



Уральский  
федеральный  
университет

имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

Строительный институт

**Ю. И. ТОЛСТОВА  
Р. Н. ШУМИЛОВ  
Л. Г. ПАСТУХОВА**

# ОХРАНА ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА

Учебное пособие



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б. Н. ЕЛЬЦИНА

Ю. И. Толстова, Р. Н. Шумилов, Л. Г. Пастухова

# ОХРАНА ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА

Рекомендовано методическим советом УрФУ  
в качестве учебного пособия для студентов,  
обучающихся по программам бакалавриата  
и магистратуры по направлению подготовки  
08.03.01, 08.04.01 «Строительство»

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2017

УДК 502.3:69(075.8)  
Т52

**Рецензенты:**  
кафедра теплогазоснабжения и вентиляции  
Белгородского государственного технологического университета  
(заведующий кафедрой доктор технических наук,  
профессор В. А. Уваров);  
Р. Ф. Шарпов, начальник отдела отопления и вентиляции  
ОАО «Уралгипрометз» (Екатеринбург)

**Научный редактор**  
доктор технических наук, профессор А. С. Носков

**Толстова, Ю. И.**

Т52      Охрана воздушного бассейна: [учеб. пособие] / Ю. И. Толстова, Р. Н. Шумилов, Л. Г. Пастухова ; [науч. ред. А. С. Носков] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 118 с.

ISBN 978-5-7996-2052-3

В учебном пособии рассматриваются физические основы и методика расчета загрязнения воздушного бассейна, а также основы расчета оборудования для предотвращения загрязнения воздушного бассейна выбросами пыли. Приведены данные по характеристикам промышленных пылей, а также по выбору и расчету пылеулавливающего оборудования для очистки вентиляционного воздуха.

Учебное пособие предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Охрана воздушного бассейна», а также для слушателей курсов повышения квалификации и научно-технических работников.

УДК 502.3:69(075.8)

ISBN 978-5-7996-2052-3

© Уральский федеральный университет, 2017

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Производственная деятельность человека приводит к загрязнению окружающей среды. В результате в атмосферный воздух поступают избыточное тепло, влага, пыль, вредные газы и пары. За год в атмосферу Земли выбрасывается около 200 млн т оксида углерода, более 20 млрд т диоксида углерода, 150 млн т диоксида серы, 53 млн т оксида азота, свыше 250 млн т пыли, более 50 млн т различных углеводородов. Каждая тонна угля на ТЭЦ дает 4 т выбросов диоксида углерода. По имеющимся прогнозам, каждые 50 лет возможно удвоение содержания диоксида углерода, что может привести к повышению температуры приземного слоя атмосферы и изменению климата на Земле.

Помимо негативного воздействия на здоровье людей, загрязнение атмосферы имеет глобальные последствия. В связи с этим возникает необходимость прогнозирования возможного загрязнения и разработки мероприятий по предотвращению поступления вредных веществ в атмосферный воздух.

Распространение вредных веществ в атмосфере зависит от ее строения и соотношения гравитационных сил, воздействия ветрового потока и турбулентной диффузии. В настоящее время расчет рассеивания в атмосфере выбросов вредных веществ производится по стандартной методике, утвержденной Росгидрометом России. Задачей расчета является определение концентраций вредных веществ на уровне земли при касании ее облаком вредности. Эти данные необходимы для сопоставления с допустимыми значениями с учетом фонового загрязнения.

Предотвращение загрязнения атмосферного воздуха прежде всего должно осуществляться с помощью технологических мероприятий. Однако роль санитарно-технических методов остается значительной. Здесь следует выделить два направления: очистку воздуха от пыли и очистку воздуха от вредных газов и паров.

Методы очистки воздуха от пыли очень разнообразны и зависят от целого ряда параметров: физических свойств пыли, начальной запыленности воздуха, допустимой концентрации пыли на выбросе, конструкции пылеуловителя, особенностей эксплуатации и т. д.

Существующие теоретические способы расчета эффективности пылеуловителей дают только приближенные значения, которые не всегда подтверждаются на практике. Отсутствие в настоящее время расчетных способов выбора пылеуловителей усложняет работу проектировщика по определению необходимой схемы очистки воздуха. Безусловно, необходимо использовать накопленный опыт эксплуатации пылеуловителей в различных системах пылеулавливания с учетом конкретной технологии и условий работы.

Современная техника пылеулавливания располагает высокоэффективными устройствами для очистки воздуха от пыли. Правильный выбор схемы очистки и типа пылеуловителя возможен только после тщательного изучения всех факторов, влияющих на работу пылеуловителя, и является одной из основных задач проектирования обеспыливающей вентиляции.

При выборе той или иной конструкции пылеуловителя проектировщику необходимо прежде всего учитывать физико-технические свойства пыли, ее дисперсный состав и т. д. Эти данные должны быть приведены в технологическом задании на проектирование пылеочистных устройств. При отсутствии таких данных проектировщику приходится использовать материалы производственных и лабораторных исследований и опыт эксплуатации данного типа оборудования в аналогичных производствах. Такие материалы не систематизированы и разбросаны в обширной научно-исследовательской и технической литературе по пылеулавливанию, что усложняет работу проектировщика.

В учебном пособии приведены необходимые данные по подбору пылеуловителей для очистки вентиляционного воздуха и рассмотрена методика их расчета. При разработке пособия использованы материалы, приведенные в монографии Ю. В. Хватова «Выбор и расчет обеспыливающего оборудования для очистки вентиляционного воздуха» (1971), представляющей научный и практический интерес и в настоящее время.

# 1. ЭКОЛОГИЯ АТМОСФЕРЫ

## 1.1. Понятие о физике атмосферы

Физика атмосферы является основой понимания механизмов распространения вредных веществ в атмосфере [1, 2]. Атмосфера, окружающая нашу планету, простирается по высоте на сотни километров. Однако основное количество воздуха содержится в слоях, непосредственно примыкающих к земной поверхности. Так, до высоты 5 км содержится 50 % общего количества воздуха, а до 30 км — 99 %.

По характеру изменения температуры по высоте атмосферу делят на пять слоев. Наибольшее значение для рассеивания выбросов имеет нижний слой, распространяющийся до высоты около 11 км и называемый тропосферой. В нем температура падает в среднем на 0,65 °С на каждые 100 м подъема вверх. Если на уровне моря температуру принять равной 15 °С, то на внешней границе тропосферы она составит –56 °С. Выше этого слоя до высоты 40 км простирается стратосфера, в которой температура не меняется с высотой и сохраняет указанное выше значение. В тропосфере содержится 75 % общего количества воздуха атмосферы.

В состав сухого воздуха входят азот (78,084 %), кислород (20,964 %), аргон (0,934 %), углекислый газ (0,030 %), другие газы (0,006 %).

Вследствие различия температур отдельных участков земной поверхности возникает конвективное движение воздушных масс. Эти потоки перемещаются вдоль поверхности Земли, создавая устойчивые течения, называемые ветром. Характер движения потоков турбулентный, однако градиент изменения скоростей по высоте тропосферы может быть различным.

В верхнем слое тропосферы, так называемой свободной атмосфере, роль сил трения незначительна, и градиент горизонтальных скоростей по высоте практически равен нулю ( $du/dz = 0$ ).

Ниже свободной атмосферы до высоты 1000 м от земной поверхности располагается пограничный слой, в котором скорости понижаются по мере приближения к Земле за счет внутреннего трения. Однако существенного значения силы внутреннего трения достигают лишь в нижней части пограничного слоя — в приземном слое толщиной до 300 м.

До высоты 100 м происходит довольно быстрое увеличение относительной скорости  $u/u_1$ . Далее скорость возрастает все медленнее, и при больших высотах ее можно считать практически постоянной. Такое изменение скорости характерно для движения турбулентного потока вблизи стенки, когда скорость в пограничном слое растет, а потом оказывается почти неизменной.

Изменение скорости с высотой при турбулентном течении у поверхности наиболее точно соответствует логарифмическому закону, который применительно к атмосфере имеет следующий вид:

$$u = u_1 \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_1}{z_0}},$$

где  $u_1$  — скорость ветра на высоте  $z_1 = 10$  м над Землей, м/с;  $u$  — скорость ветра на высоте  $z$ , м/с;  $z_0$  — шероховатость земной поверхности, м;  $z$  — расстояние от поверхности земли до рассматриваемого уровня, м.

В тропосфере, как и во всей атмосфере, происходит изменение плотности и давления воздуха с высотой. Изменение давления с высотой определяется из уравнения гидростатики:

$$dP/dz = -g\rho.$$

Подставляя значение плотности из уравнения Клапейрона  $\rho = P/RT$ , получим

$$dP/dz = -gP/RT,$$

где  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $R$  — газовая постоянная воздуха,  $R = 286,7$  Дж/(кг·К);  $T$  — температура, К.

Разделяя переменные и интегрируя при постоянной средней температуре  $T = T_{\text{cp}}$  (изменением температуры в нижнем слое тропосферы, где происходит рассеивание вредностей, можно пренебречь), получаем экспоненциальную зависимость атмосферного давления от высоты:

$$P = P_{0 \text{ exp}}(-gz/RT_{\text{cp}}).$$

При температуре  $t_{\text{cp}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$   $T_{\text{cp}} = 288 \text{ K}$ , и для нижних слоев атмосферы получаем выражение

$$P = P_{0 \text{ exp}}(-11,9 \cdot 10^{-4}z).$$

Точные расчеты с учетом изменения температуры дают значения относительного давления  $P_2/P_0$  и относительной плотности воздуха  $\rho_z/\rho_0$  на верхней границе тропосферы:  $P_2/P_0 = 0,223$  и  $\rho_z/\rho_0 = 0,3$ .

Турбулентное движение атмосферного воздуха сопровождается вихреобразованием, способствующим перемешиванию выбросов с атмосферным воздухом. Особое значение имеют горизонтальная и вертикальная пульсационные скорости в плоскости, перпендикулярной к направлению ветра. За счет их воздействия происходит раскрытие (расширение) выходящего в атмосферу облака загрязненного воздуха.

Величина пульсационной скорости зависит от скорости ветра, вида подстилающей поверхности, состояния атмосферы и других факторов.

Состояние атмосферы зависит от характера изменения температуры по высоте (температурной стратификации). Оценка состояния атмосферы производится по величине *адиабатического градиента*  $\gamma_a$ . Значение  $\gamma_a$ , найденное из уравнения адиабатического расширения для идеального газа, составляет  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  на каждые  $100 \text{ м}$  подъема вверх. Как уже указывалось, нормальное значение градиента температуры составляет  $0,65 \text{ }^\circ\text{C}$  на  $100 \text{ м}$ , однако он может изменяться в широких пределах и даже принимать отрицательные значения.

Если распределение температур в атмосфере с высотой соответствует адиабатическому градиенту  $\gamma_a$ , то на какую бы высоту

без теплообмена с окружающей средой ни переместился некоторый объем воздуха, он будет иметь одинаковую температуру с окружающей средой, вследствие чего не возникает каких-либо дополнительных сил, перемещающих его вверх или возвращающих вниз. Такое строение атмосферы называется *нейтральным*.

Если температура в атмосфере уменьшается с высотой быстрее, чем при адиабатическом градиенте, то есть  $\gamma > \gamma_a$ , то градиент температуры называется *сверхадиабатическим*. При сверхадиабатическом градиенте температуры объем воздуха, перемещающийся вверх от уровня, на котором он имел ту же температуру и давление, что и окружающая среда, будет претерпевать уменьшение температуры соответственно адиабатическому градиенту, но будет иметь более высокую температуру, чем температура окружающей среды на новом уровне. Из-за этого плотность в данном объеме будет меньше плотности окружающего воздуха. Возникающая при этом архимедова сила будет заставлять этот объем подниматься еще выше. В том случае, если некоторый объем воздуха будет перемещаться вниз, температура воздуха в нем окажется ниже температуры среды на этом уровне. Поэтому он будет опускаться все ниже и ниже. Таким образом, если градиент температуры превосходит адиабатический, все вертикальные движения ускоряются, и возрастает степень турбулентности. Такое состояние атмосферы называют *неустойчивым*. Угол раскрытия облака вредностей в вертикальной плоскости при этом увеличивается.

С другой стороны, если градиент температуры меньше адиабатического  $\gamma < \gamma_a$ , то объем воздуха, перемещаемый вверх, будет иметь температуру ниже температуры окружающей среды. Если же он перемещен вниз, то будет иметь температуру выше температуры окружающей среды. В этом случае архимедовы силы стремятся вернуть объем на первоначальный уровень, и степень турбулентности уменьшается, а состояние атмосферы называется *устойчивым*. Раскрытие облака вредностей в вертикальной плоскости оказывается меньшим, чем в предыдущем случае.

Самое устойчивое состояние атмосферы имеет место при *инверсии*, когда температурный градиент становится отрицательным (температура возрастает с высотой).

Таким образом, способность атмосферы воздействовать на вертикальное перемещение воздуха зависит от распределения температуры по высоте.

## 1.2. Распространение загрязнений в атмосфере

Перенос загрязнений в атмосфере происходит под действием двух факторов: ветрового потока и турбулентного движения в поперечном ветровому потоку направлении. Ветер является основным фактором, влияющим на распространение вредных веществ. Ветер не является устойчивым течением, его направление и скорость постоянно меняются. Вот почему при проектировании промышленных зон и жилой застройки необходимо учитывать среднегодовое и сезонное распределение скорости и повторяемости ветра. Существует понятие опасной скорости ветра, при которой концентрации вредных веществ, содержащихся в приземном слое, достигают наибольших значений. В свою очередь, опасная скорость ветра зависит от температурной стратификации атмосферы.

Рассмотрим типичные варианты стратификации атмосферы и характер распространения выходящего из трубы облака. Можно выделить пять основных вариантов строения атмосферы и соответствующих форм облака (рис. 1.1).

**Волнообразная.** Такая форма наблюдается при сверхадиабатическом вертикальном градиенте температуры и свидетельствует о неустойчивой атмосфере. Распространение облака носит волновой характер с большим углом раскрытия и большой степенью турбулентности. Касание облаком Земли и точка максимальной концентрации значительно приближаются к источнику выброса вредных веществ, а концентрация достигает наивысшего значения. Такая температурная стратификация обычно наблюдается днем при хорошей ясной погоде, когда земля интенсивно нагревается солнцем.

**Конусообразная.** Эта форма облака наблюдается при градиенте температуры  $\gamma < \gamma_a$ . Облако имеет форму конуса с горизонтальной осью и касается Земли на несколько большем расстоянии, чем в первом случае. Такая структура атмосферы более устойчива, чем в предыдущем случае. Она характерна для облачной и ветреной

погоды как днем, так и ночью и наиболее часто встречается при влажном климате. Нормальный градиент температуры равен  $\gamma = dT/dz = -0,65 \cdot 10^{-2}$  К/м; этому градиенту соответствует конусообразная структура облака.

**Веерообразная.** Эта форма облака наблюдается при инверсии или при температурных градиентах, близких к нулю. Облако очень мало расширяется в вертикальном направлении, и рассеивание идет в основном в горизонтальном направлении. Касание Земли облаком либо не происходит, либо происходит на большом расстоянии от трубы. Максимальная концентрация вредностей у Земли невелика, а точка максимума находится далеко от источника вредных веществ.

Однако такая структура атмосферы опасна при неорганизованных выбросах вредных веществ в нижние слои атмосферы (автотранспорт, наземные источники, выброс в зону аэродинамической тени зданий), так как они сохраняются в нижних слоях атмосферы и слабо поднимаются вверх. Это характерно для ночного времени, когда температура поверхности Земли ниже температуры воздуха. Этому благоприятствуют слабые ветра, чистое небо и снежный покров.

**Приподнятая.** Такая форма облака наблюдается, когда в нижней части атмосферы имеет место инверсионная структура, а сверху — нормальная с отрицательным градиентом. Зона наибольших концентраций находится на верхней границе инверсионного слоя. Такая форма может наблюдаться при заходе солнца.

Эта структура атмосферы является наиболее благоприятной для рассеивания вредных веществ, особенно при высоких трубах, когда они направляются в высокие слои атмосферы и практически не проникают к земной поверхности.

**Задымляющая.** Внизу располагается слой с нормальным отрицательным градиентом, а сверху — инверсионный слой. Такая структура атмосферы встречается утром, когда ночная инверсия рассеивается под действием солнечных лучей, что соответствует распространению облака у земной поверхности. Задымляющая структура наиболее опасна для низких труб, когда инверсионный слой располагается над их уровнем. Концентрация вредных веществ оказывается повышенной, и облако приближается к поверхности Земли вблизи трубы.

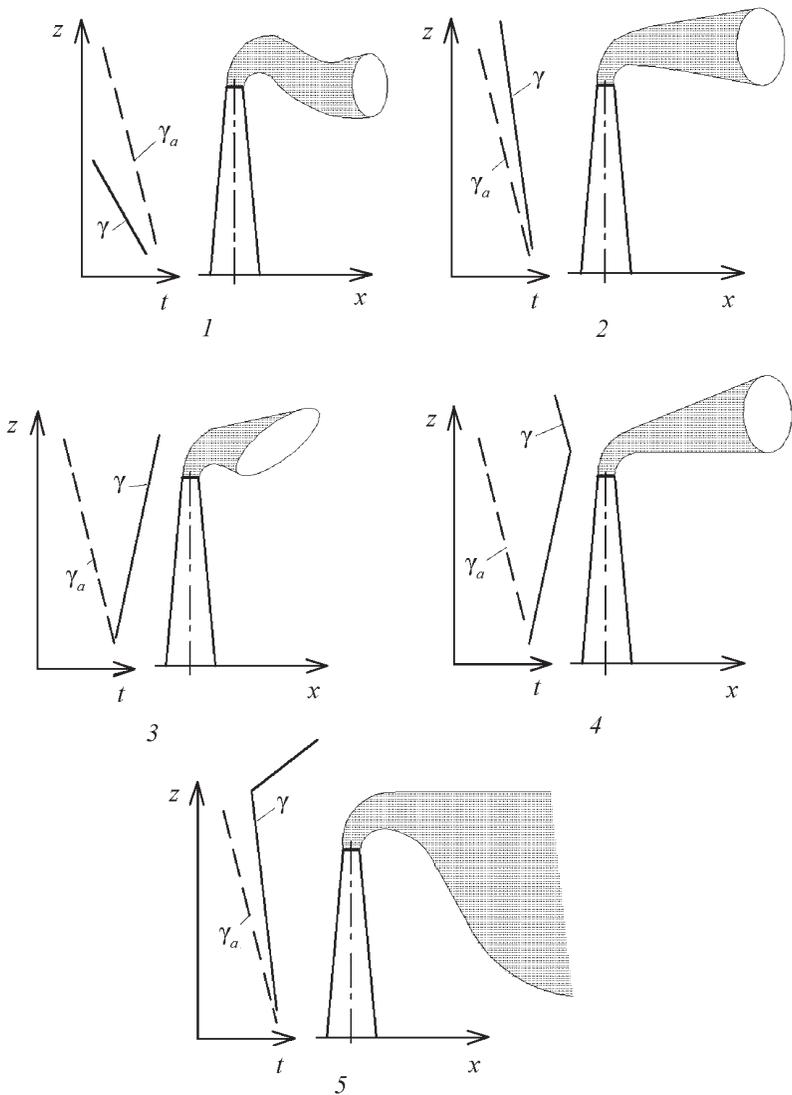


Рис. 1.1. Формы распространения дымового облака в стратифицированной атмосфере:

1 — волнообразная; 2 — конусообразная; 3 — веерообразная; 4 — приподнятая; 5 — задымляющая

Таким образом, с точки зрения загрязнения приземного слоя выбросами из труб, обдуваемых ветром, наиболее опасен первый тип атмосферы со сверхadiaбатическим градиентом. Пятый тип строения атмосферы наиболее опасен для высоких труб. При неорганизованных выбросах и выбросах в зону аэродинамической тени зданий опасен и третий тип атмосферы. Следовательно, во всех случаях благоприятны для рассеивания вредных веществ лишь второй и четвертый тип атмосферы (при ненастной погоде и при заходе солнца).

В целом характер температурной стратификации определяется географическим местоположением источника выброса и учитывается соответствующим коэффициентом в формулах расчета рассеивания вредных веществ.

## 2. РАСЧЕТ РАССЕЙВАНИЯ ВЫБРОСОВ

### 2.1. Общие положения

Расчет рассеивания в атмосфере выбросов вредных веществ производится в соответствии с «Методикой расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах промпредприятий ОНД-86» [3]. Задачей расчета является определение концентраций вредных веществ на уровне Земли при касании ее облаком вредностей. Эти данные необходимы для сопоставления с допустимыми значениями для территории промплощадки или зоны жилой застройки с учетом существующего (фонового) загрязнения.

В общем случае может существовать один или несколько источников выброса вредностей (ИВВ) — однородных (только пыль или только газ), разнородных (пыль и газ одновременно) и обладающих суммацией действия.

*Эффект суммации* — это однонаправленное неблагоприятное влияние на организм нескольких разных веществ, вызывающих одни и те же заболевания. В таком случае говорят, что вещества входят в одну группу суммации. Существует несколько десятков групп суммации. Эффектом суммации действия обладают, например, следующие сочетания вредных веществ:

- ацетон и фенол;
- ацетальдегид и винилацетат;
- валериановая, капроновая и масляная кислоты;
- озон, двуокись азота и формальдегид;
- сернистый газ и фенол;
- серы диоксид и двуокись азота;
- серы диоксид и фтористый водород;
- серы диоксид и трехокись серы;
- сероводород и динил;
- сероводород и формальдегид;
- изопропилбензол и гидроперекись изопропилбензола;

- фурфурол, метиловый и этиловый спирты;
- циклогексан и бензол;
- этилен, пропилен, бутилен и амилен;
- уксусная кислота и уксусный ангидрид;
- ацетон и ацетофенон;
- бензол и ацетофенон;
- фенол и ацетофенон [4].

Для одиночного ИВВ должно выполняться условие

$$c_x \leq \Phi, \quad (2.1)$$

где  $c_x$  — концентрация вредного вещества в расчетной точке, мг/м<sup>3</sup>;  $\Phi$  — допустимое повышение концентрации вредного вещества в атмосфере в результате рассеивания, определяется как разность предельно допустимой концентрации (ПДК) и фоновой  $c_{\text{ф}}$ , мг/м<sup>3</sup>.

При наличии нескольких разнородных вредных веществ условие (2.1) должно выполняться для каждого из них. При выбросе вредных веществ, обладающих суммацией действия, должно выполняться условие

$$\frac{c_{x^1}}{\Phi_1} + \frac{c_{x^2}}{\Phi_2} + \dots + \frac{c_{x^i}}{\Phi_i} \leq 1 \quad (2.2)$$

где  $\Phi_i$  — допустимое повышение концентрации  $i$ -го вредного вещества, мг/м<sup>3</sup>;  $c_{x^i}$  — концентрация  $i$ -го вредного вещества в расчетной точке, мг/м<sup>3</sup>.

Значения предельно допустимых концентраций (ПДК) в атмосферном воздухе населенных мест принимаются по данным перечня ГН 2.1.6.695-98 с учетом изменений согласно ГН 2.1.6.789-99 и ГН 2.1.981-00 [4]. Значения фонового загрязнения принимаются по данным Росгидромета. В предлагаемом пособии приводятся данные о ПДК некоторых распространенных вредных веществ в атмосферном воздухе населенных мест (прил. 1, табл. 1.1).

При оценке загрязнения приземного слоя атмосферы промплощадок используют показатель допустимого уровня загрязнения, составляющий 0,3 ПДК<sub>рз</sub>, где ПДК<sub>рз</sub> — предельно допустимая концентрация вредного вещества в воздухе рабочей зоны, принимаемая

по ГОСТ 12.1.005-88\* [5]. Данные о ПДК некоторых распространенных вредных веществ в воздухе рабочей зоны приведены в конце пособия (прил. 2).

Расчет рассеивания выбросов вредных веществ от нескольких ИВВ производится в зависимости от взаимного расположения ИВВ и зоны жилой застройки (ЗЖЗ) с учетом взаимного влияния отдельных источников, исходя из условий, приведенных в [3].

## 2.2. Одиночные источники выбросов

Распространение концентраций вредных веществ в направлении ветра подчиняется следующим закономерностям. При опасной для данного источника скорости ветра на некотором расстоянии от него наблюдается максимальная концентрация вредного вещества  $c_m$  в приземном слое атмосферы (рис. 2.1).

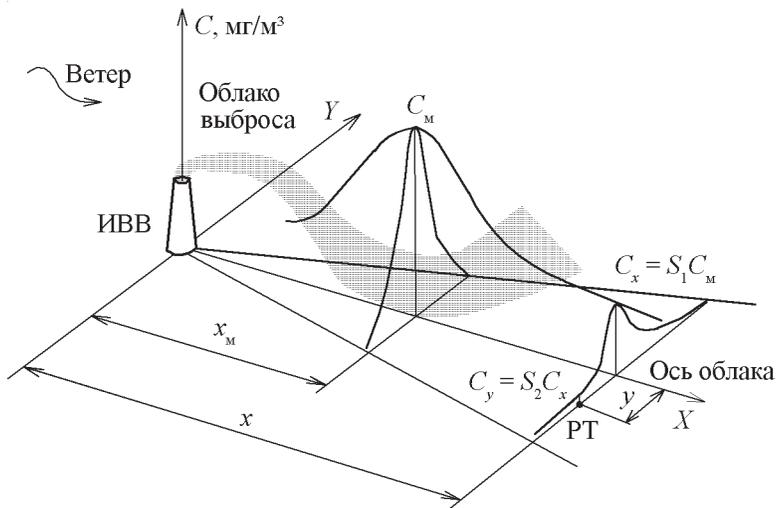


Рис. 2.1. Схема распределения концентраций вредных веществ у поверхности Земли:

$X, Y$  — координатные оси;  $c_m$  — максимальная концентрация вредного вещества; РТ — расчетная точка; ИВВ — источник выброса вредных веществ;  $x, y$  — координаты РТ

Концентрации вредного вещества  $c_x$  на расстояниях  $x$ , больших или меньших  $x_m$ , по оси облака находится с помощью коэффициента  $s_1$ , определяемого графически или по приближенным формулам [3]:

$$c_x = s_1 c_m.$$

В точках, расположенных на расстояниях  $y$  от оси облака, концентрация  $c_{xy}$  определяется с помощью коэффициента  $s_2$ , определяемого графически или по приближенным формулам [3]:

$$c_{xy} = s_2 c_x.$$

### *Исходные данные для расчета*

$V$  — расход выбрасываемого воздуха или газов, м<sup>3</sup>/с;

$\Delta T$  — разность температур выбрасываемого воздуха или газа и наружного воздуха:  $T = T_r - T_b$ , где  $T_r$  — температура выбрасываемого воздуха или газа, К;  $T_b$  — максимальная температура наружного воздуха наиболее жаркого месяца; для котельных — средняя температура наиболее холодного месяца по СП 131.13330.2012. «Строительная климатология»;

$H$  — высота трубы, м;

$D$  — диаметр трубы, м;

$M$  — количество вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу, г/с;

$\Phi$  — допустимое повышение концентрации вредного вещества в приземном слое атмосферы, мг/м<sup>3</sup>;

$l, e$  — расстояние от ИВВ до ближней и дальней границ зоны жилой застройки (ЗЖЗ), м.

В число исходных данных входит географическое местоположение ИВВ, что определяет выбор коэффициента температурной стратификации  $A$ :

— для районов Бурятии, Читинской области  $A = 250$ ;

— для Европейской территории России южнее 50° северной широты, для Дальнего Востока, остальной территории Сибири  $A = 200$ ;

— для Европейской территории России и Урала между  $50^\circ$  и  $52^\circ$  северной широты  $A = 180$ ;

— для Европейской территории России и Урала севернее  $52^\circ$  с. ш., за исключением Центральной России,  $A = 160$ ;

— для районов Центральной России  $A = 140$ .

Кроме того, необходимо знать вид вредного вещества и эксплуатационный коэффициент  $\eta_p$  очистки установленного пылегазоочистного оборудования. По этим данным принимается значение параметра  $F$ , учитывающего скорость оседания вредных веществ в атмосфере:

— для газообразных вредных веществ (сернистого газа, сероуглерода и т. п.) и мелкодисперсных аэрозолей (пыли, золы и т. п.), скорость упорядоченного оседания которых практически равна нулю,  $F = 1$ ;

— для пыли и золы (кроме указанных выше) в зависимости от среднего эксплуатационного коэффициента очистки  $\eta_p$ :

при отсутствии очистки и  $\eta_p < 75\%$   $F = 3$ ;

при  $75\% < \eta_p < 90\%$   $F = 2,5$ ;

при  $\eta_p > 90\%$   $F = 2$ .

### *Основные расчетные зависимости*

Максимальное значение приземной концентрации вредного вещества для нагретых выбросов определяется по формуле

$$c_m = \frac{AMFmn\eta_p}{H^2(V\Delta T)^{1/3}}, \quad (2.3)$$

где  $A$  — коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы,  $c^{2/3} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{град}^{2/3}/\text{г}$ ;  $M$  — количество вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу, г/с;  $F$  — коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе;  $H$  — высота трубы, м;  $V$  — расход выбрасываемого воздуха или газов,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\Delta T$  — разность температур выбрасываемого воздуха или газа и наружного воздуха;  $m, n$  — коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья ИВВ;  $\eta_p$  — коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности, при перепаде высоты менее 50 м  $\eta_p = 1$ .

Для холодных выбросов расчет максимальной концентрации  $c_m$  производится по формуле:

$$c_m = \frac{AMFDm\eta_p}{8H^{4/3}V}. \quad (2.4)$$

В случае выбросов в атмосферу, обусловленных сжиганием топлива, максимальная концентрация может быть определена по формуле:

$$c_m = \frac{P^{2/3}d_3AFm\eta_p}{2,35H^2d_4^{1/3}\Delta T^{1/3}}, \quad (2.5)$$

где  $P$  — расход топлива, т/ч;  $d_3$  — количество вредного вещества в г на кг топлива;  $d_4$  — расход газозадушной смеси в м<sup>3</sup> на 1 кг топлива.

При расчетах рассеивания выбросов наибольшей проблемой является установление основной характеристики источника выделения вредных — количества вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу. В настоящее время наряду с данными, предоставляемыми предприятиями, можно воспользоваться материалами, обобщенными по видам технологий и приведенными в справочном издании [6] и работах И. М. Квашнина [7, 8].

### *Порядок расчета*

1. Найдем параметр  $f$  и определим тип выброса:

$$f = 1630V^2 / (D^3H^2\Delta T).$$

При  $f < 100$  (нагретые выбросы) расчет производится с п. 2; при  $f > 100$  (холодные выбросы) расчет производится, начиная с п. 8.

### **Нагретые выбросы**

2. Определим коэффициент  $m$ :

$$m = 1 / (0,67 + 0,1 f^{1/2} + 0,34 f^{1/3}).$$

3. Вычислим параметр  $v_m$ :

$$v_m = 0,65(V\Delta T / H)^{1/3}.$$

4. Определим безразмерный коэффициент  $n$  по п. 14.

5. Найдем величину максимальной приземной концентрации вредности при неблагоприятных метеорологических условиях на расстоянии  $x_m$  от источника по формуле (2.3).

6. Определим коэффициент распространения максимума концентрации вредности  $d$ :

$$\text{при } v_m \leq 0,5 \quad d = 2,4 - (1 + 0,28f^{1/3});$$

$$\text{при } v_m = 0,5 \dots 2 \quad d = 4,95 v_m (1 + 0,28f^{1/3});$$

$$\text{при } v_m > 2 \quad d = 7 v_m^{1/2} (1 + 0,28f^{1/3}),$$

где  $f = 800(v_m')^3$ ;  $v_m' = 5,2V / (\pi DH)$ .

7. Последующие расчеты выполняются по п. 15.

### Холодные выбросы

8. Вычислим параметр  $v_m' = 1,66V / (DH)$ .

9. Определим безразмерный коэффициент  $n$  по п. 14.

10. Найдем значения коэффициентов  $F$  и  $A$  (раздел «Исходные данные»).

11. Вычислим величину максимальной приземной концентрации вредного вещества  $c_m$  при неблагоприятных метеорологических условиях на расстоянии  $x_m$  от источника по формуле (2.4).

12. Определим коэффициент распространения максимума концентрации вредности:

$$\text{при } v_m' \leq 0,5 \quad d = 5,7;$$

$$\text{при } 0,5 < v_m' \leq 2 \quad d = 11,4 v_m';$$

$$\text{при } v_m' > 2 \quad d = 16(v_m')^{1/2}.$$

13. Последующие расчеты выполняются по п. 15.

### Расчетные зависимости, общие для нагретых и холодных выбросов

14. Вычислим безразмерный коэффициент  $n$  (к п. 4 и 10):

$$\text{при } v_m \leq 0,5 \quad n = 4,4 v_m;$$

$$\text{при } 0,5 < v_m \leq 2 \quad n = 0,532 v_m^2 - 2,13 v_m + 3,13;$$

$$\text{при } v_m > 2 \quad n = 1.$$

*Примечание.* Для холодных выбросов вместо  $v_m$  подставляем  $v_m'$ .

15. Определим расстояние от источника  $x_m$ , на котором будет наблюдаться максимальная концентрация вредностей  $c_m$ :

$$\delta_m = \frac{5 - F}{4} dH,$$

где  $d$  — коэффициент, определяемый для нагретых выбросов ( $f < 100$ ) по п. 6; для холодных ( $f > 100$ ) — по п. 12.

16. Концентрация  $c_x$  по оси рассеивания облака вредности в любой точке с относительной координатой  $\bar{x} = x/x_m$  определяется следующим образом:

$$c_x = s_1 c_m, \quad (2.6)$$

где  $s_1$  — коэффициент, учитывающий изменение концентрации по оси факела.

17. Вычислим коэффициент  $s_1$ :

$$\begin{aligned} \text{при } \bar{x} < 1 & \quad s_1 = 3\bar{x}^4 - 8\bar{x}^3 + 6\bar{x}^2; \\ \text{при } 1 < \bar{x} < 8 & \quad s_1 = 1,13 / (0,13\bar{x}^2 + 1); \\ \text{при } \bar{x} > 8 \text{ и } F \leq 1,5 & \quad s_1 = \bar{x} / (3,58\bar{x}^2 - 35,2\bar{x} + 120); \\ \text{при } \bar{x} > 8 \text{ и } F \geq 1,5 & \quad s_1 = 1 / (0,1\bar{x}^2 + 2,4\bar{x} - 17,8). \end{aligned}$$

*Примечание.* Для низких наземных источников ( $H \leq 10$  м) при  $\bar{x} < 1$  величина  $s_1$  заменяется коэффициентом  $s_1^H$ , определяемым по формуле

$$s_1^H = 0,125(10 - H) + 0,125(H - 2) s_1. \quad (2.7)$$

18. Определим концентрацию вредности  $c_x$  и проверим выполнение уравнения (2.1) или (2.2).

### 2.3. Группа источников выбросов

Расчет рассеивания выбросов в тех случаях, когда на оси пространства облака ИВВ — ЗЖЗ имеется только один источник, производится как для одиночного ИВВ согласно данным, приведенным в разделе 2.2, и заканчивается п. 18. При наличии нескольких ИВВ расчет продолжается.

19. Для каждого ИВВ определяем опасное значение скорости ветра  $u_m$  по формулам:

для нагретых выбросов ( $f < 100$ )

$$\begin{aligned} \text{при } v_m \leq 0,5 & \quad u_m = 0,5; \\ \text{при } 0,5 < v_m \leq 2 & \quad u_m = v_m; \\ \text{при } v_m > 2 & \quad u_m = v_m(1 + 0,12f^{1/2}); \end{aligned}$$

для холодных выбросов ( $f > 100$ )

$$\begin{aligned} \text{при } v_m' \leq 0,5 & \quad u_m = 0,5; \\ \text{при } 0,5 < v_m' \leq 2 & \quad u_m = v_m'; \\ \text{при } v_m' > 2 & \quad u_m = 2,2 v_m'. \end{aligned}$$

20. Находим средневзвешенную опасную скорость ветра  $u_{cp}$ :

$$u_{cp} = \frac{\sum u_{mi} c_{mi}}{\sum c_{mi}},$$

где  $u_{mi}$ ,  $c_{mi}$  — опасная скорость ветра и максимальная концентрация для  $i$ -го источника.

21. Максимальное значение приземной концентрации  $c_{mi}$  при скорости ветра, отличающейся от опасной, находится по формуле:

$$c_{mi} = c_m r, \quad (2.8)$$

где  $r$  — коэффициент, учитывающий изменение скорости ветра.

22. Вычислим значение коэффициента  $r$ :

$$\begin{aligned} \text{при } \bar{u} \leq 1 & \quad r = 0,67 \bar{u} + 1,67 \bar{u}^2 - 1,3 \bar{u}^3; \\ \text{при } \bar{u} > 1 & \quad r = 3 \bar{u} / (2 \bar{u}^2 - \bar{u} + 2), \end{aligned}$$

где  $\bar{u} = u_{cp} / u_m$ .

Тогда максимальная концентрация вредного вещества с учетом изменения опасной скорости ветра определится по формуле

$$c_{mi} = c_m r,$$

где  $c_m$  определяется по п. 5 при  $f < 100$  или по п. 11 при  $f > 100$ .

23. Расстояние от источника выброса, на котором концентрация вредного вещества достигнет максимального значения  $c_{mi}$  при скорости ветра, отличной от опасной, находится по формуле:

$$x_{mi} = p x_{mi0}$$

где  $p$  — коэффициент, определяемый в зависимости от  $\bar{u} = u_{cp} / u_m$ :

$$\begin{aligned} \text{при } \bar{u} \leq 0,25 & \quad p = 3; \\ \text{при } 0,25 < \bar{u} < 1 & \quad p = 8,43(1 - \bar{u})^5 + 1; \\ \text{при } \bar{u} > 1 & \quad p = 0,32 \bar{u} + 0,86. \end{aligned}$$

В пределах зоны жилой застройки выбираем несколько контрольных точек: на ближайшей границе  $x = l$ , на дальней границе  $x = e$  и одну — две точки между ними. Следует иметь в виду, что для каждого ИВВ значения  $x$  различны. По п. 6 вычисляем значения

концентраций в контрольных точках. Схема определения расстояний  $x$  дана на рис. 2.2.

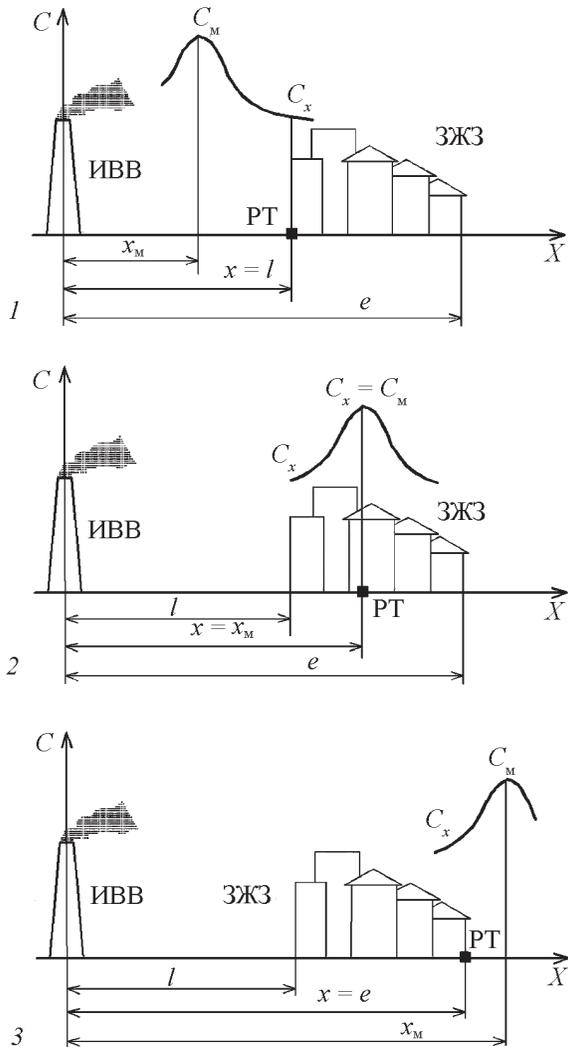


Рис. 2.2. Схема определения расстояния  $x$  до расчетной точки (РТ):

1–3 — варианты расположения точки с максимальной концентрацией вредного вещества относительно зоны жилой застройки (ЗЖЗ)

24. Для ИВВ с однородными вредностями сумма концентраций от разных ИВВ в контрольной точке должна удовлетворять условию

$$\sum_{i=1}^n c_{xi} \leq \Phi.$$

## 2.4. Влияние застройки

Влияние застройки на рассеивание выбросов в атмосфере связано с изменением характера воздушных течений вблизи здания. При обтекании здания ветровым потоком (рис. 2.3) образуются три зоны аэродинамической тени, которые называют также циркуляционными зонами. С наветренной стороны здания формируется зона III, зона II — над кровлей здания, и зона I — с заветренной стороны.

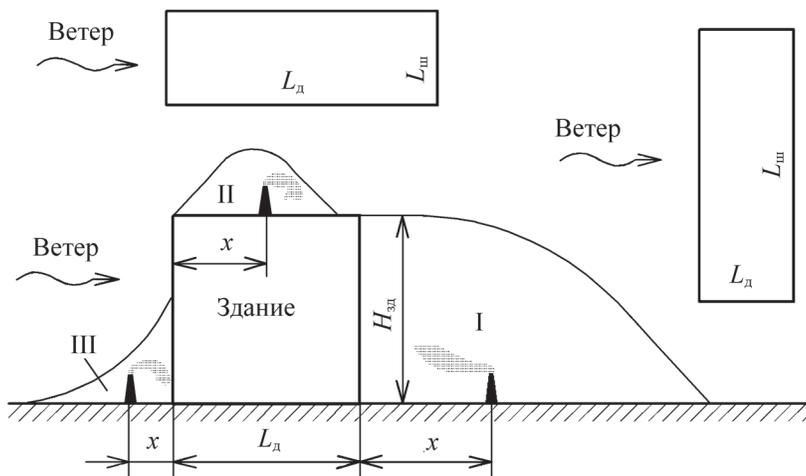


Рис. 2.3. Схема расположения зон аэродинамической тени

Далее приведен порядок расчета рассеивания выбросов с учетом влияния застройки по [3].

1. Определяются габариты зон аэродинамической тени. Максимальная высота и протяженность зон составляют:

$$\begin{aligned} H_I &= H_{зд}; & L_I &= 4L^*; \\ H_{II} &= H_{зд} + 0,4 L_d; & L_{II} &= L_d \text{ при } L_d < L^*; \\ H_{II} &= H_{зд} + 0,4 L^*; & L_{II} &= 2L^* \text{ при } L_d > L^*; \\ H_{III} &= 0,5 L^*; & L_{III} &= L^*. \end{aligned}$$

Здесь  $L^* = H_{зд}$  при  $H_{зд} < L_{ш}$ ;  $L^* = L_{ш}$  при  $H_{зд} > L_{ш}$ ;  $L_d$  — размер здания по направлению ветра;  $L_{ш}$  — размер здания в направлении, перпендикулярном ветровому потоку, в соответствии со схемой на рис. 2.3.

Границы зон находят с учетом коэффициентов  $f_i$  и расстояний  $x$  от стены здания:

$$h_I(x) = H_{зд} f_I(x); \quad h_{II}(x) = H_{зд} + f_{II}(x) L^*; \quad h_{III}(x) = L^* f_{III}(x).$$

Значения коэффициентов  $f_I, f_{II}, f_{III}$  принимаются по графикам (рис. 2.4).

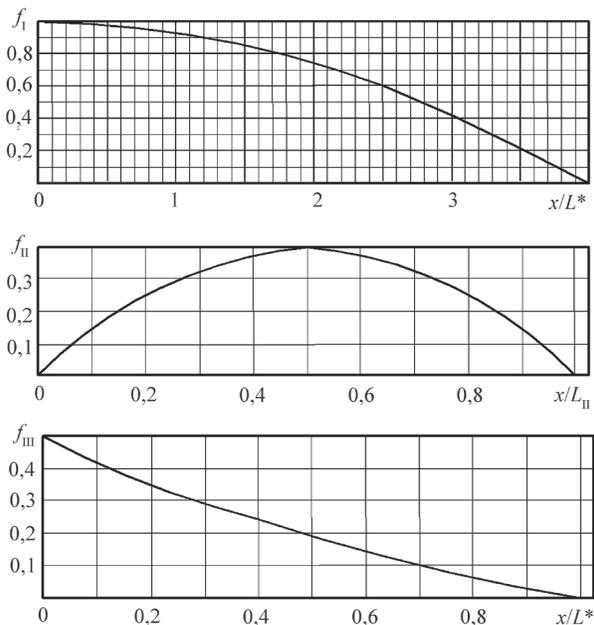


Рис. 2.4. Значения коэффициентов  $f_I, f_{II}, f_{III}$  для определения высот зон  $h$ :

$$h_I(x) = H_{зд} f_I(x); \quad h_{II}(x) = H_{зд} + f_{II}(x) L^*; \quad h_{III}(x) = f_{III}(x) L^*$$

Зная координаты и высоту ИВВ, можно установить, находится ли ИВВ в зоне тени (рис. 2.5).

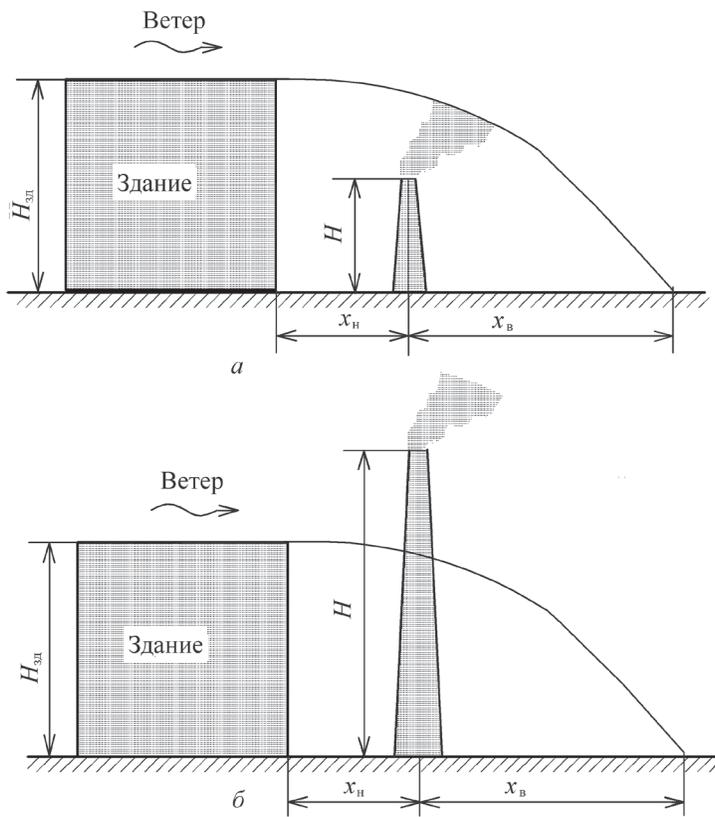


Рис. 2.5. Схемы расположения ИВВ относительно здания:  
 а — в зоне аэродинамической тени; б — вне зоны аэродинамической тени

2. Для каждого ИВВ находим максимальные концентрации  $c_m$ , расстояния  $x_m$  и опасную скорость ветра  $u_m$  по методике, изложенной в разделе 2.2.

3. Учет влияния застройки производится с помощью коэффициента  $\hat{\eta}$ :

$$\hat{\eta}_m = r_3 \hat{\eta} s \zeta_m + s_1 (1 - \zeta_m),$$

где  $r_3$  учитывает изменение опасной скорости  $u_m$  при затенении ИВВ зданием; коэффициенты  $s$  и  $\zeta_m$  учитывают влияние турбулентной диффузии и колебания ветрового потока;  $s_1$  имеет тот же смысл, что и в методике расчета рассеивания выбросов от одиночного источника, приведенной в разделе 2.2;  $\tilde{\eta}$  учитывает изменение структуры воздушного потока.

Значения вспомогательных коэффициентов находим с помощью графиков (рис. 2.6–2.9). Опасная скорость ветра с учетом влияния застройки  $\hat{u}_m$  рассчитывается по формуле (п. 19) с заменой  $H$  на  $H_{зд}$  при определении типа выброса по величине параметра  $f = 1630V^2 / (p^3 H^2 \Delta T)$ .

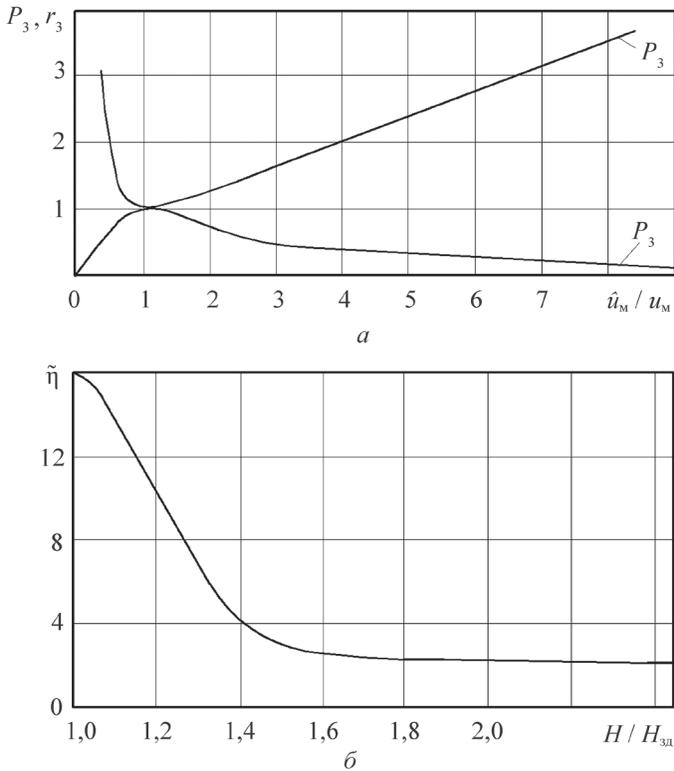


Рис. 2.6. Определение коэффициентов:  
 $a$  —  $r_3, P_3$ ;  $\tilde{b}$  —  $\tilde{\eta}$

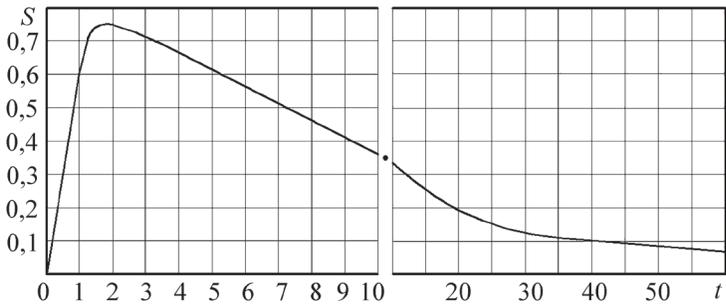


Рис. 2.7. Значения коэффициента  $S = f(t)$ , где  $t = L_1 \sqrt{\bar{\eta}} / (1,1 P_{3x_m})$

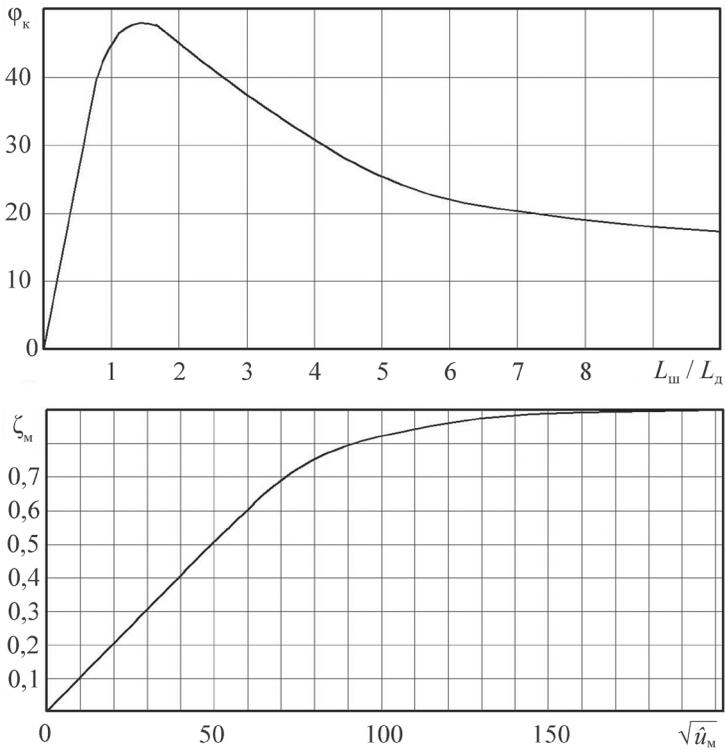


Рис. 2.8. Значения коэффициентов:

$a$  —  $\varphi_k$ ;  $b$  —  $\zeta_m$

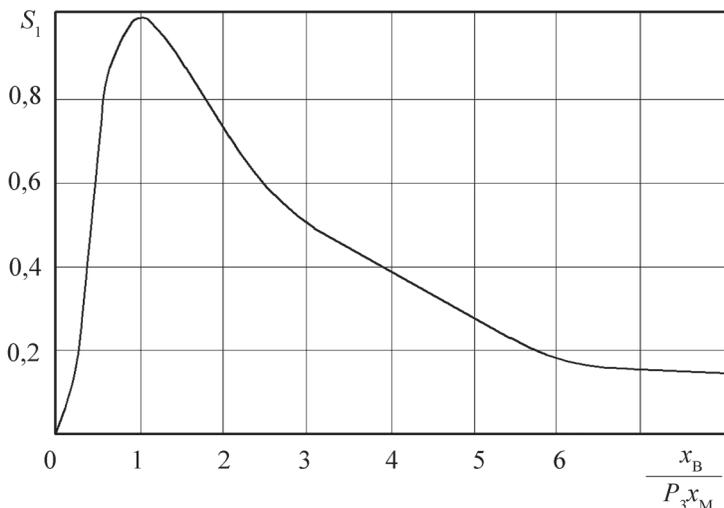


Рис. 2.9. Определение коэффициента  $S_1$

4. Определяем максимальную концентрацию  $\widehat{c}_m$  с учетом застройки:

$$\widehat{c}_m = c_m \widehat{\eta}_m.$$

5. Расстояние  $x_m$  до точки с концентрацией  $\widehat{c}_m$  определяется по формулам:

при  $H/H_{зд} < 1$

$$\text{при } x_B / (P_3 x_M) \geq 1 \quad \widehat{x}_m = P_3 x_M;$$

$$\text{при } x_B / (P_3 x_M) \leq 1 \quad \widehat{x}_m = x_B;$$

при  $H/H_{зд} > 1$

$$\widehat{x}_m = \frac{\frac{1}{\zeta_M} + \frac{v_1 x_B}{P_3 x_M} - 1}{\frac{1}{\zeta_M} + v_1 - 1}.$$

Расстояние  $x_B$  определяется по рис. 2.5, а значение коэффициента  $v_1$  по формуле:

$$v_1 = r_3 \widehat{\eta}_m S.$$

## **3. ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ РАСЧЕТОВ**

### **3.1. Общая характеристика программы**

Программа расчета рассеивания в атмосфере вредных веществ *ИМКАГ* разработана в соответствии с ОНД-86 [3] и позволяет определить концентрацию вредного вещества (пыль или газ) в заданной точке приземного слоя атмосферы от одиночного ИВВ или суммарную концентрацию от нескольких ИВВ с выделением доли загрязнения атмосферы от каждого источника.

Расчеты могут быть выполнены для наиболее неблагоприятных условий рассеивания выбросов:

- при опасной скорости ветра;
- для заданной величины скорости ветра;
- для заданного пользователем программы азимута направления ветра или для заданных пределов его изменения.

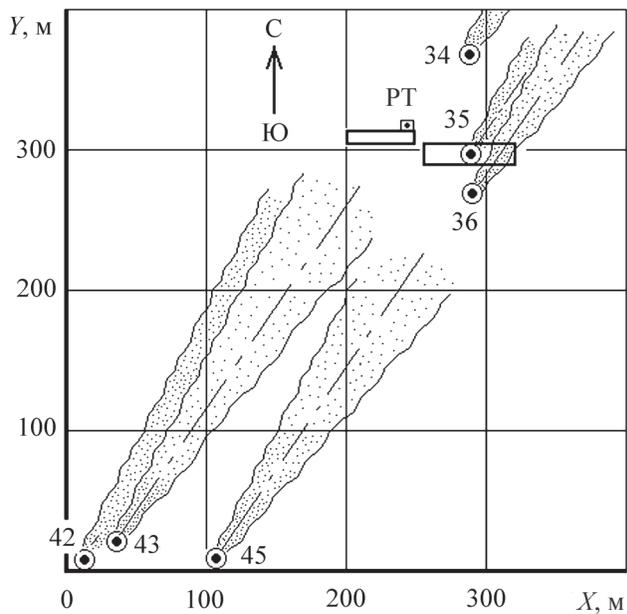
В качестве расчетной точки (РТ) пользователь может задать любую интересующую его точку, например, на границе зоны жилой застройки, в пределах зоны жилой застройки, в пределах промплощадки, в месте размещения предполагаемого воздухозабора для систем приточной вентиляции. Программа позволяет в диалоговом режиме выполнять расчеты для нескольких РТ без повторного ввода всех исходных данных.

Программа не предназначена для расчетов рассеивания в условиях сильно пересеченной местности (при уклоне более 50 м на 1 км), а также при расположении ИВВ в циркуляционных зонах вблизи здания.

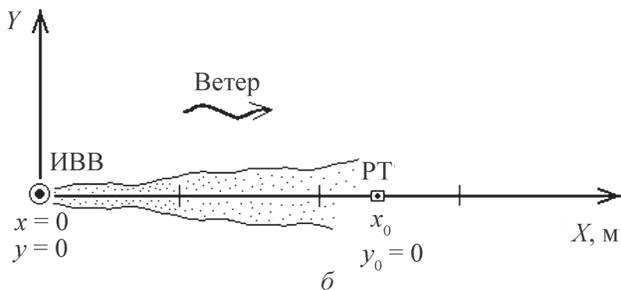
### **3.2. Подготовка исходных данных**

При подготовке исходных данных необходимо разработать схему размещения ИВВ. Пример такой схемы приведен на рис. 3.1. Координатная ось *Y* на схеме должна быть ориентирована на север, ось *X* — на восток. На схеме показано распространение следа облака

вредных веществ от источников при одном из неблагоприятных направлений ветра для заданной РТ.



*a*



*б*

Рис. 3.1. Примеры оформления схемы размещения ИВВ:

*a* — группы; *б* — одиночного источника; РТ — расчетная точка; 34, 35, 36, 42, 43, 45 — номера ИВВ по генплану промплощадки

Для условий примера ИВВ № 34, 35 и 36 не оказывают влияния на загрязнение приземного слоя и повышение концентрации вредных веществ в РТ (рис. 3.1, а). Поэтому в расчетах будет учитываться загрязнение атмосферного воздуха от источников № 42, 43, 45.

Для расчета рассеивания выбросов от одиночного источника схема может быть упрощена. Источник выброса можно поместить в начало координат, а РТ — на одной из координатных осей (рис. 3.1, б). Неблагоприятное направление ветра в последнем случае — вдоль линии, соединяющей ИВВ и РТ. Азимут направления ветра определяется углом  $A_0$ , отсчитываемым по часовой стрелке в градусах от северного направления (рис. 3.2). Например, для ветра восточного направления  $A_0 = 90^\circ$ , для южного направления  $A_0 = 180^\circ$ . Для одиночного источника, схема размещения которого показана на рис. 3.1, б, значение азимута  $A_0 = 270^\circ$ .

Программа позволяет выполнять расчеты рассеивания вредных веществ для двух вариантов исходных данных:

- при заданном азимуте направления ветра;
- при задании произвольных пределов изменения азимутов ветра, например:  $A_{01}, A_{02}$ .

В этом случае задается число  $N$  частей, на которое разбивается диапазон изменения направлений ветра. Например, при заданных пределах  $0^\circ \dots 360^\circ$  и значении  $N = 4$  программа вычисляет концентрацию вредных веществ в РТ при северном направлении ветра ( $A_0 = 0^\circ$ ), при восточном ( $A_0 = 90^\circ$ ), южном ( $A_0 = 180^\circ$ ) и западном ( $A_0 = 270^\circ$ ).

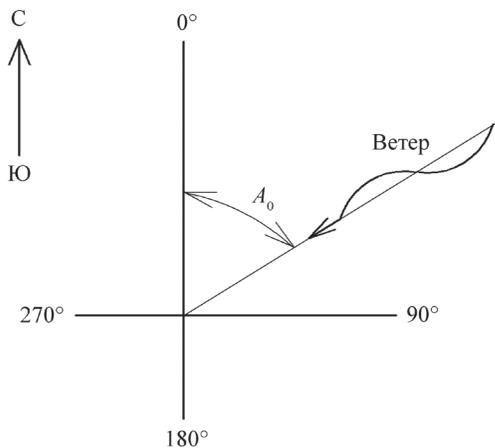


Рис. 3.2. Определение азимута направления ветра  $A_0$

По каждому ИВВ можно использовать один из предлагаемых видов данных (табл. 3.1). Виды данных «а» и «б» программа приводит при распечатке результатов к виду «в».

Т а б л и ц а 3.1

**Исходные данные для расчета рассеивания выбросов**

Вводимая величина	Условное обозначение	Единицы измерений
Избыточная температура (см. п. 2.2)	$\Delta T$	$^{\circ}\text{C}$
Эффективность пылеулавливания (для источников пылевых выбросов)	$\eta$	%
Координаты ИВВ (для фонаря — центр проема)	$X, Y$	м
Координаты РТ	$X_0, Y_0$	м
Азимут направления ветра (или пределы изменения)	$A_0$ $A_{01}, A_{02}$	град.
Допустимое повышение концентрации вредного вещества в приземном слое атмосферы в РТ	$\Phi$	$\text{мг}/\text{м}^3$
Характеристики выброса (один из вариантов):		
а) концентрация вредного вещества на выходе из устья трубы или проема фонаря;	$c_{\text{вых}}$	$\text{мг}/\text{м}^3$
скорость выхода загрязненного воздуха или газа через устье трубы или проем фонаря;	$w_0$	м/с
б) концентрация вредного вещества на выходе из устья трубы или проема фонаря;	$c_{\text{вых}}$	$\text{мг}/\text{м}^3$
расход загрязненного воздуха или газа;	$V$	$\text{м}^3/\text{ч}$
в) количество выбрасываемого вредного вещества;	$M$	г/с
расход загрязненного воздуха или газа	$V$	$\text{м}^3/\text{с}$
Геометрические размеры в зависимости от типа ИВВ:		
отметка устья трубы или центра проема фонаря	$H$	м
диаметр устья (для круглых труб)	$D$	м
размеры устья (для прямоугольных труб)	$A, B$	м
размеры проема (для фонаря — рис. 3.3)	$A, B$	м

Для аэрационных фонарей большой из введенных размеров  $A$  и  $B$  программа идентифицирует как длину фонаря (рис. 3.3). При выбросе вредных веществ через два проема фонаря их следует рассматривать как два источника.

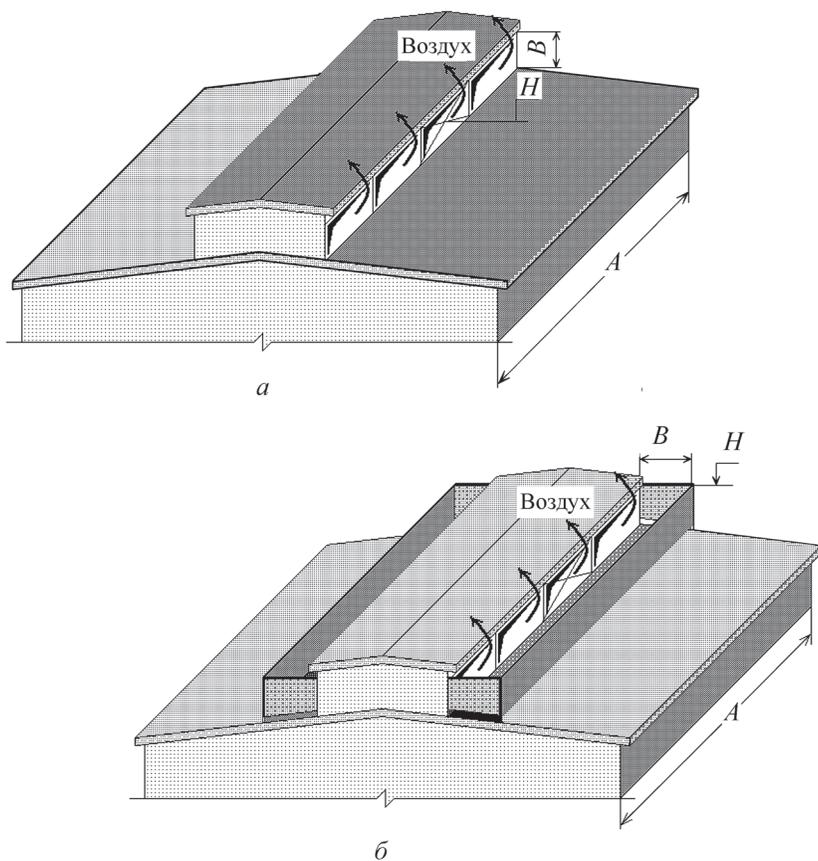


Рис. 3.3. Определение геометрических характеристик проемов фонаря:  
 $a$  — без ветроотбойных щитов;  $b$  — с ветроотбойными щитами

## 4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УЩЕРБА

Ежегодно на охрану окружающей среды тратятся огромные средства. Однако этого недостаточно, чтобы полностью предотвратить ущерб, наносимый выбросами вредных веществ. Загрязнение окружающей среды приводит к возникновению двух типов затрат.

**Затраты на предупреждение загрязнений** включают расходы на создание систем очистки и на изменение технологии в целях уменьшения выбросов вредных веществ. Сюда входят также затраты на сбор, удаление и захоронение отходов, а также потери, связанные с отчуждением земель.

**Затраты, вызываемые воздействием загрязнений**, определяются расходами на медицинское обслуживание заболевших в результате загрязнения окружающей среды, а также на компенсацию потерь от снижения производительности труда и невыхода на работу по болезни. Сумма этих двух типов затрат называется экономическим ущербом. Ниже приводится методика расчета экономического ущерба по укрупненным показателям в соответствии с [9].

Величина ущерба  $У$  определяется по формуле:

$$У = \gamma \sigma f M,$$

где  $\gamma$  — константа, руб./т выброса;  $\gamma = 2,4k_{и}k_{тн}$ ;  $k_{и}$  — коэффициент инфляции к ценам 1984 г.;  $k_{тн}$  — коэффициент текущей инфляции;  $\sigma$  — показатель опасности загрязнения, принимаемый в зависимости от типа загрязняемой территории;  $f$  — коэффициент, учитывающий условия рассеивания;  $M$  — приведенная масса годового выброса, т/год.

Укажем значения показателя  $\sigma$  в зависимости от типа загрязняемой территории:

- |  |           |
|--|-----------|
| — промышленные площадки                                | 0,4       |
| — населенные пункты плотностью населения $n$ , чел./Га | 0,1n [9]. |

Коэффициент  $f$  определяется в зависимости от скорости витания: для газообразных и легких примесей ( $w_b < 1$  см/с)

$$f = \frac{100}{100 + \varphi H} \cdot \frac{4}{1 + u};$$

для частиц при  $w_b = 1 \dots 20$  см/с

$$f = \left( \frac{100}{60 + \varphi H} \right)^2 \cdot \frac{4}{1 + u};$$

для частиц при  $w_b > 20$  см/с значение  $f = 10$ ,

где  $\varphi$  — температурный коэффициент,  $\varphi = 1 + \Delta T/75$ ;  $H$  — высота устья источника, м;  $u$  — среднегодовая скорость ветра, м/с; при отсутствии данных  $u = 3$  м/с.

Приведенная масса годового выброса  $M$  рассчитывается по формуле:

$$M = \sum A_i m_i,$$

где  $A_i$  — показатель относительной опасности вредного вещества;  $m_i$  — масса  $i$ -го выброса, т/год.

Значения показателя  $A_i$  для некоторых веществ приведены в табл. 4.1.

Ущерб от загрязнения воздушного бассейна частично компенсируется взиманием платы за выбросы. В соответствии с действующими нормативными документами установлены нормативы платы за выбросы для загрязняющих вредных веществ, с учетом которых производят расчет платы  $\Pi$ :

$$\Pi = y_i M_i k_1 k_2 k_3,$$

где  $y_i$  — норматив платы за выбросы, руб./т загрязняющих вредных веществ;  $M_i$  — масса примеси  $i$ -го загрязняющего вещества в течение года, т/год;  $k_1$  — повышающий федеральный коэффициент (в 2017 г.  $k_1 = 2,56$ ; в 2018 г. —  $k_1 = 2,67$  [10]);  $k_2$  — дополнительный коэффициент при выбросе в загрязненный воздух города,  $k_2 = 1,2$ ;  $k_3$  — коэффициент, учитывающий экологические факторы,  $k_3 = 2$ ).

Повышающие коэффициенты приведены согласно данным постановления Правительства РФ от 19.11.2014 № 1219 «О коэффициентах к нормативам платы за выбросы в атмосферный воздух»; данные

о нормативах платы для некоторых загрязняющих веществ — согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 24 декабря 2014 № 1471. Значения показателя  $A_i$  для некоторых загрязняющих веществ приведены в табл. 4.1.

Т а б л и ц а 4.1

**Значения показателя  $A_i$  и нормативы платы за выбросы [11]**

Вид ВВ	$A_i$	Норматив платы $y_b$ , руб./т	
		В пределах установленных допустимых нормативов	В пределах установленных лимитов выбросов
Азота диоксид $\text{NO}_2$	21,1	52	260
Бенз(а)пирен	$12,6 \cdot 10^6$	2 049 801	10 249 005
Марганец Mn и его неорганические соединения	2 236	2 050	10 250
Пыль каменноугольная	100	13,7	68,5
Пыль неорганическая при содержании $\text{SiO}_2$ :			
выше 70 %	83,2	41	205
20–70 %	83,2	21	105
ниже 20 %	83,2	13,7	68,5
Ртуть Hg	31 620	6 833	34 165
Серы диоксид $\text{SO}_2$	22	21	105
Свинец Pb и его соединения	22 400	6 833	34 165

## **5. ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА ВЫБРОСАМИ ПЫЛИ**

### **5.1. Физические свойства и дисперсный состав пыли**

Пылью называют дисперсную систему, состоящую из мельчайших твердых частиц, находящихся в газообразной среде во взвешенном состоянии. Система является аэрозолем: твердые частицы в ней составляют дисперсную фазу, а воздух — дисперсионную среду.

Пыль образуется в результате механического измельчения твердых тел, при горении топлива, конденсации паров, химическом взаимодействии газов с образованием твердого продукта. Пыль в основном сохраняет свойства тех веществ, из которых она образуется, но приобретает неизмеримо большую активность за счет громадного увеличения площади суммарной поверхности.

При выборе пылеулавливающего оборудования необходимо учитывать основные свойства улавливаемой пыли. Прежде всего следует определить форму и структуру твердых частиц, удельный вес, химический состав, влажность, абразивность и смачиваемость пыли водой. Сведения о некоторых наиболее распространенных видах пыли представлены в конце пособия (прил. 2–6).

Для обеспечения эффективного пылеулавливания тип пылеуловителя должен соответствовать характеристике пыли по размерам (дисперсности) составляющих ее частиц. В зависимости от дисперсного состава установлены следующие классификационные группы пыли:

- I — очень крупнодисперсная (угольный порошок);
- II — крупнодисперсная (мелкозернистый кварцевый песок);
- III — среднедисперсная (цемент);
- IV — мелкодисперсная (кварц молотый пылевидный);
- V — очень мелкодисперсная (атмосферная пыль).

Метод оценки дисперсности пыли только по размерам частиц не является полноценным, так как эффективность отделения пыли

в пылеуловителях определяется не столько размерами, сколько массой (инерцией) частиц и их парусностью (витанием). Поэтому при построении дисперсионных графиков на классификационной номограмме используются не диаметры частиц пыли, а скорости их витания.

**Скорость витания** — это скорость осаждения пылинки в неподвижной среде. Скорость витания отражает совместное влияние размеров частицы, ее веса и формы на эффективность работы пылеуловителя. Поэтому она является одним из важных свойств пылевых частиц. В настоящее время расчет скорости витания возможен только приближенными методами. Это связано с тем, что она зависит от множества параметров: от размера частиц, плотности вещества, формы пылевых частиц и гидродинамического режима взаимодействия частицы с воздухом, определяемого значением числа Рейнольдса ( $Re$ ).

Значение числа  $Re$  определяется по формуле

$$Re = \frac{VD}{\nu_{\text{окр}}}, \quad (5.1)$$

где  $V$  — скорость оседания пылинки, м/с;  $D$  — диаметр пылинки, м;  $\nu_{\text{окр}}$  — коэффициент кинематической вязкости окружающей среды; для воздуха с температурой 20 °С значение  $\nu_{\text{окр}} = 15 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

Скорость витания шарообразной частицы  $V_0$  можно найти из условия равенства веса частицы  $G$  и силы сопротивления воздушной среды  $F$ :

$$G = F.$$

Кажущийся вес шаровой частицы в воздушной среде

$$G = \frac{1}{6} \pi D^3 (\rho_p - \rho_{\text{окр}}) g, \quad (5.2)$$

где  $\rho_p$  — плотность вещества пыли, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{окр}}$  — плотность окружающего воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Сопротивление воздушной среды определяется соотношением

$$F = \psi \frac{V_0^2 \rho_{\text{окр}}}{2} S, \quad (5.3)$$

где  $\psi$  — коэффициент сопротивления частицы;  $S$  — площадь миделевого сечения частицы,  $\text{м}^2$ ; для частицы шаровой формы  $S = \pi D^2/4$ .

При постоянной скорости свободного падения частицы должно выполняться равенство

$$\frac{1}{6} \pi D^3 (\rho_i - \rho_{\text{окр}}) g = \psi \frac{V_o^2 \rho_{\text{окр}}}{2} S,$$

откуда

$$V_o^2 = \frac{8D}{6\psi} \frac{\rho_n - \rho_{\text{окр}}}{\rho_{\text{окр}}}. \quad (5.4)$$

Для определения коэффициента сопротивления шарообразных частиц при  $\text{Re} \leq 1$  используется формула Стокса:

$$\psi = 24 / \text{Re}, \quad (5.5)$$

а скорость витания шаровой частицы определяется по соотношению

$$V_i = \frac{gD^2}{18\nu_{\text{окр}}} \left( \frac{\rho_n}{\rho_{\text{окр}}} - 1 \right). \quad (5.6)$$

В интервале  $1 \leq \text{Re} \leq 1000$  для определения коэффициента сопротивления  $\psi$  может быть использована формула Л. С. Клячко:

$$\psi = 24(1 + 1/6 \text{Re}^{2/3}) / \text{Re}. \quad (5.7)$$

В последнем случае для расчета скорости витания необходимо использовать итерационные методы. Результаты расчета скорости витания шаровых частиц в воздушной среде по уравнению (5.6) представлены на рис. 5.1.

Для частиц, форма которых отличается от шарообразной, скорость витания  $V_{\text{вит}}$  находится как

$$V_{\text{вит}} = kV_o, \quad (5.8)$$

где  $k$  — коэффициент, учитывающий форму частиц.

Значения поправочного коэффициента  $k$ , учитывающего форму частиц, для практических расчетов можно принимать по данным, приведенным в [12]:

Форма частицы	Значение $k$
Шар.....	1
Округлая с неровностями .....	0,64

Куб . . . . .	0,58
Продолговатое тело . . . . .	0,57
Пластинка . . . . .	0,45
Удлиненная пластинка . . . . .	0,35

Классификационная группа пыли определяется путем построения графика ее дисперсного состава на номограмме (рис. 5.2). Этот график называют классификационной характеристикой. Сначала находим скорости витания для частиц каждого размера расчетным путем или с помощью графика (рис. 5.1).

Построение классификационной характеристики производят следующим образом. На горизонтальной шкале откладывают скорость витания частиц данной фракции, а на вертикальной шкале — процентное содержание этой фракции. Используются данные о фракционном составе пыли, начиная с частиц меньшего размера. Таким образом, на основании дифференциального распределения фракций частиц пыли в % по массе находится интегральное распределение, показывающее содержание в пыли частиц с размерами от нуля до размеров данной фракции включительно. В результате получаем ряд точек, соединяя которые, можно построить классификационную характеристику. Область, в которой она располагается, показывает, к какой группе относится данная пыль. Полученные данные используются при выборе класса и типа пылеуловителя.

Рассмотрим пример для пыли, содержащейся в местном отсеке от пескоструйной камеры в литейном цехе. Плотность пыли составляет  $2,6 \text{ г/см}^3$  (табл. 5.1).

Таблица 5.1

**Характеристика пыли для условий примера**

Вид распределения частиц	Распределение фракций (% по массе) при размере частиц, мкм					
	до 5	5–10	10–20	20–40	40–60	> 60
Дифференциальный	5	14	25	17	0	29
Интегральный	5	19	44	61	71	100

Для пыли с плотностью вещества, отличающейся от стандартной величины  $2,5 \text{ г/см}^3$ , классификационная группа определяется также с помощью номограммы на рис. 5.2 по скорости витания частиц. Например, для пыли, удаляемой местным отсосом от заточного станка, плотность вещества частиц составляет  $4 \text{ г/см}^3$ . Коэффициент, учитывающий влияние формы для частиц округлой формы с неровностями, равен  $k = 0,64$ .

Результаты определения скорости витания частиц пыли для условий примера приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

**Результаты определения скорости витания**

Вид характеристики пыли	Скорость витания, см/с при размере частиц, мкм					
	до 5	5–10	10–20	20–40	40–60	> 60
Дифференциальное распределение фракций, % по массе	13	12	23	23	22	7
Интегральное распределение фракций, % по массе	13	25	48	71	93	100
Средний размер частиц, мкм	2,5	7,5	15	30	50	60
Скорость витания шаровых частиц $V_{0,}$ определенная по графику на рис. 5.1, см/с	0,08	0,8	2,5	10	29	40
Скорость витания частиц по формуле (5.8), см/с	0,05	0,5	1,6	6,4	19	26

Интегральное распределение частиц в зависимости от размера, нанесенное на номограмму, представлено на рис. 5.3 линией  $I$  и свидетельствует, что пыль относится к третьей классификационной группе.

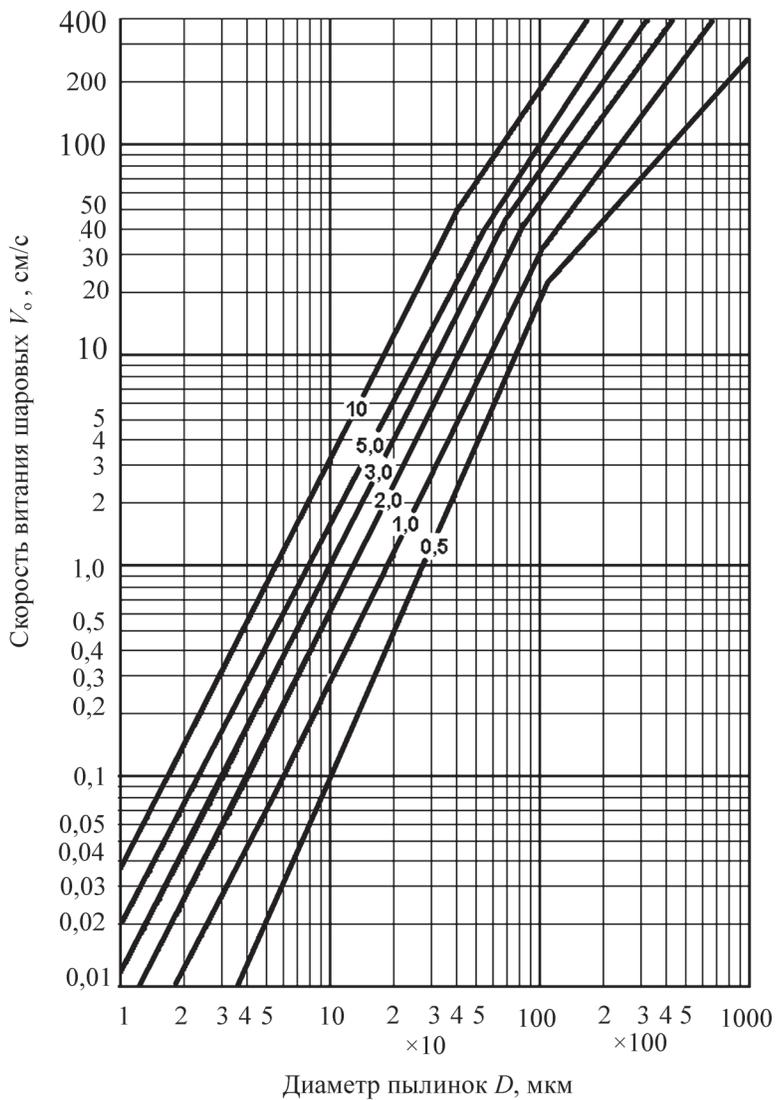


Рис. 5.1. Скорость витания шаровых частиц  $V_0$  с плотностью вещества 0,5–10 г/см<sup>3</sup> в воздушной среде

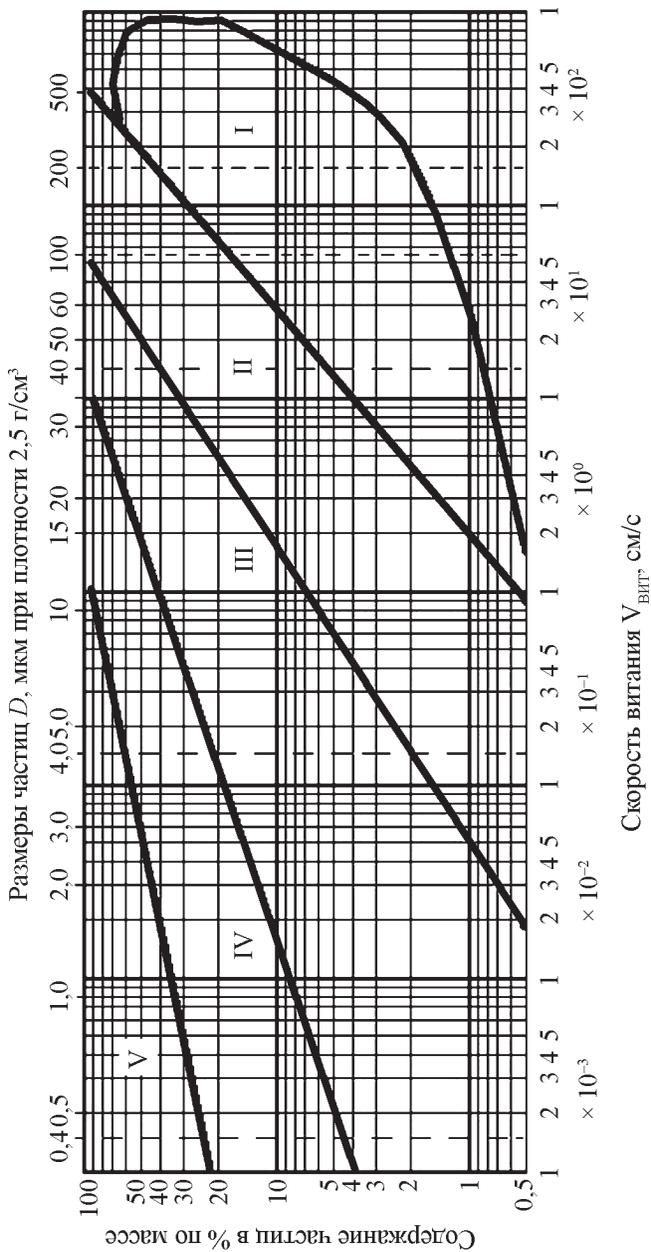


Рис. 5.2. Номограмма для определения классификационной группы пыли

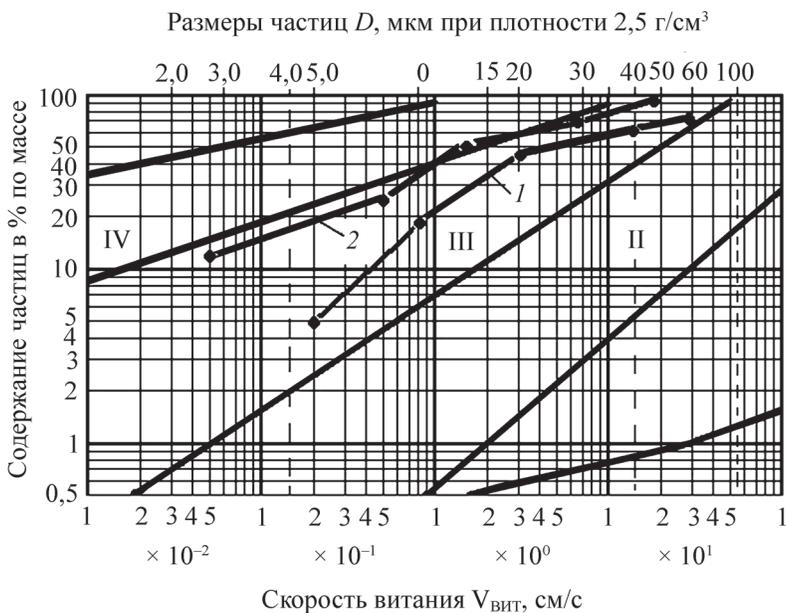


Рис. 5.3. Пример определения классификационной группы пыли:

1 — пыль из пескоструйной камеры; 2 — пыль от заточного станка

Интегральное распределение частиц пыли в зависимости от скорости витания представлено линией 2 на рис. 5.3, из которого видно, что данная пыль также относится к третьей классификационной группе.

Повышенная химическая активность пыли и ее способность принимать электрические заряды могут служить причиной воспламенения и взрыва пылевоздушной смеси. По взрыво- и пожароопасным свойствам пыли подразделяются на четыре класса:

— 1-й класс — наиболее взрывоопасные с нижним пределом взрывной концентрации меньше  $15 \text{ г/м}^3$ ;

— 2-й класс — взрывоопасные с нижним пределом взрывной концентрации  $16\text{--}65 \text{ г/м}^3$ ;

— 3-й класс — легковоспламеняющиеся и наиболее пожароопасные с температурой воспламенения ниже  $250^\circ\text{C}$ , взрывающиеся при концентрациях больше  $65 \text{ г/м}^3$ ;

— 4-й класс — воспламеняющиеся и пожароопасные пыли с температурой воспламенения выше 250 °С [12].

Следует иметь в виду, что взрыв пыли может произойти, когда одновременно возникают следующие условия:

— концентрация пыли находится между нижним и верхним пределом взрывной концентрации;

— в зоне пылевоздушной смеси имеется источник тепла или открытого огня, достаточный по мощности и температуре для ее воспламенения;

— имеется достаточное количество кислорода для поддержания начавшегося горения.

Проектировщик должен принять специальные меры, устраняющие эти условия, обеспечив безопасность эксплуатации пылеуловителя. Характеристика некоторых видов взрыво- и пожароопасных пылей приведена в конце пособия (прил. 6). Нельзя оставить без внимания и такие свойства пыли, как химическая активность воздействия на материал пылеуловителя, способность абсорбировать пары воды и образовывать плотные быстро разрастающиеся наслоения на стенках и рабочих элементах пылеуловителя. Только комплексное рассмотрение всех физико-технических свойств пыли может обеспечить правильный выбор, точный инженерный расчет и эффективную работу пылеочистного устройства.

## **5.2. Начальная запыленность воздуха перед пылеуловителем**

Самым надежным способом определения начальной запыленности воздуха перед пылеуловителем следует признать проведение специальных промышленных испытаний. Ограниченные возможности применения этого способа заставляют во многих случаях практического подбора пылеуловителей прибегать к использованию имеющихся данных, полученных при эксплуатации пылеуловителей в аналогичных условиях. Большинство таких данных относится к характеристике запыленности воздуха после различных аспирационных укрытий. Поэтому для нахождения по ним усредненной концентрации пыли в сборном воздухопроводе

перед пылеуловителем  $P_{\text{ср}}$ , мг/м<sup>3</sup>, приходится находить средневзвешенное по расходу значение по формуле

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_1 L_1 + P_2 L_2 + \dots + P_n L_n}{L_1 + L_2 + \dots + L_n}, \quad (5.9)$$

где  $P_1, P_2, \dots, P_n$  — концентрации пыли в воздуховодах местных отсосов, мг/м<sup>3</sup>;  $L_1, L_2, \dots, L_n$  — расходы воздуха, удаляемого местными отсосами от аспирационных укрытий, м<sup>3</sup>/ч.

Рассмотрим пример для аспирационной системы, объединяющей местные отсосы (табл. 5.3).

Т а б л и ц а 5.3

### Характеристики местных отсосов

№ п/п	Назначение местного отсоса	Количество единиц оборудования	Расход отсасываемого воздуха, м <sup>3</sup> /ч		Концентрация пыли в местном отсосе $P_i$ , мг/м <sup>3</sup>
			на единицу	всего $L_i$	
1	От большой шаровой мельницы	2	1 800	3 600	11 500
2	От малой шаровой мельницы	3	1 400	4 200	9 500
3	От укрытий перегрузочных узлов	5	1 000	5 000	500

Усредненная концентрация пыли в сборном воздуховоде перед пылеуловителем по соотношению (5.9) составит

$$P_{\text{ср}} = \frac{11500 \cdot 3600 + 9500 \cdot 4200 + 500 \cdot 5000}{3600 + 4200 + 5000} = 6500 \text{ мг/м}^3.$$

### 5.3. Необходимая эффективность очистки воздуха в пылеуловителе

Степень очистки воздуха от пыли, или эффективность пылеулавливания, выражается отношением веса уловленной пыли к весу пыли, поступившей в пылеуловитель:

$$\eta = \frac{G_{\text{ул}}}{G_{\text{нач}}} 100 \%, \quad (5.10)$$

где  $G_{\text{ул}}$ ,  $G_{\text{нач}}$  — вес пыли, уловленной и поступившей в пылеуловитель за единицу времени, кг.

Эффективность пылеулавливания может быть также определена следующим образом:

$$\eta = \frac{P_{\text{нач}} - P_{\text{кон}}}{P_{\text{нач}}} 100 \%, \quad (5.11)$$

где  $P_{\text{нач}}$ ,  $P_{\text{кон}}$  — концентрация пыли в воздухе до и после пылеуловителя, мг/м<sup>3</sup>.

Если между сечениями, в которых замеряются  $P_{\text{нач}}$  и  $P_{\text{кон}}$ , имеются значительные подсосы воздуха, то эффективность пылеулавливания следует определять из отношения

$$\eta = \frac{P_{\text{нач}} L_{\text{нач}} - P_{\text{кон}} L_{\text{кон}}}{P_{\text{нач}} L_{\text{нач}}} 100 \%, \quad (5.12)$$

где  $L_{\text{нач}}$ ,  $L_{\text{кон}}$  — расходы воздуха до пылеуловителя и после него, м<sup>3</sup>/ч.

В аспирационных системах, в которых воздух после очистки выбрасывается в атмосферу, необходимая эффективность его очистки  $\eta_{\text{н}}$  обуславливается начальной концентрацией пыли и величиной допустимого ее содержания в выбросе на выходе в атмосферу  $P_{\text{вых}}$ , мг/м<sup>3</sup>:

$$\eta_{\text{н}} = \frac{P_{\text{ср. н}} - P_{\text{вых}}}{P_{\text{ср. н}}} 100 \%. \quad (5.13)$$

Определение величины  $P_{\text{вых}}$  рассмотрим на конкретном примере. Пусть концентрация пыли в аспирационном воздухе составляет  $P_{\text{ср. н}} = 6500$  мг/м<sup>3</sup>, допустимое повышение концентрации пыли в приземном слое атмосферы  $\Phi = 0,5$  мг/м<sup>3</sup>, фактическое повышение концентрации пыли на основании расчета рассеивания  $c_x = 3$  мг/м<sup>3</sup>,

то есть в  $3/0,5 = 6$  раз превышает допустимое. Следовательно, концентрацию пыли на выбросе в атмосферу следует уменьшить в шесть раз до величины  $P_{\text{вых}} = 6500/6 \approx 1100 \text{ мг/м}^3$ . Требуемая эффективность очистки согласно (5.13) определится как

$$100 \% = 83 \%$$

#### **5.4. Предварительный выбор способа очистки воздуха**

Согласно приведенной в [13, кн. 1] методике подбора пылеуловителей необходимо определять требуемый класс пылеуловителей в зависимости от группы пыли по дисперсности (табл. 5.4).

Таблица 5.4

##### **Классификация пылеуловителей по степени эффективности**

Класс пылеуловителей	Эффективность, %, в зависимости от группы пыли по дисперсности				
	V	IV	III	II	I
I	< 80	99,9–80	—	—	—
II	—	92–45	99,9–92	—	—
III	—	—	99–80	99,9–99	—
IV	—	—	—	99,9–95	> 99,9
V	—	—	—	—	> 99,9

Как видно, при требуемой эффективности пылеулавливания 83 % и группе пыли по дисперсности III необходимую степень очистки воздуха от пыли могут обеспечить пылеуловители II и III класса.

В зависимости от требуемого класса пылеуловителя и группы пыли по дисперсности можно выбрать тип пылеуловителя (табл. 5.5).

## Основная номенклатура пылеуловителей [13, кн. 2]

Тип пылеуловителя	Класс эффективности	Область применения в зависимости от группы пыли по дисперсности					Сопротивление, Па
		I	II	III	IV	V	
<b>Гравитационные</b>							
Пылеосадочные камеры	V	+	+	—	—	—	до 200
<b>Инерционные</b>							
Одиночные циклоны ЦН-15 и ЦН-24	V	+	+	—	—	—	до 750
Групповые циклоны ЦН-15	V	+	+	—	—	—	до 750
Циклоны высокой эффективности (одиночные) СКЦН-34	IV	—	+	+	—	—	до 1 200
Мокроплечные циклоны ЦВП	IV	—	+	+	—	—	до 800
Скоростные промыватели СИОТ	III	—	+	+	—	—	до 1 100
Струйные мокрые ПВМК, ПВМС, ПВМБ, ПВМКМА	III II	—	—	+	—	—	до 1 950 до 3 000
Капельные, типа «Вентури» (КМП)	II	—	—	+	+	—	до 4 000
<b>Тканевые</b>							
Рукавные фильтры	II	—	—	+	+	—	до 1 250
<b>Волокнистые</b>							
Уловители туманов, кислот и щелочей ФВГ-Т	II	—	—	—	+	—	до 1 000

Тип пылеуловителя	Класс эффективности	Область применения в зависимости от группы пыли по дисперсности					Сопро- тивление, Па
		I	II	III	IV	V	
<b>Электрические</b>							
Уловители пыли, туманов	II	-	-	-	+	-	до 100

### 5.5. Фракционная эффективность пылезадержания

Характерной особенностью работы пылеуловителей является различная избирательная способность к улавливанию не одинаковых по величине частиц пыли. Поэтому среднее значение эффективности пылезадержания не раскрывает возможностей пылеуловителей и не позволяет судить об эффективности их улавливания. Для полной характеристики пылезадерживающей способности пылеуловителя, а тем более для сравнения его с другими типами пылеуловителей требуются данные по фракционной эффективности пылезадержания. В табл. 5.5 приведены необходимые характеристики пылеуловителей.

Фракционная эффективность пылезадержания  $i$ -й фракции пыли определяется отношением

$$\eta_{\phi i} = \frac{g_i}{G_i} 100 \%, \quad (5.14),$$

где  $G_i$  — массовый расход пыли  $i$ -й фракции, поступающей с воздухом или газами на очистку, г/с;  $g_i$  — количество пыли  $i$ -й фракции, улавливаемой в единицу времени, г/с.

Тогда общая эффективность пылезадержания, выраженная через фракционные эффективности очистки, определится равенством:

$$\eta = \frac{\sum G_i \eta_{\phi i}}{\sum G_i}. \quad (5.15)$$

Здесь величина  $G_i$  находится по общему расходу пыли на входе в пылеуловитель  $M_0$  и доле этой фракции  $\delta_i$  % в соответствии с фракционным составом:

$$G_i = M_0 \delta_i / 100. \quad (5.16)$$

С учетом того, что  $\sum G_i = M_0$ , уравнение (5.16) примет вид

$$\eta = \sum \delta_i \eta_{\phi i}. \quad (5.17)$$

Определив общую эффективность пылезадержания, можно принять решение о выборе типа пылеуловителя и необходимости проектирования второй ступени очистки.

## 6. КОНСТРУКЦИИ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ

В этом разделе рассматриваются наиболее распространенные конструкции, применяемые для очистки воздуха от пыли [6–8; 10; 12; 13, кн. 2; 14–24].

### 6.1. Инерционные пылеуловители сухого типа

Из большого числа инерционных пылеуловителей сухого типа в системах вентиляции чаще всего применяют циклоны, причем главным образом цилиндрические и конические конструкции НИИОГАЗ [13, кн. 2]. Цилиндрические циклоны конструкции НИИОГАЗ серии ЦН (ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24) относятся к циклонам большой производительности. Они отличаются удлиненной цилиндрической частью и обладают небольшим сопротивлением (рис. 6.1). Основные размеры циклонов приведены в табл. 6.1. Цилиндрические циклоны в качестве единственной ступени очистки применяют преимущественно для улавливания сравнительно крупных частиц. Для этого целесообразно применять циклоны ЦН-15. При наличии ограничений по высоте могут применяться циклоны ЦН-15у, а при ограничениях по расходу энергии — циклоны ЦН-24.

Циклоны ЦН-15у и ЦН-11 отличаются меньшими габаритами по сравнению с циклонами ЦН-15 и более устойчивой работой на пылях, склонных к налипанию. Поэтому их эксплуатация оправдана при очистке воздуха с высокой концентрацией мелкодисперсной пыли или при улавливании средне и сильно слипающихся пылей. Эти циклоны также менее подвержены износу.

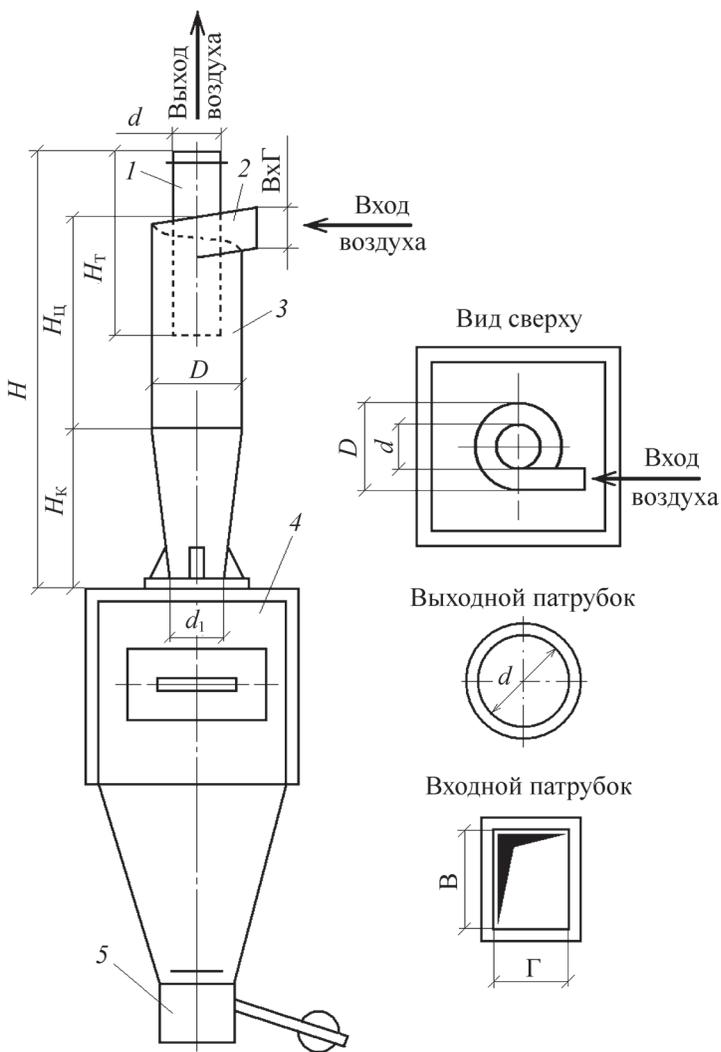


Рис. 6.1. Циклон конструкции НИИОГАЗ типа ЦН:

1 — выходной патрубок; 2 — входной патрубок; 3 — корпус циклона;  
 4 — бункер для сбора уловленной пыли; 5 — затвор для разгрузки бункера

**Основные размеры циклонов конструкции НИИОГАЗ  
в долях диаметра  $D$  цилиндрической части циклона**

Параметры	Размеры элементов циклонов				
	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-15у	ЦН-24	СКЦН-34
Внутренний диаметр цилиндрической части циклона $D$	1	1	1	1	1
Общая высота циклона $H$	4,36	4,56	3,31	4,26	3,14
Длина цилиндрической части $H_{ц}$	2,06	2,26	1,51	2,11	0,515
Длина конической части $H_{к}$	2	2	1,5	1,75	2,11
Длина выхлопной трубы $H_{т}$	1,56	1,74	1,5	2,11	0,515
Диаметр выхлопной трубы $d$	Для всех 0,59				
Диаметр пылевывпускного отверстия $d_1$	Для всех 0,3–0,4				
Размер входного патрубка $B \cdot \Gamma$	Для всех 0,26 · 0,2				

Конические циклоны конструкции НИИОГАЗ типа СКЦН-34 относятся к циклонам высокой эффективности. Они отличаются удлиненной конической частью, спиральным входным патрубком и меньшим диаметром выхлопной трубы. Сопротивление их больше сопротивления цилиндрических циклонов. Поэтому их применение должно иметь серьезное обоснование (табл. 6.2).

Фракционная эффективность циклонов конструкции НИИОГАЗ представлена на рис. 6.2. Эффективность циклонов определялась при  $D = 300$  мм, средней скорости в плане 3,5 м/с для цилиндрических циклонов и 1,75 м/с — для конических. Плотность пыли принималась равной  $\rho = 2670$  кг/м<sup>3</sup>, температура воздуха — 20 °С.

Таблица 6.2

### Производительность циклонов конструкции НИИОГАЗ

Тип	Расход воздуха, тыс. м <sup>3</sup> /ч, при диаметре корпуса D, мм															
	300	400	500	600	700	800	900	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600
СКЦН-34	0,6	1,1	1,8	2,5	3,5	4,5	5,7	7,1	10,2	13,8	18,1	22,9	28,3	34,2	40,7	47,8
ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у	0,9	1,6	2,5	3,6	4,8	6,3	8,0	9,9	14,2	19,4	25,3	32,0	39,6	47,9	57,0	66,9
ЦН-24	1,1	2,0	3,2	4,6	6,2	8,1	10,3	12,7	18,3	25,0	32,6	41,2	50,9	61,6	73,2	86,0

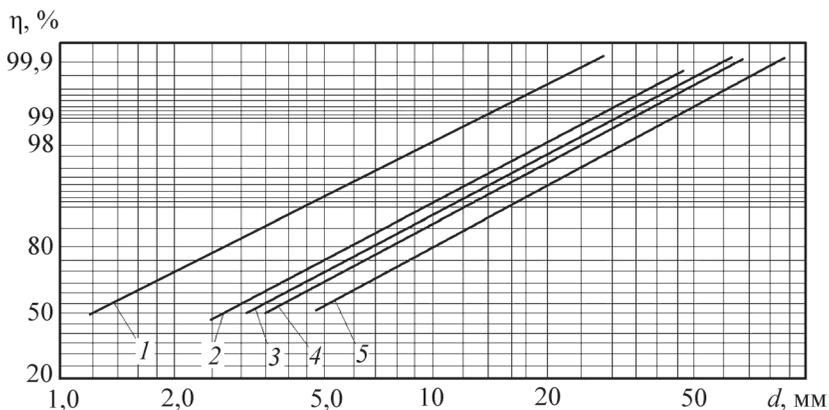


Рис. 6.2. Фракционная эффективность циклонов конструкции НИИОГАЗ:  
 1 — СКЦН-34; 2 — ЦН-11; 3 — ЦН-15; 4 — ЦН-15у; 5 — ЦН-24 [13, кн. 2]

Коэффициенты сопротивления циклонов, определенные по расчетной условной скорости воздуха в сечении цилиндрической части, приведены в табл. 6.3. На деревообрабатывающих предприятиях применяют для очистки воздуха от древесной пыли и опилок циклоны различного типа, из которых наибольшее распространение получил циклон типа Ц конструкции «Гипродревпром» (рис. 6.3). Технические характеристики циклонов даны в табл. 6.4.

Таблица 6.3

### Коэффициенты сопротивления циклонов конструкции НИИОГАЗ

Тип циклона	Расчетная скорость движения воздуха, м/с	Коэффициенты сопротивления циклонов		
		с выбросом в атмосферу без раскручивателя	с раскручивающей улиткой	с кольцевым диффузором при групповой установке
ЦН-11	3,5	250	235	215
ЦН-15	3,5	163	150	140
ЦН-15у	3,5	170	158	148
ЦН-24	4,5	80	73	70
СКЦН-34	2,5	1 150	—	—

**Технические характеристики циклонов типа Ц  
конструкции НИИ «Гипродревпром»**

Тип циклона	Производительность, тыс. м <sup>3</sup> /ч	Площадь сечения входного патрубка $F_0$ , м <sup>2</sup>	Тип циклона	Производительность, тыс. м <sup>3</sup> /ч	Площадь сечения входного патрубка $F_0$ , м <sup>2</sup>
Ц-250	0,5–0,7	0,00845	Ц-870	5,4–6,8	0,0948
Ц-300	0,9–1,0	0,01235	Ц-950	6,6–9,5	0,115
Ц-375	1,0–1,5	0,01755	Ц-1050	7,9–9,9	0,138
Ц-450	1,5–2,0	0,0250	Ц-1150	9,3–14	0,155
Ц-550	2,2–3,2	0,0378	Ц-1235	11–13	0,190
Ц-600	3,6–3,2	0,0450	Ц-1320	12,5–13,7	0,218
Ц-675	3,2–4,5	0,0533	Ц-1400	14–20	0,249
Ц-730	3,8–4,8	0,0668	Ц-1500	15–23	0,277
Ц-800	4,5–6,6	0,0800	Ц-1600	18–23	0,320

Размеры входного патрубка циклона ( $\Gamma$  — горизонтальный размер,  $B$  — вертикальный размер) можно определить по приближенным формулам:

$$\Gamma = 0,52\sqrt{F_0}; \quad B = 1,91\sqrt{F_0},$$

где  $F_0$  — площадь сечения входного патрубка, м<sup>2</sup> (табл. 6.4).

Например, для циклона Ц-800 с  $F_0 = 0,08$  м<sup>2</sup> размеры входного патрубка составят:

$$\Gamma = 0,52\sqrt{0,08} = 0,15 \text{ м}; \quad B = 1,91\sqrt{0,08} = 0,54 \text{ м}.$$

Конструктивные размеры циклонов без пылесборного бункера представлены в табл. 6.5. Циклоны этого типа обеспечивают эффективность очистки до 98,5 %. Потери давления в пылеуловителе  $\Delta P$ , Па, определяются по скорости воздуха  $W_0$  во входном патрубке как  $\Delta P = 5,4W_0^2$ .

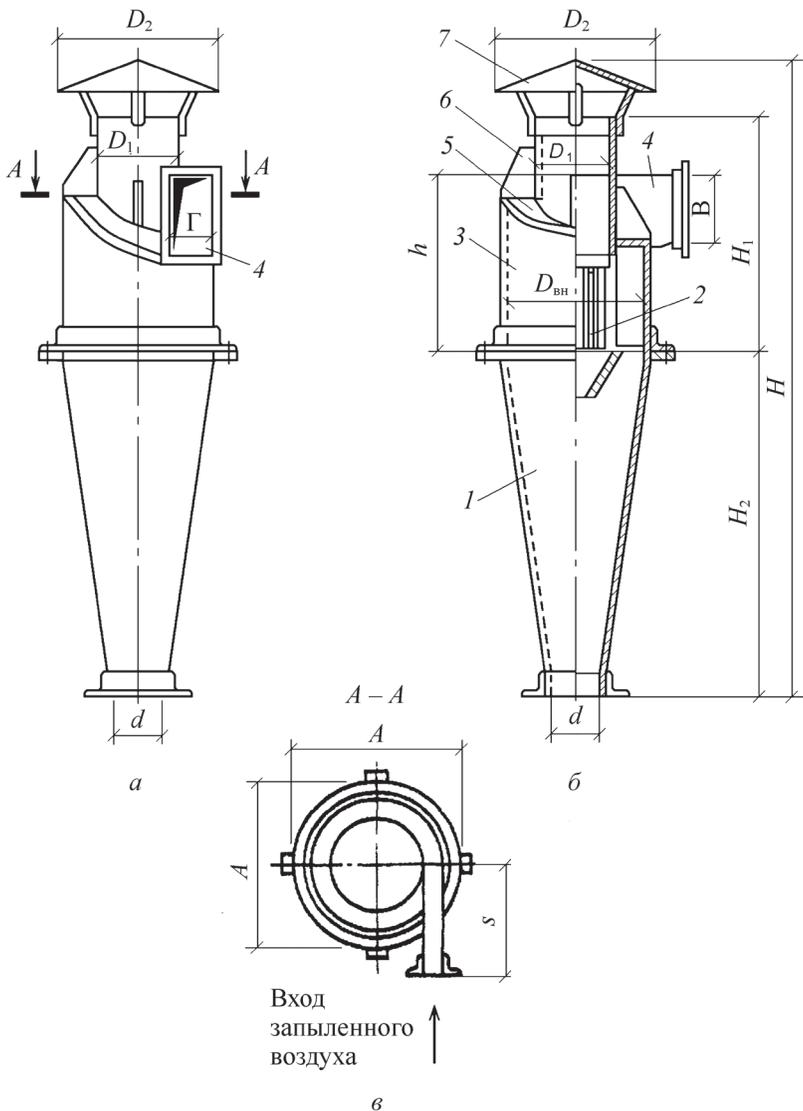


Рис. 6.3. Циклон Ц конструкции НИИ «Гипродревпром»:  
 1 — конус; 2 — сепаратор; 3 — корпус; 4 — входной патрубок; 5 — крышка корпуса; 6 — косынка; 7 — зонг; а — общий вид; б — вид сбоку;  
 в — вид сверху по А-А

Таблица 6.5

**Конструктивные размеры циклонов типа Ц  
конструкции НИИ «Гипродревпром», мм**

Тип циклона	Параметры									
	$D_{\text{вн}}$	$D_1$	$D_2$	$d$	$H$	$H_1$	$H_2$	$h$	$s$	$A$
Ц-250	250	150	270	100	1150	425	600	300	190	340
Ц-300	300	185	340	110	1380	525	700	370	225	390
Ц-375	375	225	410	135	1720	635	900	450	300	470
Ц-450	450	270	490	160	2 035	765	1 050	540	340	550
Ц-550	550	330	600	200	2 505	935	1 300	660	450	650
Ц-600	600	355	655	220	2 755	1 020	1 440	720	450	730
Ц-675	675	400	720	250	3 053	1 130	1 600	800	550	810
Ц-730	730	440	795	270	3 345	1 240	1 750	880	570	865
Ц-800	800	480	870	300	3 650	1 360	1 900	960	600	970
Ц-870	870	520	950	320	3 980	1 480	2 080	1 040	650	1 040
Ц-950	950	575	1 030	350	4 335	1 625	2 250	1 150	750	1 080
Ц-1050	1 050	630	1 145	390	4 815	1 785	2 520	1 260	790	1 283
Ц-1150	1 150	690	1 240	420	5 255	1 950	2 750	1 380	900	1 300
Ц-1235	1 235	740	1 345	460	5 635	2 100	2 960	1 480	930	1 406
Ц-1320	1 320	790	1 440	490	6 045	2 240	3 170	1 580	990	1 508
Ц-1400	1 400	840	1 500	500	6 395	2 370	3 350	1 680	1 050	1 550
Ц-1500	1 500	900	1 620	550	6 865	2 540	3 600	1 800	1 140	1 650
Ц-1600	1 600	960	1 750	590	7 335	2 750	3 840	1 920	1 200	1 740

## 6.2. Инерционные пылеуловители мокрого типа

В системах вентиляции применяют мокрые пылеуловители двух видов: с внутренней циркуляцией воды и проточные. К первому виду относятся пылеуловители вентиляционные мокрые (ПВМ). Пылеуловители второго вида оборудуются системой подвода воды извне из системы водоснабжения. Сброс воды производится в систему шламоудаления. Наибольшее распространение получили пылеуловители Вентури, циклоны — промыватели СИОТ, центробежные скрубберы (циклоны с водяной пленкой ЦВП).

Все виды мокрых пылеуловителей обладают значительно большей эффективностью пылеулавливания, чем сухие циклоны и пылеосадочные камеры. Аппараты различаются по расходу воды, который является важнейшим сравнительным показателем экономической эффективности систем очистки воздуха.

В пылеуловителе типа ПВМ запыленный воздух поступает в него под влиянием разрежения, создаваемого вентилятором, установленным на его корпусе (рис. 6.4). Из входного патрубка очищаемый воздух проходит через щель, образующуюся между нижней кромкой неподвижной перегородки 5 и поверхностью воды, залитой в пылеуловитель. Уровень воды контролируется с помощью датчика уровня 11 и поддерживается специальным устройством 12.

Вода, увлеченная с поверхности потоком воздуха, настигается на перегородку 4. В результате образуется постоянно обновляющийся слой, связывающий пыль, отделяющуюся под влиянием сил инерции. Водоотбойником вода отклоняется вниз и присоединяется снова к общей массе воды, циркулирующей в бункере пылеуловителя. Очищенный воздух проходит через каплеуловитель и удаляется вентилятором. Уловленная пыль через некоторое время оседает в нижней части корпуса, откуда удаляется в виде шлама.

Разработано несколько конструктивных модификаций ПВМ и их типоразмеров, различающихся по производительности. Характеристики некоторых моделей представлены в табл. 6.6.

Эффективность пылеулавливания всех ПВМ повышается при увеличении разности уровней воды  $\delta$ , что достигается перестановкой перегородки 5. Зависимость сопротивления пылеуловителя

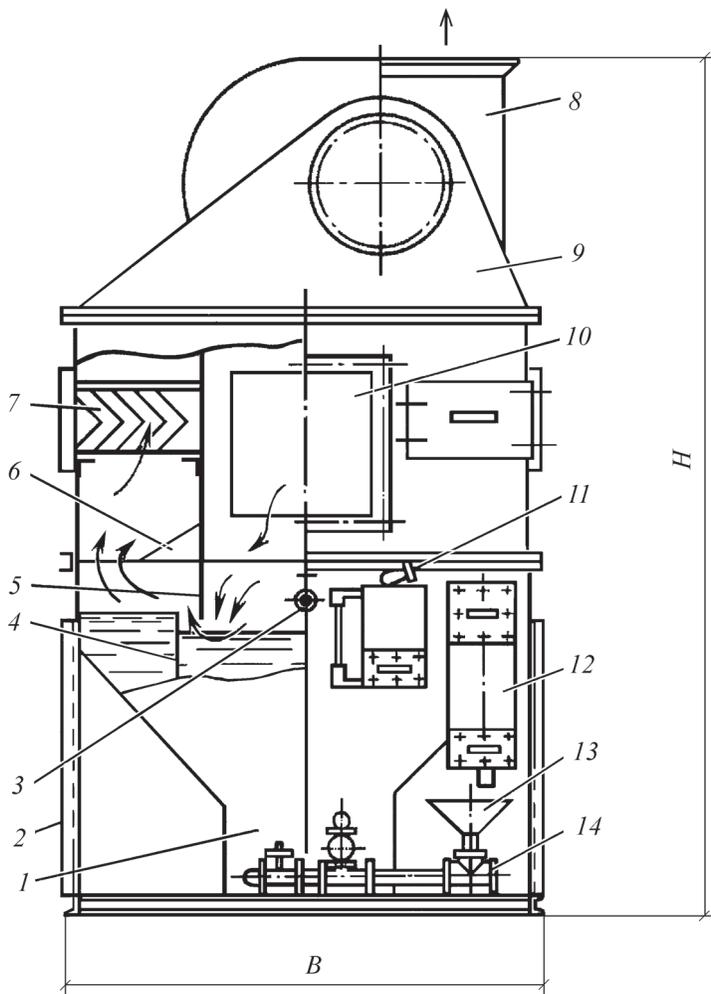


Рис. 6.4. Устройство пылеуловителя ПВМ:

1 — корпус; 2 — опоры; 3 — подвод воды; 4, 5 — перегородки; 6 — водоотбойник; 7 — каплеуловитель; 8 — вентиляционный агрегат; 9 — воздухо-сборник; 10 — входной патрубок; 11 — датчик уровня воды; 12 — устройство для регулирования уровня воды; 13 — воронка; 14 — слив шлама

от  $\delta$  и от удельной воздушной нагрузки на 1 м длины канала между перегородками показана на рис. 6.5. Удельная воздушная нагрузка принимается 3–5 тыс. м<sup>3</sup>/ч. Зона неустойчивой работы находится ниже штрихпунктирной линии. Зависимость фракционной эффективности  $\eta_{\text{ф}}$  пылеуловителей ПВМ всех модификаций от уровня  $\delta$  показана на рис. 6.6.

Таблица 6.6

**Технические характеристики пылеуловителей ПВМ**

Показатель	Типоразмер пылеуловителей				
	3СА	5СА	10СА	20СА	40СА
Номинальная производительность по воздуху, м <sup>3</sup> /ч	3 000	5 000	10 000	20 000	40 000
Тип и номер установленного вентилятора	В-Ц14-46 № 2,5	В-ЦП6-45 № 5	В-ЦП6-45 № 6,3	В-ЦП6-45 № 8	В-ЦП4-76 № 10
Объем воды в бункере, м <sup>3</sup>	0,7	14,2	1,45	2,2	5,5
Габариты, мм:					
ширина <i>A</i>	1 145	1 590	2 390	1 290	4 385
длина <i>B</i>	1 315	1 370	1 514	2 290	2 314
высота <i>H</i>	3 185	3 575	4 145	4 575	5 010

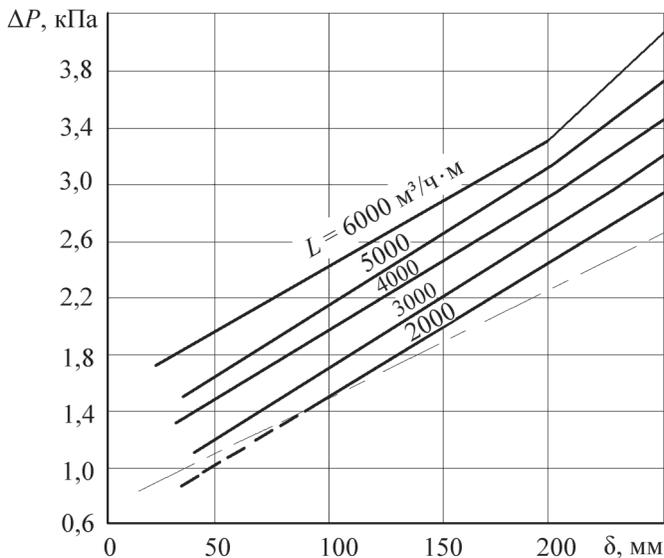


Рис. 6.5. График зависимости сопротивления  $\Delta P$  пылеуловителей ПВМ от удельного расхода воздуха  $L$  через щель при различных уровнях воды  $\delta$

**В скоростных циклонах-промывателях СИОТ** часть воды подается во входной патрубком (рис. 6.7). Шлам стекает через сливное отверстие, расположенное в центре нижнего конуса. Соответствующим выбором диаметра отверстия сток регулируется таким образом, чтобы в конусе промывателя скапливалось некоторое количество воды. Эта вода закручивается воздушным потоком и настигается на стенки корпуса аппарата. Для смыва пылевых отложений со стенок 70–80 % воды подается в верхнюю часть циклона. Технические данные скоростных промывателей СИОТ различных типоразмеров и конструктивные размеры приведены в табл. 6.7, 6.8.

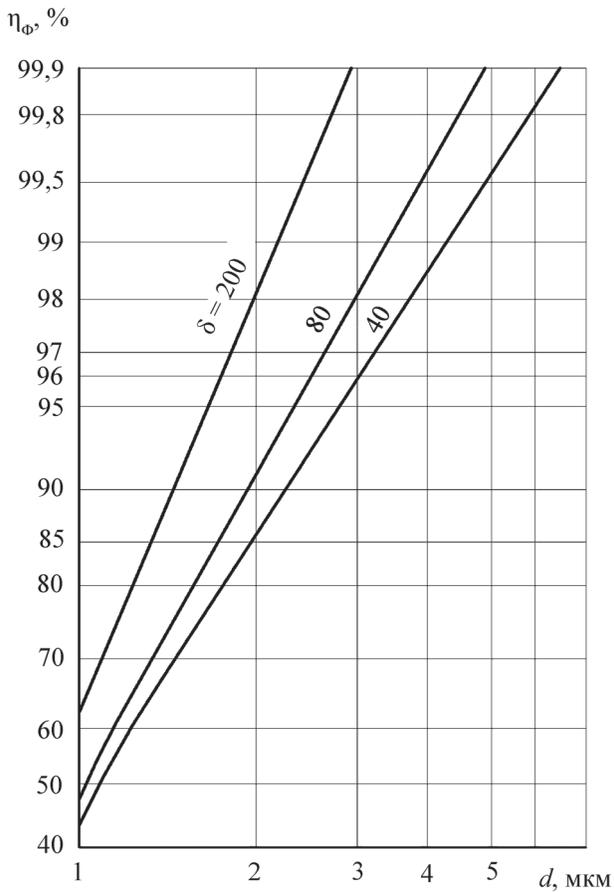


Рис. 6.6. График зависимости фракционной эффективности  $\eta_\phi$  пылеуловителей ПВМ при уровнях воды  $\delta$  от 10 до 200 мкм от диаметра частиц  $d$

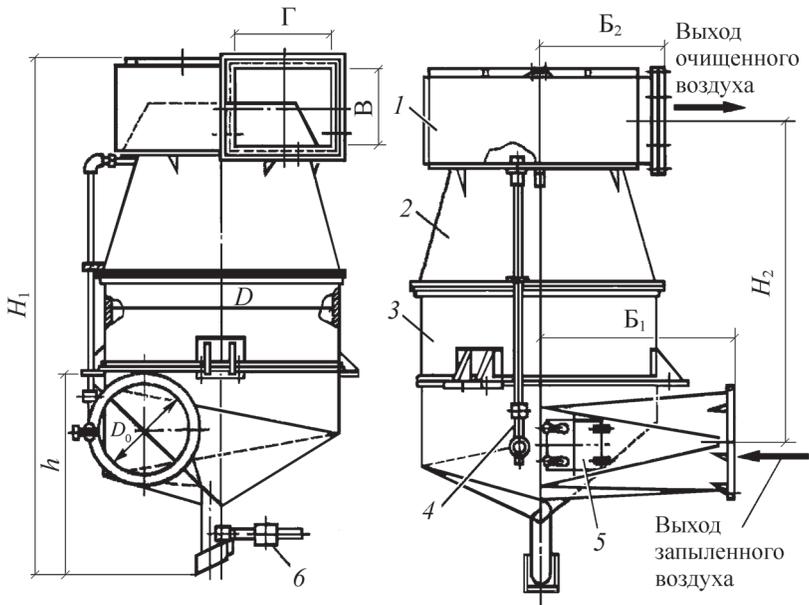


Рис. 6.7. Скоростные промыватели СИОТ:

1 — раскручиватель; 2 — конический корпус; 3 — цилиндрический корпус; 4 — водоподающий трубопровод; 5 — люк; 6 — клапан для выпуска шлама

Таблица 6.7

**Технические данные скоростных промывателей СИОТ**

Показатель	Номер скоростного промывателя СИОТ							
	5	6	7	8	9	10	11	12
Производительность, тыс. м <sup>3</sup> /ч, при входной скорости, м/с:								
14	12,5	17,5	25	35	50	70	100	140
20	17,5	25	35	50	70	100	140	200
Расход воды (максимальный), м <sup>3</sup> /ч	2	2,8	3,9	5,5	7,7	11	15,58	22

**Конструктивные размеры  
скоростных промывателей СИОТ, мм**

Номер промывателя	D	Б <sub>1</sub>	Б <sub>2</sub>	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	h	D <sub>0</sub>	B	Г
5	1 344	1 125	752	3 170	1 900	1 295	560	618	504
6	1 596	1 335	850	3 660	2 255	1 445	665	734	600
7	1 896	1 585	947	4 250	2 674	1 632	790	870	711
8	2 256	1 885	1 200	4 970	3 161	1 835	940	1 036	846
9	2 688	2245	1 347	5 820	3 758	1 960	1 120	1 234	1 008
10	3 192	2 665	1 655	6 820	4 465	2 590	1 330	1 465	1 197
11	3 792	3 165	1 945	8 000	5 033	3 170	1 580	1 741	1 422
12	4 512	3 765	2 147	9 430	6 309	3 650	1 880	2 072	1 692

Потери давления в пылеуловителе  $\Delta P$ , Па, определяются по скорости воздуха  $W_0$  во входном патрубке по приближенной зависимости

$$\Delta P = 4,1 W_0^2.$$

Скоростной промыватель СИОТ рекомендуется применять в аспирационных установках для улавливания смачиваемой пыли (за исключением волокнистой и цементирующей) при начальной концентрации до  $5 \text{ г/м}^3$ . Эффективность пылеулавливания в скоростных промывателях СИОТ не ниже эффективности циклонов с водяной пленкой. Поэтому в расчетах эффективности пылеулавливания можно использовать данные фракционной эффективности циклона ЛИОТ с водяной пленкой (прил. 7).

### 6.3. Тканевые пылеуловители

Тканевые пылеуловители (рукавные фильтры) применяют для очистки запыленных выбросов от неволокнистой сухой пыли всех групп дисперсности. Очистка воздуха происходит в результате его фильтрации через ткань, задерживающую пыль. Отлагающаяся на ткани уловленная пыль образует дополнительный фильтрующий слой. Очистка тканевых рукавов (регенерация) производится путем встряхивания или обратной продувки сжатым воздухом.

Промышленностью освоена широкая номенклатура рукавных фильтров общего и специального назначения. Эффективность рукавных фильтров заводского изготовления при нормальной эксплуатации может оцениваться по остаточной концентрации пыли в очищенном воздухе 25–50 мг/м<sup>3</sup> независимо от начальной концентрации. Характерным типом рукавных пылеуловителей является фильтр типа ГЧ-1БМФ (рис. 6.8).

Запыленный воздух подается по подводящим коллекторам в нижнюю часть аппарата, откуда поступает в рукава, изготовленные из фильтровальных тканей. Верхний торец рукавов заглушен. Под влиянием создаваемого разрежения воздух проходит через ткань рукавов. При этом пыль осаждается на поверхности и в порах ткани, а очищенный воздух выводится из пылеуловителя через отводящие коллекторы в его верхней части. По мере увеличения толщины слоя пыли сопротивление пылеуловителей возрастает. Осевшую пыль периодически удаляют встряхиванием рукавов с помощью кулачкового механизма с одновременной продувкой рукавов в обратном направлении.

Корпус пылеуловителей разделен на секции, которые поочередно с помощью клапанов отключают от подводящих коллекторов на время регенерации. Продувку осуществляют воздухом, поступающим через клапаны, автоматически открывающиеся при закрывании клапанов на подводящих коллекторах. Продувочный воздух проходит через регенерируемую секцию и удаляется через отводящий коллектор. Расход продувочного воздуха составляет 90–110 м<sup>3</sup>/(ч · м<sup>2</sup>).

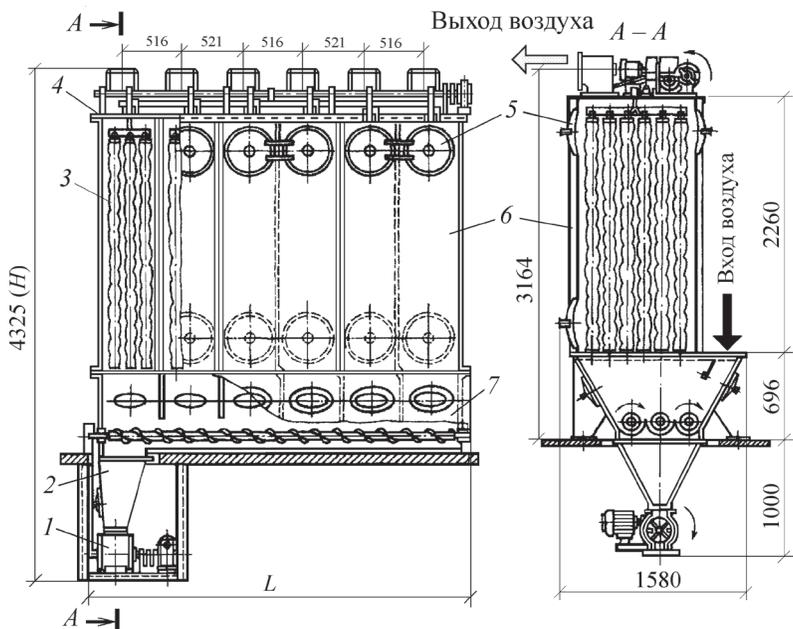


Рис. 6.8. Рукавный фильтр типа Г4-1 БФМ:

1 — шлюзовой затвор с электроприводом; 2 — сборник пыли; 3 — рукав; 4 — крышка с механизмом встряхивания; 5 — люк; 6 — корпус; 7 — желоб

Сопротивление рукавных пылеуловителей данного типа зависит от принятого режима (частоты) регенерации и эффективности. Остаточная концентрация пыли в очищенном воздухе составляет 20–50 мг/м<sup>3</sup> при начальной концентрации 5–50 г/м<sup>3</sup>. Технические характеристики фильтров этого типа приведены в табл. 6.7.

**Технические характеристики рукавных фильтров типа  
Г4-1 БФМ**

Показатель	Типоразмеры			
	Г4-1 БФМ-30	Г4-1 БФМ-45	Г4-1 БФМ-60	Г4-1 БФМ-90
Площадь фильтрующей поверхности, м <sup>2</sup>	30	45	60	90
Производительность, тыс. м <sup>3</sup> / час	4,5–5,4	6,7–8,1	9–10,8	13,5–16,2
Количество секций	2	3	4	6
Количество рукавов	36	54	72	108
Габариты, мм:				
длина	1 435	1 970	2 490	3 532
ширина	1 580	1 580	1 580	1 580
высота	4 325	4 325	4 325	4 325
Фильтровальный материал	Фильтро- вальное сукно	Фильтро- вальное сукно	Фильтро- вальное сукно	Фильтро- вальное сукно
Сопротивление, кПа	Не более 1,3	Не более 1,3	Не более 1,3	Не более 1,3
Допустимая запыленность воздуха, г/м <sup>3</sup>	15	15	15	15

### 6.4. Электрическая очистка газов

Сущность процесса очистки газов в электрофильтрах заключается в следующем. Газ, содержащий взвешенные частицы, проходит через систему, состоящую из коронирующих электродов, к которым подводится выпрямленный электрический ток высокого напряжения, и размещенных на некотором расстоянии заземленных осадительных электродов (рис. 6.9) [14].

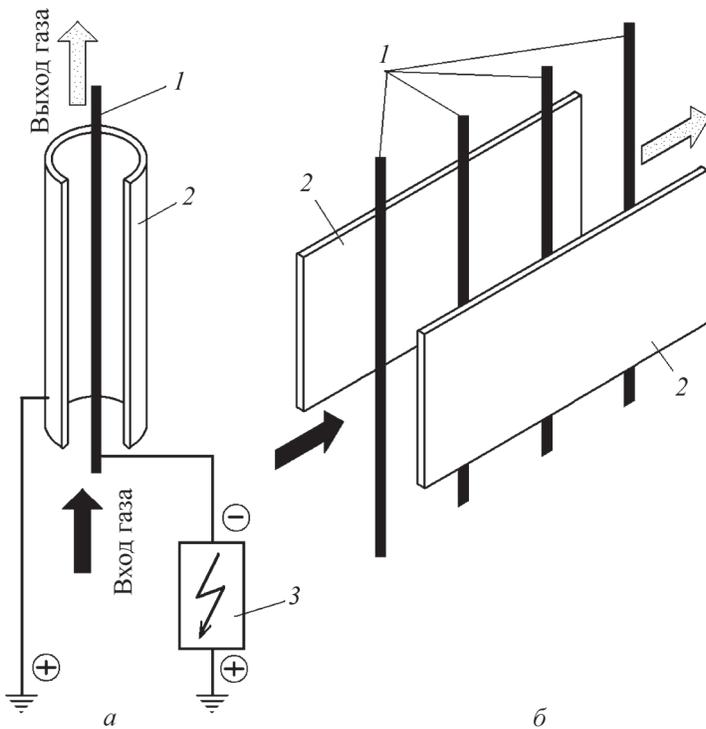


Рис. 6.9. Принципиальная схема электрофильтра:

*a* — электрофильтр с трубчатым электродом; *б* — электрофильтр с пластинчатыми электродами; 1 — коронирующий электрод; 2 — осадительный электрод; 3 — агрегат электропитания

У поверхности коронирующего электрода происходит ионизация газа, сопровождающаяся возникновением коронного разряда (короны). Газовые ионы различной полярности, образующиеся в зоне короны, под действием сил электрического поля движутся к разноименным электродам. Вследствие этого в межэлектродном промежутке возникает электрический ток, называемый током короны. Улавливаемые частицы из-за адсорбции на их поверхности ионов приобретают в межэлектродном промежутке электрический заряд.

Под влиянием сил электрического поля заряженные частицы движутся к электродам, осаждаясь на них. Основное количество частиц осаждается на развитой поверхности осадительных электродов, меньшая их часть попадает на коронирующие электроды. По мере накопления на электродах осажденные частицы удаляются встряхиванием или промывкой электродов.

В настоящее время применяются два вида электрофильтров. Однозонные электрофильтры (в которых зарядка и осаждение частиц осуществляются в одной зоне) применяют для очистки промышленных газов. Двухзонные электрофильтры (в которых процессы зарядки и осаждения протекают в двух разных зонах — ионизаторе и осадителе) применяют в основном для тонкой очистки воздуха в системах вентиляции и кондиционирования.

Очищаемый в электрофильтре газ может проходить через активную зону в вертикальном или горизонтальном направлении, соответственно, электрофильтры могут быть вертикальными или горизонтальными (рис. 6.10).

Наиболее распространенным типом сухих электрофильтров является многопольный горизонтальный электрофильтр. Наличие нескольких последовательных полей в электрофильтре улучшает условия улавливания частиц. Для очистки от пыли дымовых газов, аспирационного воздуха и других промышленных газов с температурой до 250 °С применяют унифицированные горизонтальные сухие электрофильтры серии УГ (рис. 6.11), технические характеристики которых приведены в табл. 6.8.

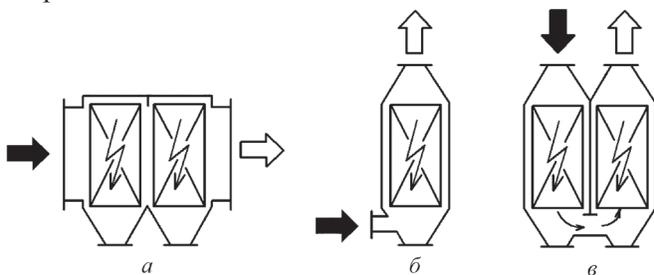


Рис. 6.10. Схемы движения газов в электрофильтрах:

*а* — многопольный горизонтальный; *б* — однопольный вертикальный;  
*в* — двухпольный вертикальный

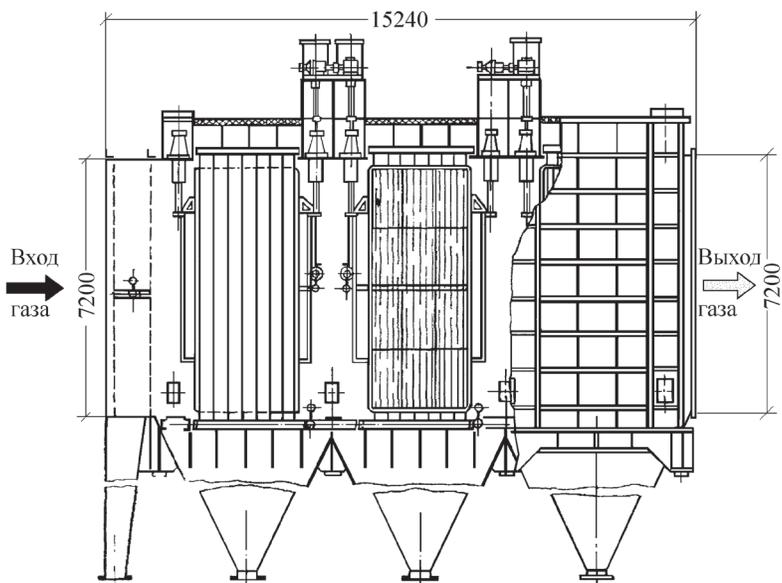


Рис. 6.11. Электрофильтр ЭГ

Таблица 6.8

**Технические характеристики электрофильтров серии ЭГ**

Марка электрофильтра	Производительность, тыс. м <sup>3</sup> /ч	Количество полей, шт.	Габаритные размеры, м		
			Длина	Ширина	Высота
ЭГ1-2-10	36	2	9,6	3,0	12,3
ЭГ1-3-10	36	3	14,1	3,0	12,3
ЭГ1-2-15	54	2	9,6	4,5	12,3
ЭГ1-3-15	54	3	14,1	4,5	12,3
ЭГ1-3-26	94	3	14,1	4,5	15,4
ЭГ1-4-26	94	4	18,6	4,5	15,4
ЭГ1-3-37	133	3	14,1	6,0	15,4
ЭГ1-4-37	133	4	18,6	6,0	15,4
ЭГ1-3-53	190	3	14,1	9,0	15,4
ЭГ1-4-53	190	4	18,6	9,0	15,4

## 7. МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ВЫБРОСОВ ОТ ВРЕДНЫХ ГАЗОВ И ПАРОВ

Методы очистки выбросов от вредных газов и паров в настоящее время делят на следующие группы:

- абсорбция — промывка выбросов растворителями примесей;
- адсорбция — поглощение примесей твердыми активными веществами (поглотителями);
- термическая нейтрализация (конденсация, сжигание);
- биохимические методы.

Выбор метода очистки зависит от химического состава и свойств вредного вещества, его объема, концентрации и температуры. Важно также определить, как будет использоваться продукт очистки. Рассмотрим подробнее названные способы очистки.

### 7.1. Абсорбция

Абсорбция заключается в поглощении вредного вещества (ВВ) жидкостью с целью его перевода в безвредное состояние. Для этого необходимо организовать контакт ВВ с жидкостью (поглотителем). Организация контакта газового потока с жидким растворителем осуществляется либо пропусканьем газа через насадочную колонну, либо распылением жидкости, либо барботажем газа через слой абсорбирующей жидкости. Применяют абсорберы — безнасадочные распылительные, с насадками, пенные, скрубберы. Эти аппараты представляют собой цилиндрические емкости, внутри которых размещается необходимое оборудование. Эффективность процесса существенно снижается при низких концентрациях и высоких скоростях газовой смеси, что уменьшает время контакта.

Загрязненный воздух или газ входит в нижнюю часть аппарата, а очищенный выходит через верхнюю часть. В емкость сверху с помощью разбрызгивателя вводят поглотитель, а из нижней части удаляют отработанный раствор. Очищенный воздух обычно выбрасывают в атмосферу.

Насадки применяют для увеличения поверхности контакта. В качестве насадок могут использоваться решетки, кольца, спирали, сетки, уложенные или свободно насыпанные слоями 1–3 м. Также в промышленном производстве нашли применение тарельчатые абсорберы.

Состав жидкости зависит от химического состава очищаемого газа. Аммиачная вода используется для очистки от  $\text{SO}_2$  с образованием сульфата аммония  $\text{NH}_3 \text{SO}_4$ . Вода хорошо взаимодействует с  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$  и т. д.

Для увеличения поверхности контакта применяют центробежные распылители, насаживаемые на вращающийся вал. В результате происходит разбрызгивание орошающей жидкости.

## 7.2. Адсорбция

Адсорбция заключается в поглощении ВВ поверхностью твердого вещества (например, силикагеля, искусственных цеолитов, глинозема, бетонита, активированного угля). Эти вещества имеют большую площадь поверхности на единицу массы. Метод основан на способности некоторых твердых веществ с ультрамикроскопической структурой концентрировать на своих поверхностях компоненты из газовой смеси. Этот процесс может происходить без химического взаимодействия, и тогда сорбент может использоваться многократно.

Конструктивно адсорберы выполняются в виде вертикальных, горизонтальных либо кольцевых емкостей, заполненных пористым сорбентом, через который фильтруется поток очищаемого газа. Выбор конструкции определяется скоростью газового потока, размерами частиц сорбента и т. д. Вертикальные адсорберы, как правило, используют при небольших объемах очищаемого газа, горизонтальные и кольцевые — при высокой производительности в десятки и сотни  $\text{м}^3/\text{час}$ .

Фильтрация может происходить через неподвижный или движущийся слой сорбента. Первые относятся к аппаратам периодического действия, в которых период контакта очищаемого газа с сорбентом чередуется с периодом регенерации сорбента. Такие

аппараты отличаются простой конструкцией, но имеют большие габариты из-за необходимости поддержания небольшой скорости газового потока. Адсорберы с движущимся сорбентом используют подъемную силу восходящего потока при очистке горячих газов или силу тяжести самого сорбента. Конструктивные схемы аппаратов приведены на рис. 7.1.

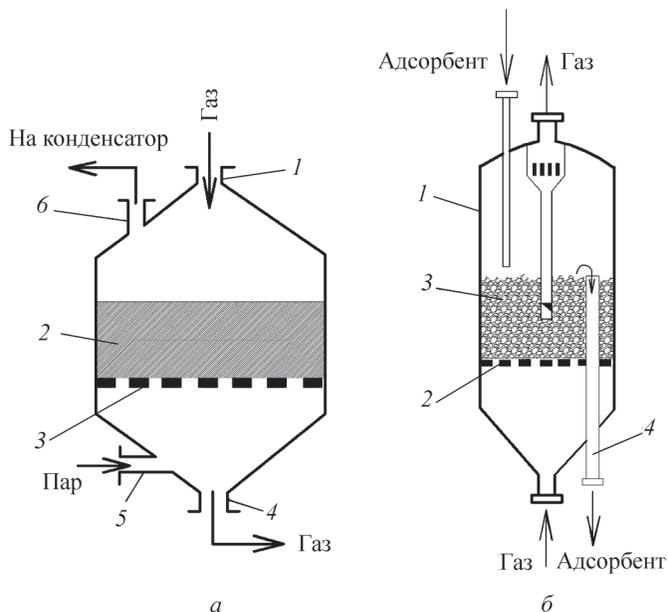


Рис. 7.1. Конструкции адсорбера:

*а* — периодического действия: 1 — входной патрубок; 2 — слой пористого адсорбента; 3 — горизонтальная решетка; 4 — патрубок очищенного газа; 5 — патрубок для подачи пара; *б* — непрерывного действия: 1 — корпус; 2 — распределительная решетка; 3 — «кипящий слой» адсорбента

### 7.3. Термическая нейтрализация

Для выделения некоторых веществ можно использовать процесс конденсации ВВ из смеси при температуре ниже температуры точки росы ВВ. Охлаждение смеси можно производить в спиральных или трубчатых теплообменниках или инжекторных конденсаторах, где

охлаждающая жидкость вбрызгивается в газовую смесь. Тип теплообменника зависит от химического состава ВВ и охлаждающей жидкости, способности их к взаимодействию и распылению.

Иногда ВВ можно перевести в безвредное состояние путем окисления или восстановления. Органические вещества разлагаются на  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ; сернистый газ  $\text{SO}_2$  можно перевести при нагревании в серный  $\text{SO}_3$ , который пригоден для дальнейшего использования при производстве серной кислоты.

Для интенсификации процессов используют катализаторы (Pt, V, Co, Ni, Cu, Md). Выбросы многих производств (нефтехимической промышленности, производства алюминия) можно нейтрализовать при термоокислении или путем дожигания, когда удаляются смолистые вещества. Для этого иногда могут потребоваться догрев смеси и подвод топлива.

Отходящие высокотемпературные газы являются важным энергетическим ресурсом, но их использование зачастую ограничено из-за наличия в них различных примесей. После термической обработки газы могут иметь достаточно малые концентрации ВВ для выброса в атмосферу, однако требуется снижение температуры для их транспортировки. В этом случае используют теплообменники или подмешивают к ним более холодный воздух.

## **7.4. Биохимические методы**

Биохимические методы основаны на способности некоторых микроорганизмов разрушать (разлагать) различные соединения. При их использовании применяют биофильтры с фильтрующим материалом природного (торф, почва, компост) или искусственного происхождения и биоскрубберы, в которых поглощающей жидкостью может служить водяная суспензия ила. Ученые считают биохимические методы технологией XXI века.

## 8. НОРМИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

### 8.1. Предельно допустимые концентрации

Основой контроля загрязнения окружающей среды являются установленные в законодательном порядке предельно допустимые концентрации (ПДК) ВВ в зоне дыхания.

Так как полностью избежать поступления ВВ в атмосферу невозможно, необходимо назначать некоторые минимально допустимые концентрации, при которых не происходит значительного ухудшения состояния здоровья человека или состояния окружающей среды. При определении ПДК принято базироваться на сведениях о вредном воздействии ВВ на здоровье людей, животных, о повреждениях растительности и т. д. ПДК — это максимальная концентрация примеси ВВ за определенное время действия, при воздействии которой не происходит вредного воздействия на человека или окружающую среду.

ПДК<sub>мах</sub> — максимальная разовая концентрация, которая устанавливается с учетом рефлекторных реакций человека (ощущаемого запаха, изменения активности головного мозга, светочувствительности). Это основная характеристика опасности ВВ.

В 1963 г. Всемирная организация здравоохранения при ООН рекомендовала следующие правила при определении ПДК как критерия чистоты атмосферного воздуха:

*1-й уровень* — концентрации и продолжительность контакта, при которых не было замечено прямого или косвенного воздействия;

*2-й уровень* — концентрации и продолжительность контакта, при которых возможны раздражение органов чувств, вредное воздействие на растительность и т. д.

*3-й уровень* — концентрации и продолжительность контакта, при которых возможны нарушения жизненно важных физиологических функций, хронические заболевания, преждевременная смерть.

*4-й уровень* — концентрации и продолжительность контакта, при которых возможны заболевания или гибель целых групп населения.

Таким образом, нормативы чистоты воздуха зависят от заданных критериев. Отсюда разные значения ПДК в разных странах. В нашей стране нормирование ПДК основано на требованиях 1-го уровня. Так, в качестве ПДК для атмосферного воздуха населенных пунктов принимаются максимально допустимые разовые концентрации ВВ. Значения ПДК вредных веществ для населенных пунктов устанавливаются гигиеническими нормативами ГН 2.1.6.695-98, утвержденными главным санитарным врачом РФ [4].

Для санитарной оценки воздуха принято выражать концентрацию ВВ в мг на 1 м<sup>3</sup> воздуха. Концентрации ВВ не являются постоянными во времени и зависят от метеоусловий, характера выброса, особенностей застройки и т. д. Различают разовую концентрацию, среднюю за сутки (среднесуточную) или за более продолжительный промежуток времени.

Под разовой концентрацией понимают содержание ВВ в воздухе при кратковременном отборе пробы (10–20 мин). Наивысшее значение разовой концентрации из 12 проб на протяжении суток называется максимальной разовой концентрацией. Для определения среднесуточной концентрации отбор проб производят в течение 24 ч или берут среднее значение концентраций всех проб, отобранных за сутки через равные промежутки (число проб — 25).

Значения ПДК ВВ в атмосферном воздухе устанавливаются санитарными нормами: для воздуха, поступающего через приемные устройства систем вентиляции, принимают в размере 30 % ПДК<sub>рз</sub>; для атмосферного воздуха населенных мест — максимальные разовые.

ПДК<sub>рз</sub> — это такие концентрации ВВ, которые при ежедневной работе по 8 ч (кроме выходных), но не > 44 ч в неделю в течение всего трудового стажа не могут вызвать заболеваний, обнаруживаемых современными методами, в процессе работы и в отдаленные сроки жизни настоящего и последующего поколений.

В основе регламентирования ПДК<sub>рз</sub> лежит принцип пороговости действия в зависимости от характера действия — общетоксического, раздражающего, мутагенного, аллергенного. С учетом этого все ВВ разделены на четыре класса: чрезвычайно опасные — 1-й класс; высокоопасные — 2-й класс; умеренно опасные — 3-й класс;

малоопасные — 4-й класс. Данные о ПДК<sub>рз</sub> приведены в ГОСТ «Воздух рабочей зоны» [5].

Большинство технологических процессов сопровождается выделением различных ВВ. Они могут обладать однонаправленным действием, что усиливает вредное воздействие на организм человека. Перечень таких веществ также приведен в санитарных нормах.

Для веществ однонаправленного действия должно выполняться условие:

$$\frac{c_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{c_2}{\text{ПДК}_2} + \frac{c_3}{\text{ПДК}_3} + \dots < 1,$$

где  $c_1, c_2, c_3$  — концентрации ВВ в воздухе; ПДК<sub>1, 2, 3</sub> — ПДК для 1-го, 2-го, 3-го класса опасности.

Для остальных веществ должно выполняться условие:

$$c < \text{ПДК}.$$

При наличии фоновое загрязнение «емкость» атмосферы снижается, и вместо значений ПДК следует использовать разницу значений ПДК – Ф, где Ф — фоновое загрязнение по данному ВВ.

## 8.2. Предельно допустимые выбросы

Для предотвращения и снижения загрязнения атмосферного воздуха были введены нормативы на величину выброса [25; 26]. Они устанавливают предельно допустимые выбросы (ВВ) для каждого источника загрязнения атмосферы при условии, что выбросы от данного ИВВ или предприятия не создадут предельную концентрацию более ПДК или более ПДК – Ф при наличии фоновое загрязнение атмосферы другими источниками.

Значения ПДВ устанавливаются при разработке разделов «Охрана окружающей среды» в проектной документации новых, реконструируемых и уже существующих предприятий. ПДВ определяются для условий полной загрузки оборудования и не должны превышать в любой 20-минутный период времени.

ПДВ устанавливаются для каждого ВВ отдельно. При этом указывается зона влияния, радиус которой является большим из  $x_1$  и  $x_2$ , где  $x_1 = 10 x_m$  соответствует расстоянию, на котором  $c = 0,05 c_m$ ,

как и  $x_2$ . Для предприятий зона влияния есть совокупность кругов радиуса  $x_1$  вокруг каждого ИВВ.

Из формулы для «нагретых» выбросов

$$c_m = (AMFmn\eta) / (H^2 V^{1/3} \Delta T^{1/3})$$

получаем выражение для расчета ПДВ, приняв  $c_m = \text{ПДК}$ :

$$\text{ПДВ} = \frac{\text{ПДК} \cdot H^2 \sqrt[3]{V \Delta T}}{AFmn\eta}.$$

С учетом фонового загрязнения  $\Phi$  получим для нагретых выбросов значение ПДВ:

$$\text{ПДВ} = \frac{(\text{ПДК} - \Phi) H^2 \sqrt[3]{V \Delta T}}{AFmn\eta},$$

где  $H$  — высота выброса, м;  $V$  — расход выбрасываемого воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $\Delta T$  — избыточная температура на выходе из трубы, °К;  $A$  — коэффициент, зависящий от температурной стратификации (определяется в зависимости от географического местоположения);  $F$  — коэффициент, учитывающий условия очистки;  $m$ ,  $n$  — коэффициенты, зависящие от условий выброса;  $\eta$  — коэффициент, учитывающий влияние рельефа.

Для «холодных» выбросов аналогично из выражения

$$c_m = AMFDm\eta / (8H^{4/3}V)$$

получим

$$\text{ПДВ} = \frac{(\text{ПДК} - \Phi)}{AFm\eta} H^{4/3} \frac{8V}{D},$$

где  $D$  — диаметр трубы (устья), м.

Если  $\Phi > \text{ПДК}$ , то вопрос о выбросе ВВ может быть разрешен лишь при снижении  $\Phi$ .

Для сокращения выбросов следует проводить технологические мероприятия по совершенствованию очистки. Рассеивание ВВ в атмосфере за счет увеличения высоты выбросов допускается только после применения этих мер. Установление ПДВ облегчает контроль, выявление ИВВ, «виновных» в загрязнении, хотя основным нормативом остается ПДК, по величине которого рассчитывается ПДВ.

Если в атмосферном воздухе концентрации ВВ превышают ПДК, а значения ПДВ по объективным причинам не могут быть достигнуты, вводят поэтапное снижение выбросов. На каждом этапе устанавливают нормативы временно согласованных выбросов (ВСВ). Величины ПДВ или ВСВ и материалы по их обоснованию согласовываются с органами, осуществляющими контроль, и утверждаются на срок не более 5 лет. До установления ПДВ производится паспортизация (инвентаризация). На каждый ИВВ должен быть составлен паспорт с указанием качественных и количественных характеристик, метода очистки. Инвентаризация ИВВ производится по установленным формам.

## 9. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТИЗА ПРОЕКТОВ (ЭЭП)

Экологическая экспертиза проектов (ЭЭП) — это система комплексной оценки возможных экологических последствий осуществления проектов строительства и реконструкции. ЭЭП направлена на предотвращение отрицательного влияния на окружающую среду. Порядок проведения ЭЭП был установлен «Инструкцией ГТМ ОНД-1-84» и неоднократно уточнялся различными постановлениями и рекомендациями.

Для проведения ЭЭП должны быть представлены следующие материалы:

- краткие сведения по обоснованию района строительства с учетом физико-географических факторов и метеоусловий, а также исходные данные ГТМ по загрязнению атмосферы;

- характеристика выбросов в атмосферу, ситуационный план района размещения объекта с указанием санитарно-защитных зон этого и соседних объектов;

- предлагаемые решения по очистке, утилизации и выбросу вредных веществ;

- упрощенные расчеты загрязнения атмосферного воздуха по ОНД-86;

- ПДК вредных веществ;

- характеристика загрязнения: виды, среднегодовая, среднесезонная и максимальная концентрации; повторяемость загрязнения с концентрацией 1,5 и 10 ПДК;

- фоновые значения концентраций загрязняющих веществ;

- территории распространения основных и специфических вредных веществ;

- перечень, объемы и интенсивность выбросов;

- физические воздействия;

- схема размещения объекта, корпусов, сооружений или генплан.

В этом разделе должны указываться назначение проекта (новое строительство, реконструкция, техническое перевооружение) и перечень нормативных материалов, на основании которых разработан данный раздел.

По расположению объекта приводятся следующие данные:

- площадь землеотвода;
- взаимное расположение проектируемого объекта и других характерных объектов (жилых массивов, участков перспективной застройки, промышленных зон, рек, возвышенностей, транспортных магистралей, предприятий);
- наличие технических и иных ограничений;
- выкопировка из карты-схемы;
- рельеф и уклон в радиусе 50 *H*.

Перечисленные данные представляют в таблицах по форме. Результаты расчетов приводят также в таблице или в виде карт рассеивания с изолиниями в долях ПДК. На основании этих данных составляется перечень ВВ, выбросы которых могут быть предложены в качестве нормативов ПДВ или ВСВ по каждому источнику и объекту в целом.

Размеры зоны загрязнения проектируемого объекта выбросами определяются на основании расчета приземных концентраций в соответствии с нормативным документом ОНД-86 [3]. Зоной влияния считаются территории, на которых суммарное загрязнение воздуха от всех источников данного объекта, в том числе «низких» и «неорганизованных», превышает 0,05 ПДК ВВ в зоне загрязнения (на промплощадке, в зоне жилой застройки).

Раздел «Охрана атмосферного воздуха» входит в состав проектной документации и может быть уточнен применительно к специфике предприятий и регионов. Его материалы оформляются в виде отдельного тома пояснительной записки, форма которой также дана в ОНД-1-84. Перечень необходимых материалов зависит от уровня загрязнения, создаваемого данным объектом (класса опасности).

ЭЭП осуществляется экспертным советом подразделений Министерства природных ресурсов Российской Федерации.

По результатам ЭЭП разработчику проекта выдается разрешение на выбросы ВВ стационарными источниками на определенный срок. При невозможности достижения ПДВ устанавливаются ВСВ и предусматривается поэтапное снижение объема выбросов. Методические материалы по экспертизе представлены в соответствующем методическом пособии [11].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. М. : Гидрометеоздат. 1985. 272 с.
2. Бретинайдер Б., Курфюрст И. Охрана воздушного бассейна от загрязнений. Л. : Химия, 1989. 288 с.
3. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86\*. СПб. : Гидрометеоздат, 2005. 93 с.
4. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населённых мест. ГН 2.1.6.1338-03. М. : Минздрав России, 2003. 42 с.
5. ГОСТ 12.1.005-88\*. Система стандартов безопасности труда : Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. 5-е изд. (январь 2008 г.) с изменением № 1\*, принятым в июне 2000 г. (ИУС 9-2000). М. : Изд-во стандартов, 2000. 76 с.
6. Защита атмосферы от промышленных загрязнений : справ. изд. : в 2 ч. М. : Металлургия, 1988. 760 с.
7. Квашин И. М. Промышленные выбросы в атмосферу : Инженерные расчёты и инвентаризация. М. : АВОК-Пресс, 2005. 395 с.
8. Квашин И. М. Промышленные выбросы предприятия в атмосферу : Рассеивание и установление нормативов. М. : АВОК-Пресс, 2008. 200 с.
9. Временная типовая методика определения экономической эффективности природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды / Госплан СССР и др. М. : Экономика, 1986. 94 с.
10. Временная методика нормирования ПДВ в атмосферу. М. : Госгидромет. 1981. 24с.
11. Методическое пособие по расчёту, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. СПб. : НИИ Атмосфера, 2005. 37 с.
12. Хватов Ю. В. Выбор и расчет обеспыливающего оборудования для очистки вентиляционного воздуха. Свердловск : Изд-во УПИ, 1971. 114 с.
13. Внутренние санитарно-технические устройства: в 3 ч. / В. Н. Богословский [и др.]; под ред. Н. Н. Павлова и Ю. И. Шиллера. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Стройиздат, 1992. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 1. 319 с. ; Кн. 2. 416 с. (Сер. Справочник проектировщика).
14. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М. И. Биргер [и др.]; под общ. ред. А. А. Русанова. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоатомиздат, 1983. 312 с.

15. Коузов П. А., Мальгин А. Д., Скрябин Г. М. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. Л. : Химия, 1982. 256 с.
16. Банит Ф. Г., Мальгин А. Д. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов. М. : Стройиздат, 1979. 351 с.
17. Пирумов А. И. Обеспыливание воздуха. М. : Стройиздат, 1981. 296 с.
18. Сигал И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. Л. : Недра, 1988. 312 с.
19. Балтренас П. Б. Обеспыливание воздуха на предприятиях стройматериалов. М. : Стройиздат, 1990. 184 с.
20. Калмыков А. В. Обеспыливание дробильных цехов. М. : Недра, 1976. 207 с.
21. Пейсахов И. Л., Лютин Ф. Б. Атлас диаграмм и номограмм по газопылевой технике. М. : Металлургия, 1974. 116 с.
22. Гордон Г. М., Пейсахов И. Л. Пылеулавливание и очистка газов. М. : Металлургия, 1968. 499 с.
23. Шляев М. И. Методы расчета пылеулавливающих систем / М. И. Шляев. М. : Форум ; ИНФРА-М, 2014. 320 с.
24. Шляев М. И. Аэродинамика и тепломассообмен газодисперсных потоков. 2-е изд., испр. и доп. М. : Форум ; ИНФРА-М, 2015. 288 с.
25. Временная методика нормирования ПДВ в атмосфере. М. : Госгидромет. 1981. 24 с.
26. ГОСТ 17.2.3-02.78. Охрана природы. Атмосфера. Правила установки ПДВ. М. : Стандарты, 1978.

## Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ

Таблица П.1.1

### Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест [4]

Наименование веществ	ПДК, мг/м <sup>3</sup>
Пыль асбестосодержащая	0,06 волокон в 1 мл воздуха
Пыль выбросов табачных фабрик	0,0008
Пыль неорганическая, содержащая диоксид кремния	0,15
более 70 % (диас и др.)	0,3
70 –20 % (шамот, цемент, песок, зола и др.)	0,5
менее 20 % (доломит, известняк, боксит и др.)	
Пыль хлопковая	0,2
Пыль полиметаллическая свинцово-цинкового производства с содержанием свинца до 1 %	0,0001
Азота оксид NO	0,4
Азота оксид NO <sub>2</sub>	0,085
Азотная кислота	0,4
Бензин нефтяной малосернистый	5
Бензин нефтяной сланцевый	0,05
Бензол	0,3
Бутан	0,1
Бутилацетат	0,1

Окончание табл. П.1.1

Наименование веществ	ПДК, мг/м <sup>3</sup>
Железа оксиды	0,04*
Магния оксид	0,4
Марганец и его соединения	0,01
Ксилол	0,2
Медь оксид	0,002
Никель	0,001*
Озон	0,16
Свинец и его соединения	0,001
Сера диоксид	0,5
Серная кислота	0,3
Углерода оксид СО	5
Фториды	0,2
Фтористые газообразные соединения	0,02
Хром шестивалентный	0,0015

\* Среднесуточная концентрация.

Таблица П.1.2

**Предельно допустимые концентрации (ПДК<sub>рз</sub>) пыли  
и других аэрозолей в воздухе рабочей зоны производственных  
помещений [10]**

Наименование веществ	ПДК, мг/м <sup>3</sup>
<i><b>Пыль минеральная и органическая</b></i>	
Кремния диоксид SiO <sub>2</sub> в виде аэрозоля конденсации: при содержании более 60 %	1
от 10 до 60 %	2
Кремния диоксид аморфный и кристаллический при содержании от 10 до 70 % ( гранит, шамот, слюда, углепородная пыль)	2
Кремния диоксид кристаллический при содержании от 2 до 10 % (горючие сланцы, медно-сульфидные руды)	4
Пыль растительного и животного происхождения:	
зерновая	4
мучная и древесная с примесью диоксида кремния менее 2 %	6
льняная, шерстяная с примесью диоксида кремния более 10 %	2
от 2 до 10 %	4
<i><b>Аэрозоли металлов, металлоидов и их соединения</b></i>	
Алюминий, окись алюминия, сплавы алюминия	2
Бериллий и его соединения	0,001
Ванадий и его соединения:	
пыль пятиоксида ванадия	0,5
пыль шлаков	4
Вольфрам и его соединения	6
Германий, окись германия	2
Железа агломерат и окатыши	4
Кадмий и его неорганические соединения	0,05/0,01

## Окончание табл. П.1.2

Наименование веществ	ПДК, мг/м <sup>3</sup>
Кобальт металлический и окись кобальта	0,5
Марганец в сварочных аэрозолях при содержании: до 20 %	0,2
от 20 до 30 %	0,1
Марганца оксиды (в пересчете на MnO <sub>2</sub> )	0,3
Медь	1
Молибден (нерастворимые соединения)	6
Мышьяка неорганические соединения	0,04
Никель, окись никеля	0,05
Свинец и его неорганические соединения	0,01
Селен аморфный	2
Селенистый ангидрид	0,1
Сурьма	0,5
Таллия иодид и бромид	0,01
Тантал и его окислы	10
Теллур	0,01
Титана диоксид	10
Торий	0,05
Уран: растворимые соединения	0,015
нерастворимые соединения	0,075
Хромовый ангидрид, хроматы, бихроматы (в пересчете на CrO <sub>3</sub> )	0,01
Цинка окись	0,5
Цирконий металлический и его нерастворимые соединения (циркон, двуокись, карбид)	6

**Содержание свободной двуокиси кремния в некоторых горных породах и промышленных пылях [12]**

Наименование материала	Содержание SiO <sub>2</sub> , %
<i>Изверженные породы</i>	
Габбро	5–8
Граниты	25–65
Гранодиориты	14–24
Диабазы	2–3
Кварцевые диориты	20–47
Кварцевые порфиры	26–52
Кварцевые сиениты	14–21
Пегматиты	22–40
Пироксениты	1–2
<i>Метаморфические породы</i>	
Амфиболит	12–36
Кварциты	57–92
Гнейсы	27–64
Роговики (гранатовые)	20–24
Скарны	30–50
Слюдяные сланцы	25–50
<i>Осадочные породы</i>	
Бентониты	3–7
Бокситы	0,5–1

## Продолжение табл. П.2

Наименование материала	Содержание SiO <sub>2</sub> , %
Обыкновенные известняки	0,2–8
Песчаники	33–76
Песчанистые известняки	15–37
<b><i>Железные руды и породы Криворожского месторождения</i></b>	
Амфиболиты	12–36
Вмещающие породы	30–40
Джеспилиты	30
Кварциты	57–92
Роговики	20–25
Руда красковая	6
Руда красно-синька	7
Руда синька	10
<b><i>Пыль дробильно-сортировочной фабрики</i></b>	
В руде, в среднем	8–30
Витающая в воздухе	20–25
Осевшая из воздуха	8–10
<b><i>Пыль обогатительной фабрики</i></b>	
В руде, в среднем	30–40
Осевшая из воздуха	40–45
<b><i>Каменный уголь</i></b>	
Буланашского месторождения	3–4
Коркинского месторождения	10–12
Челябинского месторождения	6–8

Наименование материала	Содержание SiO <sub>2</sub> , %
<i><b>Руды и пыли Красноуральского медеплавильного комбината</b></i>	
Гайская, богатая (Оренбургская обл.)	21
Гайская, бедная	44
Красногвардейская (местная)	13
Руда с рудника им. III Интернационала (г. Н. Тагил, Сандonato)	39
Учалинская руда (Башкортостан)	6
Пыль медеплавильного производства	
Конвертерная	7
Обжиговая в электрофильтрах	9
Огарок	16
Отражательная печь	4
Пиритный концентрат	10
Пыль мельниц	
Автоматические весы	29
Аспирационная колонка	4
Бурат для контроля отходов	5
Нория	4
Сепаратор (система 1-го сепарирования)	33
Сепаратор (система 2-го сепарирования)	6
Обоечная машина (система 1-го шелушения)	0,6
Обоечная машина (система 2-го шелушения)	2
Щеточная машина	8

Продолжение табл. П.2

Наименование материала	Содержание SiO <sub>2</sub> , %
<b><i>Пыль литейных цехов</i></b>	
Пескоструйная камера	64
Место вырубки опок	45
Место обрубки, очистки	42
У бегунов	40
У очистных барабанов	39
В туннелях под выбивными решетками	37
В нейтральных точках очистного отделения	27
У наждаков	26
У электросталеплавильных печей	14
Песок	84
Оборотная (горелая) земля	58
Формовочная смесь (облицовочная)	73
Формовочная смесь (наполнительная)	78
Стержневая смесь	70
Глина	8
Наждачная	21
<b><i>Пыль дробильно-сортировочных и обогатительных фабрик</i></b>	
Железные руды Урала	1–4
Медные руды Урала	12–49
Серный колчедан	4–5
Дробильно-сортировочные цеха	10–25
Обогатительные фабрики	40–45

Наименование материала	Содержание SiO <sub>2</sub> , %
<b><i>Пыль агломерационных фабрик</i></b>	
После агломерационных лент	9–15
Колошниковая	18–20
Агломерат	7–12
Концентрат	15
<b><i>Пыль доменных цехов</i></b>	
Выплавка ферромарганца	18
Колошниковая пыль	15–18
Выплавка передельного чугуна при обычном давлении	16
Выплавка передельного чугуна при повышенном давлении	15

**Плотность пылей и материалов [12]**

Наименование материала	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Алебастр	2300–2800
Антрацитная пыль	1597
Апатит	3160–3220
Асбест	2340–2530
Бериллий	1930
Волосяная пыль	1210–1570
Гипс обожженный	1810
Гипс сухой	970
Глет	8646
Глина	2300–2600
Глинозем порошкообразный	1020–1050
Горелая земля	2330
Гравий	1500–1900
Гранит	3400–4300
Графит	1900–2300
Древесная пыль	1170–1240
Дуб	1598
Железная пыль	5678–7881
Железная руда	1600–2400
Железняк бурый	3400–3950
Железняк красный	4500–4900

Продолжение табл. П.3

Наименование материала	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Железняк магнитный	4900–5200
Земля грунтовая	1200–1600
Земля формовочная	840–1300
Зола	400–600
Известняк	2500–2800
Камень, клинкер	500–2000
Каолин	2200
Карборунд	3120–3210
Кварц	2500–2800
Кварцевый песок	2500–2800
Кожа	700–1120
Кокс	360–530
Колчедан магнитный	4540–4640
Колчедан медный	4100–4300
Колчедан серный	4900–5200
Криолит	840–980
Марганцевая руда	3500–4100
Марганцевая руда, красная	3460
Марганцевая руда, черная	3900–4100
Медная пыль	8178–9651
Медная руда	1870–4200
Медный блеск	5500–5800
Медь	8273
Мука	1300

## Продолжение табл. П.3

Наименование материала	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Наждак	3147
Нефелиновый концентрат	1100–1260
Песок из пескоструйного аппарата	2700–3100
Пыль газов вельц-печей цинковых заводов:	
вельц-окись I	5140
вельц-окись III	4320
Пыль газов обжига цинковых концентратов:	
из электрофильтров	4250
после электрофильтров	4600
из газохода	4390
Пыль газов свинцовых заводов:	
из газохода перед рукавным фильтром	3400
из рукавных фильтров	5380
Пыль корундовая	2600–3900
Пыль медеплавильного завода:	
сухой концентрат при сушке	4620
влажный концентрат	4190
Пыль стальная	7700–7800
Пыль угольная	1400–1600
Пыль чугунная	7200–7300
Пыль шахтных печей медно-свинцового завода	4540
Резина	1400–1550
Свинцовая пыль	11820
Свинцовые белила	7452
Сланец аспидный	2560–2900
Слюда	2800–3200

Продолжение табл. П.3

Наименование материала	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Сода кальцинированная	500–1250
Соль поваренная	720–1280
Спек дробленый	1400–1420
Сурик	9315
Тальк	2700
Торф	290–500
Уголь древесный	150–220
Фарфоровая пыль	2460
Фаянс	2594
Фибра	1100–1500
Фтористый алюминий	790–810
Цемент	1300–1500
Цинка окись	5855–7194
Цинковая обманка	3900–4200
Чугун	7162
Чугунная пыль	4595–7326
Шамот	1850–2560
Шерстяная пыль	1549
Шлак	600–1000
Шпат	2700
Штыб	840–890
Щебень	1320–2000

Таблица П.4

### Характеристика пыли в местных отсосах промышленного оборудования [6]

Вариант	Вид местного отсоса и пыли	Плотность пыли, г/см <sup>3</sup>	Концентрация пыли, мг/м <sup>3</sup>	Распределение фракций, % по массе при размере частиц, мкм					
				до 5	5–10	10–20	20–40	40–60	> 60
1	Воздуховод нижнего отсоса от выбивной решетки горелой земли	2,45	13 000	0,1	3	6	25	40	26
2	Воздуховод от накатного укрытия выбивной решетки	2,30	8 000	6	8	30	24	12	20
3	Воздуховод от верхне-бокового отсоса у выбивной решетки	2,25	800	6	8	22	26	23	15
4	Воздуховод от укрытия перегрузки с ленты на ленту в туннеле горелой земли	2,30	1 000	4	4	17	22	8	45
5	Отсос от сита для просеивания горелой земли в смесеприготовительном отделении	2,32	2 000	9	11	43	29	4	4

Продолжение табл. П.4

Вариант	Вид местного отсоса и пыли	Плотность пыли, г/см <sup>3</sup>	Концентрация пыли, мг/м <sup>3</sup>	Распределение фракций, % по массе при размере частиц, мкм					
				до 5	5-10	10-20	20-40	40-60	> 60
6	Отсос из шаровой мельницы в смесеприготовительном отделении (уголь)	1,57	10 500	45	27	19	5	3	1
7	Отсос из шаровой мельницы в смесеприготовительном отделении (глина)	2,60	12 500	73	17	8	1	1	—
8	Отсос из дробеетного барабана (горелая земля и металл)	3,1	5 000	6	5	4	15	20	50
9	Отсос из очистного барабана в литейном цехе (горелая земля и металл)	2,8	6 000	7	6	9	16	17	45
10	Отсос при обдирке литья абразивно-стационарными кругами (абразив и чугуи)	3,2	600	1	1	3	9	13	73
11	Отсос из малой пескоструйной камеры	2,6	8 000	4	6	3	6	4	77
12	Отсос из большой пескоструйной камеры	2,6	4 000	5	14	25	17	10	29

Продолжение табл. П.4

Вариант	Вид местного отсоса и пыли	Плотность пыли, г/см <sup>3</sup>	Концентрация пыли, мг/м <sup>3</sup>	Распределение фракций, % по массе при размере частиц, мкм					
				до 5	5-10	10-20	20-40	40-60	> 60
13	Отсос из большой пескоструйной камеры (объем камеры 78 м <sup>3</sup> )	2,6	4 000	28	27	10	10	3	22
14	Отсос от защитно-обеспыливающего кожуха абразивного круга заточно-шлифовального станка (абразив и сталь)	3,6	300	13	12	23	23	22	7
15	Местный отсос при ручной электродуговой сварке электродами УОНИ-13 (окислы железа, марганца и других составных частей обмазки электродов)	4,35	100	52	18	18	9	3	—
16	Отсос от электродуговой печи карбидного завода (карбид кальция, известь, уголь)	2,29	2 100	60	17	14	7	2	—
17	Коксовая пыль (отсосы от перегрузок на ленточных транспортерах)	—	1 100	8	6	16	33	25	12
18	Коксовая пыль (отсосы от десятивалкового грохота, от виброгрохота)	—	1 800	8	6	16	33	25	12

Окончание табл. П.4

Вариант	Вид местного отсоса и пыли	Плотность пыли, г/см <sup>3</sup>	Концентрация пыли, мг/м <sup>3</sup>	Распределение фракций, % по массе при размере частиц, мкм					
				до 5	5-10	10-20	20-40	40-60	> 60
19	Отсос от миксера при разливке стали в мареновском цехе (графитовая пыль)	2,25	400	3	4	4	35	6	48
20	Отсос от вагранки с дожиганием газов (пыль колосниковых газов)	2,14	—	20	8	1	2	2	67
21	Отсос от прокатного стана (окислы железа)	5,82	—	—	6	4	7	6	77
22	Отсос при расфасовке цемента	2,84	—	37	18	8	6	12	19
23	Отсос при абразивной обработке прессованных деталей (пластмасса, вулканизированная резина, асбест)	2,12	40 000	12	5	25	19	18	21
24	Дуговая электропечь (предварительно очищенная в мультициклоне пыль белого корунда, поступающая в электро-фильтр)	3,8	7 000	15	15	27	30	8	5
25	Воздушный поток, отходящий из паровой сушилки торфа	0,8	2 000	2	4	8	22	9	55

**Средние концентрации пыли в воздухе, удаляемом местными  
отсосами от укрытий пылящего оборудования [12]**

Оборудование	Концентрация пыли в воздухо- воде, мг/м <sup>3</sup>
<i>Литейные цеха</i>	
Мельницы для размола угля и глины:	
отсос из барабана машины	9 000
отсос из кожуха укрытия	500
сита полигональные и плоские	2 000
бегуны смешивающие	1 000
головки элеваторов оборотной земли	1 000
укрытия перегрузок горелой земли по желобам	2 000
станки для зачистки стержней	500
Выбивные решетки конвейерных литейных цехов:	
отсос снизу из бункера	2 500
отсос сверху (над решеткой)	600
Обрубные столы	4 000
Очистные барабаны:	
для изделий массой менее 20 кг	500
для изделий массой более 20 кг	4 000
Точильно-обдирочные станки	2 000
Пескоструйные камеры:	
отсос от камеры	4 000
отсос от головки элеватора	2 000
Дробебетные камеры:	
отсос от камеры	2 000
отсос от головки элеватора	2 000
отсос от сепаратора	5 000
Сушилки для песка (непрерывного действия)	1 000

Продолжение табл. П.5

Оборудование	Концентрация пыли в воздухо-воде, мг/м <sup>3</sup>
<b><i>Цеха огнеупорной промышленности</i></b>	
Отсос от шаровой мельницы	24 000
Отсос от тарельчатых питателей	8 000
Отсос от транспортерных лент и шихтовых элеваторов	1 400
Аспирация дробильно-размольного оборудования на динасовом заводе при сухом размоле	4 000
Аспирация дробильно-размольного оборудования на динасовом заводе при увлажнении	130
Аспирация дробильно-размольного оборудования при производстве керамических изделий	18 000
То же в отсосе от дробильных валков	2 300
Аспирация шамотных цехов: отсос от шаровых мельниц отсос от тарельчатых питателей конвейерные ленты и элеваторы	24 000 8 000 1 400
<b><i>Рудоподготовительные и агломерационные фабрики</i></b>	
Охладители агломерата и возврата, обжиговые печи с кипящим слоем	2 300
Дробилки, грохоты, бункерные устройства, транспортеры	2 500
Разгрузочные и погрузочные устройства	3 200
Перегрузка руды из дробилки на конвейер	3 200
Перегрузка руды из элеватора на конвейер	2 500
Перегрузка из бегунов на сито	6 900

Окончание табл. П.5

Оборудование	Концентрация пыли в воздухе, мг/м <sup>3</sup>
Питатель тарельчатый	8 000
Питатель ленточный	2 200
Смеситель	2 200
Шаровая мельница	24 000
Ковшовый элеватор	1 400
<b><i>Цементные заводы</i></b>	
Щековая и молотковые дробилки	7 000
Сушильный барабан для глины	20 000
Сырьевые мельницы с одновременной сушкой	350 000
Вращающиеся печи	10 000
Цементные мельницы:	180 000
работающие по открытому циклу	
работающие по замкнутому циклу	150 000
<b><i>Элеваторы, мельницы, крупяные и комбикормовые заводы</i></b>	
Сепараторы «черные»	4 900
Обоочные машины с абразивным цилиндром (система 1-го шелушения)	2 900
То же (система 2-го шелушения)	900
Вальцевые станки (драные системы)	4 000
Вальцевые станки (размольные системы)	1 400
Воздуховоды ситовеелок	1 400
Воздуховоды рассевов	2 800
Воздуховоды центрофугалов и щеточных машин	1 200

**Характеристика взрыво- и огнеопасных пылей [12]**

Наименование пыли	Влажность, %	Зольность, %	Низший предел взрывной концентрации, г/м <sup>3</sup>
Алюминиевый порошок	—	—	58
Антрацен	—	—	5
Галалитовая	8,82	7,88	8,0
Древесная мука	6,35	5,40	30,2
Древесные опилки	—	—	65
Канифоль	—	0,5	5
Крахмал картофельный	17	3,35	40,3
Льняная костра	8,26	5,5	16,7
Мельничная серая	—	—	10,1
Молоко сухое	3,86	5,58	7,6
Мясокостная мука	—	—	10,1
Нафталин	—	—	2,5
Пек	—	1,4	15
Сажа газовая	—	0,55	20,0
Сахар свекловичный	—	—	8,9
Сера (серный цвет)	—	—	2,9
Сланцевая	1,3	4,9	58,0
Табачная	4,15	28,20	68,0
Торф фрезерный	20	5,4	20,2
Торфобрикет	—	—	10,1

Окончание табл. П.6

Наименование пыли	Влажность, %	Зольность, %	Нижший предел взрывной концентрации, г/м <sup>3</sup>
Торфяная	—	—	10,1
Угольная	7,70	32,40	114
Угольная (высокозольная)	—	—	114–400
Цинковая	—	—	800
Чайная	7,3	5,6	32,8
Шеллак	2	2,91	15
Эбонитовая	—	—	7,6
Элеваторная	—	—	227

**Фракционная эффективность пылеуловителей и фильтров [12]**

Пылеуловители и фильтры	Плотность пыли, г/см <sup>3</sup>	Фракционная эффективность пылезадержания, %, в зависимости от размеров частиц, мкм					
		до 5	5–10	10–20	20–40	40–60	> 60
<b>Циклоны</b>							
ВЦНИИОТ; $D = 5$ м	—	12	13	21	20	47	94
ЛИОТ № 1; $D = 565$ мм	2,6	76	90	97	99	100	98
ЛИОТ № 2; $D = 765$ мм	2,6	67	78	91	98	99	99
Конический (ВТИ); $D = 3,7$ м	2,54	40	40	68	98	99	100
Циклон НИИОГАЗ типа ЦН-15; $D = 600$ мм	1,93	55	87	98	98,5	99	99
<b>Мультициклоны</b>							
НИИОГАЗ; $D = 150$ мм	2,2	54	71	83	95	97	98
НИИОГАЗ, комбинированный с электрофильтром ДВП; $D = 250$ мм	2,0	26	60	66	73	83	88
Инерционный конический (ЛИОТ)	2,6	74	90	96	98	100	97

Пылеуловители и фильтры	Плотность пыли, г/см <sup>3</sup>	Фракционная эффективность пылезадержания, %, в зависимости от размеров частиц, мкм					
		до 5	5–10	10–20	20–40	40–60	> 60
		<b>Центробежные</b>					
КЦП (ВЦНИИОТ)	2	41	73	73	87	100	—
Турбодиклон (МВТУ)	—	26	45	60	97	100	—
Ротоклон (ВНИИСТО)	3	37	65	75	85	100	—
Скруббер ВГИ; $D = 1240$ мм	2	85	94	99	—	100	100
Скруббер ВГИ; $D = 1000$ мм на золе Кузнецкого угля	2	71	83	89	93	95	98
Скруббер ВГИ; $D = 1000$ мм на золе кемеровского угля	2	67	85	92	94	97	99
Циклон ЛИОТ с водяной пленкой; $D = 450$ мм	2,6	50	75	98	100	100	100
Циклон ЛИОТ с водяной пленкой; $D = 888$ мм, пыль пескоструйная	2,6	35	68	90	100	100	100
Циклон с водяной пленкой ВЦНИИОТ; $D = 220$ мм, пылевидный кварц	2	—	92	—	98	99	100

Продолжение табл. П.7

	Плотность пыли, г/см <sup>3</sup>	Фракционная эффективность пылезadržания, % в зависимости от размеров частиц, мкм					
		до 5	5–10	10–20	20–40	40–60	> 60
Пылеуловители и фильтры							
Скруббер ВГИ — Промстройпроект; D = 500 мм, размолотый уголь	1,57	84	90	95	98	100	100
Циклон с водяной пленкой; D = 400 мм (лабораторная установка ЛИОГ), пыль пескоструйная)	2	32	60	96	99	99	100
<b>Пенные пылеуловители</b>							
Однополочный аппарат; летучая зола с начальной концентрацией 6–9 г/м <sup>3</sup>	2,26	83	91	96	100	100	100
Однополочный аппарат (лаборатория ЛТИ), песчаная пыль; удельный расход воды 0,2 л/м <sup>3</sup>	2,6	52,0	85,0	95,0	98,5	99,8	100
<b>Рукавные фильтры</b>							
Фильтр с рукавами из х/б ткани	2,6	9,9	99,9	99,5	99,5	99,9	100
Фильтр с рукавами из х/б ткани после 10 лет эксплуатации, пыль пескоструйная	2,6	93	98	98	99	99	100

Окончание табл. П.7

Пылеуловители и фильтры	Плотность пыли, г/см <sup>3</sup>	Фракционная эффективность пылезадержания, %, в зависимости от размеров частиц, мкм					
		до 5	5–10	10–20	20–40	40–60	> 60
Фильтр с рукавами из сукна БЭТ № 2, пыль пескоструйная	2,6	98	98	98	99	99	99
Фильтр с рукавами из шерстяной ткани, пыль цементных заводов	3,0	96	98	98	99	99	100
<b>Электрофильтры</b>							
Вертикальный пластинчатый треста «Газоочистка» после багарейного циклона БЦ-250, зола донецкого угля	2	93	96	98	99	100	100

## Исходные данные для выполнения расчетов рассеивания пылевых выбросов

№ п/п	Регион	Объем $V$ , м <sup>3</sup> /с	$\Delta T$ , К	Высота $H$ , м	Диаметр $D$ , м	Количество ВВ $M$ , г/с	F	$\Phi$ , мг/м <sup>3</sup>	$l$ , м	$e$ , м
1	Северо-Запад	24,1	18	33	1,0	4,03	2,5	0,08	200	800
2	Урал	7,6	3	42	0,9	4,6	3,0	0,30	150	800
3	Сибирь	5,1	40	31	1,0	6,2	2,5	0,25	200	1000
4	Север	3	2	27	0,9	2,1	3,0	0,25	250	1200
5	Урал	9,4	5	29	0,9	0,95	3,0	0,12	150	1000
6	Урал	8	5	38	0,9	2,8	3,0	0,12	350	800
7	Север	7,8	10	25	0,9	1,9	2,0	0,18	300	900
8	Сибирь	10,5	40	31	1	6,2	2,5	0,25	200	1000
9	Поволжье	5,56	30	27	0,9	1,65	2,0	0,15	300	900
10	Дальний Восток	6,5	12	19	0,9	0,78	2,0	0,20	100	1200
11	Урал	1,7	20	20	1,1	2,85	3,0	0,35	200	1000
12	Сибирь	14,1	18	32	1,0	4,2	2,0	0,22	200	750

Окончание табл. П.8

№ п/п	Регион	Объем $V$ , м <sup>3</sup> /с	$\Delta T$ , К	Высота $H$ , м	Диаметр $D$ , м	Количество ВВ $M$ , г/с	F	$\Phi$ , мг/м <sup>3</sup>	$l$ , м	$e$ , м
13	Поволжье	1,45	18	27	0,9	3,42	2,5	0,20	400	750
14	Центр	7,2	15	18	1,0	1,3	2,0	0,16	250	900
15	Север	12,4	25	25	1,0	4,26	2,5	0,20	150	1000
16	Северо-Запад	14,8	16	28	1,0	3,8	2,0	0,18	300	800
17	Урал	7,5	10	26	0,9	2,6	2,0	0,20	400	1000
18	Север	14,1	18	40	1,0	4,23	3,0	0,15	200	800
19	Дальний Восток	4,7	15	28	0,9	2,2	2,0	0,30	150	600
20	Урал	7,36	3	31	1,0	1,21	2,0	0,10	300	900
21	Поволжье	12,1	15	36	1,0	4,23	2,0	0,20	150	750
22	Север	13	5	24	1,0	2,6	2,0	0,13	200	1500
23	Сибирь	15,6	8	34	1,0	2,5	2,0	0,20	200	1000
24	Дальний Восток	6,5	12	23	0,9	0,78	2,0	0,20	50	1200
25	Урал	5,2	15	24	1,0	1,2	2,0	0,12	200	800

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
1. ЭКОЛОГИЯ АТМОСФЕРЫ .....	5
1.1. Понятие о физике тропосферы.....	5
1.2. Распространение загрязнений в атмосфере .....	9
2. РАСЧЕТ РАССЕЙВАНИЯ ВЫБРОСОВ.....	13
2.1. Общие положения.....	13
2.2. Одиночные источники выбросов .....	15
2.3. Группа источников выбросов .....	20
2.4. Влияние застройки .....	23
3. ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ РАСЧЕТОВ .....	29
3.1. Общая характеристика программы.....	29
3.2. Подготовка исходных данных .....	29
4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УЩЕРБА .....	34
5. ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА ВЫБРОСАМИ ПЫЛИ .....	37
5.1. Физические свойства и дисперсный состав пыли.....	37
5.2. Начальная запыленность воздуха перед пылеуловителем .....	45
5.3. Необходимая эффективность очистки воздуха.....	47
5.4. Предварительный выбор способа очистки воздуха .....	48
5.5. Фракционная эффективность пылезадержания.....	50
6. КОНСТРУКЦИИ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ .....	52
6.1. Инерционные пылеуловители сухого типа .....	52
6.2. Инерционные пылеуловители мокрого типа .....	60
6.3. Тканевые пылеуловители.....	67
6.4. Электрическая очистка газов.....	69
7. МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОТ ВРЕДНЫХ ГАЗОВ И ПАРОВ .....	73
7.1. Абсорбция .....	72
7.2. Адсорбция .....	74

7.3. Термическая нейтрализация .....	75
7.4. Биохимические методы.....	76
8. НОРМИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ .....	77
8.1. Предельно допустимые концентрации .....	77
8.2. Предельно допустимые выбросы.....	79
9. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТИЗА ПРОЕКТОВ .....	82
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	85
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	87
<i>Приложение 1.</i> Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ .....	87
<i>Приложение 2.</i> Содержание свободной двуокиси кремния в некоторых горных породах и промышленных пылях .....	91
<i>Приложение 3.</i> Плотность пылей и материалов.....	96
<i>Приложение 4.</i> Характеристика пыли в местных отсосах промышленного оборудования.....	100
<i>Приложение 5.</i> Средние концентрации пыли в воздухе, удаляемом местными отсосами от укрытий пылящего оборудования.....	104
<i>Приложение 6.</i> Характеристика взрыво- и огнеопасных пылей.....	107
<i>Приложение 7.</i> Фракционная эффективность пылеуловителей и фильтров .....	109
<i>Приложение 8.</i> Исходные данные для расчета рассеивания пылевых выбросов.....	113

Учебное издание

Толстова Юлия Исааковна  
Шумилов Рудольф Николаевич  
Пастухова Лилия Германовна

## ОХРАНА ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА

Учебное пособие

Заведующий редакцией	<i>М. А. Овечкина</i>
Редактор	<i>Е. В. Березина</i>
Корректор	<i>Е. В. Березина</i>
Оригинал-макет	<i>Л. А. Хухаревой</i>

План выпуска 2016г. Подписано в печать 31.03.2017  
Формат 60 × 84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Гарнитура Times.  
Уч.-изд. л. 5,8. Усл. печ. л. 7,0. Тираж 50 экз. Заказ 27.  
Издательство Уральского университета  
620000, г. Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.  
Тел.: + (343) 350-56-64, 350-90-13  
Факс +7 (343) 358-93-06  
E-mail: [press-urfu@mail.ru](mailto:press-urfu@mail.ru)

*Для заметок*

*Для заметок*

