким образом, механизм перемотки фильтра может включаться через каждые 6 суток. Расход материала при высоте живого сечения трехсекционных фильтров Ф12РУ, равной 5 м, составит в сутки $5 \cdot 3 \cdot 2 : 6 = 5$ м, а в год $5 \cdot 300 = 1500$ м.

Затраты на приобретение фильтрующего материала ФСВУ при его стоимости около 2 руб. за 1 м длины достигают $1500 \cdot 2 = 3000$. Чрезмерно высокая стоимость расходуемого материала обусловлена высокой запыленностью воздуха. Несколько снизить затраты можно путем уменьшения удельной воздушной нагрузки. При установке трех рулонных фильтров того же вида удельная воздушная нагрузка составит 5500 $м^3/ч \cdot м^2$, начальное сопротивление — 2 $кгс/м^2$, а количество пыли, отлагающейся на 1 $м^2$ в сутки,— соответственно 37,4 $г/м^2$.

Расчетная пылеемкость материала при увеличении сопротивления с 2 до 15 $кгс/м^2$ ориентировочно равна 520 $г/м^2$.

Продолжительность работы фильтра до перемотки увеличится до 14 суток, годовой расход материала сократится до 950 м и затраты на приобретение материала снизятся до 1900 руб. Таким образом, установка третьего фильтра позволила снизить стоимость расходуемого материала с 3000 до 1900 руб в год, в результате чего стоимость третьего фильтра окупается менее чем за полгода В то же время затраты остаются чрезмерно большими.

Пример свидетельствует, что применять рулонные фильтры типа ФРУ при пылесодержании более 0,5 $мг/м^3$ следует только при наличии особых обоснований.

Рассмотрим для сравнения вариант применения масляных самоочищающихся фильтров Примем удельную воздушную нагрузку, соответствующую случаю установки двух фильтров ФШ5 или Кд-120 номинальной производительностью 120 тыс $м^3/ч$ с площадью рабочего сечения каждого около 11 $м^2$, равной 9100 $м^3/ч \cdot м^2$ Такая удельная воздушная нагрузка приемлема для фильтров ФШ, однако является чрезмерной для фильтров типа Кд При необходимости использовать этот тип фильтров нужно принять следующий типоразмер — Кд-160 номинальной производительностью 160 тыс $м^3/ч$. Площадь рабочего сечения этих фильтров примерно равна 14,9 $м^2$ и удельная воздушная нагрузка составит 6700 $м^3/ч \cdot м^2$.

При рассмотрении эксплуатационного режима ограничимся фильтрами типа ФШ. Эффективность фильтров можно принять приблизительно равной 70%; тогда количество пыли, отлагающейся на фильтрующих панелях каждого фильтра в сутки, составит около 560 г.

Вся уловленная пыль смывается в ванну фильтров. При емкости ванны фильтров ФШ5, равной 560 л, и плотности масла 0,9 $г/см^3$ ее максимальная пылеемкость, составляющая 30% массы масла, будет исчерпана примерно

за 270 суток По прошествии этого времени масло должно быть полностью заменено Использование скребкового механизма в фильтрах для удаления шлама позволяет удлинить этот срок в 2—3 раза

При централизованном шламоудалении с перекачкой загрязненного масла по трубам содержание механических примесей не должно превышать 7% Соответственно масло должно регенерироваться через каждые 63 суток Максимальная продолжительность использования нефтяных масел с регенерацией путем отстоя и фильтрации составляет примерно два года

При использовании обычных нефтяных масел (висцинового, индустриального, трансформаторного и т п) замасливание воздуха в среднем равно 0 2 мг/м³ Потери масла за сутки при этом составят около 960 г, или за год — около 300 кг При стоимости этих сортов масла примерно 150 руб за 1 т годовые затраты на добавление масла равняются 40—50 руб Можно принять что ежегодные затраты на замену 50% масла составят примерно 75 руб Таким образом, общие затраты на замасливатель в год в среднем равны 120 руб

Применяя вместо нефтяных масел полиметилсилоксановые жидкости типа ПМС-100 или ПМС-200, которые практически не испаряются, можно избавиться от замасливания воздуха и соответственно от потерь замасливателя на испарение При этом затраты определяются исключительно амортизацией замасливателя, которую вследствие особой стабильности кремнийорганической жидкости можно принять равной примерно 10% в год при обеспечении ее простейшей очисткой от взвешенных частиц При стоимости этой жидкости примерно 14 руб за 1 кг годовые затраты составят ориентировочно 1400 руб

Как видно из расчета, очистка воздуха в масляных самоочищающихся фильтрах при повышенной запыленности воздуха значительно дешевле его очистки в рулонных фильтрах Это преимущество сохраняется также и при использовании замасливателей типа ПМС, когда качество очищенного воздуха получается не хуже, чем при применении рулонных фильтров. С уменьшением пылесодержания эффект снижается, так как стоимость расходуемого в рулонных фильтрах фильтрующего материала прямо пропорциональна пылесодержанию, а расходы, связанные с амортизацией замасливателя, от него не зависят Стоимость расходуемых материалов уравнивается при пылесодержании по I варианту примерно 0,16 мг/м³ и по II варианту 0,24 мг/м³. В обоих случаях, очень близких к реальным условиям очистки воздуха в городах со средней загрязненностью атмосферы, применение рулонных фильтров является, несомненно, более рациональным ввиду простоты и удобства их эксплуатации

Рассмотрим также применение электрических фильтров типа ФЭ, эффективность которых несколько выше требуемой в данном случае

Примем к установке два фильтра Ф14Э6 номинальной производительностью 100 тыс м³/ч каждый, укомплектованные противоуносными стекловолокнистыми фильтрами Площадь рабочего сечения каждого фильтра 14 м² и удельная воздушная нагрузка 7200 м³/ч м² Начальное сопротивление фильтра 2 кгс/м² эффективность 92%

Количество пыли оседающей за сутки на 1 м² входного сечения фильтра примерно равно 53 г/м²

Расчетная пылеемкость фильтра при увеличении сопротивления с 2 до 15 кгс/м² составляет около 1700 г/м², поэтому продолжительность работы фильтра до достижения проектного сопротивления ориентировочно равна 32 суткам Таким образом, противоуносный фильтр должен меняться пример

но 1 раз в месяц. Одновременно должен промываться электрический фильтр. Расход фильтрующего материала на одну замену составляет 14 м² и в год 330 м². Затраты на приобретение материала равны: 2·330=660 руб. Дальнейшее снижение затрат на очистку воздуха в электрических фильтрах может быть достигнуто за счет некоторого уменьшения эффективности очистки, если отказаться от установки противоуносных фильтров. Для ориентировочных расчетов можно принять, что при накоплении пыли в количестве 1500 г/м² эффективность очистки (без противоуносного фильтра) снижается до 70%, а средняя эффективность за весь период работы составляет примерно 80%.

Особенно высокими могут быть затраты при очистке воздуха, рециркулирующего в системах вентиляции промышленных предприятий с ощутимым пылевым загрязнением. Начальная концентрация пыли в этом воздухе должна приниматься равной предельно допустимой величине, т. е. от 2 до 10 мг/м³ в зависимости от класса опасности пыли.

В связи с этим представляет интерес анализ значений постоянной фильтрации λ, полученных при исследовании некоторых из описанных в главе II фильтрующих слоев:

	Значение λ, отнесенное к числу последовательно уложенных сеток	Значение λ, отнесенное к глубине слоя
Фильтр масляный типа ФяР с заполнением из гофрированных стальных сеток с ячейками от 2,5 до 0,63 мм . .	2,3	12
Фильтр масляный типа ФяВ с заполнением из гофрированных винипластовых «сеток» с отверстиями 2,8 мм . . .	3,4	7
То же, не замасленный	5	9
Фильтр губчатый типа ФяП с заполнением из модифицированного пенополиуретана . . .	—	3

Теоретические зависимости, приведенные в п. 3 главы I, были получены для фильтрации монодисперсного аэрозоля через однородный фильтрующий слой и при игнорировании таких факторов, как электростатические силы, коагуляция частиц и т. п. Тем не менее, поскольку все эксперименты были проведены по одинаковой методике, из сравнения полученных величин можно сделать, например, вывод, что эффективность стальных сеток, изготовленных из тонкой проволоки, выше эффективности винипластовых «сеток», представляющих собой перфорированную винипластовую пленку. В то же время эти «сетки» за счет меньшей высоты гофров укладываются плотнее, чем стальные, поэтому, будучи отнесенным к глубине фильтрующего слоя, значение их постоянной фильтрации оказывается меньшим.

Слои, характеризующиеся большими значениями λ, т. е. меньшей удельной эффективностью, отличаются также более пологими кривыми распределения пыли. Благодаря более глубокому прониканию пыли такие слои обладают большей пылеемкостью,

что очень важно для фильтров III класса. С учетом этих соображений для указанной задачи очистки может оказаться целесообразным применение фильтрующих слоев, характеризующихся большими значениями постоянной фильтрации.

В целом создание установок, способных очищать воздух с повышенным начальным содержанием пыли, в частности рециркуляционный воздух, воздух в местностях с частыми пылевыми бурями и т. д., является сложной и пока не вполне решенной задачей. Наиболее соответствуют таким условиям фильтры, очищаемые в процессе работы, например рулонные фильтры типа ФПР и ФРП. Усовершенствованное шламоудаление в самоочищающихся фильтрах типа ФШ также позволяет пользоваться ими при повышенной запыленности.

Предварительная очистка воздуха в районах пыльных бурь. В 1959 г., по предложению автора, в воздухозаборе газовых турбин ГРЭС в Небит-Даге применена воздухоочистная установка, показанная на рис. IV.1.

Воздух забирается через плоские шахты *1*, приподнятые, насколько это возможно по местным условиям, над поверхностью земли за пределы зоны наибольших концентраций пыли. Ско-

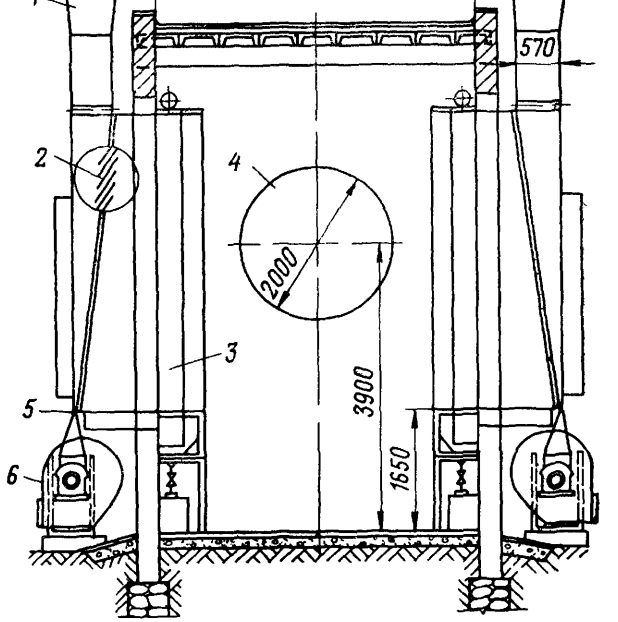


Рис IV.1. Установка для очистки воздуха в районах пыльных бурь

рость воздуха в шахте поддерживается на уровне 20—25 м/с. С этой скоростью воздух поступает на плоскую решетку *2* жалюзийного инерционного пылеотделителя типа ПИ. Наиболее крупные частицы, ударяясь о пластинки решетки, отскакивают от них, подхватываются потоком и сносятся вниз. Воздух, освобожденный таким образом от частиц пыли, проходит между пластинками решетки, а затем через фильтр *3*, после чего засасывается компрессором в отверстие *4*.

Пылевой концентрат отсасывается через узкую щель *5* с помощью вентиляторов *6* и выбрасывается в атмосферу, что в условиях пыльных бурь не может существенно увеличить пылесодержание наружного воздуха. Сопротивление устройств предварительной очистки при расходе воздуха 100 тыс. м³/ч составляет около 40 кгс/м².

Пластинки жалюзийной решетки пылеотделителя играют одновременно роль направляющих лопаток, выравнивающих поток перед фильтром. По имеющимся данным, эффективность пылеотделителя в зависимости от метеорологических условий доходит до 90%.

Предварительная очистка воздуха от волокнистой пыли с помощью металлических и капроновых сеток. Имеется опыт очистки сильно запыленного (>4 мг/м³) рециркуляционного воздуха прядильных и ткацких цехов хлопчатобумажных и камвольных фабрик с помощью металлических и капроновых сеток. В данном случае используется способность пыли образовывать на поверхности сетки волокнистый слой, являющийся естественным фильтром.

Эффективность сеток зависит как от размера их ячеек, так и от рода пыли. Эффективность одной и той же сетки может быть различной в разных цехах в зависимости от оборудования, качества пряжи и т. п. и возрастает по мере утолщения слоя осевшей пыли. Например, в ткацком цехе при использовании металлической сетки с размером ячеек 1600 мкм и диаметром проволоки 500 мкм оказалось, что в начале периода фильтрации или сразу после чистки сетки эффективность ее составляла всего 8%, а в конце периода фильтрации, когда сопротивление достигло предельной по условиям эксплуатации величины,— 24%. Среднее пылесодержание в цехе по замерам было равно 4,1 мг/м³. В другом ткацком цехе эффективность металлической сетки с размером ячеек 400—450 мкм и диаметром проволоки 160 мкм составляла 26% в начальный момент после чистки сетки и 48% к моменту следующей чистки (через 2 ч). Среднее пылесодержание составляло 6,15 мг/м³. В момент чистки сетки проскок пыли настолько велик, что, как показали замеры, запыленность за сеткой в это время превышает более чем в 1,5 раза запыленность воздуха перед сеткой.

Металлические сетки быстро корродируют. Коррозия способ-

ствует залипанию ячеек сетки волокнистой пылью и затрудняет их чистку.

В последние годы делались попытки применить в системах вентиляции текстильных предприятий рамные фильтры, снаряженные капроновой тканью. Исследования показали, что и наименее плотные капроновые ткани отличаются большим аэродинамическим сопротивлением, достигающим 50 кгс/м^2 при удельной воздушной нагрузке 8—9 тыс. м^3/ч·м^2. Эффективность капроновой ткани арт. 1530 при искусственном запылении воздуха мелкодисперсной кварцевой пылью с предельной крупностью частиц менее 10 мкм не превышала 34%, причем сопротивление росло очень быстро. Пылеемкость ткани составляла несколько граммов

Более совершенным средством являются капроновые сетки (ситовые ткани). Их номенклатура включает более 30 артикулов сеток из монокапрона разных номеров с размером ячеек до 1200 мкм. Для фильтрации воздуха могут быть рекомендованы сетки арт. 25, 27, 29, 32, 35 и 43. Капроновые сетки имеют очень малое сопротивление. Так, при нагрузке 10 тыс. м^3/ч·м^2 сопротивление самой частой сетки не превышает 6 кгс/м^2. С точностью, достаточной для практических расчетов, для перечисленных сеток можно принимать $\zeta=7$.

Изменение эксплуатационных показателей фильтра в виде капроновой сетки при фильтрации через нее воздуха прядильного цеха при воздушной нагрузке 5 тыс. м^3/ч·м^2 и среднем пылесодержании 2 мг/м^3 приведено в табл. IV.2.

ТАБЛИЦА IV 2

Изменение эксплуатационных показателей капроновой сетки по мере ее работы

Продолжительность работы фильтра от момента чистки, ч	Эффективность, %	Сопротивление фильтра, кгс/м^2	Масса уловленной пыли, г/м^2
0	40—50	1—1,5	0,5
3	65	2—3	20
5	75	3—4	30—40
8	85	6—7	60—70
10	90	8—10	80—99
14	92	10—12	99—100
22	95	$\geqslant$15	$\geqslant$120

Капроновые сетки не подвержены коррозии и благодаря гладкой поверхности нитей легко очищаются от пыли. После каждой чистки начальное сопротивление сеток полностью восстанавливается. При чистке капроновой сетки должна быть удалена вся пыль, так как в ее нижнем слое скапливается основная масса мелкой минеральной пыли ($<$20 мкм), которая проходит через верхний более рыхлый слой. При механической чистке поверхности сеток, например в фильтрах типа ФПР или ФРП, мож-

но, регулируя скорость передвижения отсасывающего патрубка в зависимости от запыленности воздуха, обеспечить постоянную среднюю эффективность улавливания пыли в пределах 70—80%.

Выбор замасливателей для воздушных фильтров. Централизованное маслоснабжение самоочищающихся фильтров и удаление шлама

Толщина пленки замасливателя, образующейся на поверхности фильтрующих элементов, имеет первостепенное значение для эффективной работы масляных и особенно самоочищающихся фильтров, а также для предотвращения капельного выноса масла. Она должна учитываться также при выборе структуры фильтрующего слоя, т. е. при конструировании фильтров.

Толщина пленки на фильтровальных панелях самоочищающихся фильтров определяется скоростью движения панелей и свойствами замасливателя. Выходящие из ванны панели увлекают за собой масло. Толщина остающейся после стока избытка масла пленки зависит от его вязкости $\mu_ж$, плотности $\rho_ж$ и поверхностного натяжения σ. Согласно теории Б. В. Дерягина [32], толщина δ пленки на вертикальной стенке, например на пластинке заполнения шторок фильтра ФШ. может быть определена из безразмерного выражения

$$\delta \left(\frac{\sigma}{\rho_ж g}\right)^{-1/2} = 0{,}94 \left(\frac{\mu_ж v}{\sigma}\right)^{1/3}.$$

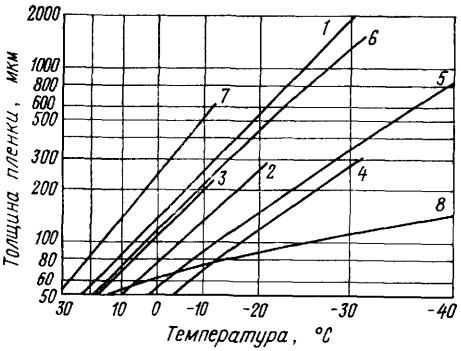


Рис IV 2. Зависимость от температуры воздуха толщины пленки

1 — масла для вентиляционных фильтров (висцинового); *2* — масла индустриального 12, *3* — то же, 20; *4* — масла трансформаторного; *5* — масла МК 8; *6* — масла парфюмерного, *7* — нефтяного замасливателя фирмы «Конкордия»; *8* — полиметилсилоксановой жидкости ПМС

На рис. IV.2 показана зависимость толщины пленки некоторых замасливателей от температуры воздуха для скорости движения панели 12 см/мин. Из графика видно, что в летних условиях пленки, образуемые некоторыми маслами, чрезмерно тонки. Толщина пленок таких распространенных замасливателей воздушных фильтров, как висцинового и парфюмерного масла, в зимнее время может доходить до 1—2 мм, что исключает возможность нормальной эксплуатации фильтров. Наилучшими

показателями обладают полиметилсилоксановые жидкости, пленка которых сохраняет практически одинаковую толщину при положительных и отрицательных температурах.

Согласно исследованиям, для предотвращения возникновения на фильтрующем слое сплошных пленок замасливателей, способных разрушаться под давлением воздуха с образованием масляного аэрозоля, размер каналов в этом слое должен составлять

$$b > 2\,\frac{(\mu_в\, v)^{2/3}}{\sigma^{1/6}\,(\rho_ж\, g)^{1/2}}\,.$$

Вязкость замасливателя является одним из важнейших его свойств, определяющим возможность его применения в конкретных температурных условиях эксплуатации. На рис. IV.3, *а* приведена вязкостно-температурная характеристика масел, полученная с помощью вискозиметра Хепплера ВН2. С учетом опыта эксплуатации фильтров следует считать, что вязкость масел не должна быть меньше 50 сСт. Максимальная их вязкость в самоочищающихся фильтрах при отрицательных температурах не должна превышать 7000 сСт, а при централизованном маслоснабжении — 4000 сСт. В ячейковых фильтрах может быть допущена вязкость, соответствующая температуре, на 5—7°С, превышающей температуру застывания замасливателя.

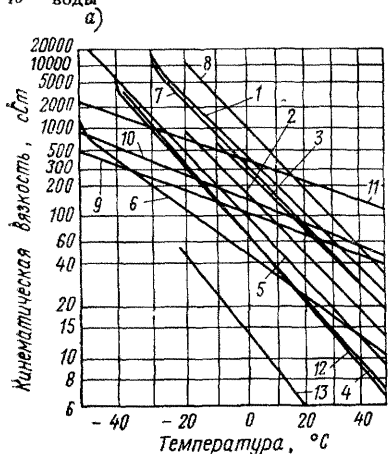
Вязкость полиметилсилоксановых жидкостей (ПМС) в интервале температур от —50 до 50°С изменяется всего только в 10 раз, всегда сохраняя достаточно высокие значения. Несмотря на пока сравнительно высокую стоимость, эти жидкости в течение нескольких лет с успехом эксплуатируются на некоторых ответственных объектах.

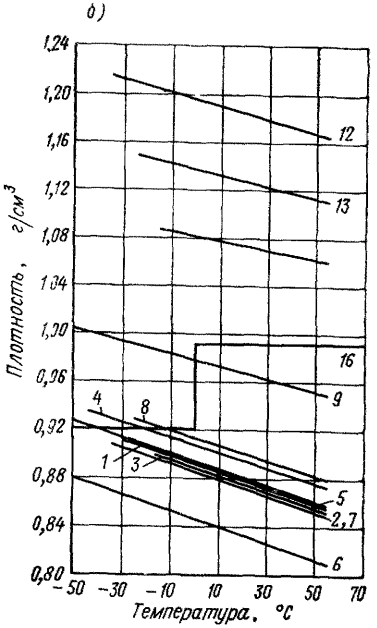
По условиям взрывобезопасности в кислородной промышленности нефтяные масла заменены водно-глицериновыми растворами с добавкой ингибиторов. Вязкость раствора с 70%-ным содержанием глицерина достигает 4000 сСт. Раствор с содержанием глицерина 66,7% замерзает при —46,5°С. При содержании глицерина более 70% температура замерзания повышается, а неразбавленный глицерин замерзает (кристаллизуется) при 17—18°С.

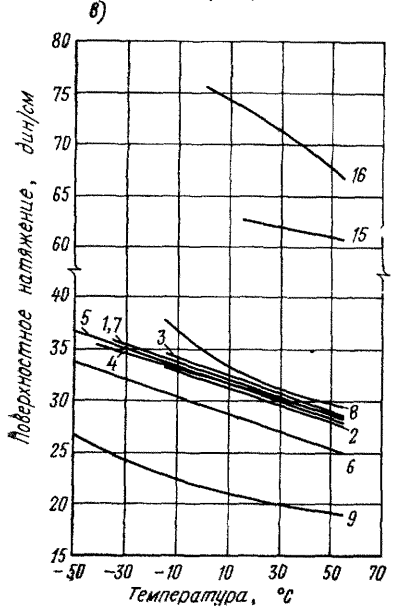
Плотность замасливателей определяет также поведение воды, попадающей в ванну фильтров. Для нормальной эксплуатации фильтров необходимо, чтобы вода (а при ее замерзании лед) находилась на дне ванны. На рис. IV.3, *б* плотность воды и льда показана линией *16* (с учетом надежного обеспечения желательного расслоения жидкостей). В области положительных температур разность плотностей воды и нефтяных масел достаточно велика, а воды и жидкости ПМС-70 незначительна. Для обеспечения опускания воды в нижнюю часть ванны плотность замасливателей вплоть до температуры 45°С должна быть не более 0,99 г/см³. Для предупреждения же всплытия льда,

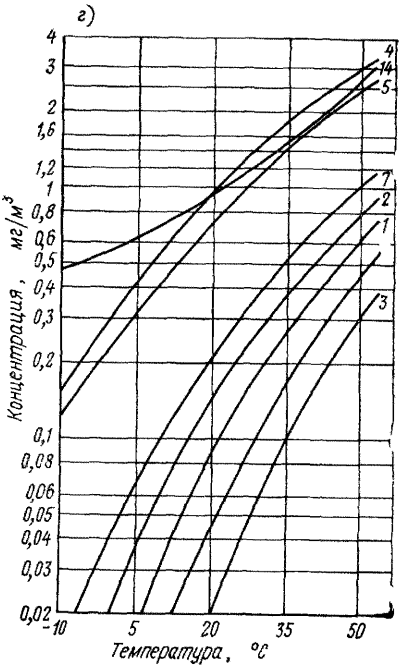
Рис IV 3 Эксплуатационные свойства замасливателей

а — вязкостно-температурная характеристика; *б* — изменение плотности, *в* — изменение поверхностного натяжения, *г* — испаряемость (среднее содержание замасливателей *в* очищенном воздухе в зависимости от температуры), *1* — масла для вентиляционных фильтров (висцинового), *2* — масла индустриального 12, *3* — то же, 20, *4* — масла трансформаторного, *5* — масла МК-8; *6* — масла АМГ-10, *7* — масла парфюмерного, *8* — нефтяного замасливателя фирмы «Кордия», *9* — полиметилсилоксановой жидкости ПМС-70; *10* — то же, ПМС-100, *11* — то же, ПМС 200, *12* — водноглицеринового раствора 70%-ного, *13* — то же, 50%-ного, *14* — масла приборного МВП, *15* — глицерина (99,19 %), *16* — воды









имеющего плотность 0,92 г/см³, плотность замасливателей в области отрицательных температур должна быть не более 0,91 г/см³. Из графика на рис. IV.3,*б* видно, что масла висциновое, индустриальное, парфюмерное и АМГ-10 удовлетворяют этому требованию, в то же время трансформаторное масло и масло фирмы «Конкордия», начиная с —5°С, а также масло МК-8, начиная с —30°С, имеют такую плотность, что возможно всплытие льда. Плотность полиметилсилоксановых жидкостей при 0°С больше критического значения, в связи с чем фильтры, работающие на этих жидкостях в северных районах, иногда снабжаются специальными электроподогревателями. Водно-глицериновые растворы могут замерзнуть только во всем объеме.

Поверхностное натяжение замасливателей определяет их способность образовывать на поверхностях фильтрующего слоя равномерную пленку и смачивать пылевые частицы для их лучшего удержания. Чем меньше поверхностное натяжение, тем лучше происходит смачивание скоплений пыли, образующих множество капиллярных каналов. Как видно из рис. IV.3, *в*, лучшими показателями в этом отношении обладают полиметилсилоксановые жидкости, сохраняющие максимальную подвижность во всем температурном диапазоне. Нефтяные масла по смачиваемости и капиллярному эффекту несколько уступают им, однако существенно превосходят водно-глицериновые растворы, обладающие наибольшим поверхностным натяжением. Наблюдения показали, что водно-глицериновые растворы образуют слои неравномерной толщины. Иногда наблюдается сбегание слоя с образованием отдельных скоплений глицерина, что свидетельствует о преобладании когезии молекул друг к другу над их адгезией к материалу поверхности. Загрязненные, даже слегка корродированные, металлические поверхности смачиваются удовлетворительно. Об этом свидетельствуют также результаты исследования фактической пылезадерживающей способности фильтров, смоченных оптимальным водно-глицериновым раствором. Испытания проводились на самоочищающемся фильтре типа Кд-43 производства домодедовского завода «Кондиционер». Параллельно в качестве контрольного испытывался такой же фильтр, замасленный висциновым маслом. Таким же образом была проверена жидкость ПМС-70. Исследование показало, что эффективность фильтров во всех трех случаях практически одинакова.

Испаряемость замасливателей определяет их содержание в очищенном воздухе. В первую очередь она должна учитываться в тех случаях, когда очистка воздуха производится в целях создания комфортных условий, а также при наличии специальных технологических требований.

Как видно из рис. IV.3, *г*, содержание в воздухе даже таких замасливателей, как парфюмерное, висциновое и индустриальное масла, может достигать очень больших величин, особенно в лет-

нее время в южных районах, а при определенных условиях и зимой, например при установке калориферов в приточных системах вблизи фильтров. Такие масла, как трансформаторное, МВП (вазелиновое) и др., при температуре более 5°С, по-видимому, применять не следует совсем. Содержание глицерина и жидкостей ПМС не приведено на графике вследствие его очень небольшой величины.

Запах замасливателей является весьма важным свойством, особенно при подаче воздуха в общественные здания.

Органолептическое исследование показало, что полиметилсилоксановые жидкости, а также глицерин и его водные растворы практически не имеют запаха. В то же время все нефтяные масла, за исключением парфюмерного, обладают неприятным запахом. У маловязких масел — МВП, трансформаторного и МК-8— этот запах значительно сильнее и резче по сравнению с маслами средней вязкости — индустриальным 12 и 20 и висциновым. Особенно неприятен запах масла АМГ-10. С понижением температуры запах несколько уменьшается, однако и в этих условиях применять маловязкие масла в системах приточной вентиляции, особенно в общественных зданиях, нежелательно. С понижением влажности запах ощущается сильнее.

Токсичность замасливателей должна полностью исключаться. Исходя из специальных исследований можно считать, что полиметилсилоксановые жидкости, глицерин и его водные растворы нетоксичны.

Действуя на кожные покровы, нефтяные масла могут вызывать различные заболевания [22].

Пожароопасность. Основным показателем пожароопасности является температура вспышки. Наибольшие преимущества и в этом отношении имеют полиметилсилоксановые жидкости с температурой вспышки 290—300°С. У неразбавленного глицерина $t_{всп}=174$°С, и она повышается с введением воды. При содержании в растворе 35% и более воды он считается невоспламеняющимся. Такие распространенные нефтяные замасливатели, как висциновое, парфюмерное и индустриальное масла, характеризуются $t_{всп}$ от 160 до 170°С, а маловязкие масла типа МК-8, МВП и АМГ-10 — $t_{всп}=135$°С и ниже.

Замасливатели можно выбирать из числа перечисленных в табл. IV.3 с учетом условий эксплуатации.

При превышении рекомендованного значения верхней температурной границы возможно чрезмерное снижение вязкости и разжижение замасливателей, что способствует выносу их из фильтра в виде капель, увеличению их испаряемости и усилению запаха. Активизируются процессы окисления жидкостей. При использовании замасливателей за пределами нижних рекомендуемых границ чрезмерно увеличивается вязкость, замасливатель густеет, в результате чего фильтрующие элементы не отмываются от пыли, замедляется осаждение пылевых частиц в ванне.

ТАБЛИЦА IV 3

Натуральные и синтетические замасливатели для масляных фильтров

Замасливатель	Стандарт или техические условия	Температурные границы применения, °С		Температура вспышки, °С
		верхняя	нижняя	
Масло для вентиляционных фильтров (висциновое)	ГОСТ 7611—55	35	—15	—
То же, при введении депрессатора АзНИИ . .	То же	35	—25	165
Масло индустриальное 12	ГОСТ 1707—51	20	—20	165
То же, 20	То же	30	—10	170
Парфюмерное масло .	ГОСТ 4225—54	25	—25*	160
Трансформаторное масло	ГОСТ 982—68	5	—35	147**
Масло МК-8	ГОСТ 6457—66	10	—40	135
Приборное масло МВП	ГОСТ 1805—51	—15***	—50	127**
Водно-глицериновый раствор 80%-ный . .	Инструкция ЦНИИПромзданий	35	—15	—
То же, 70%-ный . . .	То же	35	—35	—
» 60%-ный . . .	»	20	—30	—
Полиметилсилоксановая жидкость ПМС-100 . .	МРТУ ЕУ-230-61	15****	—50	300
То же, ПМС-200 . .	То же	50****	—50	300

* Температура застывания масла стандартом не определена. Нижняя граница применения данного масла установлена по результатам исследований ЦНИИПромзданий

** Температура вспышки в закрытом тигле.

*** Верхняя граница определена по повышенной испаряемости приборного масла

**** При указанных значениях температурной границы испарение практически отсутствует

При дальнейшем охлаждении на фильтрующих элементах образуются сплошные пленки, увеличивающие сопротивление фильтра, возможен срыв и вынос замасливателя. При достижении температуры застывания или замерзания возможно разрушение привода и других элементов фильтра.

Проектирование фильтровальных камер

В системах приточной вентиляции и кондиционирования фильтры III класса устанавливают перед калориферами. При этом принимают меры для предупреждения попадания атмосферных осадков в воздухозаборные отверстия или создают условия для выпадения их из потока в подводящих каналах до фильтров. Фильтры I класса по возможности располагают вблизи мест выпуска воздуха в помещение, предотвращая тем самым загрязнение очищенного воздуха в каналах. Фильтры II класса, если они не являются единственной ступенью очистки, также приближают к местам раздачи воздуха.

Особое внимание следует уделять организации упорядоченного подтекания воздуха к рабочей поверхности фильтров.

Скорость фильтрации в современных фильтрах не превышает 3 м/с, в то время как в подводящих каналах скорость потока воздуха составляет 10—12 м/с и более. Только в редких случаях, например при установке фильтров вблизи воздухозаборов, удается обеспечить плавное расширение потока перед фильтрами. Поток воздуха, втекающего в камеру, не успевает на коротком пути до фильтра расшириться надлежащим образом, в результате чего отдельные участки фильтра подвергаются воздействию больших скоростей. Для выравнивания скоростей потока приходится вводить сопротивления в виде решеток, выполненных из перфорированных листов, уголков, реек, сеток и других элементов.

На рис. IV.4, *а* представлена наиболее часто встречающаяся схема фильтровальной камеры с картиной течения воздуха в ней.

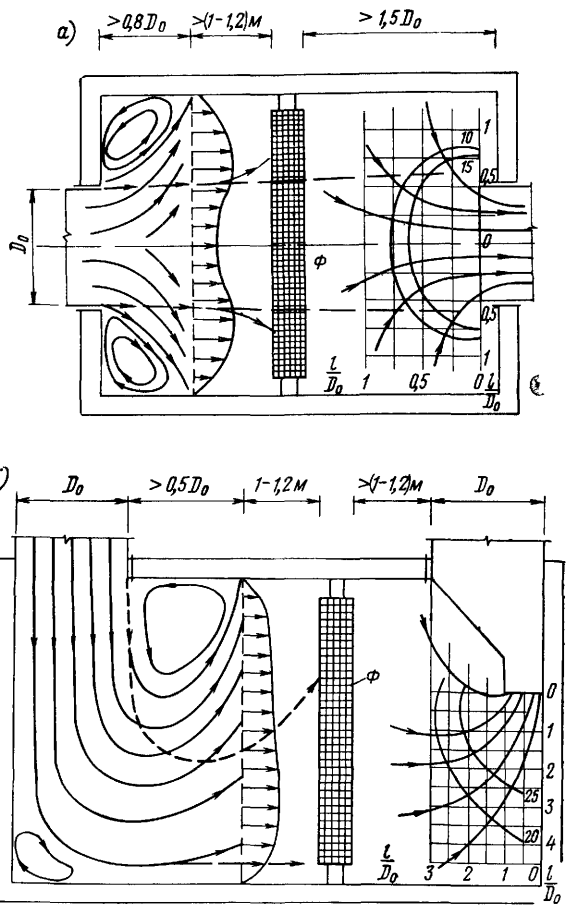


Рис. IV.4. Схемы течения воздуха через фильтровальную камеру
а — при осевом подводе и отводе воздуха; *б* — при боковом подводе и отводе воздуха; *Ф* — фильтр

Пунктирными линиями показаны границы активной струи при отсутствии решетки.

Фильтр, так же как и решетка, представляет собой сопротивление, рассредоточенное по сечению потока. Вследствие этого за фильтром скорости потока выравниваются. В однослойных фильтрах, например волокнистых, это выравнивание начинается с передней поверхности фильтрующего слоя, поэтому такие фильтры малочувствительны к неравномерности скоростей. В многослойных фильтрах выравнивание происходит от слоя к слою. Например, в фильтрах типа Кд, где воздух проходит через четыре сетчатые панели, последнюю из них обтекает поток, распределение скоростей в котором выравнялось под влиянием первых трех сеток, однако первая сетка оказывается полностью под влиянием неравномерных скоростей.

В фильтрах типа ФШ всего два слоя, поэтому первые по течению воздуха шторки благодаря своей большей глубине и большему сопротивлению оказываются в несколько лучшем положении, чем первая сетка фильтров типа Кд. В электрических фильтрах выравнивание скоростей потока происходит перед противоуносным пористым слоем, в то время как в осадительной зоне, сопротивление которой очень мало, распределение скоростей остается неравномерным.

Течения, образующиеся под влиянием установленной в той же камере выпрямляющей решетки, показаны на рис. IV.4, *а* сплошными линиями. Чем больше сопротивление решетки, тем меньше разница между скоростью воздуха на ее отдельных участках.

При набегании на решетку струя растекается по ней в радиальных направлениях. В тонких решетках, обычно применяемых на практике, радиальные составляющие скорости не гасятся, вследствие чего перетекание от центра к периферии сохраняется и за решеткой. В решетке с большим сопротивлением такое перетекание проявляется особенно сильно, причем может возникнуть «перевернутый» профиль скоростей: поток устремляется к стенкам камеры, а в центральной части создаются обратные течения.

Возникающая таким образом вторичная неравномерность скоростей потока также нежелательна. Для удовлетворительного выравнивания скоростей потока с помощью плоских решеток их следует конструировать так, чтобы коэффициент местного сопротивления решеток был равен величине, определяемой по формуле И. Е. Идельчика:

$$\zeta = \left(\frac{F_ф}{F_к}\right)^2 - 1,$$

где $F_ф$ — площадь рабочего (входного) сечения фильтра; $F_к$ — площадь сечения подводящего канала.

При конструировании решеток рекомендуется пользоваться методикой, изложенной в работе [40].

Необходимо учитывать, что при значениях ζ, меньших вычисленной величины, скорости в осевой части потока останутся большими, а при значениях ζ, больших вычисленной величины, может возникнуть перетекание к периферии.

Формула применима для отношения площадей $F_ф/F_к \leqslant 10$. При больших значениях этого отношения следует устанавливать несколько решеток. В этом случае растекание потока по каждой из решеток будет происходить менее интенсивно, а в пространстве между решетками радиальные составляющие скоростей потока будут затухать. В пределах значений отношения $6 \leqslant F_ф/F_к \leqslant 20$ можно принимать для установки две решетки. Требуемый коэффициент сопротивления отдельной решетки системы при одинаковой их конструкции определяется формулой[1]:

$$\zeta = \left(\frac{F_ф}{F_к}\right)^{2/n} - 1,$$

где n — число решеток.

Расстояние между решетками должно быть достаточно велико, чтобы могло произойти выравнивание потока. Практически рекомендуется принимать это расстояние не менее $l = 0{,}1Б$, где $Б$ — наибольший размер решетки.

Степень выравнивания потока в некоторой мере зависит от расположения входного отверстия относительно фильтра. Следует стремиться к центральному вводу потока в камеру.

Расстояние от первой решетки до входного отверстия должно быть не меньше $l = 0{,}8D_0$, где D_0 — диаметр или ширина входного отверстия.

Расстояние между решеткой и фильтром должно быть не менее 1—1,2 м.

Распределение скоростей в пространстве вблизи всасывающего отверстия показано на рисунке в долях средней скорости в сечении всасывающего отверстия D_0.

Скорости в спектре всасывания с удалением от всасывающего отверстия быстро затухают. Тем не менее для всасывающих отверстий, устроенных, как показано на рис. IV.4, *а*, скорости на расстоянии, равном примерно одному диаметру всасывающего отверстия, еще составляют около 10% средней скорости в сечении всасывающего отверстия. Если установить фильтр на таком расстоянии от всасывающего отверстия, то в результате сложения скоростей можно ожидать образования эпюры скоростей с той же выпуклой структурой, во избежание которой устанавливались решетки. В результате взаимодействия струи и подсасыва-

[1] Имеется в виду, что поток в подводящем канале выравнен. При наличии вблизи входного отверстия поворотов, клапанов и других местных сопротивлений необходимо вводить в формулу коэффициент кинетической энергии [40].

ния может возникнуть струйное перетекание через фильтр от входного отверстия к всасывающему, как это показано на рисунке пунктирной линией. Рекомендуется принимать расстояние от фильтра до всасывающего отверстия не меньше $1{,}5—2D_0$.

На рис. IV.4, *б* показана схема другой, также распространенной компоновки камеры с боковым подводом и отводом воздуха. В данном случае поток отжимается к противоположной входу стенке, как это показано на рисунке пунктирной линией. И в этом случае необходимо учитывать, что будет происходить растекание воздуха по решетке, но по направлению к стенке, на которой расположено входное отверстие. При слишком большом сопротивлении решетки у этой стенки возникнет зона повышенных скоростей и эпюра скоростей будет вновь неравномерной. Для экономии площади камеры всасывающее отверстие располагают вплотную к торцевой стенке камеры. При этом спектр всасывания изменяется, так как одно из направлений подтекания воздуха преграждается, а в других направлениях зона всасывания удлиняется.

На рис. IV.4, *б* в целях большей компактности всасывающее отверстие с помощью переходного элемента вытянуто вдоль всей торцевой стенки. При этом скорость может быть уменьшена.

По условиям компоновки не всегда удается выдержать указанные расстояния. В этом случае приходится прибегать к устройству лопаток или объемных, например сотовых, решеток, не только выпрямляющих, но и направляющих поток. В некоторых случаях удобно использовать короткие диффузоры с встроенными в них направляющими перегородками.

В кондиционерах равномерность подтекания воздуха, как правило, должна обеспечиваться соответствующим исполнением присоединительных элементов и оборудования, устанавливаемого перед фильтрами. В кондиционерах типа Кд неравномерность потока часто вызывается влиянием клапанов, располагаемых на небольшом расстоянии (600—1200 мм) от фильтра. Чтобы клапан с достаточной чувствительностью регулировал своим сопротивлением объем проходящего через него воздуха, воздушную нагрузку на него принимают обычно около 30 тыс. $м^3/ч \cdot м^2$, т е. в 3 раза больше, чем на фильтры. Соответственно средняя скорость струи воздуха, выходящего через клапан, доходит до 10 м/с, т. е. более чем в 3 раза превышает максимальную скорость, допускаемую в масляных фильтрах из условия предотвращения выноса масла. Применяя клапан большего размера или равномерно размещая в камере несколько клапанов малого размера вместо одного большого, можно добиться образования более или менее равномерного потока в переходной камере.

Наибольшей чувствительностью к условиям подтекания воздуха отличаются масляные самоочищающиеся фильтры типа Кд. Сетчатые панели этих фильтров легко прогибаются при повы-

шенном давлении воздушного потока, в результате чего их кромки выходят из направляющих. Прогибы панелей возможны при завышении скорости подтекания воздуха по всему сечению и даже в его отдельных участках. Последнее встречается при сосредоточенной подаче воздуха к фильтру и является особенно нежелательным, так как осевые скорости струи могут во много раз превышать допускаемые величины. При выходе кромок панелей из направляющих открывается часть рабочего сечения фильтра, где воздух минует фильтрующий слой. Выше и ниже места выхода кромок трение чрезвычайно усиливается, и сетка, задевая за острые края направляющих, разрушается. Приводы вследствие перегрузок часто выходят из строя.

Для ограничения прогиба фильтрующих сеток в фильтрах типа Кд устанавливают жесткие решетки, однако при больших давлениях трение сеток об эти решетки настолько велико, что трение ведущего вала фильтра о те же сетки недостаточно для их движения. Панель остается неподвижной, не промывается от накапливающейся пыли и ее сопротивление возрастает. При этом двигатели привода, как правило, выходят из строя раньше, чем остановка панелей может быть замечена обслуживающим персоналом.

Вследствие неравномерного распределения скоростей возможен также вынос масла из фильтра. Наиболее крупные капли масла падают на дно камеры вблизи фильтра, но мелкие уносятся далеко в систему, загрязняя по пути каналы, теплообменник и другое ее оборудование. Масло, попавшее на горячие калориферы, испаряется, а частично возгоняется, сообщая воздуху неприятный запах.

Особенно важно не допустить образования зоны повышенных скоростей в нижней части сечения фильтра. Находящиеся здесь элементы фильтрующих панелей только что вышли из масляной ванны, и на их поверхности еще имеется избыточное масло, не успевшее стечь. Толстые масляные пленки легко срываются воздухом, образуя большое количество капель масла.

Масляные ячейковые фильтры менее чувствительны к неравномерности скоростей потока воздуха, хотя при установке свежепромасленных фильтров также может наблюдаться унос масла В целом же в установках с ячейковыми фильтрами всех видов, с сухими рулонными фильтрами и т. д. неравномерность скоростей вызывает только некоторое увеличение сопротивления в связи с растеканием воздуха по фильтрующей поверхности.

Нельзя допускать неравномерного распределения скоростей в электрических фильтрах, так как здесь в зонах с повышенными скоростями частицы либо не успевают зарядиться и осесть на осадительных электродах, либо срываются с них воздухом.

При использовании в вентиляционных камерах и кондиционерах частичной рециркуляции воздуха смешение наружного воздуха с теплым и влажным рециркуляционным обычно происхо-

дит непосредственно перед фильтрами. На границе смешивающихся потоков водяные пары, содержащиеся в рециркуляционном воздухе, конденсируются, осаждаясь в виде водяных пленок или изморози на фильтрующих поверхностях. В масляных самоочищающихся фильтрах эта влага в дальнейшем стекает в ванну. Образование водяного слоя на дне ванны не вредит работе фильтра, если только нет опасности переполнения ванны, в результате чего будет выливаться масло, или нет вероятности всплытия льда при замерзании воды. Для удаления воды ванны фильтров обычно снабжаются сифонными трубками. В полах помещений следует предусматривать соответствующие стоки.

При большом количестве водяных паров в рециркуляционном воздухе в сильные морозы на фильтрующих панелях иногда образуются наледи; сопротивление фильтров при этом может очень сильно возрастать. Ввиду резкого увеличения скоростей на участках, оставшихся свободными от наледей, усиливается унос масла. Подобного же рода нарушения работы фильтра возникают при попадании в него снега.

В целях предотвращения нарушений, связанных с обледенением фильтрующих панелей и заносом их снегом, а также с застыванием масла на панелях масляных фильтров, в некоторых конструкциях фильтров имеются подогреватели.

Подогретое масло растапливает наледи и снег на панелях в процессе их промывки в ванне; кроме того, такое масло легче стекает с панелей. После выхода панели из ванны находящееся на ней масло быстро охлаждается, вследствие чего на состоянии масляных пленок такой подогрев не сказывается.

При устройстве подогрева следует предупреждать опасность возникновения пожара, имея в виду низкую температуру вспышки масел. Кроме того, температура подогрева масла должна быть достаточно низка, чтобы оно не испарялось.

При подогреве масла должна быть надежная гарантия, что верхний предел температуры масла в ванне ни при каких условиях не превысит 30°С. Нагревательные элементы не должны располагаться в ванне, так как это затруднит удаление шлама. Более предпочтительным является наружный обогрев масла.

Для подогрева замасливателей, заливаемых в фильтры типа ФШ, разработаны электрические подогреватели Ус48 (рис. IV.5). Замасливатель непрерывно откачивается из фильтра насосом, входящим в комплект фильтра, и через подогреватель подается обратно в фильтр в пространство над пористым фильтрующим слоем, уложенным в ванне фильтра.

Заданная температура подогрева поддерживается при помощи термометров сопротивления НСП и ТСМ.

Наиболее радикальным средством для защиты от слишком низких температур, заноса снегом, обледенения и пр. является подогрев воздуха перед фильтром, однако при такой установке

калориферов их ребристая поверхность может быстро забиться пылью, в результате чего уменьшится теплоотдача и нарушится установленный тепловой режим помещений. Полностью очистить калориферы от осевшей пыли трудно. Ввиду указанного основные калориферы должны устанавливаться после фильтров, а предварительный (в случае необходимости) обогрев должен производиться упрощенными, легко очищающимися устройствами.

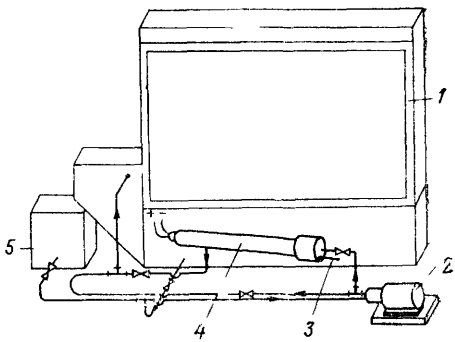


Рис IV 5 Установка фильтра ФШ с подогревателем

1 — фильтр; *2* — шестеренный насос, *3* — термометр сопротивления, *4* — подогреватель; *5* — шламоприемник

В подавляющем большинстве случаев кратковременная работа системы в неблагоприятных погодных условиях без фильтров не может вызвать каких-либо серьезных последствий. В связи с этим при необходимости следует предусматривать обводные каналы, позволяющие воздушному потоку миновать фильтры.

Электрические фильтры должны обеспечиваться водой для промывки, желательно подогретой. На время промывки и сушки фильтров с них должно сниматься напряжение, чтобы избежать пробоев и утечек тока, причем на время промывки должен отключаться и вентилятор. В летнее время сушка фильтров при включенных вентиляторах происходит быстро (менее 30 мин). В зимнее время для сушки фильтров следует отключать их с помощью клапанов, а при возможности подогревать воздух, например путем устройства внутренней рециркуляции.

В заключение следует подчеркнуть, что так называемые номинальные пропускные способности фильтров являются предельными и могут применяться в проектах только при обеспечении полного соблюдения всех требований к установке и эксплуатации фильтров и, в первую очередь, при небольшом начальном пылесодержании. Запас в пропускной способности устанавливаемых фильтров должен приниматься с учетом ответственности сооружения и реальных условий работы установки. В ответственных фильтровальных установках он может доходить до 40%.

При проектировании системы воздухоснабжения необходимо учитывать влияние воздушных фильтров на ее производительность. В ячейковых фильтрах, как в масляных, так и в сухих, сопротивление фильтрующего слоя в период, предшествующий его регенерации или смене, превышает начальное сопротивление в

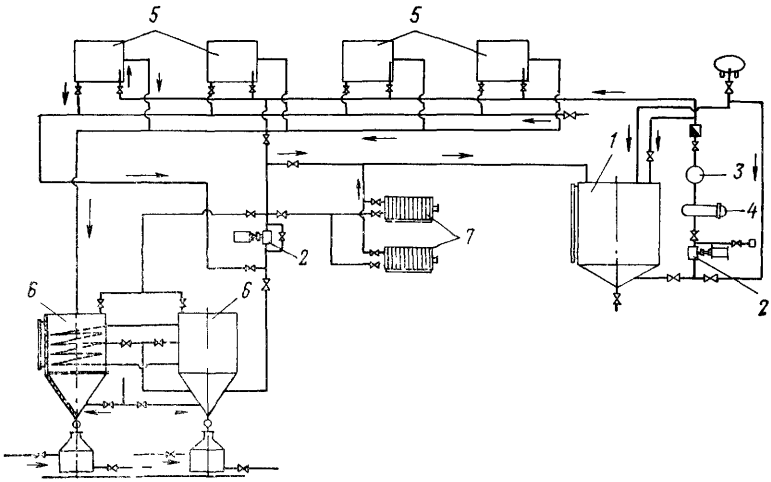


Рис. IV.6. Схема централизованного маслоснабжения

результате накопления пыли в 2—3 раза и более. Особенно больших значений достигает конечное сопротивление в фильтрах I класса, материал которых ввиду его ценности целесообразно использовать как можно дольше. Под влиянием растущего сопротивления фильтра производительность системы уменьшается. Границы колебания производительности зависят от вида характеристики побудителя тяги. В вентиляторных системах это влияние тем больше, чем положе характеристика вентилятора. Сокращение подачи воздуха в приточных системах и кондиционерах нарушает температурный и влажностный режим помещений.

Сопротивление масляных самоочищающихся фильтров практически не изменяется, а в рулонных фильтрах приращение сопротивления автоматически регулируется так, что не вызывает слишком сильных изменений производительности.

Проектами должно предусматриваться создание необходимых условий для облегчения труда эксплуатационного персонала.

Для облегчения эксплуатации масляных самоочищающихся фильтров большой производительности, особенно в условиях повышенной запыленности, применяют системы централизованного маслоснабжения, регенерации масел и удаления шлама. Принципиальная схема такой системы, разработанной при участии Всесоюзного объединения «Регомас», приведена на рис. IV.6.

Система функционирует следующим образом. Замасливатель, поступающий на объект, сливается в бак *1*, откуда с помощью шестеренного насоса *2* подается в ванны фильтров. В схеме

предусмотрен счетчик *3*, который позволяет контролировать заполнение ванн. Для защиты счетчика от загрязнений установлен специальный фильтр *4*. При переполнении ванн *5* замасливатель по дренажному трубопроводу может стекать в отстойники *6*. Залитый в ванны замасливатель используется до 7%-ного насыщения механическими примесями, после чего подлежит регенерации и направляется на очистку в отстойники. После предварительного отстаивания замасливатель, пройдя через фильтр-пресс *7*, перекачивается обратно в емкость. При длительном отстаивании с подогревом необходимость в фильтрации может отпасть Для этого случая в схеме предусмотрена возможность перекачки замасливателя из отстойника непосредственно в емкость для свежего замасливателя.

В результате отстаивания индустриального, трансформаторного и других аналогичных масел при температуре 70—80°С в течение 20 ч из них осаждается до 90% примесей. В фильтр-прессе при предварительном отстаивании накапливается значительно меньше шлама, и его перезарядку можно производить значительно реже.

Загрязненный замасливатель отстаивается в отстойнике, конусная часть которого заполняется водой. Там же размещается устройство для пневматического перемешивания, что позволяет использовать отстойник для приготовления промывочного раствора и для введения в замасливатели добавок.

Для обеспечения нормальной эксплуатации системы необходимо предусматривать не менее двух отстойников.

Фильтрация отстоенного замасливателя осуществляется в рамочных фильтр-прессах. Производительность фильтр-пресса зависит от вязкости жидкости, поэтому замасливатель желательно подогревать до температуры 70—80°С. В качестве фильтрующего материала в фильтр-прессах применяют хлопчатобумажные ткани и фильтровальную техническую бумагу Принимая во внимание необходимость перезарядки фильтрующего материала, следует предусматривать установку двух параллельно работающих фильтр-прессов.

Для перекачки замасливателя по трубопроводам при его вязкости в пределах от 70 до 1850 сСт пользуются шестеренными насосами типа Р3, а при вязкости не более 28—35 сСт — центробежными насосами. Слив замасливателя из фильтров ФШ производится с помощью насосов, входящих в комплект поставки фильтров

Схема применима и для фильтров, работающих на полиорганосилоксановых жидкостях и водно-глицериновых растворах Отстаивание водно-глицериновых растворов производится без использования водяной подушки, а при фильтрации нельзя применять бумагу.

2. ОЧИСТКА ЗАПЫЛЕННЫХ ВОЗДУШНЫХ ВЫБРОСОВ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ

Задачи очистки запыленных воздушных выбросов

Пыль, содержащаяся в воздушных выбросах, в зависимости от ее дисперсности либо оседает на поверхность земли вблизи места выброса, либо разносится воздушными потоками, образуя долгоживущее зарязнение атмосферы земли. И в том, и в другом случае выбрасываемая пыль причиняет ущерб, для ограничения которого необходимо стремиться к возможно более полному ее улавливанию.

Современная техника позволяет в большинстве случаев достигать практически полного улавливания пыли из выбросов, однако очистные установки иногда оказываются чрезмерно сложными по устройству и эксплуатации. Ввиду этого требования к чистоте выбросов устанавливаются исходя из реальных возможностей техники и экономики и видоизменяются с развитием соответствующих возможностей.

В большинстве стран допустимая концентрация пыли в воздушных выбросах вентиляционных систем ограничена величиной в 150 мг/м^3, которую следует рассматривать как результат некоторого компромисса между требованиями здравоохранения и возможностями техники. В СССР введено в практику нормирование допустимого содержания пыли в вентиляционных выбросах с учетом ее токсичности.

Остаточное содержание пыли в очищенных вентиляционных выбросах определяется по формуле $C=100K$, где C — предельно допустимая концентрация пыли в выбросе; K — коэффициент, определяемый в зависимости от предельно допустимой концентрации (ПДК) той же пыли в воздухе рабочей зоны производственных помещений

ПДК, мг/м^3	K
До 2	0,3
Более 2 до 4	0,6
» 4 » 6	0,8
» 6 » 10	1

При объеме вентиляционных выбросов менее 15 тыс. м^3/ч ПДК пыли в выбросе, по мнению автора, целесообразно определять по формуле $C=(160-4Q)\,K$, где Q — объем выброса, тыс. м^3/ч.

Пыль крупнее 10—20 мкм следует улавливать с полнотой не менее 95% ее массы независимо от ее ПДК. В приземном слое воздуха концентрация пыли не должна превышать ПДК пыли в атмосферном воздухе, установленной санитарными нормами.

Выбор и расчет пылеуловителей

Принятое в проекте оборудование должно соответствовать условиям очистки, т. е. физическим и химическим свойствам улавливаемой пыли и очищаемого воздуха, его количеству и особенностям эксплуатации очистного оборудования. Эти условия характеризуются еще большим многообразием, чем условия очистки атмосферного воздуха. В значительно большем диапазоне и в самых различных сочетаниях изменяется дисперсность пыли, являющаяся основным показателем для выбора пылеуловителей требуемой эффективности. Возникает необходимость в учете пластичности пыли, ее слипаемости и влажности.

Некоторые виды пыли способны растворяться в процессе мокрой очистки, а затем образовывать в пылеуловителях кристаллические отложения; другие обладают гидравлическими свойствами и подобно цементу схватываются в увлажненном состоянии, создавая твердые корки. Очищаемый воздух часто содержит пары и возгоны различных веществ, конденсирующихся и выпадающих в процессе очистки, аэрозоли смолистых веществ и агрессивные газовые примеси, разрушающие пылеуловители.

При выборе пылеуловителей обычно стремятся исходить из каталожных показателей эффективности улавливания отдельных фракций пыли. Для получения этих показателей сопоставляют определенные экспериментально дисперсные составы пылей, содержащихся в воздухе, поступающем в пылеуловитель, и в очищенном воздухе. Этот метод не всегда дает вполне достоверные результаты, главным образом вследствие несовершенства методики определения дисперсного состава пыли; последнюю приходится вначале осаждать в том или ином уловителе, а затем вновь диспергировать в воздушной или жидкой среде для исследования содержания в ней отдельных фракций. При этом невозможно установить, в какой мере степень искусственного диспергирования мелких фракций соответствует начальной дисперсности, т. е. той, которую имеет данная пыль при проходе через пылеуловитель.

Развивающаяся техника исследования дисперсности пыли в потоке [121] с течением времени, несомненно, повысит точность этого метода, но пока более надежной основой для правильного выбора оборудования является практика эксплуатации. Используя на проектируемом объекте пылеуловители, применение которых в идентичных условиях уже дало хороший эффект, можно быть уверенным в успехе [3]. Некоторую помощь при выборе оборудования могут оказать данные табл. III.1 и III.2. Исходя из полного улавливания пылеуловителем, классом которого задаются в соответствии с обычно известной классификационной группой пыли по дисперсности (см. рис. I.1), частиц размером, соответствующим размеру эффективно улавливаемых частиц, указанному в табл. III.1, и предполагая, что все частицы мень-

шего размера полностью проскакивают пылеуловитель, можно получить оценку эффективности проектируемых очистных устройств с некоторым запасом.

Если пылеуловитель выбранного таким образом класса не обеспечивает надлежащего остаточного содержания пыли, то следует применить пылеуловитель более высокого класса.

Ответственной задачей является выбор сухого или мокрого способа пылеулавливания. Главное преимущество первого способа — получение уловленной пыли в виде порошка, главный недостаток второго — необходимость обработки шламовых вод.

Задача решается однозначно, если необходимая эффективность может быть достигнута применением простых сухих пылеуловителей — гравитационных или инерционных. В условиях возрастающих требований к чистоте выбросов такие случаи встречаются редко. В то же время выбор между сухими тканевыми пылеуловителями (например, рукавными) или мокрыми типа струйных или циклонных пылеуловителей требует надлежащего обоснования. Как правило, в системах вентиляции предпочтение отдается последним, так как рукавные пылеуловители более сложны по устройству, требуют постоянного квалифицированного ухода, регулярной замены рукавов, занимают много места, причем обязательно в отапливаемых помещениях.

Исходя из современной практики проектирования и эксплуатации при выборе различных видов пылеуловителей, как правило, руководствуются следующими соображениями.

Гравитационные пылеуловители. Пылеосадочные камеры целесообразно применять при больших концентрациях крупнодисперсной пыли, в частности для предварительной очистки воздуха.

Как правило, пылеосадочные камеры сооружаются в процессе строительства здания. Размеры камер устанавливают в каждом отдельном случае путем ориентировочного расчета. Среднюю скорость потока принимают не более 0,6 м/с. Площадь поперечного сечения камер следует развивать главным образом за счет их ширины, причем необходимо принимать меры для заполнения потоком всего сечения камер. Удаление осевшего материала должно быть механизировано. При улавливании пыли горючих материалов удаление должно быть непрерывным, а камеры следует оборудовать автоматическими дождевальными установками.

Инерционные пылеуловители сухого типа. Из пылеуловителей этого типа в системах вентиляции промышленных предприятий чаще всего применяют циклоны, причем главным образом конструкции НИИОГаза. Жалюзийные пылеуловители и различного рода ротационные пылеуловители используют пока лишь в специфических условиях, на транспортных средствах и т. п.

Область применения отдельных типов циклонов НИИОГаза, рассмотренных в главе III, можно уточнить с учетом показате-

лей эффективности и сопротивления следующим образом. В современных условиях с помощью циклонов редко можно полностью удовлетворить требования к допустимому остаточному содержанию пыли в больших выбросах. Поэтому они применяются преимущественно в качестве I ступени очистки. Исключение могут составлять небольшие вентиляционные выбросы (меньше 15 тыс. $м^3/ч$), когда важно уловить наиболее крупные частицы, засоряющие территорию предприятий и нередко служащие причиной глазных травм. В таких случаях целесообразно применять циклоны ЦН-15, показавшие себя в длительной эксплуатации как надежные аппараты. При наличии ограничений по высоте могут применяться циклоны ЦН-15у и при особых ограничениях расхода энергии или при очень крупной пыли — циклоны ЦН-24.

Эффективность циклонов ЦН-11 выше, чем циклонов ЦН-15, на 1—2%, однако они менее надежны в отношении налипания средне- и слабослипающихся пылей, которые наиболее часто встречаются на практике[1]. Циклоны ЦН-11 более других циклонов НИИОГаза подвержены абразивному износу [115].

В тех немногих случаях, когда, пользуясь высокоэффективными циклонами, можно обеспечить необходимую очистку воздуха при энергозатратах, равных и даже несколько бо́льших, чем, например, в мокрых пылеуловителях, следует применять циклоны СДК-ЦН-33, а при очень жестких ограничениях по высоте циклоны СК-ЦН-34. Реже применяют циклоны УЦ и СИОТ.

Исследования показывают, что выигрыш в эффективности при применении групповых циклонов небольшого диаметра вместо больших одиночных циклонов значительно меньше, чем предполагалось ранее. Этот вывод распространяется также на батарейные циклоны, более высокая эффективность которых проявляется только при хорошо организованной эксплуатации, исключающей возникновение условий для нарушения аэродинамической стабильности работы аппаратов. В отдельных случаях компактность батарейных циклонов и устойчивость их чугунных элементов против износа оправдывает их применение и в системах вентиляции.

Инерционные пылеуловители мокрого типа. Основной задачей проектирования в данном случае является выбор наиболее простой и дешевой схемы мокрой очистки. Определяющим здесь является расход воды и трудность удаления шлама.

До последнего времени в системах вентиляции применялись в основном пылеуловители группы, характеризующейся внешней циркуляцией воды: центробежные скрубберы ПСП-ВТИ, ЦВП, циклоны-промыватели СИОТ. Недостаточная в отдельных случаях эффективность этих пылеуловителей обусловила в пос-

[1] Все пыли с содержанием частиц мельче 10 мкм до 60—70% ведут себя как липкие

ледние годы применение более энергоемких пылеуловителей типа Вентури.

Растут масштабы применения пылеуловителей с внутренней циркуляцией воды: ротоклонов, ПВМ. При очистке небольших объемов воздуха особенно удобны в эксплуатации пылеуловители этого типа со скребковыми механизмами. Они сохраняют свои преимущества также и в больших системах с оборотным водоснабжением.

Пенные пылеуловители не нашли широкого применения в системах вентиляции. Областью применения этих эффективных пылеуловителей остаются технологическая очистка и кондиционирование отходящих газов, преимущественно в непрерывно работающих газоочистных устройствах.

Тканевые пылеуловители, по видимому, с течением времени получат более широкое применение в соответствии с их высокой эффективностью и возможностью избежать мокрых процессов. В отличие от многих рассмотренных выше пылеуловителей рукавные пылеуловители могут изготовляться только заводским путем.

Электрические пылеуловители следует рассматривать как пылеуловители близкого будущего. Они обладают всеми преимуществами сухих пылеуловителей, но значительно эффективнее циклонов, не требуют частой замены рабочих органов, как рукавные пылеуловители, и т. п.

Конструирование пылеулавливающих установок

Вентиляционные пылеуловители, как правило, являются непродуктивным оборудованием, обременяющим основное производство. Вследствие этого при проектировании необходимо особенно тщательно продумывать удобство эксплуатации и ремонта этих аппаратов, учитывая их специфические особенности. Большое внимание должно уделяться подводящим и отводящим участкам воздуховодов, сбору и транспортированию уловленной пыли или шлама и тепловлажностному режиму работы пылеуловителей.

Подвод и отвод воздуха. Обычно пылеуловители можно устанавливать как на всасывание, так и на нагнетание, если этому не препятствует повышенный износ вентиляторов. Следует, однако, учитывать, что при установке пылеуловителя после вентилятора повышается опасность загорания и взрыва горючих и взрывоопасных пылей.

Диаметр подводящих каналов должен подбираться таким образом, чтобы предупредить выпадение в них пыли.

В непосредственной близости от циклонов рекомендуется избегать поворотов и других местных сопротивлений на подводящих участках воздуховодов, так как возникающие деформации потока распространяются на начальный участок течения в этих аппаратах и могут существенно снизить эффективность сепара-

ции. Допустимы повороты в плоскости, перпендикулярной оси циклонов, в направлении вращения воздуха в циклоне. С отрицательным влиянием деформации потока на входном участке следует считаться также при использовании скрубберов и циклонов — батарейных и групповых. В последнем случае может ухудшаться распределение воздуха по циклонным элементам.

Отвод очищенного воздуха от циклонов часто производится через улиточные раскручиватели с целью совмещения поворота потока с использованием энергии вращательного движения воздуха и некоторого снижения тем самым потерь напора. Последние исследования И. Е. Идельчика показывают, однако, что улиточный отвод может быть оправдан главным образом компоновочными соображениями. Отвод очищенного воздуха через колено с плавным закруглением не сопровождается существенными потерями напора.

Выходные отверстия воздуховодов, отводящих очищенный воздух в атмосферу, обычно снабжаются колпаками для защиты от попадания в них атмосферных осадков. Такое оформление отверстий создает дополнительное сопротивление, а сами колпаки быстро изнашиваются. Целесообразность установки защитных колпаков следует рассматривать в каждом отдельном случае, по возможности заменяя их дренажем воздуховодов.

В крышках присоединительных коллекторов и улиток следует предусматривать люки для их осмотра и очистки. Устраивать дополнительные люки в корпусах пылеуловителей, кроме предусмотренных в конструкции, не следует. Герметичность пылеуловителей и их сопряжений с подводящими и отводящими каналами, а также герметичность разгрузочных отверстий является необходимым условием эффективного пылеулавливания.

Устанавливать регулирующие дроссель-клапаны на подводящих и отводящих участках воздуховодов не следует. В групповых параллельных установках нескольких пылеуловителей, предназначаемых для очистки периодически изменяющихся объемов воздуха, применяют запорную арматуру, при помощи которой можно отключать часть аппаратов и этим поддерживать на оптимальном уровне воздушную нагрузку на каждый пылеуловитель. Такая регулировка особенно необходима в инерционных пылеуловителях, где снижение скорости воздуха влияет на эффективность.

Сбор и транспортирование пыли и шлама. Количество улавливаемой пыли часто бывает настолько велико, что организация ее транспортирования вызывает серьезные организационные трудности. От того, насколько проработаны в проекте данные вопросы, зависит работоспособность пылеулавливающей установки в целом.

Необходимо учитывать, что бункера пылеуловителей предназначены не для сбора пыли, а только для ее осаждения. Осажденная пыль должна быть как можно скорее удалена из

бункеров. Горючие и взрывоопасные пыли следует удалять непрерывно. Накопление пыли в бункерах циклонных пылеуловителей приводит, как это было показано в п. 3 главы III, к взмучиванию отложившейся пыли донным течением, а затем к полному прекращению ее улавливания. Циклонные элементы забиваются пылью, которая, налипнув, часто продолжает держаться в них при опорожнении бункера. Аналогичные явления наблюдаются и в пылеуловителях других видов. Для накопления пыли под аппаратами устанавливают сборные бункера, емкость которых выбирают в соответствии с принятым режимом очистки, количеством отлагающейся пыли, ее насыпной массой и т. п. Угол наклона стенок бункера обычно составляет 55—60°. Нельзя допускать объединения общим бункером нескольких циклонов с индивидуальными вентиляторами.

Чтобы пылевыгрузочные устройства обеспечивали нормальную работу циклонов, они должны быть герметичными, в противном случае, когда бункер находится под давлением, возможен выброс пыли, а когда он находится под разрежением — подсос воздуха, что резко снижает эффективность очистки. На пылевыпускных отверстиях пылеуловителей устанавливать затворы не следует. Их устанавливают только на пылевыпускных патрубках бункеров. Весьма распространены барабанные затворы в виде лопастного колеса, вращающегося в литом корпусе, который крепится к фланцу пылевыпускного патрубка бункера пылеуловителя. Привод механический.

Большое применение получили конусные мигалки типа ВТИ, периодически открывающиеся под давлением слоя пыли. При разрежении более 100 кгс/см^2 устанавливают последовательно два затвора. Дополнительное уплотнение в данном случае достигается благодаря тому, что при открытии одного из клапанов под давлением слоя пыли второй всегда закрыт и препятствует, таким образом, проходу воздуха.

Особые сложности возникают при проектировании систем водоснабжения и канализации мокрых пылеуловителей. Количество твердых взвесей в сточных водах мокрых пылеуловителей, как правило, настолько велико, что спуск их в канализацию без отстаивания невозможен. В целях экономии воды сточные воды после очистки должны возвращаться обратно в пылеуловитель.

В пылеуловителях с форсуночным распылением воды требования к ее очистке особенно высоки из-за возможности засорения и износа форсунок.

В некоторых случаях ограничиваются установкой отстойника непосредственно под пылеуловителем. Осветленная вода через перелив спускается в канализацию, а шлам, скапливающийся в отстойнике, периодически выгребается вручную. Эта операция, а также транспортирование полужидкого шлама представляет собой трудоемкую и грязную работу.

Весьма ответственным является устройство для спуска шла-

ма из пылеуловителей. Здесь должно быть предусмотрено беспрепятственное удаление шлама и в то же время обеспечена полная герметичность в отношении подсоса воздуха. Гидравлические затворы в виде канализационных сифонов, как правило, оказываются неприемлемыми, так как они часто забиваются

При использовании пылеуловителей с подачей воды в зону контакта извне (см. п. 8 главы III) централизованная обработка сточных вод с обезвоживанием и транспортированием шлама за пределы предприятия должна рассматриваться как обязательный элемент проекта.

Значительно удобнее в этом отношении пылеуловители с внутренней циркуляцией воды, оборудованные скребковым механизмом для удаления шлама. В этом случае нет необходимости в системе оборотного водоснабжения, отсутствуют форсунки, сопла и насосы, требующие постоянного наблюдения

Шлам, сбрасываемый в шламовую коробку, удобно вывозить из цеха с помощью автопогрузчика или по узкоколейным путям.

При затрудненности доступа к пылеуловителям, их большом количестве, а также при наличии на предприятии центральных станций очистки вод эти пылеуловители могут использоваться и со сливом шлама.

Схема водоснабжения и очистки воды нескольких пылеуловителей типа ПВМ общей производительностью 200 тыс м³/ч, осуществленная на ЗИЛ, представлена на рис. IV.7. Подпитка пылеуловителей *1* для компенсации потерь воды на испарение

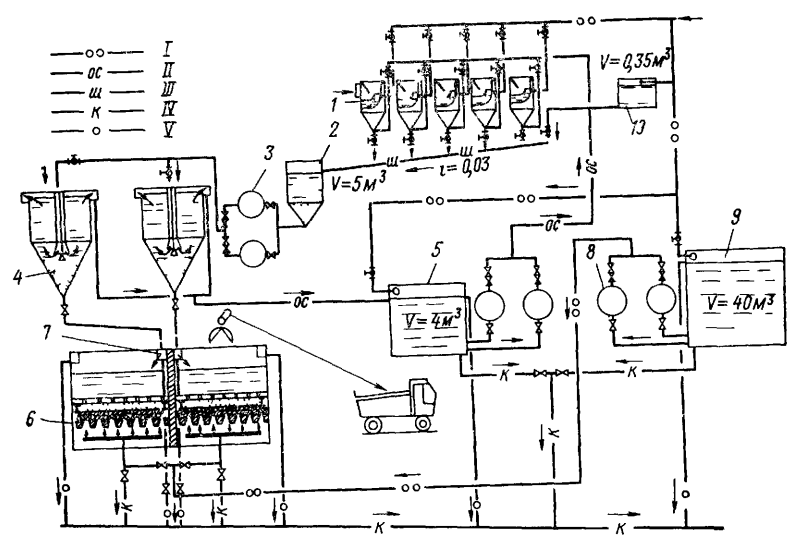


Рис IV 7 Схема водоснабжения пылеуловителей ПВМ при непрерывном удалении шлама

трубопроводы: *I* — производственного водоснабжения, *II* — осветленной воды, *III* — шлама, самотечный, *IV* — канализационный, *V* — переливной

осуществляется по трубопроводу производственного водоснабжения По самотечному шламопроводу шлам поступает в промежуточный водошламоприемный бак *2*, установка которого обусловлена большим расстоянием между группой пылеуловителей и отстойниками. Из бака *2* шлам перекачивается насосами *3* в один из вертикальных отстойников *4* Очищенная вода сливается в бак осветленной воды *5*, откуда насосом перекачивается в пылеуловитель *1*. Влажный осадок сливается в один из шламоуплотнителей *6* по дырчатым желобам *7*, расположенным вдоль их продольных стенок.

Заполнение, обезвоживание и выгрузку шлама из двух шламоуплотнителей (рабочего и резервного)производят поочередно. В шламоуплотнителях шлам фильтруется через зернистый слой, насыпанный на железобетонные балки, расположенные с небольшими зазорами Слив отфильтрованной воды из шламоуплотнителей в водосток производится через дренажную распределительную систему трубопроводов. Шлам выгружается грейфером на железнодорожные платформы, полувагоны или в грузовые автомобили Для предупреждения разрушения грейфером фильтрующих слоев над ними располагается секционная ячейковая металлическая решетка

Регенерация фильтрующих слоев шламоуплотнителя достигается обратной промывкой технической водой, подаваемой насосами *8* из бака промывной воды *9*.

Смыв отложений шлама, образование которых возможно в самотечном шламопроводе, производится периодическим спуском воды из смывного бака *10*.

Тепловлажностный режим работы пылеуловителей должен учитываться в тех случаях, когда есть основания ожидать, что в процессе очистки воздуха может произойти его охлаждение и повышение относительной влажности Охлаждение воздуха до точки росы нежелательно в пылеуловителях всех видов, так как на увлажненных конденсирующимися парами поверхностях пылеуловителей пыль образует коркообразные отложения, уменьшающие сечение проточной части аппаратов и нарушающие аэродинамический режим течений В результате у мокрых пылеуловителей снижается эффективность и растет брызгоунос, а у сухих пылеуловителей затрудняется удаление уловленной пыли

Совершенно недопустимо охлаждение воздуха до точки росы в батарейных циклонах и рукавных пылеуловителях. В первых пылевые отложения нарушают распределение воздуха по циклонным элементам, что приводит к возникновению обратных токов, снижающих до нуля эффективность аппаратов, во вторых резко снижается воздухопроницаемость ткани рукавов, и фильтр практически перестает пропускать воздух.

В принципе под открытым небом можно устанавливать все непрерывно работающие пылеуловители, как сухие, так и мок-

рые, разумеется, при условии защиты от атмосферных осадков их наиболее чувствительных элементов: двигателей, встряхивающих и управляющих механизмов и приборов, а также защиты от замерзания водных коммуникаций. Теплоты воздуха обычно достаточно для предохранения воды от замерзания в мокрых пылеуловителях. Дополнительно надо обогревать воду, находящуюся в бункерах пылеуловителей в нерабочее время.

В заключение следует указать на необходимость предусматривать в проектах автоматизированный контроль таких основных параметров пылеулавливающих установок, как расход или скорость воздуха, его температура, сопротивление пылеуловителей, уровень воды и ее расход. Необходимо также решать в проектах вопросы обслуживания пылеуловителей, устанавливая порядок обслуживания и ремонта.

3. ОБЕСПЫЛИВАНИЕ СПЕЦОДЕЖДЫ

Общие сведения

Существуют производства, в которых невозможно избежать сильного загрязнения одежды работающих пылью или влажной грязью. В других, очень чистых, производствах недопустимо даже небольшое загрязнение одежды [100]. Нередко можно обойтись без каждодневной стирки спецодежды при условии, что она будет хорошо очищена от пыли и грязи в сухом состоянии. Известно большое число разнообразных механических устройств для обеспыливания спецодежды и других предметов из мягких тканей (ковров, мешков и пр.). Очистка в них достигается с помощью механизированных щеточных устройств, бил, струй сжатого воздуха и т. п. Рабочие органы таких устройств оказывают только локальное воздействие на отдельные участки поверхности, вследствие чего возникает необходимость менять положение обеспыливаемой одежды. Это приводит к созданию агрегатов, сложных по устройству и эксплуатации, повреждающих одежду и недостаточно эффективных.

Ниже описаны устройства, в которых очистка достигается средствами, обычными для систем вентиляции. Обеспыливание происходит в результате проявления инерционных эффектов, возбуждаемых в процессе взаимодействия обеспыливаемых тканей с воздушными потоками, обтекающими их с относительно небольшими скоростями. Встряхивание тканей, подобно «полосканию» флагов и парусов в ветреную погоду, распространяется на всю их площадь; оно достаточно энергично, чтобы сорвать с них налипшие частицы загрязнения, и в то же время не причиняет существенных повреждений одежде.

Встряхивание ткани осуществляется при ее колебательных движениях, вызванных бегущими волнами. Рассматривая полотнище ткани как поверхность раздела двух параллельных потоков воздуха с потенциалом скорости вида $\varphi = wy + \overline{\varphi}$, где

φ — потенциал скоростей возмущающего течения, и выражая поверхность полотнища, возмущенную волнами определенной длины, уравнением $x(y, t) = A \cos By \sin (Ry—Tt)$, где A, T и R — соответственно амплитуда, частота и волновое число; B — коэффициент, зависящий от длины полотнища, оказалось возможным определить основные параметры процесса аэродинамического встряхивания [80]. Круговая частота колебаний определяется выражением

$$T = 0{,}3 \frac{\rho w}{m_т \alpha},$$

где $m_т$ — масса единицы площади ткани; α — экспериментальный коэффициент, величина которого для наиболее распространенных видов одежды массой 0,4—1,3 кг равна 0,057—0,024.

Соответственно волновое число равно

$$R \approx 0{,}9 \frac{\rho}{m_т \alpha},$$

а максимальное ускорение полотнища

$$\frac{d^2 x}{dt^2} \approx 0{,}9 A \left(\frac{\zeta w}{m_т \alpha}\right)^2.$$

Аэродинамический обеспыливатель спецодежды

Общий вид четырехсекционного обеспыливателя типа ПА-1 показан на рис. IV.8. Корпус шкафа обеспыливателя разделен вертикальными перегородками на четыре секции. Верхнее открытое сечение шкафа защищено крупноячеистой сеткой. Перегородки снабжены направляющими планками-турбулизаторами. Внизу шкафа установлена съемная сетка. Вверху каждой из секций устроено выдвижное приспособление для навешивания спецодежды, состоящее из гибкой подвески с вешалкой. В нижней части шкафа расположен створчатый клапан, отключающий шкаф от воздуховода [104].

Разработан также двухсекционный обеспыливатель такого же размера, в котором две из четырех секций приспособлены для хранения предметов, не подлежащих обеспыливанию. В этих секциях устроены полки для хранения головных уборов и принадлежностей для умывания, а также имеется крючок для навески вещей.

Обеспыливатель обычно работает под разрежением. Комплекты спецодежды размещаются на вешалках, после чего дверка шкафа закрывается и включается вентилятор или открывается клапан. Для обеспыливания хлопчатобумажных и брезентовых костюмов массой до 2,5 кг скорость движения воздуха в обеспыливателе должна составлять 10—12 м/с. Число встряхиваний одежды при этом достигает 10—12 раз в 1 с. Амплитуда колеба-

ний в данном случае равна ширине секции (примерно 150 мм), соответственно отрывающая сила инерции равна:

$$F = 0{,}086\, m \left(\frac{w}{m_{\text{т}}\, \alpha}\right)^2 \text{ дин.}$$

Сопоставление с силами адгезии частиц показывает, что в данном случае создаются благоприятные условия для отрыва мельчайших загрязнений. Действительно, эксперименты подтвердили отрыв плотно налипших частиц загрязнения размером 5—10 мкм и более. Масса загрязнений, удаляемых с сухой одежды, доходит до 96% начальной. Отмечено, что в условиях интенсивного воздушного полоскания одежды ускоряется ее сушка.

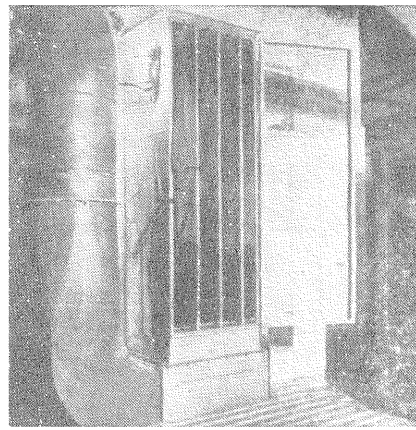


Рис. IV.8. Четырехсекционный обеспыливатель для спецодежды

Аэродинамическое сопротивление обеспыливателя составляет 50—80 кгс/м² в зависимости от массы одежды. Остальные технические показатели двухсекционного обеспыливателя приведены ниже.

Техническая характеристика обеспыливателя ПА-1

Количество одновременно обеспыливаемых комплектов спецодежды	2
Продолжительность процесса обеспыливания при очистке спецодежды от пыли:	
зернистой	20—30
волокнистой и стекловолокнистой	30—60
Максимальная длина обеспыливаемого комплекта спецодежды, мм	1430
Максимальная производительность, компл/ч	60
Расход воздуха, м³/ч	7000
Масса (без спецодежды), кг	262

Разработана модификация аэродинамических обеспыливателей ПА-2, предназначенных для обеспыливания более тяжелой спецодежды (до 6 кг).

Воздух, отсасываемый из обеспыливателей, может содержать значительное количество пыли. Учитывая периодичность процесса пылевыделения, для очистки воздуха, как правило, достаточно циклонов.

Обеспыливатели ПА-1 целесообразно использовать в виде шкафов, совмещая в них хранение и обеспыливание одежды. При этом отдельные шкафы соединяются общими отсасывающими воздуховодами, присоединенными к центральным вытяжным вен-

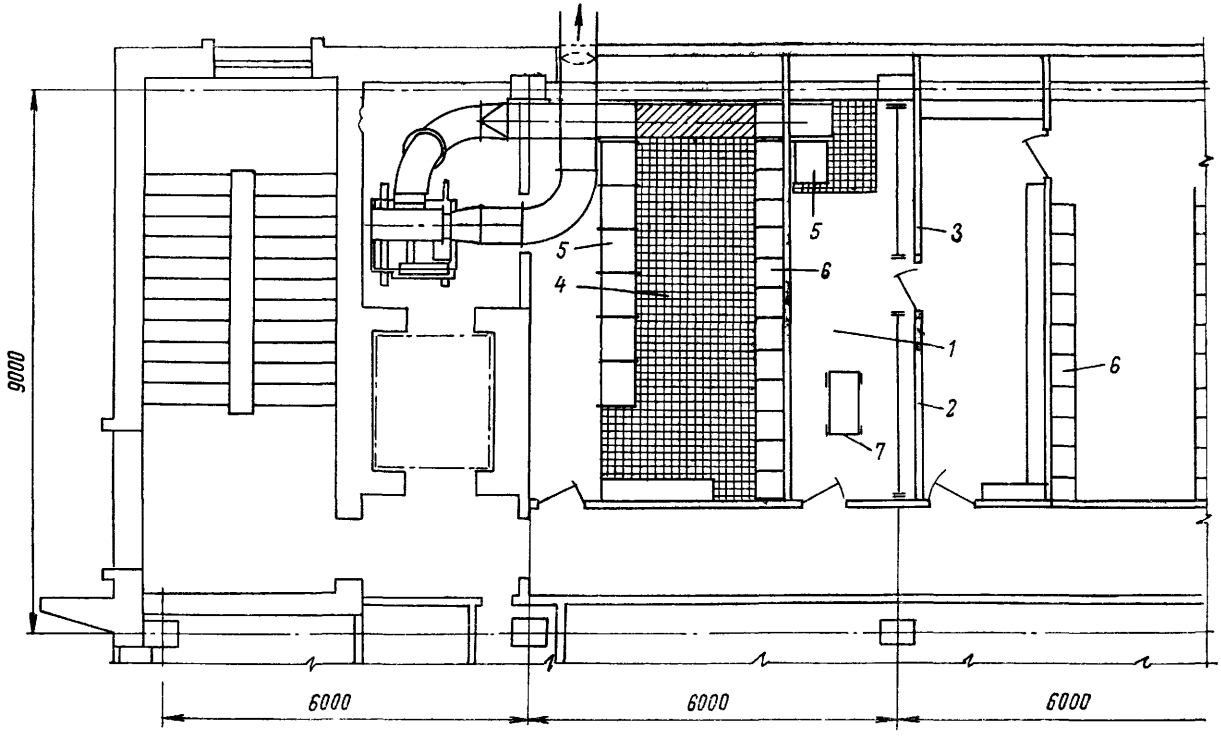


Рис. IV.9. Компоновка гардероба производственного предприятия с использованием обеспыливателей

1 — помещение для обеспыливания одежды специальным персоналом; *2* — проем для приема грязной одежды; *3* — проем для выдачи чистой одежды; *4* — помещение для совмещенного хранения и обеспыливания одежды; *5* — обеспыливатель; *6* — шкаф для хранения домашней одежды; *7* — тележка

тиляторным агрегатам, и включаются поочередно. Пример такой компоновки показан на рис. IV.9 (помещение *4*). На этом же рисунке показан вариант централизованного обслуживания обеспыливателя для рабочих, пользующихся им эпизодически (помещение *1*). Прием грязной одежды, ее обеспыливание и выдача производятся специальным персоналом [80].

Обдувочные камеры

На предприятиях радио- и электронных изделий, приборостроения, производства чистых веществ, фармацевтической, пищевой и ряда других отраслей промышленности некоторые ответственные процессы производятся в так называемых сверхчистых помещениях. К чистоте воздуха в этих помещениях предъявляются очень жесткие требования, так как попадание даже единичных пылинок снижает чувствительность и точность приборов или качество изделий.

Для предотвращения проникания пыли с воздухом, фильтрующимся через неплотности оконных проемов и т. п., сверхчистые производства размещают в безоконных и бесфонарных («герметичных») зданиях или во внутренних помещениях зданий обычного типа, не имеющих естественного освещения.

Важно, кроме того, избежать перетекания воздуха в чистые помещения из смежных, более загрязненных, помещений. С этой целью в чистых помещениях создается небольшой подпор (избыточное давление от 2 до 6 кгс/м^2). Так как при открывании дверей обмен воздушными массами между смежными помещениями может происходить и при наличии подпора, чистые помещения изолируются дополнительно с помощью шлюзов. Одновременно шлюзы препятствуют занесению пыли персоналом производства и с этой целью часто оборудуются обдувочными устройствами.

Каждый рабочий, входя в цех со двора или из какого-либо более пыльного цеха, вносит на одежде, обуви, головном уборе и т. п. некоторое количество пыли. Кроме того, при движении он увлекает за собой запыленный воздух. Пыль образуется непрерывно из спецодежды и кожных покровов тела. Для борьбы с таким загрязнением проводится противопыльная обработка людей, направляющихся в цехи. Обработка включает в себя переодевание в особую спецодежду и обдувку в специальных камерах. В простейших из них в полу устроена решетка, через которую отсасывается воздух, с тем чтобы он «омывал» человека, стоящего на ней. В более сложных камерах, кроме того, подается очищенный и подогретый воздух, который, вытекая из системы сопл или массированным потоком, обдувает человека.

В зависимости от уровня требований к чистоте воздуха могут применяться шлюзы в виде коридоров или камер, располагаемых при входе в отдельные помещения или при входе в «герметич-

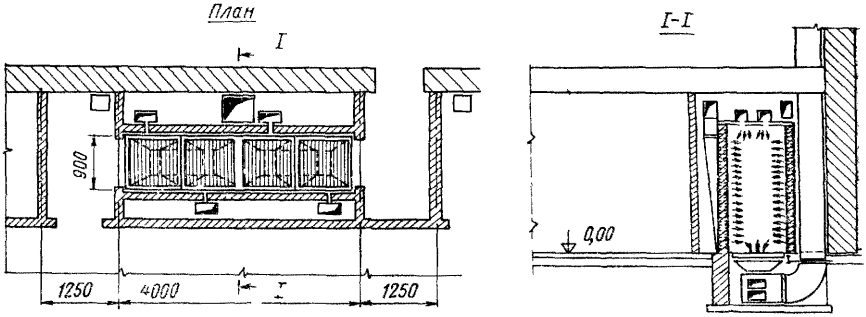


Рис IV 10 Шлюз коридорного типа

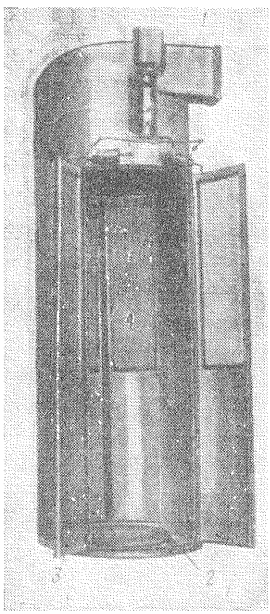
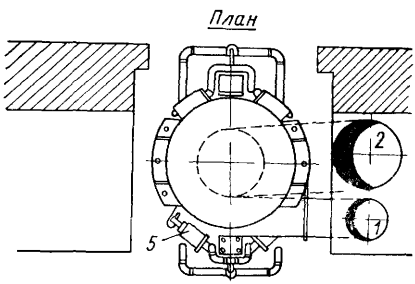


Рис IV 11 Установка цилиндрической обдувочной камеры ОК-2 в дверных проемах

1 — подвод обдувочного воздуха; *2* — удаление обдувочного воздуха; *3* и *4* — соответственно входная и выходная автоматизированные двери; *5* — пневматические устройства для открывания и закрывания дверей



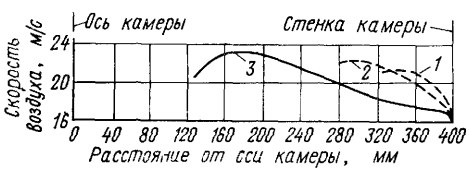


Рис IV 12 Распределение тангенциальных составляющих скоростей в цилиндрической обдувочной камере

1 и *2* — при разных положениях корпуса человека относительно входа *3* — в пустой камере

ную» часть корпуса в комплексе технологического гардероба [100].

При употреблении спецодежды, подвергшейся перед надеванием обеспыливанию, обдувка производится для того, чтобы удалить воздух, увлекаемый людьми, переходящими из загрязненных помещений.

На рис. IV.10 приведена схема проходного шлюза коридорного типа. Воздух подается сверху вниз через продольные щели в потолке камеры по всей длине проходной части шлюза со скоростью 2 м/с, а также через вертикальные щели, расположенные в обеих продольных стенах, со скоростью 4 м/с. Удаляется воздух через решетки в полу проходной части камеры. Под решетками располагается канал равномерного всасывания. Расход воздуха на одну камеру примерно 10 тыс. м³/ч; длину камеры следует принимать от 3 до 5 м, ширину — 0,8—1 м.

При употреблении спецодежды, не подвергающейся предварительному обеспыливанию, обдувка производится для удаления со спецодежды пыли. Скорость обдувки определяется при этом наименьшей крупностью пылевых частиц, представляющих опасность для данного производства. Как показали исследования, скорость обдувки должна быть не менее 15 м/с для удаления частиц размером 2—3 мкм и не менее 20 м/с для удаления частиц размером 1 мкм.

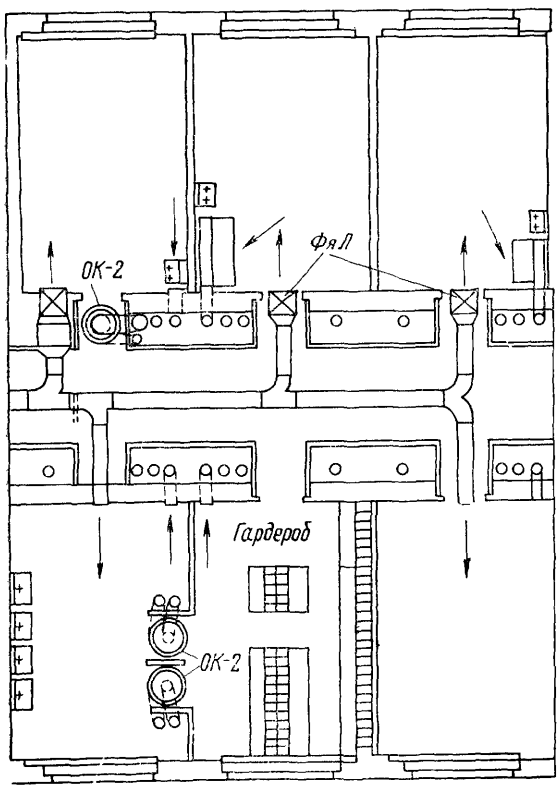


Рис. IV.13. Размещение цилиндрических обдувочных камер ОК-2 в здании

На рис. IV.11 показана обдувочная камера ОК-2 [100]. Обдувка производится вращающимся потоком, для чего камера имеет цилиндрическую форму, а воздух подводится тангенциально, как в циклоне, по патрубку *1*. Удаляется воздух через решетку в дне камеры воздуховодом *2*.

Использование вращающегося потока предоставляет определенное преимущество: распределение скоростей происходит по гиперболическому закону, вследствие чего скорости в центральной части больше, чем скорость входа. На рис. IV.12 показано распределение тангенциальных составляющих скоростей в поперечном сечении камеры, измеренное с помощью шарового насадка. Тангенциальные составляющие скорости воздуха достигают 25 м/с при скорости входа всего 8 м/с. Скорость направлена по касательной к корпусу обдуваемого человека, и аэродинамическое давление на корпус имеет минимальное значение. Пыль, сдуваемая с одежды, отбрасывается к стенкам камеры, чем уменьшается вероятность осаждения частиц, удаленных с одного участка на другой, находящийся вне зоны больших скоростей. Так как один и тот же объем воздуха последовательно обтекает разные участки тела, т. е. используется неоднократно, оказывается возможным уменьшить объем подаваемого воздуха до 2,5—3 тыс. $м^3$/ч. Открывание и закрывание дверей камеры, включение и выключение обдувки автоматизированы. Общая продолжительность цикла, включая вход и выход человека, примерно 30 с. Сопротивление камеры около 80 $кгс/м^2$.

На рис. IV.13 показано размещение цилиндрических камер в плане здания. В одном случае камеры одновременно служат входными тамбурами в небольшое лабораторное помещение, а воздуховоды встроены в коммуникационные короба коридора здания, в другом камеры вмонтированы параллельно в выходных дверях централизованного гардероба.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адам Н. К. Физика и химия поверхностей. М.—Л., Гостехиздат, 1947.
2. Allander C. Staub, 1958, № 1, 15.
3. Альбом рекомендуемых схем очистки вентиляционных выбросов от пыли, вып. I, 1964; вып. II, 1965. М., изд. НИИСТ и ГПИ Сантехпроект Госстроя СССР.
4. Baer H. Staub, 1952, № 6.
5. Бажанова В. В. В сб. трудов ЦНИИПромзданий, вып. 21. М., изд. ЦНИИПромзданий, 1971.
6. Barth W. BWK, 1956, № 8.
7. Баттман Л. Д. Загрязненное небо. М. «Мир», 1967.
8. Батурин В. В. Основы промышленной вентиляции. М., Профиздат, 1965.
9. Becher F. Heiz., Luft, Haustechn., 1959, № 12, 321.
10. Bell M. Heat., Pip. a. Air Condit., 1970, № 9.
11. Белов К. А. Улавливание химических продуктов коксования. М., Металлургиздат, 1948.
12. Беркович М. Т., Бухман Я. З. Промышленная пыль. Свердловск, Металлургиздат, 1960.
13. Богданов О. С., Пидник Л. К. и др. В сб. трудов института Механобр, вып. 124, Свердловск, 1959.
14. Bradley P. Trans. Faraday Soc., 1936, v. 32, № 8, 1088.
15. Brolove A. Nucleonics, 1951, № 5, 60.
16. Бурчаков А. С., Москаленко Э. М. Динамика аэрозолей в горных выработках. М., «Наука», 1965.
17. Вальдберг А. Ю., Дубинская Ф. Е., Исянов Л. М. Очистка промышленных газов в скрубберах Вентури. М., изд. ЦНИИТЭнефтехим, 1972.
18. Walter E. Staub, 1965, № 10. 441.
19. Виноградов Н. И. Водоснабжение и санитарная техника. 1964, № 6.
20. Whitby K., Jordan R., Algren A. ASHRAE Journ., 1962, 4, № 6, 79.
21. Власенко Г. Я. В сб.: Обеспыливающие устройства промышленной вентиляции. М., изд. МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1970.
22. Вредные вещества в промышленности. Под ред. Н. В. Лазарева. М., «Химия», 1969.
23. Wyndler E. L., Hoffmann D. J. of the Air Poll. Contr., 1965, № 15, 14.
24. Гастерштадт И. Пневматический транспорт. Изд. Северо-западного промбюро ВСНХ, 1927.
25. Гервасев А. М. Пылеуловители СИОТ. М., Профиздат, 1954.
26. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли—пыли, дымы и туманы. Л., «Химия», 1969.
27. Gillespie T., Riddal E. J. Coll. Sci., 1955. v. 10, № 3, 281.
28. Daniels T. The Engineer, 1957, v. 203, 358.
29. Денисов В. В сб. трудов института Гинцветмет, № 17, М., 1959.

30. Дергачев Н. Ф. Мокрые золоуловители системы ВТИ. М., Госэнергоиздат, 1960.
31. Дерягин Б. В. Что такое трение? М., изд. АН СССР, 1963.
32. Дерягин Б., Титиявская А. ДАН СССР, т. 50, 1945.
33. Дерягин Б. В., Яламов Ю. И. ДАН, 1967, № 5.
34. Doyle H., Brooks A. Ind. Eng. Chem., 1957, № 57A, 49.
35. Dratwa H. Staub, 1971, № 2, 57.
36. Жуковский Н. Е. Определение движения жидкости при какомлибо условии, данном на линии тока. Изб. соч., т. 2. Техтеоретиздат, 1949.
37. Загрязнение атмосферного воздуха. Женева, изд. Всемирной организации здравоохранения, 1962.
38. Зайцев М. М. В сб.: Материалы по пылеулавливанию в цветной металлургии». М., Металлургиздат, 1957.
39. Зимон А. Д. Адгезия пыли и порошков. М., «Химия», 1967.
40. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М, Госэнергоиздат, 1960.
41. Jordan D. Brit. J. Appl. Phys. Suppl., 1954, № 3, 124, Chem. Engin., 1969, № 2.
42. Карпухович Д. Т. Водоснабжение и санитарная техника, 1972, № 7.
43. Кашина В. И. Газовая промышленность, 1962, № 6.
44. Киселев О. М. В сб. трудов семинара по краевым задачам Казанского государственного университета имени В. И. Ульянова-Ленина, вып. 4, Казань, 1968.
45. Киселев Н. В., Нагорский И. С., Волкус С. П. Изв. Высш. уч. зав. «Энергетика», 1969, 12, 73.
46. Кириллов В. Ф. Водоснабжение и санитарная техника. 1962, № 12.
47. Кирш А. А., Стечкина И. Б., Фукс Н. А. Коллоидный журнал, 1966, № 2.
48. Клячко Л. С. Отопление и вентиляция, 1934, № 4.
49. Кноп В., Теске В. Техника обеспечения чистоты воздуха. М., «Медицина», 1970.
50. Коузов П. А. В сб.: Научно-исследовательские работы институтов охраны труда ВЦСПС, вып. 65. М., Профиздат, 1970.
51. Крепс Р. Л. В сб. трудов ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского, вып. 438. М., изд. ЦАГИ, 1939.
52. Krupp H. Adv. in Coll. a. Interface Sci., 1967. № 1/2, 111.
53. Кунина Э. М. в сб. трудов ЦНИИПромзданий, вып. 21, М., изд. ЦНИИПромзданий, 1971.
54. Кучерук В. В. Очистка вентиляционного воздуха от пыли. М., Машгиз, 1963.
55. Larsen R. Amer. Ind. Hyg. Assoc., 1958, № 19, 265.
56. Левин Л. М. Исследования по физике грубодисперсных аэрозолей. М, изд. АН СССР, 1961.
57. Loffler F. Staub, 1968, № 11, 456.
58. Löbner A. Staub, 1965, № 6.
59. Мамкин П. П. В сб.: Обеспыливание в металлургии. М., «Металлургия», 1971.
60. Маляренко Л. Г., Щельцына О. Н., Бажанова В. В., Буневич Л. А. Тракторы и сельхозмашины, 1972, № 9.
61. Минский Е. М. ЖТФ, 1940, 10, вып. 19.
62. Мурашкевич Ф. И. Некоторые вопросы теории улавливания частиц в турбулентном промывателе. М., изд. НИИОГаз, 1959.
63. Nietzold J. Luft u. Kaltetechn., 1971, № 1, 25.
64. Павловский Е. И. Заводская лаборатория, 1972, № 6.
65. Падва В. Ю. Водоснабжение и санитарная техника, 1968, № 4.
66. Parriste P., Ogilvie A. Calcium Superphosphate and Compound Fertilizers, 1948.
67. Pemberton C. Proc Conference held at BCUPA, Leatherhead, 1960.
68. Penrose M. J. of Inst. Heat. a. Ventil., 1961, № 29.

69. Пескин Ф. А. Торфяная промышленность, 1970, № 2.
70. Петров Б. А., Сидяков П. В. Обеспыливание технологических газов цементного производства. Л., Стройиздат, 1965.
71. Петрянов И. В., Козлов В. И. и др. Волокнистые фильтрующие материалы ФП. М., «Знание», 1968.
72. Петрянов И. В. Коммунист, 1969, № 11.
73 Пирумов А. И. Изв. АН СССР. ОТН, 1957, № 4.
74. Пирумов А. И. В сб. трудов НИИСТ, № 3. М., Госстройиздат, 1959.
75. Пирумов А. И. Аэродинамические основы инерционной сепарации. Под ред. Н. Я. Фабриканта. М., Госстройиздат, 1961.
76. Пирумов А. И. В сб. трудов НИИСТ, № 9. М., Госстройиздат, 1961.
77. Пирумов А. И. В сб. трудов НИИСТ МПСМ СССР, № 19. М., Госстройиздат, 1966.
78. Пирумов А. И. Ван Ч., Соснер Ю. М. Электрические воздушные фильтры типа ФЭ. Изд. НИИСТ МПСМ СССР, 1966.
79. Пирумов А. И., Ван Ч. Водоснабжение и санитарная техника, 1968, № 8.
80. Пирумов А. И., Пончек М. И., Шарапенко В. Г. Водоснабжение и санитарная техника, 1971, № 8.
81. Пирумов А. И., Кузенков Б. А., Гальцов В. А. В сб. трудов ЦНИИПромзданий, вып. 21, М., изд. ЦНИИПромзданий, 1971.
82. Пирумов А. И., Кузенков Б. А. Очистка вентиляционного воздуха в мокрых пылеуловителях-промывателях с внутренней циркуляцией воды. М., ГОСИНТИ, № 5/32, 1971.
83. Позин М. Е., Мухленов И. П., Тарат Э. П. Пенные газоочистители, теплообменники и абсорберы. М., Госхимиздат, 1959.
84. Полиновский В. И. Вентиляторы, воздуходувки, компрессоры. М., ОНТИ, 1936.
85. Рекк Е. В. Фильтры и пылеотделители для очистки воздуха от пыли. М., изд. Главсантехпроект, 1955.
86. Richtlinien zur Prüfung von Filtern, Staub, 1961, № 5, 206.
87. Ричардсон Э. Динамика реальных жидкостей М., «Мир», 1965.
88. Rose H., Wood A. The Introduction to the Electrostatic Precipitation in the Theory and Practice. London, 1956.
89. Розенкранц И. С. Химическая промышленность, 1940, № 12.
90. Русаков А. А., Урбах И. И., Анастасиади А. П. Очистка дымовых газов. М., «Энергия», 1969.
91. Рябчиков С. Я. В сб. докладов межобластного семинара по очистке газов. Ярославль, Семибратовский филиал НИИОГаз, 1972.
92. Рыхтер Э. Водоснабжение и санитарная техника, 1968, № 3.
93. Сборник статей по вопросам удара о поверхность воды. Труды ЦАГИ, вып. 152, М., изд. ЦАГИ, 1935.
94. Semrau K. J. Air Poll. Contr. Association, 1960, № 10.
95. Silverman L., Dennis R. Air Cond., Heat. a. Ventil., 1959, № 3.
96. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. М., «Мир», 1971.
97. Спурный К., Йех Ч., Седлочек Б., Шторх О. Аэрозоли. Пер. с чешск. М., Атомиздат, 1964.
98. Stairmand C., Kesley R. Chem. a. Ind., 1955, № 10, 1342
99. Степин Н. И. Электрическая тяга, 1962, № 1.
100. Талиев В. Н., Карпис Е. Е., Пирумов А. И. В сб. трудов НИИСТ, № 9, М., Госстройиздат, 1961.
101. Taylor G. Roy. Soc. Proc., 1917, v. A. 93.
102. Теверовский Е. Н., Зайцев М. М. Сб. трудов НИИОГаз, М., Химиздат, 1957.
103. Ter-Linden A. Trans. of the ASME, 1953, v. 3, № 3, 75.
104. Типовые конструкции и детали зданий и сооружений. Серия 1.494-3. Обеспыливатель аэродинамический для спецодежды ПАИБ. Вып. 0 и 1. М., изд. ЦИТП, 1971.

105. Toma D. Mitteil d. Hydraul., Inst. d. Techn. Hochschule, 1939, № 9.
106. Ужов В. Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами. М., «Химия», 1967.
107. Ужов В. Н., Мягков Б. Н. Очистка промышленных газов фильтрами. М., «Химия», 1970.
108. Ужов В. Н., Вальберг А. Ю. Очистка газов мокрыми фильтрами. М., «Химия», 1972.
109. Filter fur die Lüftreinigung Schweizer Ind. u. Verkenrs Revue, 1970, № 12.
110. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. М., изд. АН СССР, 1955.
111. Фукс Н. А. Успехи механики аэрозолей. М., изд. АН СССР, 1961.
112. Хазановский В. И., Бажанова В. В., Требуков С. П. В сб. трудов НИИСТ, № 19. М., Стройиздат, 1966.
113. Хайкин С. Э. Что такое силы инерции. М., Техтеоретиздат, 1939; Физические основы механики. М., «Наука», 1971.
114. Hasenclover D. Staub. 1959, № 2, 37.
115. Циклоны НИИОГаз. Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации. Ярославль, изд. Всесоюзного объединения по очистке газов и пылеулавливанию, 1971.
116. Шкраб М. Новейшие типы золоулавливающих устройств. М., ОНТИ, 1934.
117. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., «Наука», 1969.
118. Strauss H., Staub, 1968, № 10, 391.
119. Strauss W. Industrial Gas Cleaning. Pergamon Press, 1966.
120. Hejma J. Staub, 1971, № 7, 290.
121. Янковский С. С., Булгакова Н. Г., Русанов А. А. В сб.: Обеспыливание в металлургии. М., «Металлургия», 1971.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Введение 5

Глава I. Основные закономерности процессов обеспыливания воздуха 8

1. Классификация пылей по их дисперсности 8
2. Взаимодействие пылевых частиц с воздушными потоками 10
3. Общие положения теории процессов сепарации пыли из воздушных потоков 15

Современные представления о механизме отделения пыли от воздушных потоков 15
Закономерности инерционной сепарации пыли в криволинейных потоках 23
Сепарация пыли в пограничных областях турбулентных потоков 29
Условия удержания пылевых частиц на поверхностях 32
Общие закономерности пылеулавливания в пористых слоях 42

Глава II. Воздушные фильтры для очистки атмосферного и рециркуляционного воздуха 45

1. Классификация воздушных фильтров 45
2. Масляные воздушные фильтры 54

Общие сведения 54
Ячейковые масляные фильтры 54
Самоочищающиеся масляные фильтры 59

3. Волокнистые воздушные фильтры 67

Общие сведения 67
Ячейковые волокнистые фильтры 69
Рулонные волокнистые фильтры 75

4. Губчатые воздушные фильтры 82

Общие сведения 82
Конструкции губчатых фильтров 83

5. Электрические воздушные фильтры 85

Общие сведения 85
Конструкции электрических фильтров 89

Стр.

Глава III. Пылеуловители для очистки запыленных воздушных выбросов 96

1. Классификация пылеуловителей 96

2. Пылеосадочные камеры 100

3. Циклоны 102

Общие сведения об аэродинамике циклонных пылеуловителей 102
Эффективность циклонов 106
Конструкции циклонов 113

4. Жалюзийные пылеуловители сухого типа 119

5. Противоточные инерционные пылеуловители 122

6. Ротационные пылеуловители со стертым пограничным слоем 124

7. Вентиляторные пылеуловители 124

Общие принципы устройства вентиляторных пылеуловителей 124
Простейшие вентиляторные пылеуловители . 128
Вентиляторные пылеуловители с сепарирующим рабочим колесом 130

8. Инерционные контактные пылеуловители мокрого типа с подводом воды в зону контакта извне 136

Общие сведения 136
Мокропленочные циклоны 137
Капельные пылеуловители-промыватели 145

9. Инерционные пылеуловители мокрого типа с внутренней циркуляцией воды 146

Общие сведения 146
Мокрые центробежные пылеуловители 147
Прямоточно-инерционные пылеуловители 147
Барботажные пылеуловители 149
Струйные пылеуловители 151

Глава IV. Проектирование и эксплуатация обеспыливающих установок 159

1. Очистка воздуха, подаваемого в здания и сооружения системами приточной вентиляции и кондиционирования 159

Задачи очистки воздуха 159
Выбор и расчет воздушных фильтров 161
Выбор замасливателей для воздушных фильтров. 169
Централизованное маслоснабжение самоочищающихся фильтров и удаление шлама 169
Проектирование фильтровальных камер 174

Стр.

2. Очистка запыленных воздушных выбросов вентиляционных систем 184

Задачи очистки запыленных воздушных выбросов . 184
Выбор и расчет пылеуловителей 185
Конструирование пылеулавливающих установок . . 188

3. Обеспыливание спецодежды 193

Общие сведения 193
Аэродинамический обеспыливатель спецодежды . . 194
Обдувочные камеры 197

Список литературы 201

Александр Иванович ПИРУМОВ

ОБЕСПЫЛИВАНИЕ ВОЗДУХА

Редактор издательства М. А. Шершукова

Внешнее оформление художника Э. С Филимонова

Технические редакторы И. В. Панова, Т .В .Кузнецова

Корректоры Л. П. Бирюкова, Г. А. Кравченко

Сдано в набор 11/III 1974 г. Подписано к печати 12/VI 1974 г.

Т-11816 Формат 60×90¹/₁₆ д. л. Бумага типографская № 1

13 печ. л. (уч.-изд. 13,58 л)

Тираж 27.000 экз. Изд. № А VI—3874 Зак. № 116 Цена 88 коп.

Стройиздат

103006, Москва, Каляевская, д. 23а.

Подольская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли г. Подольск, ул. Кирова. 25.

AIR DUST CONTROL
A PIRUTOV

AN INTEGRATED EXPERIENCE OF THE THEORY AND PRACTICE OF AIR CLEANING FOR THE ATMOSPHERIC AIR POLLUTION AND DUST CONTROL IN INDUSTRIAL BUILDINGS ENVIRONMENT, OFFICES AND HOUSES

THE BASIC MECHANISMS OF PARTICLES SEPARATION FROM AIR STREAMS AND THE CONDITIONS OF THEIR PRECIPITATION ON DRY AND WET SURFACES AND WATER FILMS IN DIFFERENT DUST REMOVAL DEVICES ARE DISCUSSED, THE THEORY OF INERTIAL SEPARATION IS ENLARGED AND ITS NEW APPLICATIONS TO SOME DUST CONTROL EQUIPMENT DESIGN (CYCLONES, JET SCRUBBERS AND SO ON), FOUND TO BE SATISFACTORY IN PRACTICE, ARE GIVEN, THE DUST DISPERSITY CLASSIFICATION AND AIR FILTERS AND DUST COLLECTORS EFFICIENCY SYSTEMS ARE WORKED OUT

THE WIDELY SPREADING DRY AND WETTED POROUS FILTERS, ELECTRIC AIR FILTERS, DRY AND WET DUST COLLECTORS, NEW EQUIPMENT FOR THE AERODYNAMICAL WORKERS, CLOTHES CLEANING, AS WELL AS AUTOMATIC VORTEX AIR SHOWERS FOR INDUSTRIAL CLEAN ROOMS, A CONSIDERABLE PART OF WHICH WERE CREATED WITH THE AUTHOR'S PARTICIPATION, ARE DESCRIBED.

IN THE CONCLUSION THE PROBLEMS OF PROPER USE OF THE DESCRIBED DUST CONTROL EQUIPMENT ARE DISCUSSED

THE BOOK IS INTENDED FOR RESEARCH AND DESIGN SPECIALISTS, MEMBERS OF BUILDING CONSTRUCTION AND MAINTENANCE ORGANIZATIONS, WHO ARE ENGAGED IN AIR CLEANING

ПИРУМОВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ (1916 г. РОЖД.) ЯВЛЯЕТСЯ РУКОВОДИТЕЛЕМ ЛАБОРАТОРИИ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ЦНИИПРОМЗДАНИЙ. ОКОНЧИВ В 1939 г МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ ИМ В В КУЙБЫШЕВА, РАБОТАЛ В ИНСТИТУТЕ ГИГИЕНЫ ТРУДА И ПРОФЗАБОЛЕВАНИЙ АМН СССР, А ЗАТЕМ В ЦНИИПРОМЗДАНИЙ, ЗАНИМАЯСЬ ВОПРОСАМИ ВЕНТИЛЯЦИИ И ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ. ЕГО ГЛАВНЫЕ РАБОТЫ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ТЕОРИИ И ПРАКТИКЕ ИНЕРЦИОННОЙ СЕПАРАЦИИ ЧАСТИЦ ИЗ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ (КНИГА «АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНЕРЦИОННОЙ СЕПАРАЦИИ» И ДР.), ИСПОЛЬЗОВАНЫ ПРИ СОСТАВЛЕНИИ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ПО ЗАЩИТЕ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ И ПРИ СОЗДАНИИ НОВЫХ ОБЕСПЫЛИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ.

A. PIRUMOV (WAS BORN IN 1916) IS THE CHIEF OF THE DUST CONTROL DEPARTMENT AT THE CENTRAL RESEARCH INSTITUTE FOR INDUSTRIAL BUILDINGS AFTER GRADUATING FROM THE MOSCOW CIVIL ENGINEERING INSTITUTE IN 1939 HE HAS BEEN WORKING AT THE RESEARCH INSTITUTE FOR INDUSTRIAL HYGIENE AND PROFESSIONAL DISEASES OF THE ACADEMY OF MEDICAL SCIENSES OF THE USSR AND LATER AT THE CENTRAL RESEARCH INSTITUTE FOR INDUSTRIAL BUILDINGS. SPECIALIZING IN THE PROBLEMS OF VENTILATION AND DUST CONTROL, HIS MAIN INTEREST CONCERNS THE THEORY AND PRACTICE OF THE INERTIAL SEPARATION OF PARTICLES FROM AIR STREAMS (HIS PREVIOUS BOOK IS TITLED: «AERODYNAMIGAL FOUNDATIONS OF INERTIAL SEPARATION»). HIS RESEARCH WORKS WERE USED IN ELABORATING OF THE NORMATIVE DOCUMENTS FOR ATMOSPHERIC AIR POLLUTION CONTROL AND FOR THE DEVELOPMENT OF NEW AIR CLEANING DEVICES

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
16	14-я сверху	$v = v_s\left(1 + e^{-t/\tau}\right)$,	$v = v_s\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$,
26	9-я снизу	от нуля, является участком нестационарного движения частицы,	ции частицы τ, т. е. чем мельче пыль. Часть траектории частицы,
40	12-я сверху	$\sqrt[3]{\mathrm{Re}}\ \sqrt{6} < 1)$	$\sqrt[3]{\mathrm{Re}/}\ \sqrt{6} < 1)$
45	Табл. II.1, графа 2, 1-я строка	полевые	пылевые
132	Рис. III.24, ордината	p, кгс/см²	p, кгс/м²
134	20-я сверху	от 3 до 5 м/ч	от 3 до 5 км/ч.
149	1-я снизу	[1] Летальные	[1] Детальные
153	Табл. III.13, графа 3 слева, 6-я строка снизу	$\frac{1359}{1420}$	$\frac{1350}{1420}$
190	21-я снизу	100 кгс/см²	100 кгс/м²
195	20-я снизу	Продолжительность процесса обеспыливания	Продолжительность процесса обеспыливания в с

Зак. 116