



СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

**Т. А. Кулагина, Л. В. Кула**  
**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ**  
**ОСНОВЫ ЗАЩИТЫ**  
**ОКРУЖАЮЩЕЙ**  
**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**



**ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

гина

Е

ТЫ

СРЕДЫ



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Сибирский федеральный университет

Т. А. Кулагина, Л. В. Кулагина

# **Теоретические основы защиты окружающей среды**

Учебное пособие

Красноярск  
СФУ  
2017

УДК 502.1(07)  
ББК 20.1я73  
К900

*Р е ц е н з е н т ы:*

*Н. Д. Демиденко*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Теплотехника и гидрогазодинамика» СФУ;

*В. В. Москвичев*, доктор технических наук, директор Красноярского филиала ИВТ СО РАН – специального конструкторско-технологического бюро «Наука»

**Кулагина, Т. А.**  
К900 Теоретические основы защиты окружающей среды : учеб. пособие / Т. А. Кулагина, Л. В. Кулагина. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. – 364 с.  
ISBN 978-5-7638-3678-3

Изложены основы теории образования вредных выбросов в промышленности. Рассмотрены современные методы защиты окружающей среды от вредных выбросов в атмосферу и гидросферу, приведены сведения о схемных решениях этих методов.

Предназначено для магистрантов направления подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность», обучающихся по программам 20.04.01.01 «Безопасность жизнедеятельности в техносфере», 20.04.01.03 «Чрезвычайные ситуации в техносфере», 13.04.01.01 «Энергетика теплотехнологий», 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника». Может быть использовано студентами других специальностей при изучении планирования эксперимента в машиностроении, энергетике, строительстве, транспорте и др.

Электронный вариант издания см.:  
<http://catalog.sfu-kras.ru>

УДК 502.1(07)  
ББК 20.1я73

ISBN 978-5-7638-3678-3

© Сибирский федеральный университет, 2017



## ВВЕДЕНИЕ

*Человек одарен разумом и творческой силой, чтобы преумножать то, что ему дано, но до сих пор он не творил, а разрушал. Лесов все меньше и меньше, реки сохнут, дичь перевелась, климат испорчен, и с каждым днем земля становится все беднее и безобразнее.*

А. П. Чехов

В своем стремлении познать мир человечество преобразовывало его для удовлетворения своих постоянно растущих потребностей. Быстро растущая численность и активность населения Земли столь же быстро увеличивают и антропогенное воздействие на природу, вызывая цепочку негативных последствий: сокращение природных ресурсов, загрязнение среды, разрушение атмосферы, воды и почвы.

Сотни лет усилия науки были направлены на изучение сущности мира, но и сегодня она находится только в начале пути, потому что любое новое знание, любое открытие рождает новые вопросы, требующие дальнейших исследований.

До сих пор масштабы, динамика и механизмы многих природных явлений остаются непознанными, непредсказуемыми и разрушительными. С конца XIX века такая ситуация усугубляется новыми проблемами, связанными с усилением влияния техногенных факторов на окружающую среду.

Необходимость изменения парадигмы интересов науки и ее роли в жизни общества стала актуальной. Одновременно с углублением познания природы ученым все больше приходится заниматься поиском фундаментальных закономерностей взаимодействия общества и природы, решением задач сохранения и восстановления природных комплексов, оздоровления окружающей среды, устойчивого развития.

Парадокс состоит в том, что в конце XX – начале XXI века наука, создавшая мощные средства использования природных ресурсов и преобразования биосферы, приступила к поиску концеп-

ций и средств защиты от своих же изобретений. В этом смысле большие надежды связывают с экологией.

Решение задач защиты окружающей среды сопряжено с разрешением научных, экономических, социальных и политических проблем. Оптимальное решение этих задач требует от общества, специалистов и ученых понимания прошлых и предстоящих изменений на Земле.

Неразрывная, органичная взаимосвязь и взаимозависимость условий обеспечения энергопотребления и сохранения окружающей среды как важнейших факторов жизнедеятельности человека и развития технологий ставят проблему взаимодействия энергетики и окружающей среды. Еще В. И. Вернадский, анализируя воздействие человека на природу, отметил, что человек становится крупнейшей геологической силой, меняющей облик нашей планеты.

С ростом единичных мощностей энергоблоков электрических станций и энергетических систем, удельных и суммарных уровней энергопотребления возникла проблема ограничения загрязняющих выбросов и воздействий на воздушный и водный бассейны, принципиально новые аспекты которой обозначились с развитием ядерной энергетики.

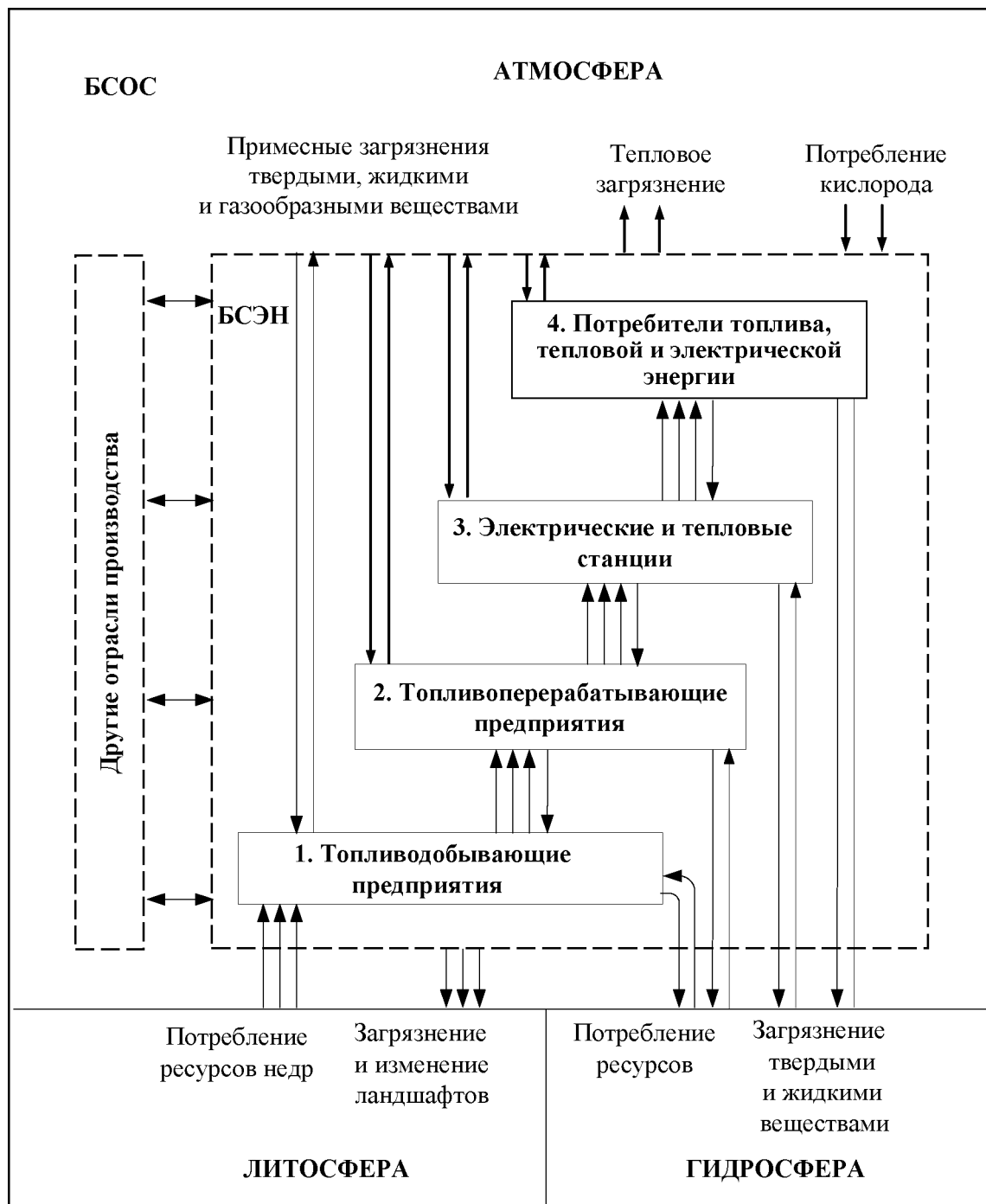
Важнейшей стороной проблемы взаимодействия энергетики и окружающей среды в новых условиях является все более возрастающее обратное влияние – определяющая роль условий окружающей среды в решении практических задач энергетики (выбор типа энергетических установок, дислокации предприятий, выбор единичных мощностей энергетического оборудования и др.).

Исследования совокупности антропогенных воздействий на биосферу – часть окружающей среды, определяющую все стороны жизнедеятельности человека и всего животного и растительного мира, включая ландшафт, недра, воздушный и водный бассейны, продукты питания, – дают основания для рассмотрения всей окружающей среды как большой, сложной системы.

В соответствии с установившейся терминологией энергетика (топливно-энергетический комплекс) включает в себя получение, переработку, преобразование, транспортировку, хранение и использование энергоресурсов и энергоносителей всех видов.

В общем случае различают следующие основные стадии трансформации первичных энергетических ресурсов:

- извлечение, добыча или прямое использование;
- переработка (облагораживание) до состояния, пригодного для преобразования или использования;



Структурная схема большой системы «энергетика – окружающая среда»

преобразование связанной энергии переработанных ресурсов в электрическую на тепловых (ТЭС), атомных (АЭС) и гидравлических (ГЭС) электростанциях и в тепловую в котельных и на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ);

использование энергии.

Каждая из этих стадий основана на различных физических, физико-химических и технологических процессах, различающихся по масштабам, времени функционирования и другим признакам.

Развитие энергетики оказывает воздействие на различные компоненты природной среды: на атмосферу (потребление кислорода, выбросы газов, паров и твердых частиц), гидросферу (потребление воды, переброска стоков, создание водохранилищ, сбросы загрязняющих и нагретых вод, жидких отходов) и литосферу (потребление ископаемых топлив, изменение водного баланса, изменение ландшафта, выбросы на поверхности и в недра твердых, жидких и газообразных токсичных веществ). Кроме того, имеют место общие для всей окружающей среды энергетические воздействия (электромагнитное излучение, электрическое и магнитное поля, ионизирующее излучение, шум и вибрация, а также тепловое загрязнение), которые в настоящее время приобретают глобальный характер, затрагивая все структурные компоненты нашей планеты.

Из вышесказанного следуют задачи настоящего курса, базирующегося на таких дисциплинах, как гидрогазодинамика, технологические процессы и загрязняющие выбросы, физика атмосферы и гидрофизика, термодинамика и тепломассообмен и др. Это изучение основных физико-химических и физических процессов и методов защиты окружающей среды от техногенных воздействий в теплоэнергетике.

В настоящем учебном пособии рассмотрено взаимодействие энергетики лишь с частью окружающей среды, а именно с атмосферой и гидросферой, которое в совокупности с методами защиты окружающей среды позволяет проводить системный анализ ситуации на базе построения физической, математической, экономической и других моделей с использованием аналитических и экспериментальных данных. Решение оптимизационных задач взаимодействия структур, свойств и явлений в БСЭНОС позволит характеризовать систему с целью разработки мероприятий по обеспечению равновесного или близкого к нему функционирования.

# 1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

## 1.1. Аэрозольные загрязнения

Твердые (жидкие) частицы вещества, суспендированные в воздухе, т. е. в виде аэрозолей, находятся в нестабильном состоянии и с течением времени отделяются от воздуха. Однако они могут находиться во взвешенном состоянии продолжительное время, тем самым ухудшая качество атмосферного воздуха. Основными факторами, определяющими степень отрицательного воздействия аэрозольных загрязнений, являются, как правило, размеры частиц, их концентрация и химический состав.

*Диспергационные аэрозоли* – результат пыления порошков или измельчения твердых и жидких материалов. *Конденсационные аэрозоли* появляются в результате химического взаимодействия газов с образованием нелетучего продукта или при конденсации пересыщенных паров. При этом диаметр их частиц меньше 0,5 мкм.

В диспергационных аэрозолях размер частиц значительно больше. Такие аэрозоли с твердыми частицами неправильной формы называются *пылью*. Конденсационные аэрозоли с твердой и смешанной дисперсными фазами называются *дымами*. Конденсационные и диспергационные аэрозоли с жидкой дисперсной фазой называются *туманами*. Эти определения используются независимо от размера частиц в аэрозолях.

**Размер частиц.** В состав аэрозолей могут входить частицы различных размеров в диапазоне от  $10^{-3}$  до  $10^3$  мкм. При этом масса частицы от меньшей до большей может увеличиться в  $10^{18}$  раз. Аэрозольные частицы подразделяют на три группы: первая группа – частицы размерами от  $10^{-3}$  до  $10^{-1}$  мкм; вторая – от  $10^{-1}$  до 1 мкм; третья – 1 до  $10^3$  мкм. Физические свойства частиц разных групп и ха-

раактеристики их движения (скорость испарения и охлаждения, скорость движения, рассеяние света, сопротивление движению и т. д.), а также механизм удаления их из среды различны.

Размер частиц можно определить с помощью оптического или электронного микроскопов. При этом не учитывается форма частицы и ее плотность. Так как частицы, присутствующие в атмосфере, значительно отличаются по степени агрегации и по плотности, целесообразно определять их размеры по аэродинамическому поведению. Диаметр Стокса  $d_p$  находят как диаметр сферической частицы, обладающей той же скоростью оседания, что и рассматриваемая частица, и плотностью, равной объемной плотности вещества рассматриваемой частицы. Так как диспергационные и конденсационные аэрозоли состоят из различных материалов, то целесообразнее для определения размера частиц пользоваться *аэродинамическим диаметром*  $d_{pa}$ . Это диаметр сферической частицы, имеющей такую же скорость оседания, что и рассматриваемая частица, и плотность, равную  $1 \text{ г/см}^3$ .

**Концентрация частиц** определяется так же, как и плотность газов, выражается числом или массой частиц и рассчитывается как отношение числа частиц в данном объеме к величине этого объема.

В загрязненном воздухе большинство частиц имеют размеры от 0,01 до 0,1 мкм с концентрацией порядка  $10^6$  на  $1 \text{ см}^3$ , а вблизи источников выброса – на несколько порядков выше. Концентрация частиц размером больше 1 мкм обычно составляет менее десяти единиц на  $1 \text{ см}^3$ . Это так называемая *концентрация по числу частиц*, она может быть определена, например, методом рассеяния света.

*Концентрация по массе* – отношение массы частиц в данном объеме к величине этого объема. В загрязненном воздухе концентрация по массе твердых частиц обычно менее  $1 \text{ мг/м}^3$ , а в воздуховодах систем промышленной вентиляции – более  $1 \text{ г/м}^3$ , что определяется фильтрацией.

**Химический состав.** Каждая твердая частица аэрозоля может состоять из нескольких химических компонентов. В отдельных случаях сделать подобный анализ возможно с помощью электронного микрозонда и квадрупольной масс-спектрометрии. В обычных аналитических лабораториях идентификация отдельных частиц невозможна. Поэтому, как правило, используется информация об усредненном химическом составе для всех размеров частиц и всего интервала отбора проб.

Пробы отбираются двумя методами: методом полной фильтрации и с помощью каскадного импактора. В последнем случае полу-

чают данные о зависимости химического состава от размера частиц, подвергая анализу каждую фракцию, получаемую при разделении. Это может позволить выбирать методы для удаления из отходящих газов наиболее опасных веществ.

**Безразмерные параметры.** Число Рейнольдса для потока  $Re_g$  – это отношение величин сил инерции и сил вязкости в потоке жидкости. Если  $Re_g < 2100$ , то силы вязкости доминируют и течение является ламинарным. Если  $Re_g > 4000$ , то наблюдается турбулентное течение. Для потока

$$Re_g = Du_g \frac{\rho_g}{\mu_g},$$

где  $D$  – характерный размер воздуховода, например диаметр, см;  $u_g$  – скорость потока газа, см/с;  $\rho_g$  – плотность газа, г/см<sup>3</sup>;  $\mu_g$  – абсолютная вязкость газа, Па · с.

Число Рейнольдса для частиц  $Re_p$  – это величина порядка от  $10^{-4}$  до  $10^2$ . Число Рейнольдса для частиц зависит от скорости движения частиц относительно газового потока и от свойств жидкости, если частица является жидкой.

Для частиц

$$Re_p = d_p (u_p - u_g) \frac{\rho_g}{\mu_g},$$

где  $d_p$  – диаметр частицы, см;  $u_p$  – скорость частицы, см/с.

Число Кнудсена  $Kn$  является безразмерным параметром, характеризующим движение частиц, и представляет собой отношение средней длины свободного пробега молекул газа к диаметру частиц:

$$Kn = \frac{2\lambda_g}{d_p},$$

где  $\lambda_g$  – средняя длина свободного пробега молекул газа, см:

$$\lambda_g = kT / 2\pi P d_i^2,$$

где  $k$  – постоянная Больцмана, равная  $1,38062 \cdot 10^{23}$  Дж/К;  $T$  – абсолютная температура газа, °С;  $P$  – давление газа, кПа;  $d_m$  – диаметр молекулы, см. Например, для молекул воздуха при 20 °С и 760 мм рт. ст.

$\lambda_g \approx 6,53 \cdot 10^{-2}$  мкм. Если газ состоит из очень малых частиц, то среду можно рассматривать как дискретную, где частицы стремятся проскользнуть между молекулами газа. В этом случае  $Kn > 0,1$ .

Для выявления влияния молекул газа на движение частиц выделяют четыре режима, которые соответствуют изменению размеров частиц от больших до малых: гидродинамический; течение со скольжением; переходный; свободномолекулярный. Приблизительные диаметры частиц в воздухе в стандартных условиях приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

**Величина частиц для различных режимов течения в воздухе при 20 °С и 760 мм рт. ст.**

Течение	$Kn$	$d_p$ , мм
Гидродинамическое (стоксовское)	$<0,1$	$>1,3$
Со скольжением (Каннингхема)	$\leq 0,3$	$>0,4$
Переходное	$10-0,3$	$0,01-0,4$
Свободномолекулярное	$>10$	$<0,01$

*Поправочный коэффициент Каннингхема  $C'$  для течения со скольжением*, полученный экспериментально Милликеном в опытах с масляными капельками, используется для учета скольжения частиц между молекулами газа, когда  $Kn > 0,1$  (дискретная среда). Упрощенно для воздуха при нормальном давлении он может быть рассчитан по формуле

$$C' = 1 + \left( 6,21 \cdot 10^{-1} \frac{T}{d_p} \right).$$

Поправочный коэффициент Каннингхема становится настолько малым, что им можно пренебречь, когда размеры аэрозолей превышают 1 мкм (при нормальных условиях).

*Число Стокса  $St$  (или параметр соударения  $K_p$ )* – безразмерное отношение расстояния, на которое сближаются частицы, к характерному размеру системы, отражает относительное воздействие на частицу силы тяги и сил вязкости:

$$St = K_p = 2 \frac{x_s}{d_c},$$



где  $x_s$  – путь торможения частицы, см;  $d_c$  – диаметр препятствия, см.

**Аэродинамический диаметр.** Как правило, дымовые газы от промышленных производств содержат аэрозоли, состоящие из частиц различной плотности, формы и размера. Это сказывается на эффективности их улавливания.

Аэродинамический диаметр является показателем реакции частицы на действие инерционных сил, например в мокрых скрубберах и циклонах. Его можно определить, используя каскадный импактор. При одинаковом аэродинамическом диаметре частицы будут улавливаться с одинаковой эффективностью независимо от их формы, размера и плотности.

Таблица 1.2

**Уравнения, используемые для пересчета размеров частиц**

Искомый диаметр	Уравнение для пересчета		
	Диаметр Стокса $d_p$	Классический аэродинамический эквивалентный диаметр $d_{pac}$	Импакторный аэродинамический диаметр $d_{pa}$
Диаметр Стокса $d_p$	1,0	$d_{pac} = d_p \left[ \frac{\rho C(d_p)}{C(d_{pac})} \right]^{1/2}$	$d_{pa} = d_p \left[ C(d_p) \rho \right]^{1/2}$
Классический аэродинамический диаметр $d_{pac}$	$d_p = d_{pac} \left[ \frac{C(d_{pac})}{C(d_p) \rho} \right]^{1/2}$	1,0	$d_{pa} = d_{pac} \left[ C(d_{pac}) \right]^{1/2}$
Аэродинамический диаметр соударения $d_{pa}$	$d_p = d_{pa} \left[ \frac{1}{C(d_p) \rho} \right]^{1/2}$	$d_{pac} = d_{pa} \left[ \frac{1}{C(d_{pac})} \right]^{1/2}$	1,0

**Примечание.** Диаметр Стокса используют как приближение к физическому диаметру частицы. Импакторный аэродинамический диаметр применяют при проектировании очистного оборудования.

Существует несколько определений аэродинамического диаметра (табл. 1.2):

1. Диаметр Стокса ( $d_p$ ) – произведение диаметра сферы, имеющей такую же скорость оседания и плотность, как и рассматриваемая частица, на поправочный коэффициент Каннингхема.

2. Классический аэродинамический эквивалентный диаметр ( $d_{pac}$ ) – диаметр сферы с единичной плотностью ( $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ ), обладающей такой же скоростью оседания, как и рассматриваемая частица при малых значениях числа Рейнольдса, умноженный на поправочный коэффициент Каннингема для соответствующего диаметра ( $C(d_{pac})$  или  $C(d_{pa})$ ).

3. Импакторный аэродинамический диаметр ( $d_{pa}$ ) – диаметр сферы, имеющей единичную плотность и обладающей такой же скоростью оседания, как и рассматриваемая частица при малых числах Рейнольдса. Значение диаметра не умножается на коэффициент Каннингема. Диаметр ( $d_{pa}$ ) является наиболее подходящим параметром при расчетах процессов инерционного разделения частиц.

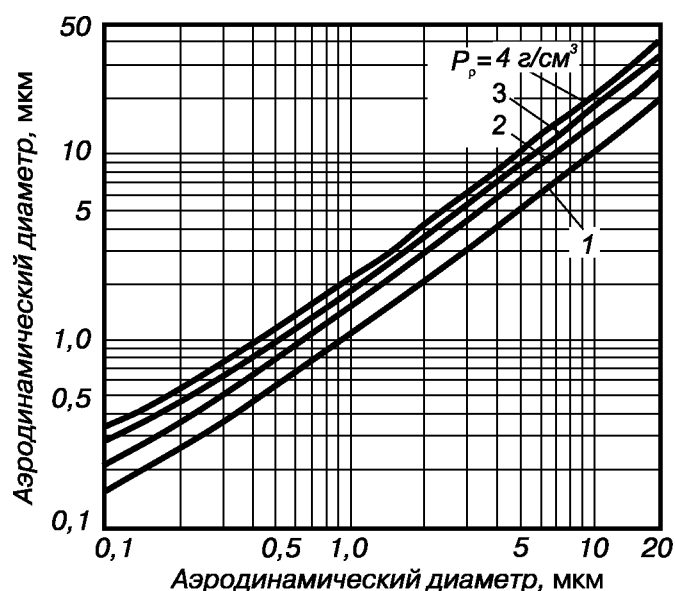


Рис. 1.1. Соотношение между физическим и аэродинамическим диаметрами

Соотношение между различными диаметрами частиц с различной плотностью графически показано на рис. 1.1.

Диаметр отсекания  $d_{pc}$ , при котором эффективность улавливания составляет 50 %, характеризует эффективность систем пылеулавливания при специфическом распределении частиц по размерам. Например, в скрубберах или циклонах, в которых эффективность улавливания частиц является непрерывной функцией размера частиц, диаметр отсекания может быть использован для сопоставления относительной эффективности мокрых скрубберов.

### 1.1.1. Движение частиц в потоке

На частицы аэрозоля действуют три типа сил: внешние (тяжести, электрические, магнитные и др.); сопротивление среды; взаимодействие между собой. Последние очень слабы, и ими можно пренебречь. Сопротивление среды (газа) при отсутствии эффектов инерции, связанных с вытеснением воздуха движущейся сферической частицей ( $Re_p < 0,05$ ), выражается законом Стокса:

$$F = -3\pi\mu_g d_p u_r,$$

где  $F$  – сила сопротивления потока, Н;  $u_r$  – относительная скорость частицы по сравнению с газом, см/с.

Конечная скорость оседания сферической частицы определяется из условия равенства сил тяжести и сопротивления:

$$u_t = \frac{(\rho_p - \rho_g) g d_p^2}{18\mu_g},$$

где  $\rho_p$ ,  $\rho_g$  – плотность частицы и газа соответственно, г/см<sup>3</sup>.

Если размер частиц мал и близок к величине среднего свободного пробега молекул газа ( $6,53 \cdot 10^{-2}$  мкм при 20 °С и 760 мм рт. ст.), то частицы проскакивают между молекулами, сопротивление воздуха уменьшается и скорость падения частицы возрастает. В этом случае используется поправочный коэффициент Каннингхема и конечная скорость оседания частицы:

$$u_t = d_p^2 (\rho_p - \rho_g) \frac{g}{18\mu_g} C' = \frac{d_{pac}^2 (\rho_p - \rho_g) g C'}{18\mu_g} = \frac{d_{pa}^2 g}{18\mu_g}.$$

При высоких числах Рейнольдса ( $Re_p > 0,05$ ) для определения скорости используют графическую зависимость, представленную на рис. 1.2.

Самые мелкие частицы, размер которых меньше среднего свободного пробега молекул газа, имеют очень низкие скорости оседания. При соударении друг с другом процесс их движения становится хаотичным (броуновским). Удаление таких частиц из потока возможно в основном за счет диффузии. Коэффициент диффузии

$$D_p = \frac{RTC'}{3\pi\mu_g d_p N},$$

где  $N$  – число Авогадро.

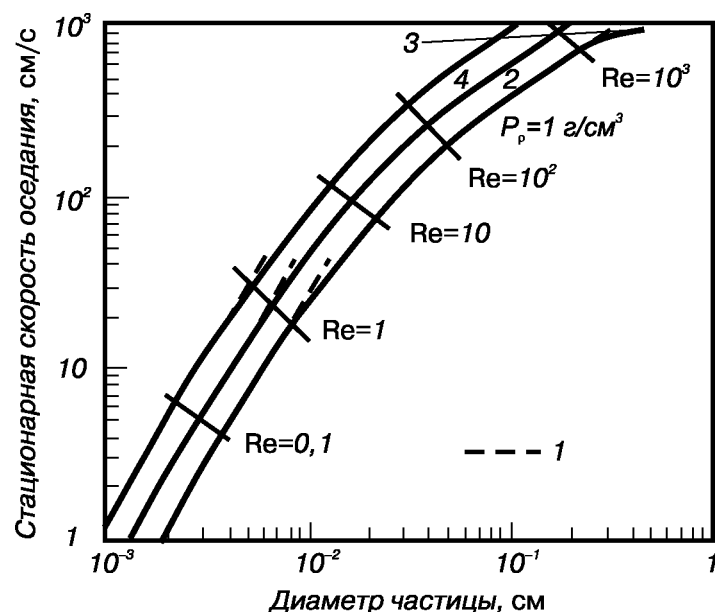


Рис. 1.2. Стационарная скорость оседания для сферических частиц и капель в воздухе при 20 °С и 760 мм рт. ст.

Частицы аэрозоля могут вступать во взаимный контакт и сливаться или слипаться при этом, т. е. происходит *коагуляция* – самопроизвольный процесс, происходящий непрерывно и приводящий к увеличению размеров частиц в аэрозоле. Кроме того, размер капель может увеличиваться или уменьшаться вследствие процессов конденсации или испарения, а также определяться химической реакцией между компонентами системы.

### 1.1.2. Теория улавливания частиц

Материальный баланс (по частицам) в элементарном объеме (рис. 1.3) может быть представлен следующим образом:

$$-u_g H_f W dn = u_d n_d H_f dL$$

или

$$-Q dn = u_d n_d dA_d,$$

где  $u_g$  – скорость потока газа, см/с;  $H_f$  – высота потока, см;  $W$  – ширина потока, см;  $u_d$  – скорость осаждения, см/с;  $n_d$  – концентрация частиц в плоскости осаждения;  $L$  – длина коллектора, см;  $Q$  – объемная скорость потока, см<sup>3</sup>/с;  $Q = u_g H_f W$ ;  $n$  – средняя концентрация частиц

в плоскости, перпендикулярной к направлению потока,  $\text{см}^{-3}$ ;  $A$  – площадь осаждения,  $\text{см}^2$ ;  $A_d = WL$ .

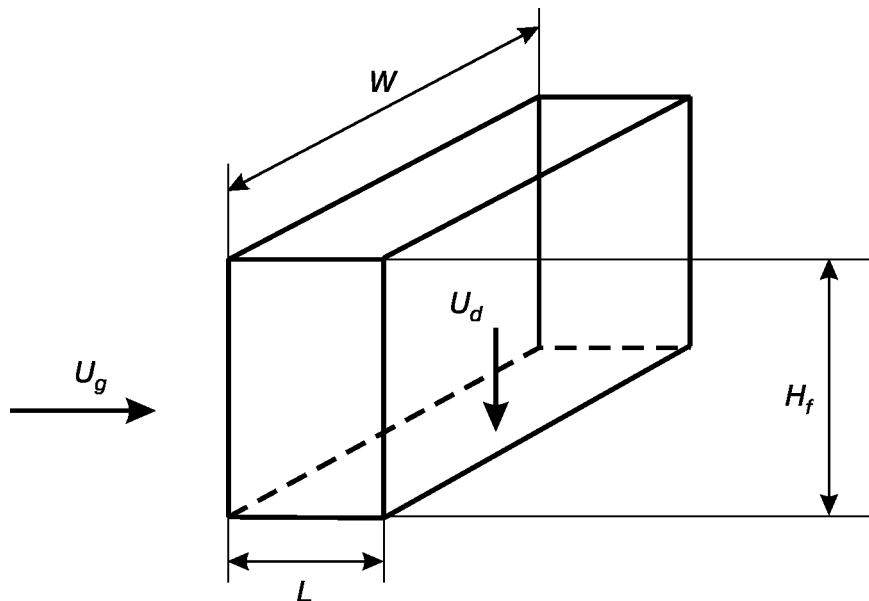


Рис. 1.3. Общая модель осаждения частиц

Если отсутствует перемешивание, то величина  $n_d$  имеет постоянное значение, равное  $n$  (так называемая входная концентрация), до тех пор, пока не станет равной нулю. Тогда

$$-dn = \frac{u_d n_d dA_d}{Q}$$

или

$$\frac{n_1 - n_2}{n_d} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \eta = \frac{u_d A_d}{Q}. \quad (1.1)$$

Для случая полного перемешивания  $n_d = n$  и

$$\frac{-dn}{n} = \frac{u_d dA_d}{Q};$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp(-u_d A_d / Q) = Pt, \quad (1.2)$$

где  $Pt$  – пропуск частиц в долях:  $Pt = 1 - \eta$ , где  $\eta$  – эффективность улавливания частиц.

В уравнениях (1.1) и (1.2) содержится общий параметр осаждения  $u_d A_d / Q$ , отличающийся только знаком. Следовательно, уравнение, определяющее проскок при отсутствии перемешивания, легко может быть преобразовано для случая полного перемешивания.

Фактическая скорость осаждения для данного устройства зависит от размера частиц, геометрии коллектора, свойств газа и характеристик потока. Это важно знать при создании механизмов улавливания отдельных частиц из загрязненных отходящих газов для предотвращения негативного воздействия на окружающую среду.

**Инерционное осаждение.** Если в потоке воздуха, содержащего аэрозоли, имеются препятствия, то крупные частицы по инерции сталкиваются с ними, а мелкие вместе с потоком газа могут их обогнуть. Улавливание частиц за счет инерции называют *импакцией* (например, захват снежных хлопьев ветровым стеклом автомобиля). Эффективность инерционного улавливания определяется тремя факторами:

1) числом Рейнольдса для воздуха относительно препятствия (т. е. зависит от скорости движения частиц в газовом потоке)

$$Re_c = u_o \rho_g d_c / \mu_g,$$

где  $u_o$  – скорость воздуха относительно препятствия в отсутствие помех, см/с;  $d_c$  – диаметр коллектора, см;

2) траекторией частицы, которая зависит от ее массы, аэродинамического сопротивления, размера и формы препятствия, а также скорости газового потока;

3) способностью препятствия удерживать частицы. Обычно ее принимают равной 100 %.

При высоких значениях  $Re_c$  (поток потенциальный) разделение линий потока происходит вблизи препятствия, а при низких – течение определяется вязкостью (вязкий поток) и наличие препятствия остается заметным на больших расстояниях. Эффективность улавливания увеличивается с увеличением чисел  $Re_c$ .

Если считать, что частицы подчиняются закону Стокса (т. е. не учитывать действие всех силовых полей), то, приравняв силы инерции частицы и сопротивление воздуха движению частицы, получим уравнение движения частиц:

$$K_p (du'_p / dt') = (u'_g - u'_p)$$

или

$$K_p \left( dv'_p / dt' \right) = (v'_g - v'_p),$$

где

$$K_p = \frac{C' \rho_p d_p^2 u_0}{9 \mu_g d_c},$$

где  $K_p$  – безразмерный параметр инерции – отношение длины пробега частицы к радиусу препятствия;  $u_p$ ,  $v_p$  – составляющие скорости частицы по осям  $x$  и  $y$ ;  $u_g$ ,  $v_g$  – составляющие скорости газового потока относительно препятствия по осям  $x$  и  $y$ ;  $u_0$  – начальная скорость частицы, см/с;  $d_c$  – характерный размер препятствия, см.

На рис. 1.4 приведены рассчитанные теоретически и зафиксированные экспериментально значения эффективности улавливания для препятствия при потенциальном и вязком течениях.

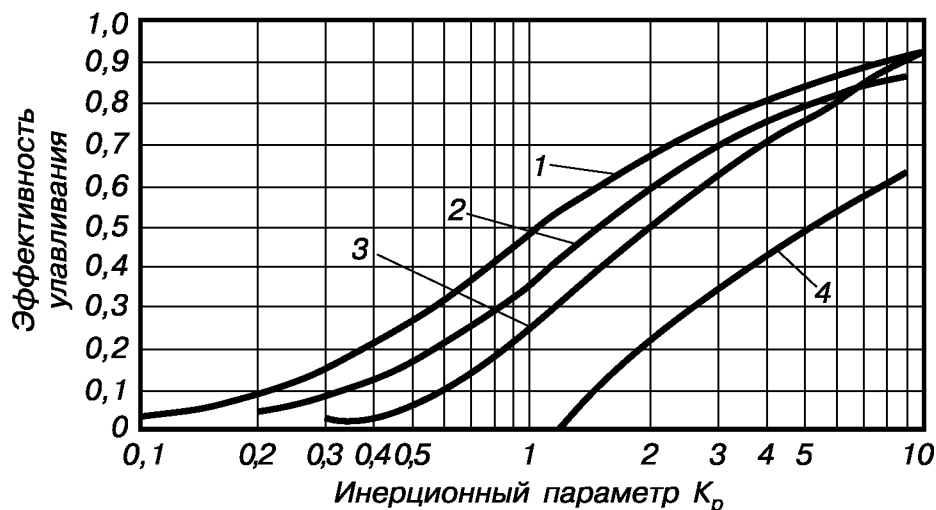


Рис. 1.4. Экспериментальные и расчетные значения эффективности улавливания для сферических и цилиндрических коллекторов: 1 – сфера (теория, потенциальное течение); 2 – сфера (эксперимент); 3 – цилиндр (эксперимент); 4 – сфера (теория, вязкое течение)

Теоретическое решение уравнений движения позволяет определить критическое значение  $K_p$ , ниже которого не происходит инерционного улавливания.

**Касание.** Если поверхность частицы соприкасается с препятствием, то частица улавливается за счет касания.

При рассмотрении инерционного улавливания предполагалось, что частица представляет собой точечную массу. Однако в действительности улавливание происходит при соударении препятствия с по-

верхностью частицы, а не центра. Поэтому не существует единой кривой, описывающей зависимость эффективности улавливания от параметра инерции  $K_p$ .

Так, если  $K_p = 0$ , т. е. частица движется по линии тока в потенциальном течении, то

$$\eta = (1 + K)^2 - \left[ \frac{1}{(1 + K)} \right],$$

где  $K = d_p / d_c$ .

Если частицы улавливаются в цилиндре при ламинарном течении, то

$$\eta = 0,0518 \left( \frac{C_D Re_c}{2} \right) K^{1,5}.$$

Если частица улавливается за счет касания в турбулентном потоке, тогда

$$\eta = 1 + K - \left[ \frac{1}{(1 + K)} \right].$$

**Гравитационное осаждение.** Когда частицы улавливаются свободно падающими каплями, предполагается, что:

скорость оседания частиц много меньше скорости улавливающих капель, т. е. размеры капель гораздо больше, чем частиц;

воздух насыщен парами и не происходит испарения или увеличения размера капель, касанием и диффузией пренебрегаем.

Скорость оседания определяется по графикам на рис. 1.5, как для потенциального ( $\eta_{\text{пот}}$ ), так и для вязкого ( $\eta_{\text{вяз}}$ ) течений.

Фактическую эффективность улавливания находим по формуле Ленгмюра:

$$\eta_g = \frac{\left[ \eta_{\text{вяз}} + \eta_{\text{пот}} \left( \frac{Re_c}{60} \right) \right]}{\left[ 1 + \left( \frac{Re_c}{60} \right) \right]}.$$

На рис. 1.6 приведена зависимость эффективности улавливания от диаметра частиц для различных диаметров капли. Максимальная



эффективность улавливания наблюдается при диаметре капли воды 0,1–0,2 см.

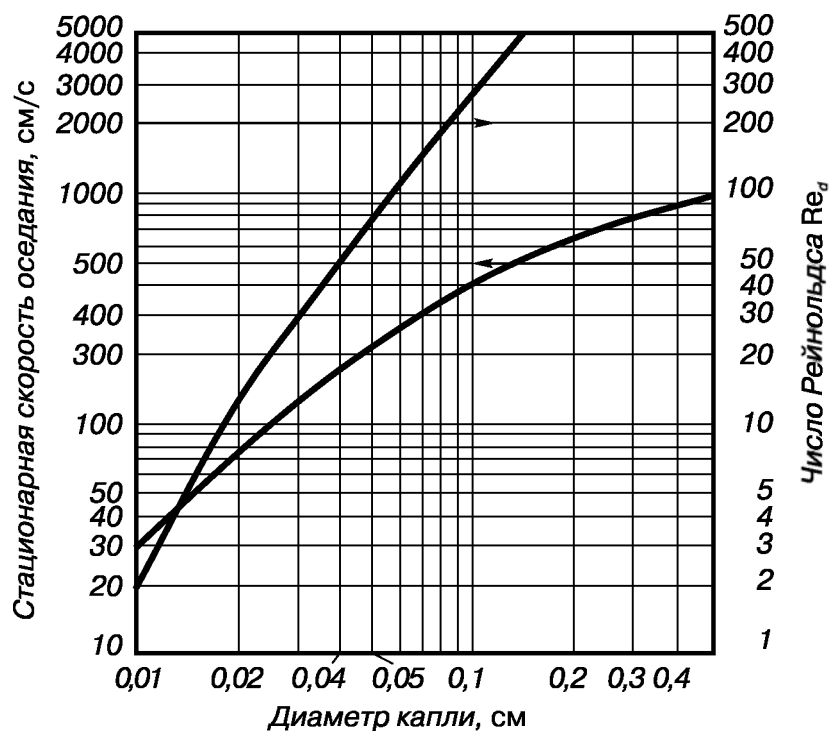


Рис. 1.5. Зависимость стационарной скорости оседания и величины числа Рейнольдса от диаметра капли при 20 °С и 760 мм рт. ст.

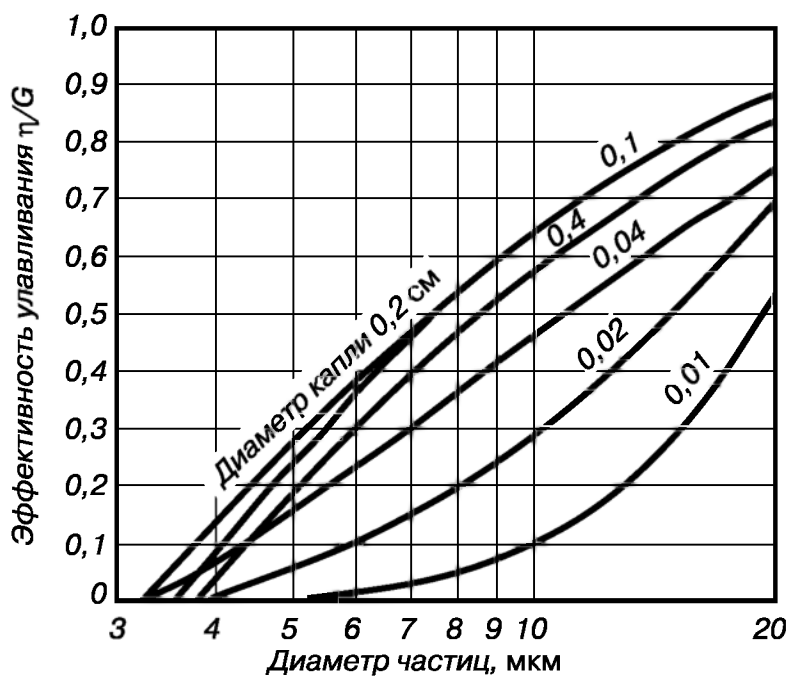


Рис. 1.6. Зависимость эффективности улавливания частиц ( $\rho_p = 2 \text{ г/см}^3$ ) свободнопадающими каплями воды от их диаметров

Если загрязненный газ имеет малую скорость и крупные частицы, то эффективность их улавливания с помощью изолированного волокна посредством гравитационного осаждения может быть достаточно велика:

$$\eta_G = K_G = \frac{C' d_p^2 \rho_p g}{18 \mu_g u_o},$$

где  $K_G$  – безразмерный гравитационный параметр, равный отношению скорости осаждения частицы к скорости газового потока после обтекания волокна.

**Диффузия.** Когда частицы очень малы, то они редко улавливаются за счет инерционного соударения или касания, так как могут легко обтекать препятствия по линиям потока, и величина отношения  $d_p/d_c$  для них мала. Если среда является неподвижной, то частицы, сталкиваясь с молекулами газа, могут пересекать линии газового потока, соударяться с препятствием и удаляться.

Концентрация аэрозоля вблизи поверхности препятствия

$$C = C_i \left[ 1 - \left( \frac{r_c}{\sigma} \right) \right],$$

где  $C_i$  – концентрация частиц в основной части газового потока,  $\text{см}^{-3}$ ;  $r_c$  – радиус препятствия, см;  $\sigma$  – расстояние от центра препятствия, см.

При этом градиент концентрации  $C$  у поверхности препятствия рассчитывают по формуле

$$\frac{\partial C}{\partial \sigma} = \frac{C_i}{r_c}.$$

Скорость осаждения на сферическом препятствии для неподвижного газа (грамм в секунду, если значение  $C$  в граммах на кубический сантиметр)

$$\phi = 4\pi D_p r_c C_i.$$

Если аэрозоль движется вблизи сферы, то скорость диффузии возрастает, а ее величина будет зависеть от значения числа Рейнольдса  $Re$  и числа Шмидта  $Sc$ , которое представляет собой безразмерную величину, характеризующую относительные скорости диффузионного и конвективного переносов при постоянном  $Re_c$ :

$$Sc = \mu_g / \rho_p D_p.$$

При малых числах Рейнольдса ( $Re_c < 3$ ) и больших числах Шмидта ( $Sc = 10^6$ ) коэффициент диффузии будет низким и тогда

$$\varphi = 2\pi D_p r_d C_i Re_c^{1/2} Sc^{1/3}.$$

Для тех же значений чисел Шмидта при  $Re_c = 600-2600$

$$\varphi = 1,6\pi D_p r_d C_i Re_c^{1/2} Sc^{1/3}.$$

При числе Шмидта, равном  $10^3$ , и  $Re_c = 100-700$

$$\varphi = 1,9\pi D_p r_d C_i Re_c^{1/2} Sc^{1/3}.$$

В случае диффузионного осаждения на изолированном волокне вводится число Пекле  $Pe$ , равное отношению общей скорости переноса в объеме к скорости диффузии:

$$Pe = \frac{u_o d_f}{D_p} = \frac{3\pi u_o d_f \mu_g d_p}{C' k T},$$

где  $d_f$  – диаметр препятствия, см.

**Электростатическое осаждение.** Частицы аэрозоля приобретают электрический заряд в процессе образования в результате диффузии свободных ионов под действием коронного заряда. Частицы пыли, кроме того, приобретают заряд в результате трения или дезагрегации, при этом образуются две группы частиц с противоположными зарядами. Дисперсионная среда не приобретает значительного заряда. Суммарный заряд положительных и отрицательных частиц, взвешенных в воздухе, равен нулю.

Однако наличие электростатического заряда оказывает влияние на улавливание частичек в электрическом поле. Если в системе, состоящей из загрязненного частицами воздушного потока и препятствия, нужно определить параметр улавливания, представляющий собой отношение электростатической силы к силе сопротивления Стокса – Каннингхема, то необходимо точно представлять механизм взаимодействия. Если заряд распределен по препятствию равномерно, а частицы имеют противоположный знак заряда, то для кулоновской силы безразмерный электростатический параметр

$$K_E = \frac{C' q_p q_c}{3\pi^2 \mu_g d_p u_0 \varepsilon_0 d_c^2},$$

где  $u_0$  – скорость частицы относительно газового потока.

Если заряжен только аэрозоль, то

$$K_E = \frac{\left(\varepsilon - \frac{1}{\varepsilon} + 2\right) 2C' d_p^2 q_c^2}{3\pi^2 \mu_g u_0 d_c \varepsilon_0 d_c^4},$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая постоянная;  $q_p$  – заряд частицы, Кл;  $q_c$  – заряд на коллекторе (на единицу площади), Кл/см<sup>2</sup>;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость в вакууме, равная  $8,85 \cdot 10^{-21}$  Ф/м.

### 1.1.3. Очистка потока газа от аэрозольных частиц

Устройства, в которых частицы осаждаются под действием сил тяжести, инерции либо и тех, и других, принято называть механическими осадителями. В гравитационных осадителях частицы осаждаются из потока газа под действием собственного веса, в инерционных – поток внезапно подвергается изменению направления движения, при этом возникают инерционные силы, которые стремятся выбросить частицы из потока.

К механическим обеспыливающим устройствам относятся осадительные камеры, инерционные пылеуловители, циклоны.

**Осадительные камеры.** Данные устройства (рис. 1.7) предназначены для улавливания грубодисперсных частиц размерами от 50 до 500 мкм и более, движущихся с потоком в горизонтальном направлении. Они применяются на некоторых агломерационных фабриках и чугунолитейных заводах в качестве первой ступени очистки от грубодисперсной пыли, широкого распространения не получили из-за громоздкости и трудности очистки.

Для осаждения под действием гравитации газ медленно пропускают через большую камеру. Расстояние, требуемое для осаждения частиц, можно уменьшить путем разделения пространства камеры несколькими горизонтальными параллельными плоскостями.

Гравитационные камеры можно усложнять отражательными перегородками для изменения направления движения газа и использования сил инерции с целью увеличения эффективности осаждения.

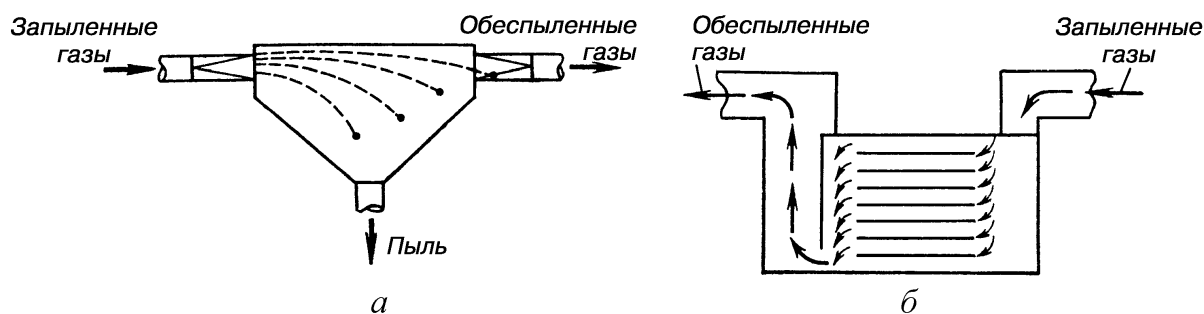


Рис. 1.7. Осадительные камеры: а – пылеосадительная; б – камера Гаварда

Размеры осадительных камер подбирают на основе подсчета числа сил, действующих на частицу, и скорости вертикального движения вниз под действием результирующей силы. По закону Ньютона ускорение вертикального движения частиц определяется результирующим действием силы тяжести, плавучести и сопротивления среды. В данном случае эффектом плавучести можно пренебречь, тогда силу сопротивления определяют как

$$m \left( \frac{du_s}{dt} \right) = gm - C_D \left( \frac{\rho_f u_s^2}{2} \right) \pi r_p^2, \quad (1.3)$$

где  $C_D$  – коэффициент сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса для движущейся частицы:

$$C_D = C_D(\text{Re}) = C_D \left( \frac{\rho_f u_s d_p}{\mu} \right).$$

При  $\text{Re} < 0,5$   $C_D = \frac{24}{\text{Re}}$  (закон Стокса), а при бóльших значениях числа Рейнольдса ( $0,5 < \text{Re} < 800$ )

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\text{Re}^{1/3}}$$

(уравнение Клячко).

Для малых частиц нужно вводить поправку Каннингхема при определении силы сопротивления в случае скольжения, но в этом случае условия гравитационного осаждения уже не играют роли.

Из уравнения (1.3) понятно, что вертикальное ускорение частицы продолжается до тех пор, пока сила веса не станет равной силе сопротивления, после чего частица будет двигаться с постоянной скоро-

стью – стационарной скоростью осаждения частицы  $u_s$ , которая может быть найдена с учетом того, что время, необходимое для достижения этой скорости, очень мало, поэтому левую часть уравнения (1.3) приравняем к нулю и заменим  $m$  на

$$\frac{(\rho_p - \rho_f)d_p^3}{6}.$$

Тогда получим в безразмерной форме

$$\frac{4gd_p^3\rho_f(\rho_p - \rho_f)}{3\mu^2} = C_D \text{Re}^2 = 0.$$

Это выражение определяет число Галилея  $Ga$ , которое пропорционально  $d_p^3$  и не зависит от скорости осаждения  $u_s$ :

$$Ga = \frac{4gd_p^3\rho_f(\rho_p - \rho_f)}{3\mu^2}.$$

Условием достижения стационарной скорости является  $Ga = C_D \text{Re}^2$ .

Чтобы рассчитать стационарную скорость осаждения для частиц любого размера  $d_p$ , вначале нужно найти число Галилея. Затем по эмпирическому соотношению Коха определяют

$$\lg\left(\frac{\text{Re}}{C_D}\right)^{1/3} = -1,387 + 2,153\lg Ga^{1/3} + 0,548\lg^2 Ga^{1/3} + 0,05665\lg^3 Ga^{1/3}.$$

Рассчитывая безразмерное число  $\text{Re}/C_D$ , получаем стационарную скорость  $u_s$ , используя зависимость

$$\frac{\text{Re}}{C_D} = \frac{\text{Re}^2}{Ga} = \frac{3\rho_f^2 u_s^2}{4g(\rho_p - \rho_f)\mu}.$$

В области применения закона Стокса (см. п. 1.1.2) скорость находят просто:

$$u_s = \frac{g(\rho_p - \rho_f)d_p^2}{18\mu}.$$

Скорость осаждения для более крупных частиц ( $d_p > 70$  мкм)

$$u_s = \sqrt{\frac{4d_p(\rho_p - \rho_f)g}{3\rho_f C_D}}.$$

Соотношение между размером частицы и стационарной скоростью осаждения показано на рис. 1.8. Например, при проектировании осадительной камеры с фронтальным характером течения газа и равномерным распределением твердых частиц можно воспользоваться расчетной схемой, представленной на рис. 1.9.

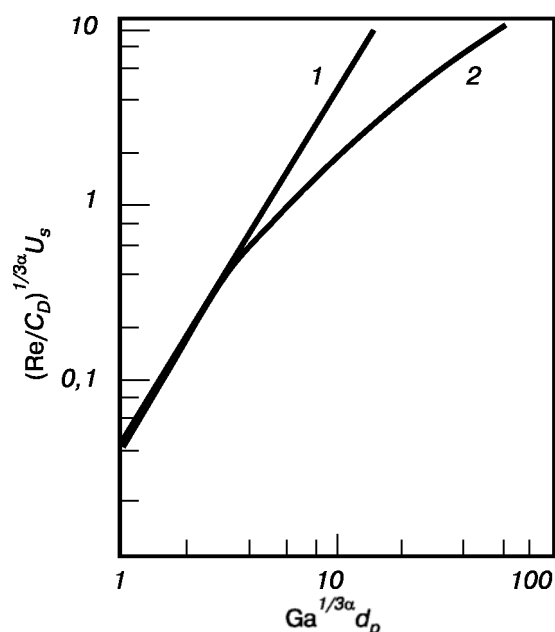


Рис. 1.8. Стационарная скорость седиментации в функции размера частиц:  
1 – по закону Стокса; 2 – по уравнению Клячко

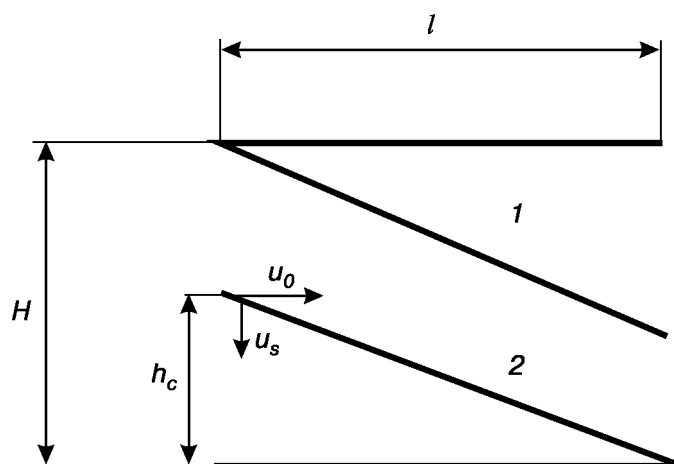


Рис. 1.9. Разрез осадительной камеры:  
1 – очищенная зона; 2 – предельная траектория

Частица, поступающая в камеру на уровне  $h_c$ , должна двигаться прямолинейно. Осядет она или нет, определяется условием

$$u_c h_c \leq u_0 l.$$

Осажденная фракция частиц с одной и той же скоростью седиментации  $u_s$  определяется соотношением

$$\frac{h_c}{H} = \frac{u_0 l}{u_s}.$$

Размеры камеры ( $H$ ;  $l$ ; ширина  $B$  на схеме не показана) определяются размером наименьших частиц, которые должны быть осаждены полностью. Поэтому вначале рассчитывают  $u_s$ , затем находят  $l = u_s / u_0$ , принимая  $h_c / H = 1$ .

Значение  $u_0$  должно быть меньше скорости, при которой начинается унос частиц, но не более 3,05 м/с; и, наконец, определяют произведение

$$BH = \frac{Q}{u_0},$$

откуда выбирают высоту и ширину осадительной камеры.

**Инерционные осадители.** В инерционных пылеуловителях очистка производится за счет резкого изменения направления потока, в результате чего частицы пыли по инерции ударяются о поверхность, выпадают и удаляются из аппарата через разгрузочные устройства.

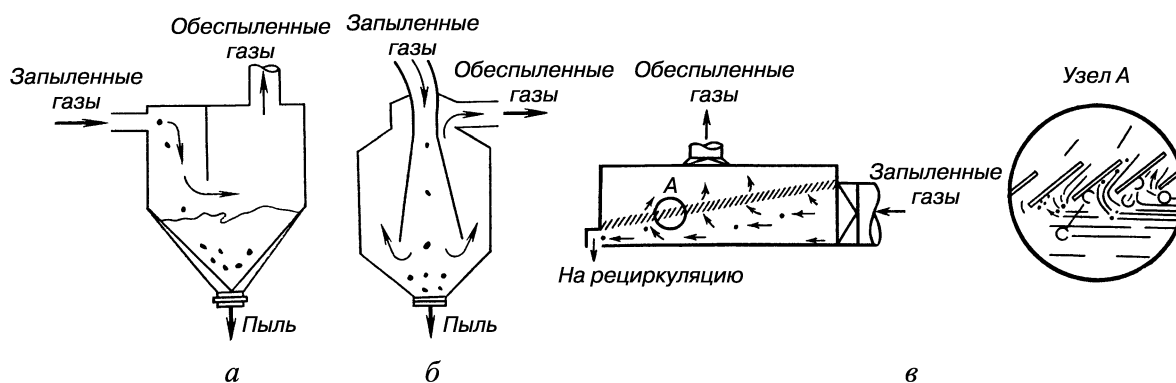


Рис. 1.10. Инерционные пылеуловители:  
а–б – пылевые мешки; в – жалюзийный пылеуловитель

Некоторые простейшие конструкции инерционных пылеуловителей показаны на рис. 1.10. Их недостатки – сложность очистки



и абразивный износ. Их эффективность не более 70–75 % при размерах пылевых частиц 30–40 мкм. Благодаря низкому гидравлическому сопротивлению инерционные осадители могут быть встроены непосредственно в воздухопроводы или газоходы, выполняя функции предварительной ступени очистки.

**Циклонные осадители.** На частицу массой  $m$ ,двигающуюся по круговой траектории радиуса  $r$ , с тангенциальной скоростью  $u_t$  действует центробежная сила  $mu_t^2/r$ . Например, если  $u_t = 15$  м/с,  $r = 0,6$  м, то эта сила примерно в 40 раз превышает силу тяжести, что улучшает эффект осаждения в камере.

Циклон (рис. 1.11, *а*) состоит из двух частей – цилиндрической трубы и суживающегося книзу конуса. Запыленный газ по спирали движется внутри аппарата. Взвешенные частицы под действием центробежной силы отбрасываются к стенкам циклона и, теряя скорость, опускаются по его конической части.

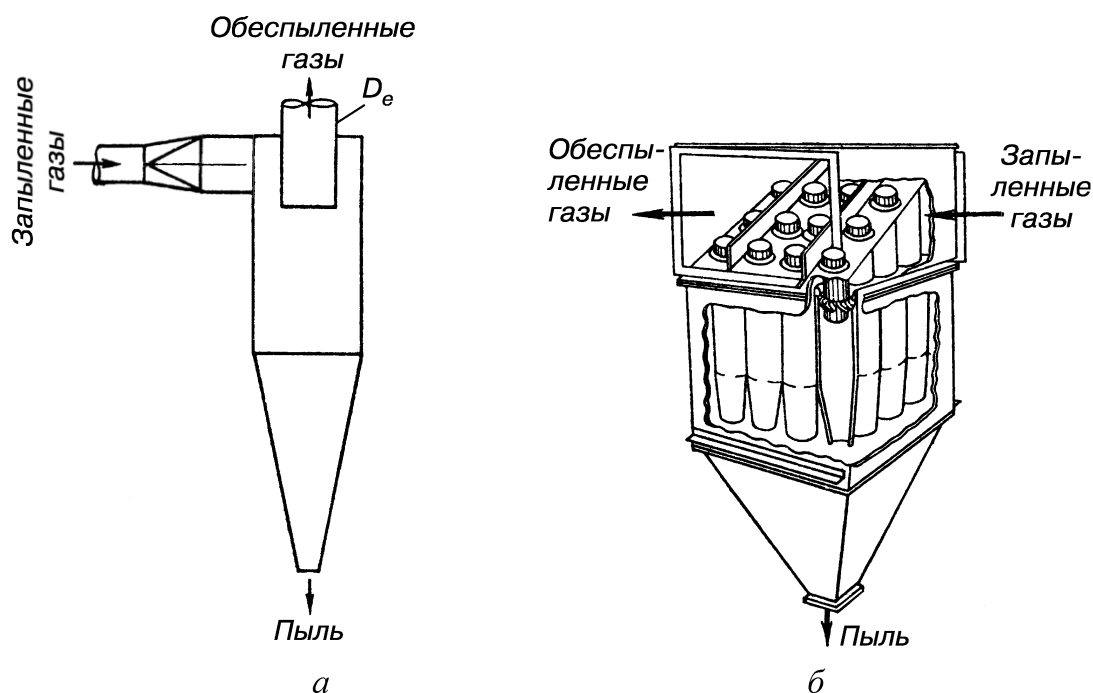


Рис. 1.11. Схемы циклона (*а*) и батарейного циклона (*б*)

Циклоны широко используются в цементной, угольной, химической, деревообрабатывающей промышленности, металлургии. Эффективность работы циклона резко изменяется вместе с колебаниями расхода газа. Этот недостаток устраняется в мультициклонах (рис. 1.11, *б*). В данном случае в зависимости от расхода газа включается в работу то или иное число циклонов.

Средняя эффективность (или КПД циклона) обеспыливания газа составляет 98 % при размерах частиц пыли 30–40 мкм, 80 % – при  $d_p = 10$  мкм и 60 % – при размерах частиц 4–5 мкм. Степень улавливания пыли различной дисперсности в батарейном циклоне отражает рис. 1.12. Основным недостатком циклонов – большой абразивный износ проточных частей аппарата пылью.

Циклоны бывают двух типов – с тангенциальным входом и с осевым. На рис. 1.11, *a* показан циклон первого типа, в котором газ в вихреобразном движении, очищаясь, меняет свое направление и покидает циклон через канал  $D_c$ .

В циклонах с осевым входом газ поступает через центральный штуцер вблизи одного из оснований цилиндра. Он обтекает лопасти, сообщаящие потоку вращательное движение. Уловленные частицы выносятся периферическим потоком, а очищенный газ выходит в центре противоположного основания.

Циклоны изготавливают из обычной углеродистой стали, при необходимости можно использовать другой металл или керамический материал. Устройство не содержит движущихся частей, поэтому эксплуатация его проста.

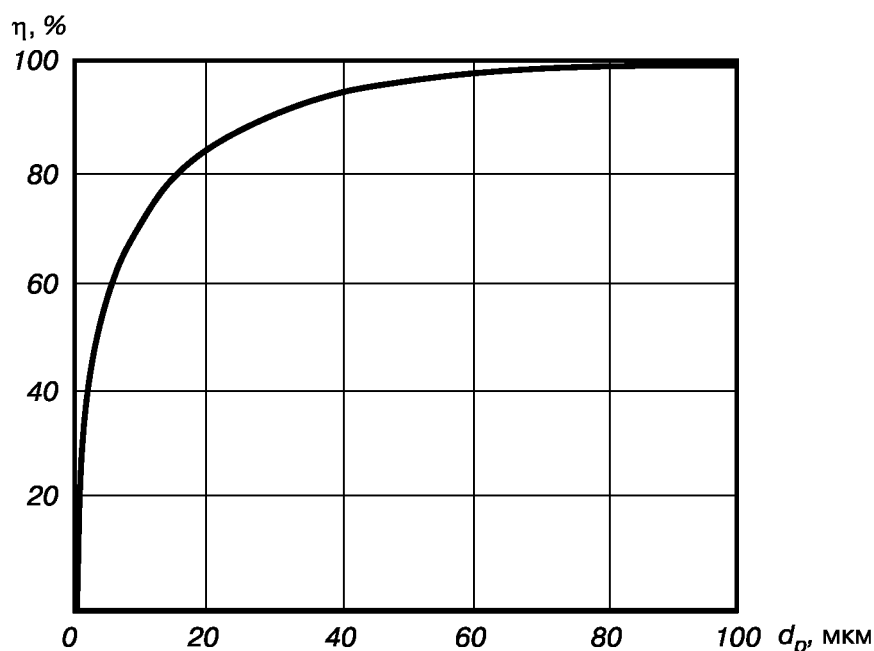


Рис. 1.12. Зависимость степени улавливания в батарейном циклоне от размера частиц пыли

При проектировании циклона вначале выбирают его тип, затем определяют размеры, фракционную эффективность, перепад давления и необходимую для каждого циклона мощность. Для этого необходи-

мо иметь данные о скорости потока газа, составе, температуре, давлении, концентрации и дисперсном составе пыли.

Траектория движения частицы в циклоне определяется действием на нее центробежной силы. Тангенциальная скорость газа на линии тока зависит от радиуса вращения  $u_{\tau} R^n = \text{const}$ , где показатель степени  $n \leq 1$  и может быть определен по экспериментально полученной формуле

$$n = 1 - \left(1 - 0,67 D^{0,14}\right) \left(\frac{T}{283}\right)^{0,3},$$

где  $D$  – диаметр циклона, м;  $T$  – температура газа, К.

Траектория движения частиц описывается с учетом уравнения Ньютона при замене  $gm$  на центробежную силу из предположения, что радиальная составляющая силы сопротивления подчиняется закону Стокса и  $\frac{du_s}{dt} = 0$ , т. е. радиальная скорость смещения постоянна. Тогда

$$t = \frac{9\mu R_1^2}{(n+1)\rho d_p^2 u_{\tau}^2} \left[ \left(\frac{R}{R_1}\right)^{2n+2} - 1 \right],$$

где  $t$  – время, которое требуется частице, вначале находящейся на расстоянии  $R_1$  от оси, для того чтобы достичь координаты  $R$ , с. Полученное уравнение описывает горизонтальное движение, а вертикальное – определяется стационарной скоростью оседания.

Для определения общей эффективности работающего циклона необходимо произвести измерения:

- 1) запыленности входящего потока, кг/м<sup>3</sup>;
- 2) общего количества уловленной пыли за определенный интервал времени, кг/с;
- 3) скорости потока, м/с.

Тогда общая эффективность улавливания

$$E = \frac{C_1 - C_2}{C_1} V_{\tau},$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – концентрация пыли в газе соответственно до и после циклона;  $V_{\tau}$  – объемная скорость.

Запыленность потока находят с помощью фильтра, объемную скорость – с помощью трубки Пито. Для определения точки отбора

пробы необходимо соблюдать следующее условие: поток не должен иметь возмущений поля течения, т. е. плоскость с точками отбора следует располагать в прямой части канала на расстоянии 8–10 диаметров канала от любого изгиба.

Общая эффективность улавливания определяется как масса осажденных частиц, отнесенная к массе частиц, поступающих в осадитель. Обе величины отнесены к единице времени. Общую эффективность улавливания можно найти интегрированием фракционной эффективности по распределению частиц по размерам:

$$E = \int_0^1 E_g d_f \approx \sum E_g \Delta f,$$

где  $E_g$  – фракционная эффективность улавливания частиц диаметром  $d_p$ ;  $f$  – массовая доля частиц в потоке, имеющих размер меньше  $d_p$ .

На основе вероятностного подхода к процессу пылеулавливания расчетную степень очистки в механических осадителях можно определить по формуле

$$\eta_{\text{расч}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dx = \Phi(x),$$

где  $\Phi(x)$  – интеграл вероятности (функция Крампа). Значения  $\Phi(x)$  выбирают по таблице справочных данных в зависимости от величины  $x$ , рассчитываемой по формуле

$$x = \frac{\lg\left(\frac{d_m}{d_{50}}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma_r + \lg^2 \sigma_\eta}},$$

где  $d_{50}$  – размер частиц, осаждаемых в аппарате при данном режиме его работы с эффективностью 50 %;  $\lg^2 \sigma_\eta$  – стандартное отклонение в функции распределения фракционных степеней очистки. Например, для циклонов размер частиц  $d_{50}$  можно рассчитывать по формуле

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{(D_{\text{ц}} \rho_p \mu_g V_T) / (D_{\text{ц}} \rho_g \mu_g V)},$$

где  $D_{\text{ц}}$  – диаметр циклона, м;  $\rho_p$  – плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $V_T$  – условная скорость газов. Величины  $d_{50}$ ,  $\lg^2 \sigma_\eta$ , определенные экспериментально при разработке аппаратов, рассматриваются как справочные.

Фракционная эффективность определяется прямым отбором потока на каскадный импактор, имеющий не менее шести ступеней до и после циклона. Фракционная эффективность улавливания циклона может быть более 80 % даже для частиц диаметром 10 мкм.

*Мокрые скрубберы* – это устройства, в которых для улавливания частиц используется жидкость. В одних скрубберах первичный захват происходит на водной поверхности, в других – водой смывают частицы, осажденные на твердой поверхности. В последнем случае в качестве первой ступени очистки используется циклон или фильтр. Общая схема очистки газовоздушных потоков со скрубберной установкой показана на рис. 1.13.

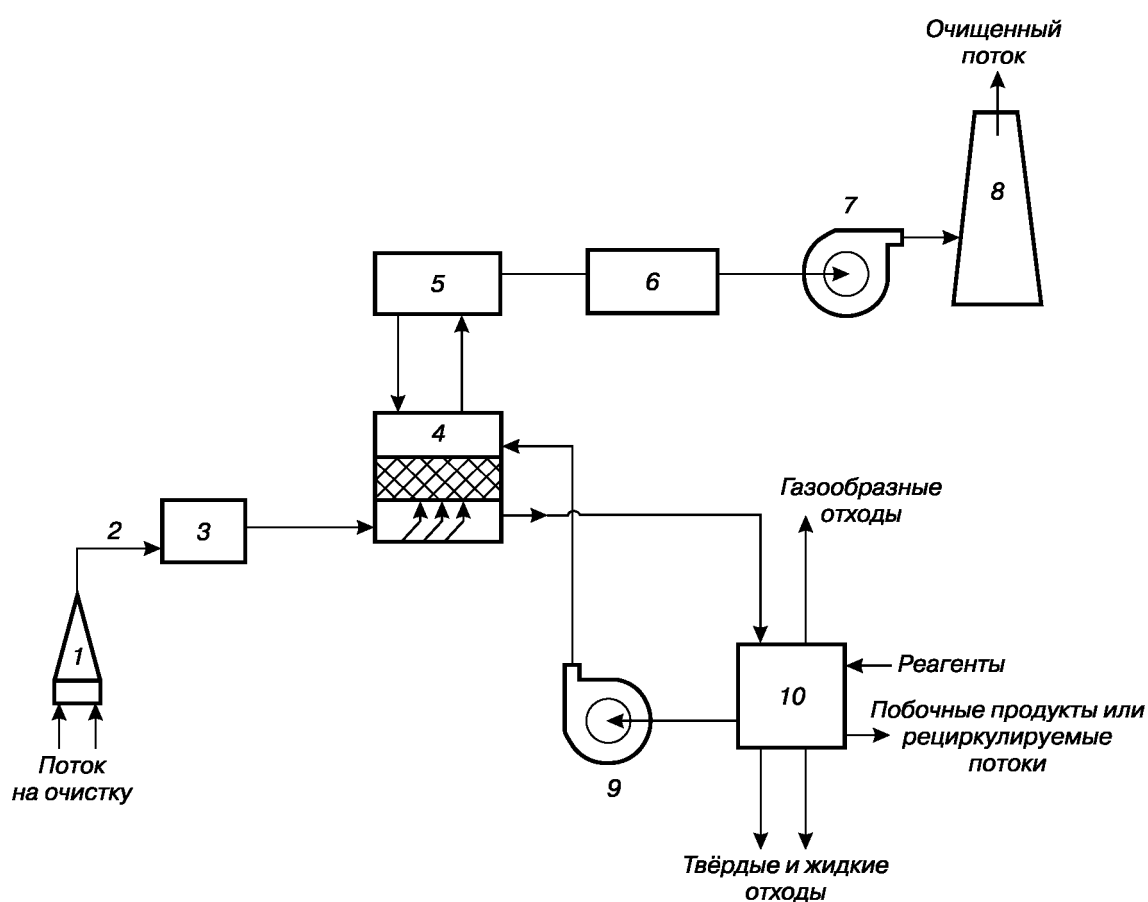


Рис. 1.13. Скрубберная система: 1 – всасывающий зонтик; 2 – газоходы; 3 – система предварительной обработки; 4 – скруббер; 5 – сепаратор уноса; 6 – теплообменник; 7 – дымосос; 8 – дымовая труба; 9 – насос; 10 – устройство для подготовки жидкости

В мокрых скрубберах реализуется тесный контакт газа и жидкости, сопровождающийся генерацией капель. Отдельно следует отметить возможность уноса жидкости из скруббера в теплообменник и далее через газоходы в дымосос, дымовую трубу, а затем и в атмо-

сферу, вследствие чего возможны коррозия, повреждения вентиляторов и выбросы загрязнителя. Особое внимание нужно уделять очистке жидкости после орошения и возможности использования полученных отходов.

Твердые частицы в скрубберах улавливаются с помощью нескольких основных механизмов:

1. *Инерционное осаждение* обусловлено изменениями направления течения масс в малом масштабе (например, при наличии малого препятствия).

2. *Броуновская диффузия* хорошо работает, когда частицы имеют диаметр менее 0,1 мкм и смещаются под ударами газовых молекул.

(Инерционное осаждение и броуновская диффузия являются главными механизмами улавливания частиц скрубберами. Когда диаметр частиц свыше 0,3 мкм, важнее инерционное осаждение, причем его эффективность растет с увеличением размера частиц. Если диаметр улавливаемых частиц меньше 0,3 мкм, начинает преобладать диффузия, эффективность которой растет с уменьшением размера частиц.)

3. *Диффузиофорез*. Массоперенос в скруббере, который может заключаться в конденсации водяного пара на холодной поверхности воды, приводит к появлению силы, под действием которой частицы осаждаются на поверхности. Такое осаждение может быть значительным, а доля захваченных частиц – примерно равной доле конденсата.

Осаждение частиц под действием диффузиофореза описывается уравнением

$$u_D = \frac{M_1^{1/2} D_G}{[yM_1^{1/2} + (1-y)M_2](1-y)} \cdot \frac{dy}{dr}$$

или

$$u_D = F_1 D_G \frac{1}{(1-y)} \cdot \frac{dy}{dr},$$

где  $u_D$  – скорость диффузиофоретического осаждения, м/с;  $M_1$  – молярная масса воды, кг/моль;  $D_G$  – коэффициент диффузии воды через газ-носитель, м<sup>2</sup>/с;  $y$  – мольная доля водяного пара;  $M_2$  – молярная масса газа-носителя, кг/моль;  $r$  – расстояние в направлении диффузии, м;  $F_1$  – функция состава (для ориентировочных расчетов можно использовать среднее значение 0,85).

По исследованию Уитмора, доля осажденных частиц равна массовой или мольной доле конденсата, т. е. не нужно проследивать детальный ход конденсации, определяя при этом мгновенные значения скорости осаждения, и, интегрируя их по времени, устанавливать долю осажденных частиц. Достаточно фиксировать превращение частиц пара в конденсат, при этом захватывается соответствующая доля взвешенных частиц.

4. *Электростатическое осаждение.* Частицы, несущие электростатический заряд, могут быть осаждены под действием градиента заряда. Этот механизм высокоэффективен для частиц любого размера. Электростатические заряды (если они присутствуют на частицах) оказывают влияние на эффективность инерционного осаждения:

- через кулоновское взаимодействие между заряженной частицей и заряженным коллектором:

$$K_c = \frac{Q_d Q_p C'}{3\pi^2 E_G \mu_g u_0 d_d^2 d_p},$$

где  $K_c$  – безразмерный параметр кулоновского взаимодействия;  $Q_d$  – заряд капли-коллектора, Кл;  $Q_p$  – заряд частицы, Кл;  $E_G$  – диэлектрическая постоянная газа, Ф/см;  $d_d$  – диаметр капли, м;  $u_0$  – скорость газа по отношению к телу (коллектору), м/с;

- благодаря зеркальным силам между заряженной частицей и нейтральным коллектором:

$$K_{ic} = \frac{Q_p^2 C'}{3\pi^2 \rho_0 d_p d_d^3 \mu_g u_0} \left( \frac{E_d - E_G}{E_p + 2E_G} \right),$$

где  $K_{ic}$  – безразмерный параметр зеркальной силы для частицы;  $E_d$  – диэлектрическая постоянная капли, Ф/см;  $E_p$  – диэлектрическая постоянная частицы, Ф/см;

- благодаря зеркальной силе между нейтральной частицей и заряженным коллектором:

$$K_{ip} = \frac{2Q_d^2 d_p^2 C'}{3\pi^2 E_G d_d^5 \mu_g u_0} \left( \frac{E_d - E_G}{E_p + 2E_G} \right),$$

где  $K_{ip}$  – безразмерный параметр зеркальной силы для коллектора;

- путем воздействия внешнего однородного электрического поля, параллельного направлению движения потока, на заряженную частицу при наличии нейтрального коллектора:

$$K_{ex} = \frac{Q_p E_0 C'}{3\pi\mu_g u_0 d_p},$$

где  $K_{ex}$  – безразмерный параметр воздействия внешнего электрического поля;  $E_0$  – напряженность однородного внешнего электрического поля, В/см;

- через дипольное взаимодействие между нейтральной частицей и нейтральным коллектором, поляризованными внешним электрическим полем, направленным параллельно потоку:

$$K_{icp} = \left( \frac{E_p - E_G}{E_p + 2E_G} \right) \cdot \left( \frac{E_d - E_G}{E_d + 2E_G} \right) \cdot \left( \frac{E_G d_p^2 E_0^2 C'}{d_d \mu_g u_0} \right),$$

где  $K_{icp}$  – безразмерный параметр взаимодействия между электрическими диполями.

Из результатов численных расчетов, полученных Нильсеном, следует, что кулоновский захват – единственный механизм, который может способствовать увеличению эффективности улавливания в скрубберах с электростатическим оборудованием.

Зависимость эффективности улавливания частиц от  $K_c$  и  $K_p$  проиллюстрирована на рис. 1.14. Значения  $K_c$  на графиках отрицательны, и это отражает противоположность зарядов частиц и капель. Наибольшее влияние кулоновское притяжение оказывает, когда  $K_p$  мал, что соответствует низкой относительной скорости  $u_0$ .

Электрическая зарядка капель и частиц существенно повышает эффективность улавливания мелких частиц в скрубберах. Лучше использовать мелкие капли и высокий уровень заряда. Для частиц диаметром более нескольких микрометров зарядка дает небольшой эффект.

5. *Конденсация на частицах* наблюдается, когда происходит увеличение массы частиц из-за пленочной конденсации водяного пара на их поверхности, вследствие чего повышается эффективность инерционного осаждения. Это явление может происходить одновременно с диффузиофорезом и называется *градиентно-силовым конденсационным улавливанием* (ГСК).

Так как ГСК-улавливание связано с одновременным действием нескольких механизмов, математическая модель этого процесса сложна и громоздка. Поэтому чаще всего пользуются упрощенными методами, основанными на раздельном влиянии сил. Например, если



конденсация на частицах происходит до скруббера, то последовательность расчета может быть следующей:

определяют начальное распределение частиц по размерам на входе в скруббер;

рассчитывают долю конденсата для условий работы скруббера;

находят диффузиофоретический проскок, пренебрегая осаждением за счет других механизмов:

$$Pt_D = 1 - 0,85 f_V = \frac{1 - 0,85 q'}{H_1 + 18 / 29},$$

где  $f_V$  – объемная доля конденсирующего компонента;  $q'$  – отношение конденсации  $\left( \frac{\text{килограмм конденсата}}{\text{килограмм сухого газа}} \right)$ ;  $H_1$  – начальная относительная влажность, %;

определяют распределение по размерам после обводнения на выходе из конденсатора, считая, что на каждой частице конденсируется одинаковое количество пара;

рассчитывают фракционный и общий проскок через скруббер.

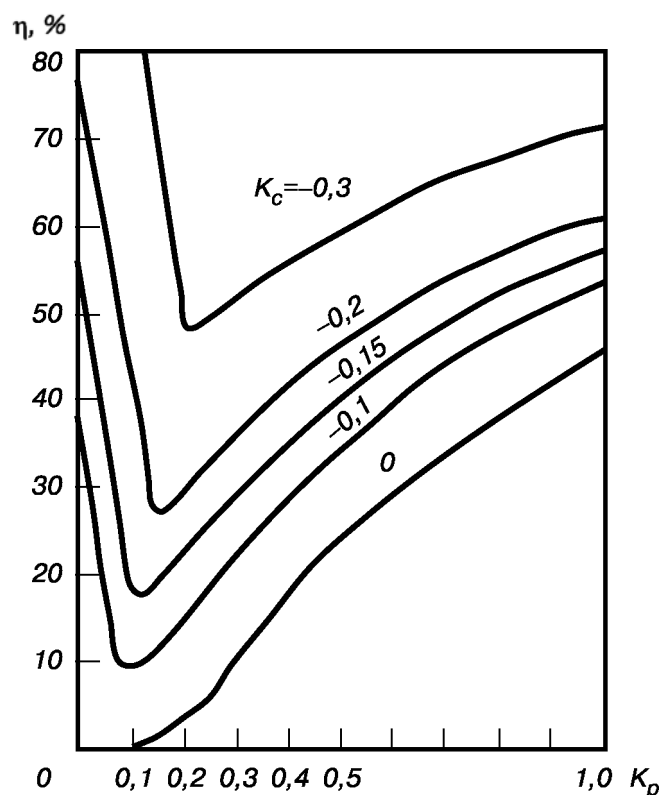


Рис. 1.14. Эффективность захвата при совместном действии электростатических сил и инерции

6. *Коагуляция* повышает эффективность осаждения из-за увеличения размера частиц, которое происходит при их слипании вследствие броуновского движения или турбулентности.

Для повышения эффективности работы скрубберов иногда используют поверхностно-активные вещества (ПАВ). При этом могут наблюдаться противоречивые результаты, которые объясняются следующими причинами:

- несмачиваемые частицы пыли образуют слой на поверхности жидкости. Ударяясь о твердую поверхность, частицы в большей степени отскакивают, чем удерживаются жидкостью, тогда как смачиваемые частицы имеют тенденцию тонуть. В результате этого поверхность жидкости освобождается для контакта с осаждающимися частицами;
- перемешивание жидкости или обновление ее поверхности дает тот же эффект, что и увеличение смачиваемости;
- ПАВ могут оказывать влияние на свойства поверхности, если время позволяет накопить достаточные поверхностные концентрации;
- роль смачивания наиболее очевидна для скрубберов, в которых используется стабильная пена и образуется развитая поверхность, а улавливание частиц происходит за счет диффузии в ячейках пены с относительно малоподвижными пленками жидкости.

Эффективность работы скрубберов определяется следующими процессами: улавливание каплями жидкости, двигающимися через газ; улавливание цилиндрами (типа проволок); улавливание пленками жидкости (обычно текущими по твердым поверхностям); улавливание пузырьками газа (обычно поднимающимися в жидкости); улавливание при ударе газовых струй о жидкие или твердые поверхности.

В любом из этих случаев твердые частицы отделяются от газа благодаря одному или нескольким механизмам улавливания. Скорость осаждения может быть увеличена благодаря укрупнению частиц.

Рассчитать скорость осаждения можно, если известны все силы, действующие на частицу. Тогда можно определить скорость осаждения для данной концентрации  $C_p$ , площадь, на которой происходит осаждение  $A_d$ , и объемный расход газа  $Q_G$ . Предполагая, что  $u_{pd}$  постоянна по всей плоскости осаждения и перемешивание отсутствует, эффективность улавливания

$$E = 1 - \frac{C_{pe}}{C_{pi}} = \frac{u_{pd} A_d}{Q_G},$$

где  $u_{pd}$  – скорость осаждения частицы, см/с.

Для случая идеального перемешивания, как в высокотурбулентном потоке, проскок

$$Pt = \frac{C_{pe}}{C_{pi}} = \exp\left(\frac{-u_{pd} A_d}{Q_G}\right).$$

Используя последнее уравнение, можно получить значение эффективности, превышающее единицу, т. е. устройство будет иметь эффективность, равную 100 %, и концентрация будет снижена до нуля.

Зная механизм улавливания, можно рассчитать скорость осаждения частицы. Так, при гравитационном осаждении

$$u_s = \frac{C'd_p^2(\rho_p - \rho_G)g}{18\mu_g};$$

при броуновской диффузии

$$u_{BD} = 1,13 \left( \frac{D_p}{\theta} \right)^{0,5};$$

при диффузиофореze

$$u_D = \left( \frac{\mu_v^{0,5}}{p_v M_v^{0,5} + p_G M_G^{0,5}} \right) \frac{PD_{vG}}{p_G} \nabla P_v;$$

при миграции в электрическом поле

$$u_e = \left( \frac{E_p}{E_p + 2} \right) \cdot \left( \frac{C'E_0 E_c E_p d_p}{4\pi\mu_g} \right).$$

Математическое выражение для общего проскока пыли с любым распределением по размерам через любое устройство имеет вид

$$\bar{Pt} = \int_0^w \left( \frac{Pt_d}{w} \right) \cdot dw,$$

где  $Pt$  – доля проскакивающих частиц;  $Pt_d$  – доля проскакивающих частиц фракции размером  $d_{pa}$ ;  $w$  – общее количество пыли, кг. Правая

часть этого уравнения есть интеграл от произведения массовой доли фракции на величину проскока для фракции.

Если улавливание в аппарате происходит по инерционному механизму, то

$$Pt_d = \exp(-A_e \cdot d_{pa}^{B_e}) = 1 - E,$$

где  $A_e$  и  $B_e$  – константы.

Если улавливаемые частицы крупнее 1 мкм, то удобным может быть выражение, связывающее проскок с физическим ( $d$ ), а не с аэродинамическим ( $d_{pa}$ ) диаметром:

$$Pt_d = \exp(-A_p \cdot d_p^{B_e}),$$

где  $A_p$  – константа. Для случая колонн с насадками и ситовыми тарелками  $B_e = 2$ , для центробежных скрубберов  $B_e = 0,67$ .

Аппараты «мокрого» типа классифицируются в основном по главным конструктивным механизмам улавливания частиц. К ним относятся тарелочные, насадочные, центробежные, экранные, брызгальные и другие скрубберы, а также газопромыватели.

Все эти аппараты могут применяться для очистки дымовых газов и вентиляционного воздуха, а также для подготовки газов к очистке. Параметр  $d_{50}$  в формуле для мокрых пылеуловителей (рис. 1.15) определяют по эмпирической зависимости

$$d_{50} = 188,32 K_r^{-0,645},$$

где  $K_r$  – полезные энергозатраты на очистку газа;

$$K_r = P_{\text{ж}}^m,$$

где  $P_{\text{ж}}^m$  – давление жидкости перед форсункой, Па;  $m$  – удельный расход орошающей жидкости, м<sup>3</sup>/с. Стандартное отклонение фракционной эффективности для данного случая  $\lg \sigma_{\eta} = 0,29$ .

Труба Вентури (рис. 1.15, б) используется для интенсивного дробления, диспергации жидкости с целью увеличения площади соприкосновения. Эффективность мокрых пылеуловителей в основном зависит от смачивания пыли. При улавливании плохо смачиваемых пылей, например угольной, в воду вводят поверхностно-активные вещества.

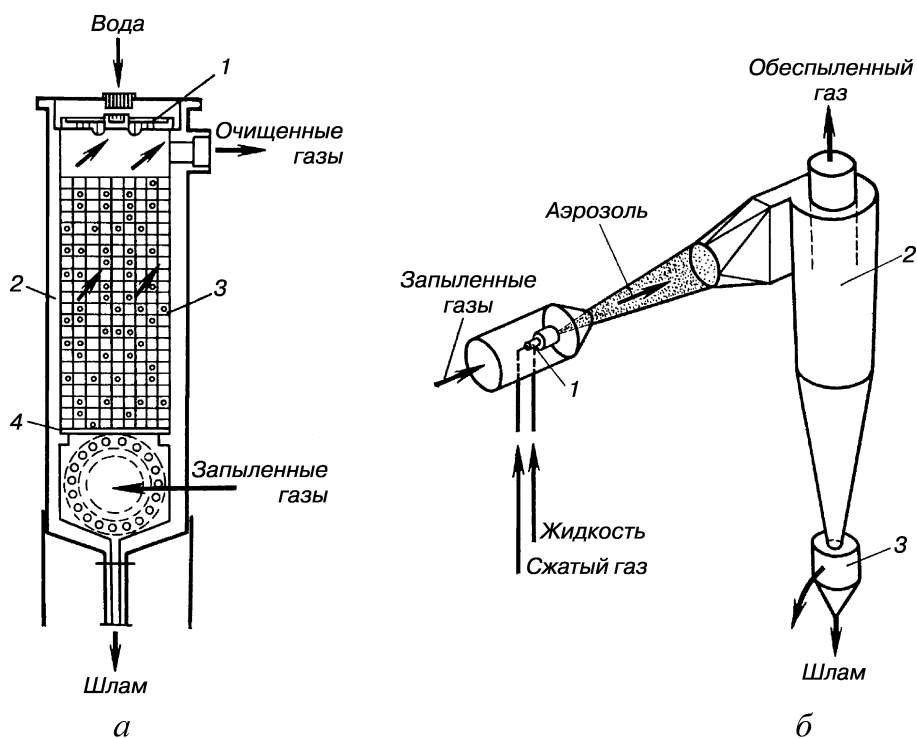


Рис. 1.15. Схема мокрых пылеуловителей: а – промывная башня, заполненная кольцами Рашига, стекловолокном или другими материалами: 1 – распределитель воды; 2 – корпус; 3 – насадка; 4 – опорная пластина; б – труба Вентури с циклоном: 1 – генератор аэрозоля; 2 – циклон; 3 – сборник шлама

К недостаткам мокрого пылеуловителя относят: сложность выделения уловленной пыли из воды; возможность кислотной или щелочной коррозии при переработке некоторых газов; значительное ухудшение условий рассеивания через заводские трубы отходящих газов, увлажненных при охлаждении в аппаратах этого типа.

При интенсивном контакте между жидкостью и газом в скрубберах происходит распыление и унос части жидкости очищенным газом. Кроме того, в уносе может содержаться и суспензированное, и растворенное твердое вещество.

Капли, унесенные из скруббера, можно отделить от газа с использованием тех же механизмов, что и для частиц. Исходя из размеров капель, это может быть гравитационное, инерционное и центробежное осаждение. Гравитационное осаждение осуществляется как внутри самого скруббера, так и в выходном канале. Центробежное осаждение производится в циклонных сепараторах, для чего в аппаратах устраивают направляющие перегородки (зигзагообразные, шевронные, рифленые) или радиальные экраны. За счет этого поток неоднократно меняет свое направление, при этом капли осаждаются на перегородках или экранах и стекают вниз. При инерционном осаждении поток про-

пускают через слой насадок из массивных элементов, таких как кольца, седла и т. п., или через слой проволоочной сетки, стекло-волокон.

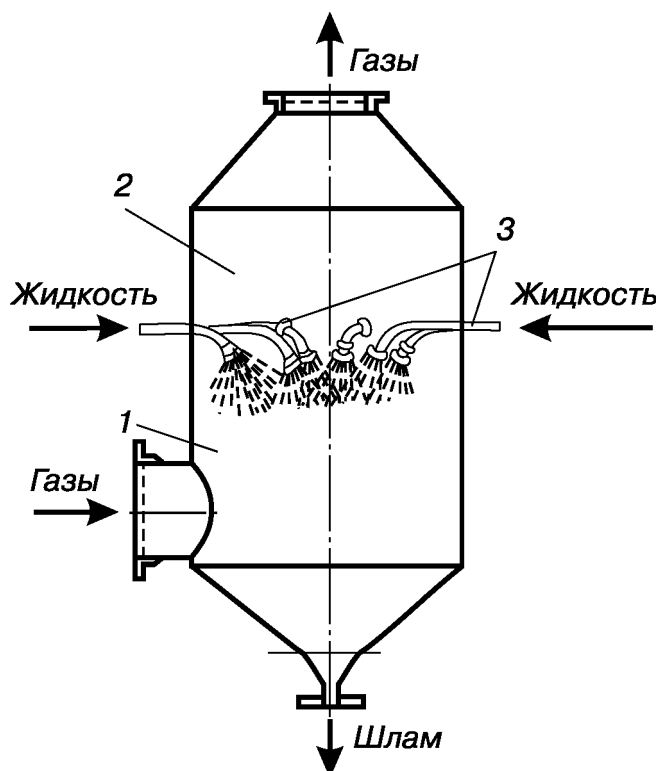


Рис. 1.16. Схема полового форсуночного скруббера:  
1 – входной патрубок; 2 – корпус; 3 – система орошения

Первичная эффективность улавливания уноса определяется как задержанная устройством массовая доля капель, содержащихся в первичном уносе.

Вторичный унос из сепаратора может быть обусловлен следующими причинами:

- дроблением капель жидкости при ударе;
- пленочным течением жидкости по твердой поверхности и срывом пленки в потоке газа на выходе из сепаратора;
- разрывом пузырей на поверхности раздела «жидкость – газ» с последующим образованием капель;
- уносом из сепарированного потока под действием высокоскоростного потока газа.

Первые три механизма вторичного уноса зависят от конструкции сепаратора. Последний определяет предельные условия его работы.

Из практических исследований известно, что вертикальные поверхности осаждения остаются более чистыми, чем горизонтальные, благодаря лучшим условиям стекания в сепарационных аппаратах.

Кроме того, образования осадка можно избежать, применяя химические соединения.

**Фильтры.** *Фильтрация* – один из старейших и наиболее широко распространенных методов удаления частиц из запыленных газовых потоков. Она может обеспечить улавливание разнообразных частиц любого дисперсного состава, а при правильном выборе фильтра – задерживать и жидкие капельки.

Исторически первыми материалами для тканевых фильтров были натуральные волокна – шерсть и хлопок. Синтетические волокна расширили диапазон тканевых фильтров по температуре и в отношении химически агрессивных аэрозолей.

Область применения тканевых фильтров ограничивается параметрами очищаемого потока. Например, применение фильтров ограничено температурами, превышающими 500–600 К, при которых разрушается ткань или укорачивается срок ее службы до экономически невыгодного, а также составом газа или частиц, которые могут разрушать ткань или не поддаются удалению из фильтра (клейкие частицы). Некоторые технологические трудности могут быть решены изменением условий работы фильтра, например охлаждением потока. Для первичной фильтрации высокотемпературного потока используют гравийные фильтры.

Прохождение газа через фильтр требует расхода энергии, который определяется по перепаду давления на фильтре и зависит от скорости газа. Сочетание этих двух величин образует параметр, называемый сопротивлением:

$$S = \frac{P}{V},$$

где  $P$  – перепад давления на фильтре, кН/м<sup>2</sup> (кПа);  $V$  – скорость на поверхности фильтра (линейная скорость на лобовой поверхности, м/с, или в модифицированной форме

$$\Delta P = S_E V + K_2 C_i' V^2 t,$$

где  $S_E$  – эффективное остаточное сопротивление ткани, (кН·с)/м<sup>3</sup>;  $K_2$  – коэффициент удельного сопротивления пыли, (Н·с)/(г·м);  $C_i'$  – концентрация пыли в потоке газа, г/м<sup>3</sup>;  $t$  – время фильтрации, с.

Величина  $S_E$  является мерой сопротивления чистого тканевого фильтра, в котором имеется глубоко проникшая остаточная пыль.

На рис. 1.17 показана зависимость  $S_E$  от массы пыли, удерживаемой фильтром.

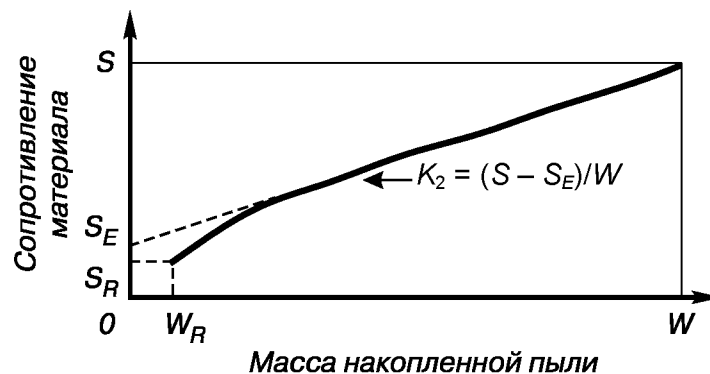


Рис. 1.17. Сопротивление фильтрующего материала в функции количества осажденной пыли

В момент приближения частицы пыли к волокну действуют следующие механизмы, которые могут привести к ее улавливанию:

- касание, когда частица, двигаясь мимо препятствия на расстоянии меньше своего радиуса, касается препятствия и захватывается;
- инерционный захват, когда под действием инерции частица сходит с первоначальной траектории, сталкивается с препятствием и захватывается;
- диффузия, когда частица настолько мала, что ее траектория становится хаотичной вследствие броуновского движения. Захват происходит, если случайное отклонение приводит частицу к волокну. Этот механизм становится наиболее важным при размере частиц менее 0,1 мкм;
- электростатическое осаждение, наблюдаемое при противоположных знаках заряда частицы и препятствия;
- термофорез, когда частица смещается к препятствию под действием градиента температуры;
- гравитационное осаждение, когда частица смещается с линии тока под действием земного тяготения;
- ситовый эффект, при котором частица задерживается из-за того, что слишком велика, чтобы пройти через данную пору или канал.

Действие наиболее важных из этих механизмов приведено на рис. 1.18–1.20. В каждом случае предполагается, что частица захватывается, если касается волокна, нити или ранее осажденной частицы.

При осаждении частицы на изолированном волокне механизмы касания, инерции, диффузии являются наиболее важными. Гравита-



ция и термофорез несут существенны, а электрические силы могут быть незначительными или очень важными.

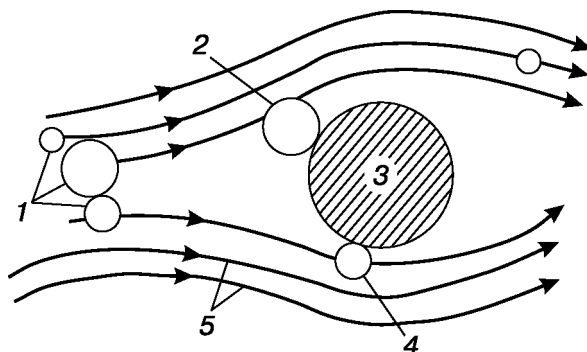


Рис. 1.18. Механизмы захвата частиц (касание и инерция): 1 – частицы; 2 – инерционный захват; 3 – нить или волокно; 4 – касание; 5 – линии тока

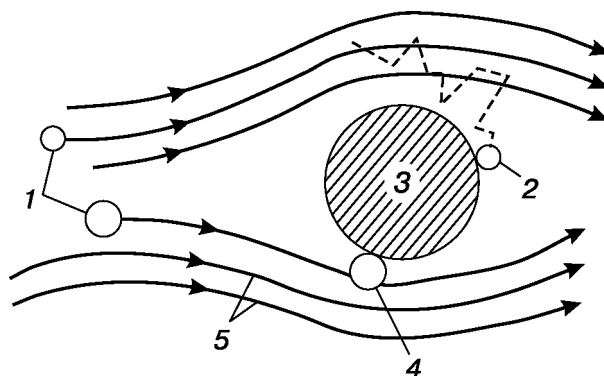


Рис. 1.19. Механизмы захвата частиц (диффузия и электрическая сила): 1 – частицы; 2 – диффузия; 3 – нить или волокно; 4 – электрическая сила; 5 – линия тока

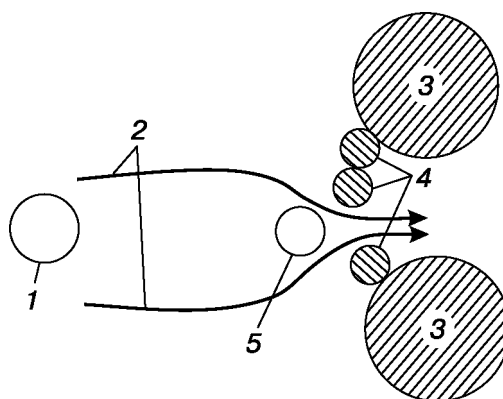


Рис. 1.20. Механизмы захвата частиц (ситовый эффект): 1 – частица; 2 – линии тока; 3 – нить или волокно; 4 – ранее захваченные частицы; 5 – частица, размер которой больше проходного сечения

Основой тканевого фильтра является гибкая пористая паутина текстильного материала, в результате твердые частицы отделяются от газового потока. Материалы фильтров могут быть разнообразными и выбираются по стоимости, рабочей температуре, химическим и физическим условиям, методу очистки и эффективности.

Для выбора фильтра необходим подробный анализ очищаемых газов. К необходимой информации следует отнести сведения о потоке (будет он постоянным или переменным и в каких пределах), температуре и характере применения фильтра. Колебания величины потока определяют выбор линейной скорости фильтрации, а колебания температуры влияют на выбор материала и на конструкцию.

Кроме того, нужны сведения о запыленности потока, о химических и физических характеристиках пыли, составе газа, о перепаде давления и параметрах технологического цикла. Размер частиц и их плотность влияют на выбор линейной скорости. Например, относительно большие частицы малой плотности могут стать причиной высокого сопротивления, если неправильно выбрана линейная скорость или характер поля течения газа неудовлетворителен. В результате – вторичный унос или образование мостиков между пылевыми отложениями на разных рукавах, что приведет к избыточному выбросу пыли.

Химические и физические свойства пыли определяют успешность работы фильтра. Так, если пыль абразивная, то снижается срок службы рукавов, если пыль липкая или гигроскопическая, то наблюдается залипание рукавов и недостаточная очистка.

Состав газа определяет выбор материала, при этом должны быть известны рабочая температура и условия использования. В настоящее время верхний температурный предел промышленного применения фильтров составляет около 550 К (стекловолоконистые материалы, которые теперь используются не только в тканевой форме, но и в валяном виде). Другая новая высокотемпературная разработка – нанесение микропористой политрифтор-эфирной пленки на тканевые и валяные набивные материалы.

К вспомогательным элементам системы очистки относят вентилятор и двигатель, побуждающие к движению газовый поток. Предпочтительнее помещать вентилятор после фильтра, чтобы уменьшить абразивное воздействие пыли. Экономически целесообразно выбирать вентилятор с запасом по номинальным характеристикам, потому что в отдельные моменты времени он может работать с перегрузкой. Потребляемую им энергию можно оценить с помощью следующего выражения:

$$P = 0,00184 Q \Delta P t,$$

где  $P$  – мощность вентилятора, кВт;  $Q$  – объемная скорость потока, м<sup>3</sup>/с;  $\Delta P$  – перепад давления, Па;  $t$  – время эксплуатации, ч/год.

Потеря давления в системе состоит из потерь на фильтре, в воздуховодах и коллекторе. Потери давления в воздуховодах вычисляют посредством аэродинамического расчета. Перепад давления в фильтре зависит от конструкции и габаритов последнего и обычно лежит в пределах 100–400 Па. В системе в целом падение давления может составлять 0,4–0,5 кПа, однако типичными являются значения 1,0–2,0 кПа.

Кроме сопротивления фильтра важной характеристикой последнего является проскок. Деннис и Клемм получили ряд уравнений для расчета концентрации на выходе из фильтра и проскока через фильтр:

$$C_0 = [Pn_s + (0,1 - Pn_s) \exp(-aW)] C_i + C_R,$$

где  $C_0$  – концентрация на выходе, г/м<sup>3</sup>;  $Pn_s$  – безразмерная постоянная:

$$Pn_s = 1,5 \cdot 10^{-7} \exp[12,7(1 - e^{60,18V})];$$

$a$  – поправочный коэффициент:

$$a = 4,66 \cdot 10^4 V^{-4} + 0,094,$$

где  $V$  – локальная лобовая скорость, м/с;  $W$  – количество пыли на фильтре, г/м<sup>2</sup>;  $C_i$  – концентрация пыли на входе, г/м<sup>3</sup>;  $C_R$  – концентрация уносимых с фильтра частиц (постоянная), г/м<sup>3</sup>.

Из уравнений видно, что проскок растет с увеличением линейной скорости (рис. 1.21 и 1.22).

Линейную скорость фильтрации можно определить, зная концентрацию пыли на выходе из фильтра, длительность процесса, величину коэффициента удельного сопротивления пыли  $K_2$  и значение эффективного остаточного сопротивления ткани  $S_E$ . При снижении точности определения  $S_E$  и  $K_2$  падает точность расчетов.

Деннис и Клемм предложили использовать следующее уравнение для определения коэффициента удельного сопротивления пыли:

$$K_2 = \frac{\mu S_0 10^{-2} (3 + 2\beta^{5/3})}{60 \rho_p C_c (3 - 4,5\beta^{1/3} + 4,5\beta^{5/3} - 3\beta^2)},$$

где  $\mu$  – вязкость газа, Па·с;  $S_0$  – безразмерный параметр удельной поверхности  $S_0 = 60 \cdot 10^{1,15 \lg^2 \sigma_g / MMD}$ , где  $MMD$  – массовый медианный диаметр частиц, мм;  $\sigma_g$  – стандартное геометрическое отклонение размера частиц (безразмерное);  $\bar{\rho}$  – насыпная плотность слоя пыли, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_p$  – плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $\beta = \bar{\rho} / \rho_p$ ;  $C_c$  – поправка Каннингхема ( $\sim 1$  при  $MMD > 5$ ).

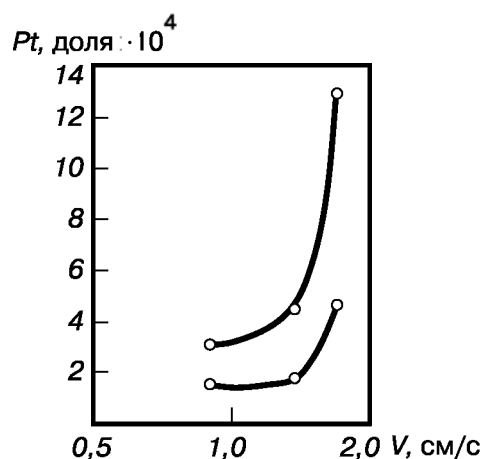


Рис. 1.21. Зависимость проскока от линейной скорости для опытного фильтра промышленной котельной

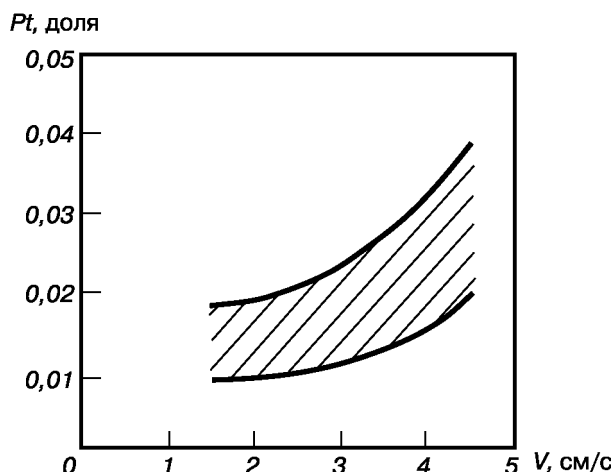


Рис. 1.22. Зависимость проскока от линейной скорости для фильтра небольшой коммунальной котельной

Для частицы летучей золы с  $MMD = 9$  мкм,  $\sigma_g = 3$ , при температуре 298 К справедлива следующая запись зависимости  $K_2$  от скорости фильтрации:

$$K_2 = 1,8V^{1/2}.$$

Величина показателя степени может зависеть от природы и свойств пыли.

**Способы регенерации тканевых фильтров.** Возможность регенерации – одна из важнейших отличительных особенностей тканевого фильтра. Структура фильтровального материала определяет гидравлическое сопротивление аппарата, его нагрузку по газу, необходимую площадь фильтрации, а следовательно, размеры фильтра, энергозатраты, т. е. его экономичность и конкурентоспособность.

Регенерация фильтрованных элементов сводится к приложению тех или иных нагрузок к запыленному фильтрованному материалу, обеспечивающих в конечном итоге разрушение и отделение пылевого слоя от материала. Для приложения нагрузок могут использоваться

механические (обычное встряхивание, иногда кручение) или пневматические (различные виды обратной продувки: непрерывная, пульсирующая, импульсная, струйная) способы. Механическое приложение нагрузки сочетается, как правило, с непрерывной обратной продувкой. Возможны также другие способы регенерации с применением, например, акустических колебаний, однако они не получили распространения в промышленности (рис. 1.23).

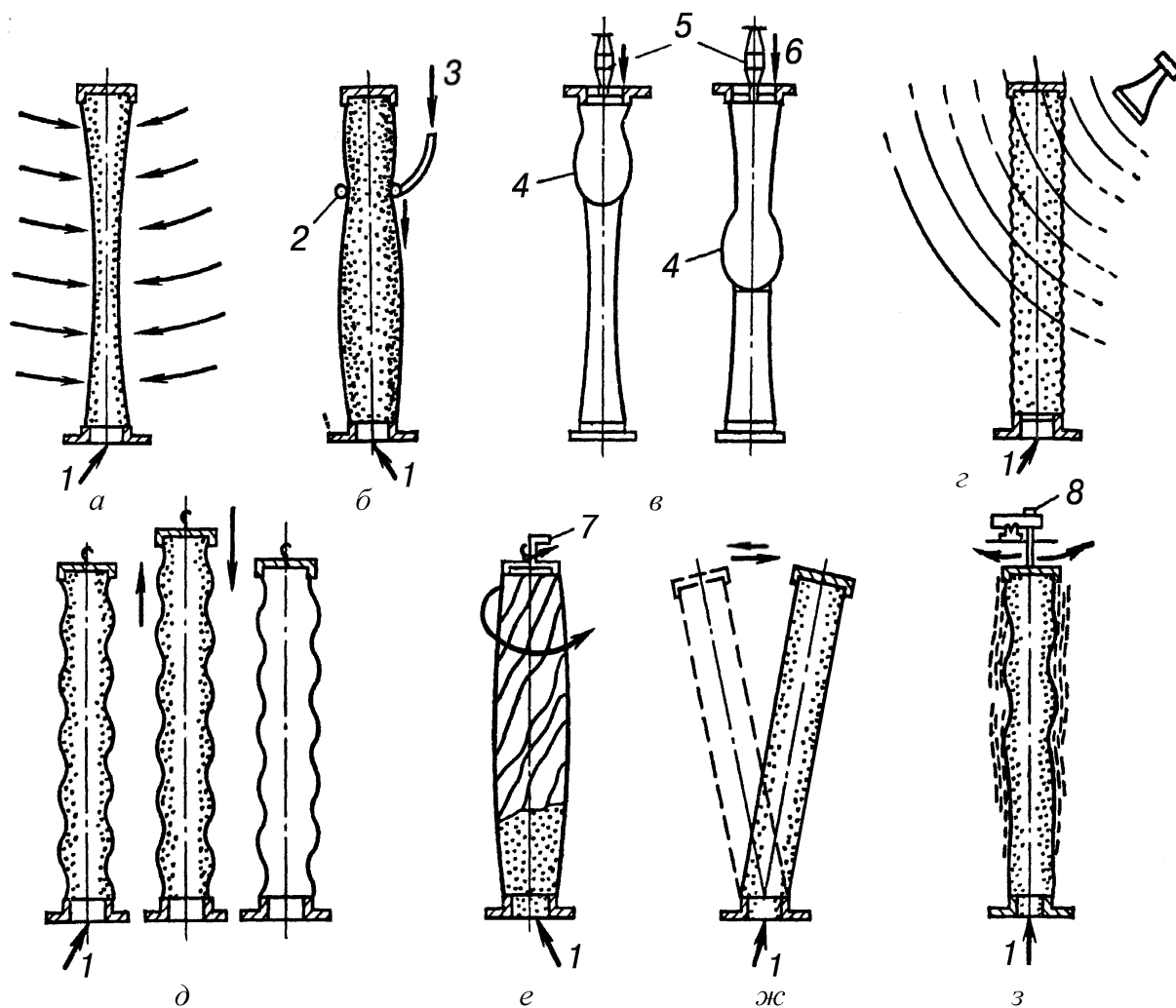


Рис. 1.23. Способы регенерации рукавных фильтров: *а* – обратная посекционная продувка; *б* – струйная продувка; *в* – импульсная продувка; *г* – акустическая регенерация; *д* – механическое встряхивание; *е* – кручение рукавов; *ж* – качание рукавов; *з* – вибрация; 1 – направления движения запыленного газа; 2 – движущееся кольцо; 3 – продувочный воздух; 4 – пузырек сжатого воздуха; 5 – эжектор; 6 – импульс давления; 7 – реверсивное вращательное устройство; 8 – вибратор

Механизм разрушения пылевого слоя при регенерации различными способами имеет общие черты. Практически при всех способах разрушение пылевого слоя происходит по ослабленным аутогезион-

ным связям, обычно без нарушений адгезионного взаимодействия частиц с волокнами, так как последние велики. Поэтому важное значение для удаления пыли имеют структурные неоднородности пылевого слоя, обусловленные наличием крупных частиц, подвижность нити в тканях и интенсивность колебаний фильтровального материала.

В зависимости от способа регенерации различают следующие пять типов фильтров:

- фильтр с механическим встряхиванием (только механическая регенерация). Применяется редко, причем для очистки газов небольшого объема, содержащих грубую, легко отряхиваемую пыль. Скорости фильтрации находятся в диапазоне 0,4–1,2 м/мин. Фильтровальным материалом служат ткани из природных и синтетических волокон. Конструкция получается простой (аппараты ФР-6П, ФТ-2М, ФТНС-М и др.);

- фильтр со встряхиванием и одновременной обратной продувкой воздухом низкого давления (менее 10 кПа). Расход воздуха при регенерации в этом случае такой же, как и при фильтрации. В отдельных случаях при рыхлой структуре слоя у фильтров с такой регенерацией скорость фильтрации может достигать 2 м/мин благодаря глубокой очистке ткани (аппараты ФРУ, ФРВ-20, ФРН-30, РФ 1 и др.);

- фильтр с одной обратной продувкой воздухом низкого давления (менее 10 кПа), который может подаваться непрерывно или в виде пульсирующего потока. Способ находит преимущественное применение при длине рукавов до 10 м и диаметре порядка 300 мм. Фильтры оснащаются рукавами из синтетической ткани, стеклоткани или иглопробивного войлока. В зависимости от вида пыли (грубой или средней дисперсности) нагрузки могут составлять 0,6–2,5 м/мин (аппараты ФР, ФРДО и др.);

- фильтр с импульсной регенерацией воздуха высокого давления ( $0,5 \cdot 10^5$  до  $7 \cdot 10^5$  Па). Рукава надеваются на каркасы. В ходе регенерации рукава раздуваются, что обеспечивает дополнительное механическое воздействие. Скорости фильтрации лежат между 1,5 и 2,5 м/мин в зависимости от адгезионных свойств слоя пыли. Хотя применение сжатого воздуха не является дешевым способом регенерации, тем не менее фильтры с импульсной продувкой, благодаря повышенной нагрузке по газу, получили широкое распространение (аппараты ФРКИ, ФРКДИ, ФРКН);

- фильтры со струйной продувкой, характеризующиеся тем, что воздух обратной продувки проходит не через всю поверхность рукава, а лишь через узкий участок, расположенный напротив кольцевого

сопла с щелью шириной от 0,8 до 6 мм. Сопло непрерывно перемещается по высоте рукава, обеспечивая поочередную очистку всей его поверхности. При этом пыль удаляется полностью, так что эффективность пылеулавливания определяется способностью чистого фильтровального материала (плотный войлок) захватывать частицы пыли. Преимуществом таких фильтров является повышенная скорость фильтрации (до 6 м/мин), однако они применяются лишь при пониженной концентрации пыли на входе – не более 50 мг/м<sup>3</sup> (аппарат РФОСП).

*Регенерация обратной продувкой.* Регенерация обратной продувкой является наиболее распространенной и используется для всех видов фильтрованных элементов (рукава или кассеты, тканые или войлочные материалы, осаждение пыли на внутренней или наружной поверхности рукава, одна или несколько секций). Существует несколько способов создания обратного потока, обеспечивающих непрерывную работу. Сопло сжатого воздуха на стороне чистого воздуха каждого рукава инжектирует воздух высокого давления в рукав в обратном направлении по отношению к нормальному в виде импульсов длительностью от 0,1 до 0,04 с в случае систем с рукавами с закрытыми концами, прикрепленными к трубной решетке камеры чистого воздуха (рис. 1.24).

Вариацией этого метода является разделение групп рукавов (включая камеру чистого воздуха) на зоны с помощью внутренних перегородок. Камеры чистого воздуха сообщаются с выхлопной трубой через клапаны. Каждая зона снабжена одним импульсным клапаном, который подаёт сжатый воздух в группу рукавов. Во время цикла регенерации клапан в регенерируемой зоне закрывается, перекрывая воздушный поток через зону. Из камеры, в которую поступает воздух от отдельного вентилятора, подается обратный поток к рукавам с закрытыми концами, которые крепятся, как и в предыдущем случае, но не разделены на зоны. Камера вращается, и воздух обратной продувки инжектируется внутрь каждого рукава по мере того, как сопла проходят над рукавами. Интервал времени между регенерациями определяется скоростью вращения камеры. К уравновешенной раме прикреплено несколько продувочных колец, окружающих каждый рукав. Рама медленно движется вверх и вниз с помощью цепей, укрепленных на шкивах. Воздух непрерывно подается к продувочным кольцам от наружного вентилятора через шланг (рис. 1.25). Камера нагнетания, движущаяся горизонтально, устанавливается над выпускным патрубком чистого воздуха каждой вертикальной линии рукавов.

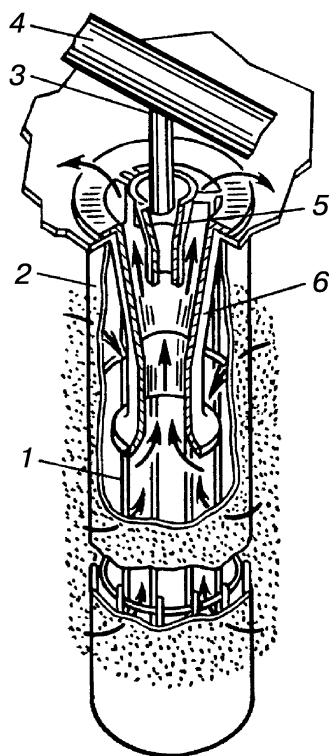


Рис. 1.24. Система импульсной регенерации: 1 – каркас; 2 – фильтрующий рукав; 3 – коллектор сжатого воздуха; 4 – продувочное сопло; 5 – вторичное сопло; 6 – насадок Вентури

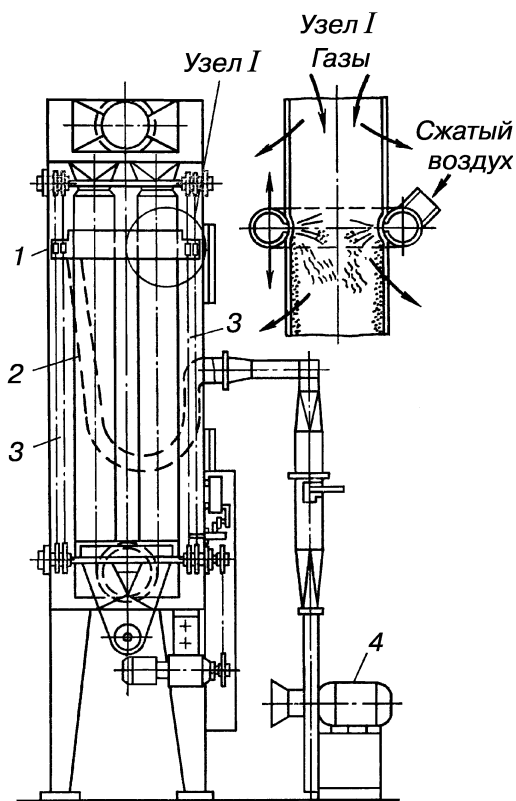


Рис. 1.25. Рукавный фильтр с обратной струйной продувкой: 1 – рама с продувочными кольцами; 2 – гибкий шланг для подвода продувочного воздуха; 3 – цепи для перемещения рамы; 4 – двигатель с высоконапорным вентилятором

Обратный поток может подаваться двумя способами: атмосферный воздух может проходить через рукав в обратном направлении по сравнению с нормальным за счет вентилятора, чистый воздух может вдуваться в рукава от отдельного вентилятора, установленного на движущейся камере нагнетания (рис. 1.26).

*Регенерация с помощью механического встряхивания.* Механическое встряхивание закрепленных на общей раме закрытых сверху рукавов наиболее эффективно в продольном направлении, но при этом сильно изнашиваются рукава, особенно в нижней части. Встряхивание должно быть кратковременным и резким, но не настолько сильным, чтобы вызвать большие механические усилия в ткани. Колебательные перемещения верхних частей рукавов в горизонтальном направлении вызывают значительно меньший износ, но они и менее эффективны, так как колебания плохо распространяются по длине рукавов.

Пыль удаляется по длине рукава неравномерно. Обычно в средней части рукавов остается больше пыли, что вызывает неравномер-



ное распределение скоростей газов и более быстрое изнашивание тех мест, где интенсивнее происходит процесс регенерации – в верхней или нижней частях в зависимости от способа встряхивания.

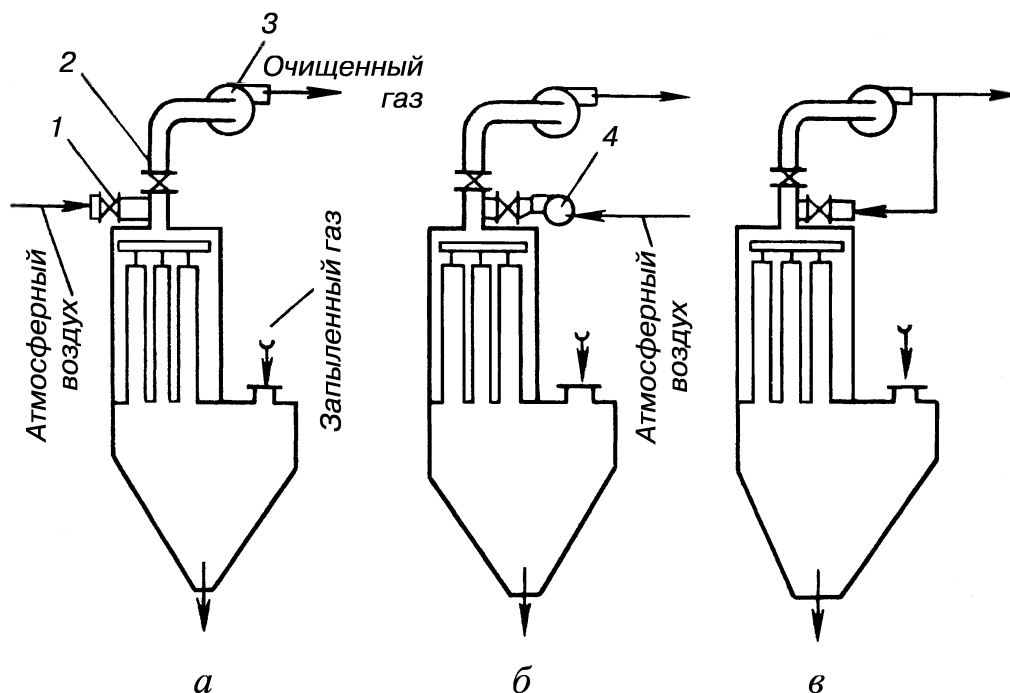


Рис. 1.26. Схемы работы фильтров с обратной продувкой: *а* – фильтр с продувкой за счет подсоса воздуха; *б* – фильтр с продувкой с помощью вентилятора продувки; *в* – фильтр с продувкой за счет давления основного вентилятора; 1 – клапан продувочного газа; 2 – клапан очищенного газа; 3 – основной вентилятор; 4 – дополнительный вентилятор

Минимальная фильтрующая поверхность тканей и максимальный срок службы рукавов достигаются при сочетании коротких циклов фильтрации и регенерации.

Операция встряхивания рукавов в продольном направлении заключается в поднятии штанги подвеса на 7–10 см и последующем свободном падении ее с этой высоты вместе с рукавами на подушки, которые амортизируют удар. Подъем и сброс рукавов повторяются 5–15 раз в зависимости от свойств пыли.

Этот способ регенерации в сочетании с обратной продувкой наиболее эффективен и применяется для тяжелых ворсовых тканей, на которых удерживается в равновесном состоянии до 1 кг/м<sup>2</sup> пыли. Колебания рукавов в поперечном направлении чаще используются для тонких тканей с гладкой поверхностью.

*Регенерация с помощью аэродинамического встряхивания.* Аэродинамическое встряхивание может осуществляться путем подачи

импульса сжатого воздуха внутрь каждого фильтрующего элемента (рис. 1.27). Такой вид регенерации используется в каркасных рукавных и плоских фильтрах. Избыточное давление сжатого воздуха при регенерации составляет 0,4–0,8 МПа, длительность импульса – от 0,1 до 0,2 с, необходимая частота импульсов зависит от характера изменения сопротивления фильтра и обычно составляет 5–10 импульсов в минуту на каждый рукав. Увеличение длительности импульса неэффективно, а остаточное равновесное сопротивление фильтра обратно пропорционально квадрату давления сжатого воздуха в ресивере, частоте импульсов в степени 0,5 и прямо пропорционально входной концентрации в степени 0,25.

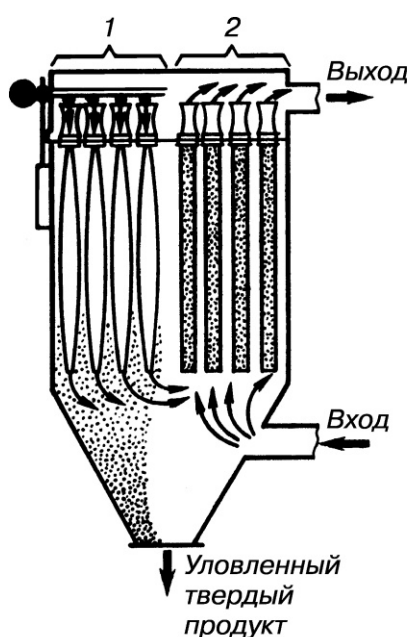


Рис. 1.27. Каркасный рукавный фильтр с импульсной продувкой:  
1 – очистка; 2 – пылеулавливание



Рис. 1.28. Рукав в сочетании со скруббером Вентури

При рассматриваемом методе механическое воздействие, обеспечивающее деформацию ткани, сочетается с обратной продувкой, так как происходит эжектирование очищенных газов в рукав (рис. 1.24). В качестве фильтрующего материала обычно используются фетры, длина рукавов не превышает 2,5–3,5 м.

С целью интенсификации работы фильтров разработаны эжекторы, в которых эффект центральной струи сочетается с воздействием

тангенциального потока воздуха по периферии сопла (рис. 1.28), что обеспечивает достижение сверхзвуковой скорости в продувочном сопле. Известны также конструкции с двумя эжекторами в каждом рукаве в верхней и нижней частях, что позволяет увеличить длину рукавов до 5–6 м.

В промышленности наибольшее распространение получили рукавные фильтры, в которых процессы регенерации могут быть полностью автоматизированы. Запыленные газы или воздух могут вводиться в рукава как снизу, так и сверху. Фильтрация через рукава может производиться снаружи вовнутрь, а также изнутри наружу.

Ультразвуковые аппараты (рис. 1.29) используются для повышения эффективности работы циклонов или рукавных фильтров. Ультразвук приводит к коагуляции и укрупнению частиц пыли. Наиболее распространенными источниками ультразвука являются различного типа сирены. Относительно эффективно ультразвуковые пылеуловители работают только при высоком содержании пыли в газе. Чтобы увеличить эффективность работы аппарата, в него подают воду. Ультразвуковые установки в комплексе с циклоном применяют для улавливания сажи, тумана, различных кислот и т. п.

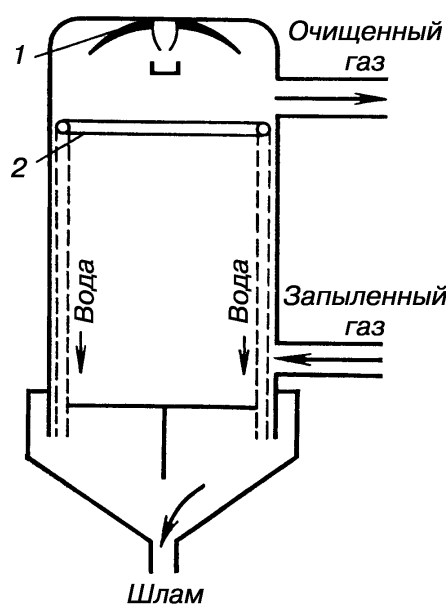


Рис. 1.29. Акустический ультразвуковой пылеуловитель: 1 – акустическая сирена; 2 – трубчатый ороситель

**Электрофильтры.** Электрическое осаждение – эффективный метод улавливания дисперсных загрязнителей, специфика которого заключается в том, что осаждающая сила действует непосредственно

на частицы, тогда как при механических методах сепарации создается косвенное воздействие на поток газа в целом. Подобное прямое и чрезвычайно эффективное использование силового воздействия объясняет умеренное потребление энергии и малое сопротивление потоку газа при высокой эффективности улавливания.

Современные электрофилтры могут иметь эффективность более 99,9 %, в них улавливаются мельчайшие частицы субмикрометрового диапазона. Принципиальных ограничений степени очистки нет, так как эффективность может быть повышена путем увеличения времени пребывания частиц в аппарате. Неоспоримым преимуществом является возможность очищать большие потоки газа при высоких температурах и в агрессивной среде.

Электрофилтр – это аппарат, в котором используются электрические силы для улавливания взвешенных частиц из газов. Работа электрофилтра независимо от его типа состоит из трех стадий: зарядка взвешенных частиц, их осаждение и удаление в бункер.

Частицы в газовом потоке могут быть частично заряженными. Однако этих зарядов не хватит для осаждения. Наиболее эффективным средством зарядки является коронный разряд постоянного тока. Можно использовать как положительную, так и отрицательную корону, но для промышленной газоочистки предпочтительнее отрицательная, так как она обладает большей стабильностью. Когда очищается воздух в помещениях, используют только положительную корону, потому что она дает меньше озона.

Корона формируется между активным высоковольтным электродом (тонкой проволоки) и заземленным пассивным электродом, имеющим форму трубы или пластины. Зарядка происходит в газовом пространстве, содержащем чаще отрицательные ионы. Пылевые частицы заряжаются в результате бомбардировки газовыми ионами за сотые доли секунды.

Если осаждение частиц обусловлено воздействием на них поля короны, то этот принцип работы реализуется в аппаратах, которые получили название одноступенчатых (рис. 1.30). В двухступенчатых электрофилтрах зарядка частиц и их осаждение происходят на разных ступенях.

Используемый в электрофилтрах коронный разряд образуется либо между тонкими проволоками и стенками канала (рис. 1.30), либо между проволоками и пластинами (рис. 1.31).

Электроны испускаются поверхностью проволоки или образуются вблизи неё в электрическом поле высокой напряженности, в зо-

не коронного свечения (рис. 1.31). Соударения электронов дают положительный ион на каждый образованный электрон. Ионы рожают новые свободные электроны при ударах о проволоку или в результате фотоэлектронной эмиссии в газе или на поверхности проволоки.

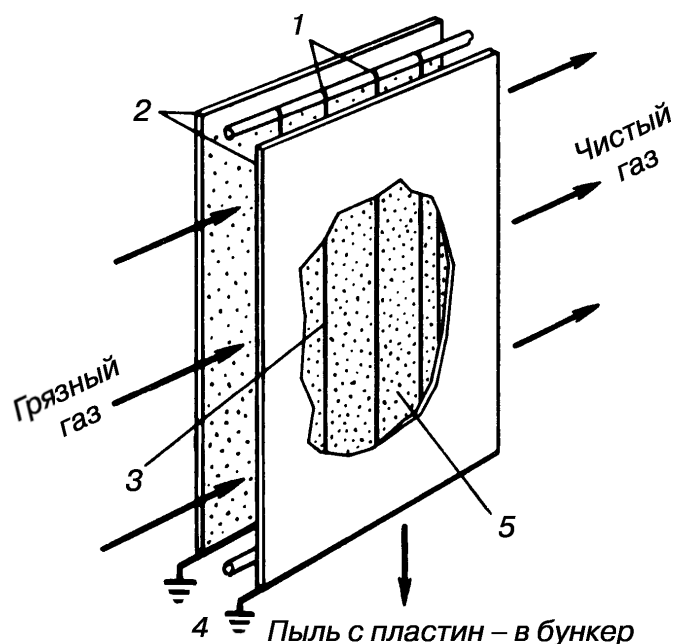


Рис. 1.30. Схема одноступенчатого фильтра: 1 – высоковольтные проволоки для коронного разряда; 2 – осадительные пластины; 3 – коронный разряд вдоль проволоки; 4 – заземление; 5 – пыль, собранная на пластинах

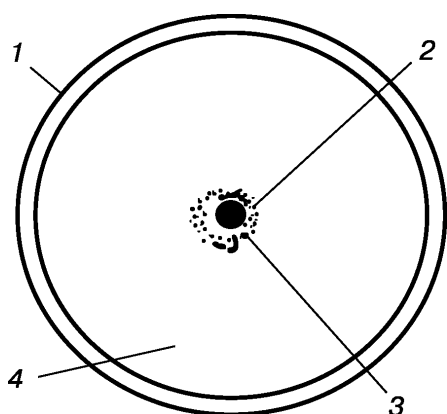


Рис. 1.31. Схема коронного разряда: 1 – труба; 2 – разрядная проволока; 3 – свечение короны, содержащей положительные ионы и свободные электроны; 4 – область отрицательного ионного объемного заряда

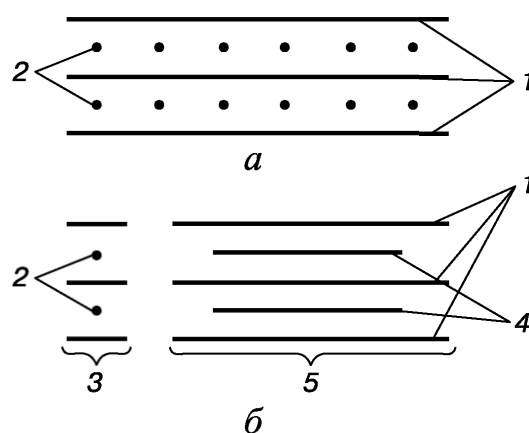


Рис. 1.32. Схема одноступенчатого (а) и двухступенчатого (б) электрофильтров: 1 – осадительные пластины; 2 – коронирующие проволоки; 3 – зарядник; 4 – высоковольтные электроды; 5 – осадитель

Наиболее важной является зарядка частиц ионами, движущимися под действием внешнего электрического поля, менее важна зарядка, обусловленная диффузией ионов, скорость которой не зависит от электрического поля и определяется энергией теплового движения ионов. Зарядка в поле существенна для частиц диаметром более 0,5 мкм, диффузионная – для частиц  $d_p < 0,2$  мкм, в промежуточном диапазоне работают оба механизма.

Теория полевой зарядки частиц разработана для условий, существующих в униполярной короне для отдельной сферической частицы в однородном электрическом поле при равномерной плотности ионов.

Если незаряженную частицу внезапно поместить в поле короны, то она сразу начнет заряжаться в результате соударения газовых ионов о ее поверхность. Скорость зарядки и величину заряда находят методами электростатики. Заряд частицы за время  $t$  рассчитывают по упрощенной формуле

$$q = q_s \frac{t}{t + t_0},$$

где  $q_s$  – предельное значение заряда, Кл;

$$q_s = 12\pi\epsilon_0 E_0 r_p^2 \frac{\epsilon}{\epsilon + 2},$$

где  $\epsilon_0$  – проницаемость вакуума,  $\epsilon_0 = 8,55 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $E_0$  – напряженность электрического поля, В/м;  $r_p$  – радиус частицы, м;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая постоянная частицы по отношению к диэлектрической постоянной вакуума;  $t$  – время заряда частицы, с;  $t_0$  – временная постоянная зарядки, с:

$$t_0 = \frac{4\epsilon_0}{N_0 e K},$$

где  $N_0$  – ионная плотность,  $\text{м}^{-3}$ ;  $e$  – заряд электрона, Кл;  $K$  – подвижность газовых ионов,  $\text{м}/(\text{с} \cdot \text{В} \cdot \text{м})$ .

Например, частица диаметром 1 мкм помещена в корону со следующими характеристиками:  $E_0 = 6 \cdot 10^5$  В/м;  $N_0 = 5 \cdot 10^{14}$   $\text{м}^{-3}$ ;  $K = 2,2 \cdot 10^{-4}$   $\text{м}/(\text{с} \cdot \text{В} \cdot \text{м})$ .

Находим предельный заряд:  $q_s = 5,0 \cdot 10^{-17}$  Кл = 313 зарядов электрона. Тогда временная постоянная заряда

$$t_0 = \frac{4\epsilon_0}{N_0 \epsilon K} = \frac{4 \cdot 8,55 \cdot 10^{-12}}{5 \cdot 10^{14} \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \cdot 2,2 \cdot 10^{-9}} = 0,002 \text{ (с)}.$$

Кроме полевой зарядки частиц в электрофильтрах осуществляется процесс диффузионной зарядки, при которой ионы обмениваются с газовыми молекулами тепловой энергией. Ионы, диффундирующие через газ, сталкиваются с частицами и захватываются ими под действием зеркальных сил притяжения.

Механизм диффузионной зарядки частиц не зависит от напряженности внешнего поля. На основе принципов кинетической теории выведено уравнение диффузионной (или тепловой) зарядки, которое связывает заряд частицы в числе элементарных зарядов:

$$n = \frac{4\pi\epsilon_0 k T r_p}{e^2} \ln \left( 1 + \frac{e^2 \bar{v} r_p N_0 t}{4\epsilon_0 k T} \right),$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура, К;  $\bar{v}$  – средняя скорость газовых ионов, м/с. Например: при обычном давлении для воздуха  $\bar{v} = 467$  м/с. Примем  $N_0 = 5 \cdot 10^{14}$  м<sup>-3</sup>;  $T = 373$  К;  $r_p = 1 \cdot 10^{-6}$  м и  $t = 1$  с. Тогда  $n = 18 \cdot \ln(1 + 4,08 \cdot 10^4) = 191$  заряд электрона.

В табл. 1.3 приведены расчетные значения диффузионных зарядов для некоторых типичных наборов параметров.

В промежуточном интервале размеров нужно учитывать и полевую, и диффузионную зарядку. При этом расчеты выполняются приближенными и численными методами. Графические зависимости заряда частиц приведены на рис. 1.33.

Следует отметить явное преобладание диффузионного механизма для частиц меньше 0,4 мкм и, наоборот, преобладание полевой зарядки для частиц крупнее 0,8 мкм.

Таблица 1.3

**Заряды для процесса диффузионной зарядки**

$d_p$ , мкм	$t$ , с			
	0,01	0,1	1	10
0,1	2	3	6	8
0,2	4	8	12	16
0,4	11	19	27	35
1,0	34	55	76	96

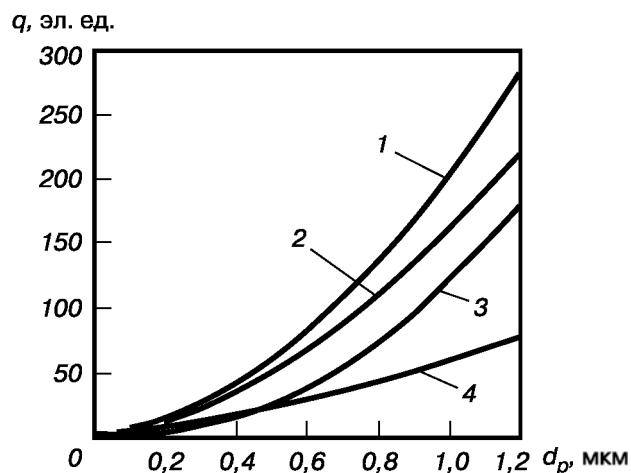


Рис. 1.33. Заряд частиц, рассчитанный по теориям полевой зарядки, диффузионной зарядки и их сочетанию для типичных условий (эл. ед. – элементарные единицы): 1 – теория комбинированной зарядки; 2 – экспериментальные данные Хьюитта; 3 – теория полевой зарядки; 4 – диффузионная теория

Частицы примесей, приобретя заряд, дрейфуют под действием электрического поля и осаждаются. Большая часть пыли оседает на положительно заряженном осадительном электроде (рис. 1.34, осадительным электродом служит сама труба), меньшая часть – на внутреннем коронирующем электроде. Частота разряда определяет степень очистки газа при соответствующем значении подаваемого напряжения.

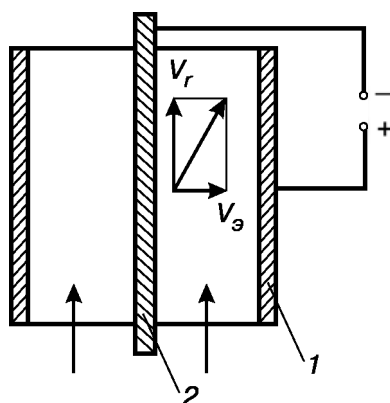


Рис. 1.34. Схема электрофильтра:  
1 – труба (осадительный электрод); 2 – коронирующий электрод

Осаждение частиц происходит под действием кулоновских или электрических сил. При этом скорость осаждения возрастает совместно со скоростью миграции частиц к осадительным электродам, поэтому последняя должна иметь максимальное значение.



Если рассматривать простейшую ситуацию, когда частицы переносятся ламинарным потоком, то скорость их движения можно рассчитать с учетом закона Кулона электростатического взаимодействия:

$$F_e = qE_p, \quad (1.4)$$

где  $F_e$  – сила электрического взаимодействия, В/м;  $q$  – заряд частиц, Кл;  $E_p$  – напряженность осаждающего поля, В/м, и закона сопротивления Стокса – Каннингхема:

$$E_d = \frac{6\pi\mu_g r_p w}{1 + A \left( \frac{\lambda}{r_p} \right)}, \quad (1.5)$$

где  $\mu_g$  – вязкость газа, Па · с;  $r_p$  – радиус частицы, м;  $w$  – скорость миграции, м/с;  $A$  – безразмерный параметр (для атмосферного воздуха  $A \cong 0,86$ );  $\lambda$  – средняя длина пробега молекул окружающего газа, м.

Приравняв (1.4) к (1.5), вычислим скорость миграции как

$$w = \frac{qE_p}{6\pi\mu_g r_p} \left[ 1 + A \left( \frac{\lambda}{r_p} \right) \right].$$

На рис. 1.35 показана зависимость скорости миграции от размера частиц и напряженности поля для типичных условий. Полное улавливание наступает тогда, когда самая «медленная» частица осаждается на осадительном электроде.

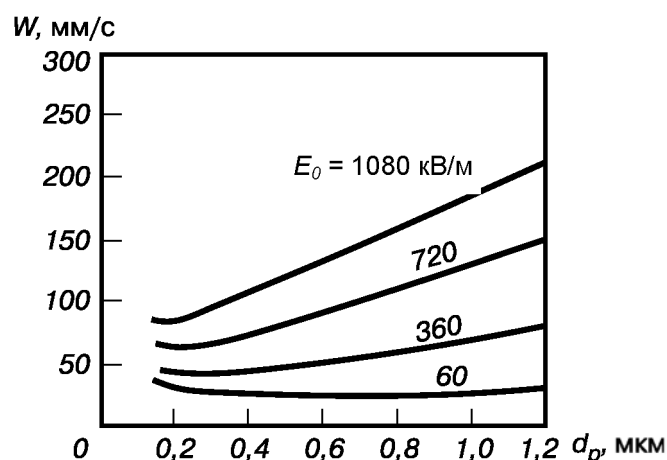


Рис. 1.35. Зависимость скорости миграции от диаметра частиц и электрических параметров в атмосферном воздухе (данные Хьюитта)

В действительности условие идеального ламинарного течения никогда не реализуется и течение газа носит сложный турбулентный характер. Осаждение частиц в этих условиях можно рассматривать на основе вероятностного подхода, т. е. с использованием экспоненциальной формулы для вероятности захвата частицы, двигающейся в поле электрофильтра.

По конструкции электрофильтры подразделяются на трубчатые и пластинчатые. В них улавливают пыль с частицами размером выше 5 мкм. Осевшие на электроды частицы образуют слой, который удаляется при помощи удара, вибрации, отмывки и т. д.

Эффективность очистки газа в электрофильтрах может быть определена по формуле Дейча:

$$\eta = 1 - e^{-V_3 F_{уд}}, \quad (1.6)$$

где  $V_3$  – составляющая скорости движения частиц пыли к осадительному электроду, м/с;  $F_{уд}$  – удельная поверхность осадительных электродов, равная отношению поверхности осадительных электродов к расходу очищаемых газов.

Как следует из формулы (1.6), эффективность очистки газов в электрофильтрах может быть высокой. В практических конструкциях она может достигать 0,99–0,999.

Электрофильтры используют для очистки не только от пыли, но и от масляных туманов, смол. Производительность некоторых электрофильтров достигает 100–500 тыс. м<sup>3</sup>/ч. Расход энергии ~ 0,12–0,20 кВт·ч на 1000 м<sup>3</sup> газа.

При работе электрофильтра немаловажным является давление осажденных частиц, толщина которых на электродах может достигать нескольких сантиметров. Наиболее эффективное средство – постукивание по поддерживающей коронирующий электрод конструкции. При этом важным является избежание уноса, который снижает эффективность работы электрофильтра.

## 1.2. Газообразные загрязняющие вещества

Основными газообразными загрязняющими веществами в атмосфере являются диоксид серы SO<sub>2</sub>, оксиды азота NO и NO<sub>2</sub>, монооксид углерода CO и газообразные углеводороды. Среди прочих газообразных загрязнений можно выделить триоксид серы SO<sub>3</sub>, другие со-

единения серы  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CS}_2$ , аммиак  $\text{NH}_3$ , отдельные углеводороды  $\text{C}_6\text{H}_6$ , различные галогеносодержащие газы и пр. К источникам их образования относят процессы сжигания горючих соединений, промышленные технологические процессы и природные источники.

**Соединения серы.** При нормальных условиях газообразными оксидами являются диоксид серы  $\text{SO}_2$  и триоксид серы  $\text{SO}_3$ , хотя известно о существовании других оксидов серы –  $\text{SO}$ ,  $\text{S}_2\text{O}$ ,  $(\text{SO})_2$ , а также полимерных оксидов  $\text{S}_m\text{O}_m$ ,  $(\text{SO}_3)_n$ . Из них лишь очень реакционноспособный монооксид  $\text{SO}$  может играть заметную роль в химии серосодержащих загрязнений атмосферы.

Диоксид серы представляет собой бесцветный газ с острым раздражающим запахом. Он не взрывается, не воспламеняется, хорошо растворяется в воде, что позволяет использовать метод промывки газов в скрубберах и способствует быстрому образованию серной кислоты в водяных каплях. В виде готовой продукции  $\text{SO}_2$  получают либо сжиганием элементарной серы, либо сжиганием  $\text{H}_2\text{S}$ , содержащегося в природном газе, либо кислородным обжигом сульфидов металлов, либо сплавлением последних с оксидами металлов.

Триоксид серы – бесцветный газ; в промышленности его получают каталитическим окислением  $\text{SO}_2$ ; хранят  $\text{SO}_3$  в жидком виде. Определение  $\text{SO}_3$  в воздухе является сложной процедурой; данные о его содержании в окружающей атмосфере отсутствуют. Триоксид серы  $\text{SO}_3$  образуется вместе с  $\text{SO}_2$  при сжигании серы в количестве 1–10 % от  $\text{SO}_2$ . В атмосфере время жизни  $\text{SO}_3$  очень мало ( $10^{-6}$  с), так как он быстро реагирует с парами воды, образуя серную кислоту.

Сероводород – это бесцветный горючий высокотоксичный газ, имеющий характерный неприятный запах. Время жизни  $\text{H}_2\text{S}$  в атмосфере составляет 1 день, средняя концентрация в нормальных условиях равна  $6 \text{ мкг/м}^3$ . Антропогенными источниками  $\text{H}_2\text{S}$  являются заводы по производству крафтцеллюлозы, коксовые печи, установки по очистке природного газа, предприятия, производящие искусственный шелк и нейлон. Из-за сильного запаха на этих предприятиях обычно предусматривают превращение  $\text{H}_2\text{S}$  в серную кислоту.

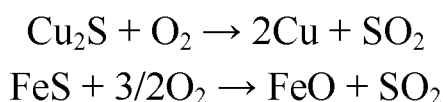
При сжигании топлива, в котором присутствуют остаточные количества органических и неорганических сульфидов, сера превращается в  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$ , которые выделяются в атмосферу.

При сжигании угля образуется около 70 % от общего количества  $\text{SO}_2$ , поступающего в атмосферу во всем мире. Содержание серы в угле зависит от месторождения. Неорганическая сера присутствует в основном в виде дисульфидов и сульфатов. При нагревании угля

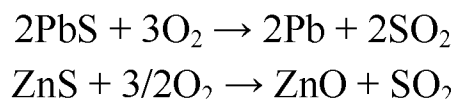
происходит испарение органических и в меньшей степени неорганических соединений; при этом образуются  $\text{H}_2\text{S}$ , некоторое количество  $\text{CS}_2$ ,  $\text{COS}$  и примеси производных тиофена и тиолы.

Значительное количество оксидов серы выбрасывается в атмосферу при производстве меди, свинца и цинка из сульфидных руд, а также в процессе очистки нефтепродуктов. В процессе плавки сульфидных руд протекают следующие реакции:

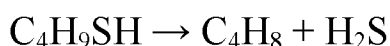
при производстве меди и железа



при производстве свинца и цинка



При термическом крекинге углеводородов, в результате реакции



происходит образование сероводорода.

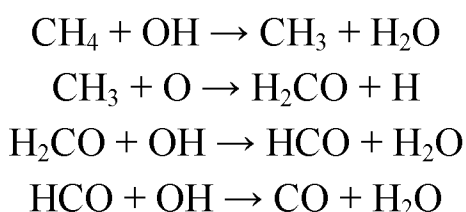
**Соединения углерода.** К соединениям углерода, имеющим значение в глобальном цикле превращений углерода, относятся диоксид углерода  $\text{CO}_2$ , монооксид углерода  $\text{CO}$ , метан  $\text{CH}_4$  и большое количество различных летучих углеводородов.

Поскольку  $\text{CO}_2$  эффективно поглощает длинноволновое излучение, отраженное от поверхности Земли, наличие  $\text{CO}_2$  в атмосфере действует как защитный экран, уменьшающий теплотери планеты. Так называемый парниковый эффект, связанный с присутствием  $\text{CO}_2$  в атмосфере, – важный фактор, регулирующий температуру земного шара. Поскольку в результате деятельности промышленных предприятий возможно нарушение превращения  $\text{CO}_2$  в атмосфере, диоксид углерода, поступающий из антропогенных источников, в глобальном масштабе следует рассматривать как загрязнение. При неполном сгорании топлива в результате работы двигателей возможно и выделение углеводородов с высокой молекулярной массой. Содержащиеся в атмосфере оксиды азота, углеводороды значительно повышают эффективность фотохимического образования озона, поэтому их концентрацию желательно поддерживать на минимальном уровне.

Диоксид углерода представляет собой нетоксичный бесцветный газ, без запаха, растворимый в воде.

Монооксид углерода – это бесцветный горючий токсичный газ, не имеющий запаха. При  $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  угарный газ (СО) незначительно растворим в воде (2,17 мл / 100 мл  $\text{H}_2\text{O}$ ). Токсичность этого газа связана с его способностью реагировать с гемоглобином крови со скоростью, в 200 раз превышающей скорость связывания кислорода гемоглобином. Из всех загрязнений атмосферы СО наиболее широко распространен и присутствует в ней в самых больших количествах.

При сжигании наиболее простого углеводорода метана (когда  $T > 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) происходит его взаимодействие со свободными радикалами:



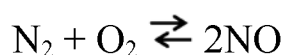
Основное количество углеводородов на нефтеперерабатывающих предприятиях выделяется в результате утечек из резервуаров и при проведении технологических операций.

Основными типами углеводородов являются алканы, алкены, ароматические углеводороды, альдегиды, кетоны, спирты.

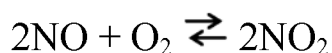
**Оксиды азота.** Обычно под  $\text{NO}_x$  понимают смесь оксидов азота:  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ . Ввиду скоротечности реакций образования оксидов азота и их взаимодействия друг с другом и компонентами воздуха учесть точное количество конкретного оксида невозможно. Поэтому обычно суммарное количество  $\text{NO}_x$  приводят в пересчете на  $\text{NO}_2$ . При этом следует иметь в виду, что на долю  $\text{NO}$  приходится 90 % всех содержащихся в дымовых газах оксидов азота.

Оксид азота (II) представляет собой бесцветный газ без запаха, негорючий и слабо растворимый в воде. На воздухе  $\text{NO}$  окисляется до  $\text{NO}_2$ . Оба соединения сильно токсичны. Оксид азота (II) поглощает свет длиной волны менее  $2300\text{ }\text{\AA}$ . Диоксид азота – красновато-оранжевато-коричневый газ с острым едким запахом. Газообразный  $\text{NO}_2$  – сильный коррозионно-активный агент.

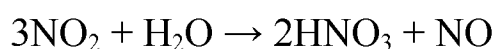
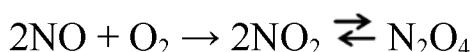
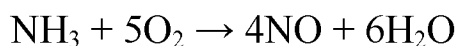
Образование оксидов азота в процессах сжигания связано с окислением атмосферного азота или, в меньшей степени, с окислением органических соединений азота, содержащихся в топливе:



В нижней части топки по направлению распространения пламени, где происходит смешивание NO с воздухом, может образовываться значительное количество NO<sub>2</sub>:



Основным источником выбросов NO<sub>x</sub>, не связанных со сжиганием топлива, является производство азотной кислоты, в технологических процессах которого происходят следующие реакции:



Избыток оксида азота (II) снова возвращают в технологический процесс для окисления. В ходе адсорбции образуются хвостовые газы, которые содержат NO и NO<sub>2</sub> и попадают в атмосферу.

**Особо опасные загрязняющие вещества.** Среди химических соединений, выбрасываемых в атмосферу, содержится достаточно большое число ядовитых веществ. В настоящее время к опасным загрязняющим веществам относят пары ртути, винилхлорид, бензол, бенз(а)пирен и т. п.

Бензол C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> представляет собой прозрачную бесцветную негорючую и достаточно легколетучую жидкость и является одним из существенных компонентов бензина. Основным источником поступления C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> в атмосферу являются предприятия химической промышленности, коксовые печи, нефтеперерабатывающие предприятия.

Винилхлорид CH<sub>2</sub>CHCl – бесцветный горючий газ со сладковатым запахом. Агентство по охране окружающей среды США относит винилхлорид к особо опасным загрязняющим веществам. Вредные выбросы при производстве винилхлорида, поливинилхлорида и их производных оцениваются в 100 тыс. т в год.

Основными источниками поступления бензола в атмосферу являются выхлопные газы транспортных средств и выбросы промышленных предприятий. Для определения бензола в воздухе можно использовать газовую хроматографию с пламенно-ионизационным детектором. Считается, что реакционная способность бензола в атмосфере низка. Бензол не подвергается фотолизу при воздействии света с длиной волны более 2800 Å. Вследствие некоторой растворимости бензола в воде в ряде природных водоемов отмечаются значительные его концентрации.

### 1.2.1. Методы очистки

Очистка технологических и вентиляционных выбросов от газовых примесей и паров – более сложная задача, чем очистка от пыли, так как газовые загрязнители свободно проходят через фильтры и другие пылеуловители.

Существует много разнообразных методов очистки, которые классифицируют по разным признакам. Все методы можно разделить на две группы – каталитические и некаталитические. В первой группе примеси не выделяют из системы, а превращают в другие вещества, которые остаются в газовой смеси или удаляются из неё. Во второй – примеси выводят из газовой смеси путем конденсации или поглощения жидкими и твердыми поглотителями.

Некаталитические методы очистки газов по типу процесса делятся на абсорбционные, хемосорбционные и адсорбционные, а по характеру процесса – на регенерационные (циклические) и нерегенерационные. Хемосорбционные методы подразделяют по типу хемосорбента и по типу получаемого продукта.

Выбор метода очистки зависит от концентрации извлекаемого компонента в отходящих газах, объема и температуры газа, наличия в нем других примесей, от требуемой степени очистки и возможности использования продуктов рекуперации. Метод выбирают на основе технико-экономических расчетов.

Осложняющим обстоятельством при работе оборудования может быть присутствие в потоке твердых частиц или газообразных загрязнителей разных типов. Для решения такой проблемы можно применять предварительную обработку в устройствах для улавливания сухих частиц (циклоны, рукавные фильтры, электрофильтры) или использовать специальное оборудование, позволяющее проводить одновременную обработку газов и твердых материалов (скруббер Вентури, тарельчатые колонны, брызгальные градирни).

Для очистки следует выбирать такой метод, который обеспечит обработку всех присутствующих загрязнителей.

*Абсорбция* – поглощение веществ из газовой смеси всем объемом жидкости (абсорбента). В качестве растворителя часто используется вода, но можно применять и другие абсорбенты, например углеводороды или  $H_2S$ . Вода, используемая для абсорбции, может содержать добавки химических веществ, таких как кислоты, щелочи, окислители или восстановители, реагирующих с поглощаемым газом и снижающих равновесное давление его пара, т. е. получается комбинация методов абсорб-

ции и химической обработки. Хемосорбционные методы применяются для очистки газов от  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_y\text{O}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{CO}_2$ .

Сущность таких методов заключается в поглощении удаляемых компонентов жидкими поглотителями-хемосорбентами, в качестве которых используют растворы минеральных и органических веществ, суспензии и органические жидкости. В процессе хемосорбционной очистки выделяемые из газа компоненты вступают в химические реакции с хемосорбентами, при этом образуются новые вещества, регенерирующиеся и вновь возвращающиеся на абсорбцию.

Рассмотрим более подробно очистку газов от диоксида серы, которая представляет собой наиболее сложную проблему. В табл. 1.4 приведены данные, характеризующие загрязнение окружающей среды диоксидом серы.

Очистка газов от  $\text{SO}_2$  ведется преимущественно хемосорбционными методами с использованием извести или известкового молочка. Достоинства этих методов – доступность и низкая стоимость абсорбентов, простая технологическая схема процесса, низкие капитальные и эксплуатационные затраты. Недостатки – низкая эффективность очистки, невысокая степень использования известняка, образование отходов в виде шлама или загрязненного гипса.

Таблица 1.4

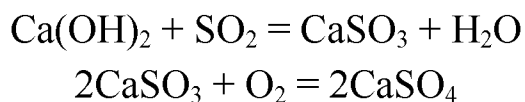
#### Источники имиссии $\text{SO}_2$

Отрасли промышленности	Процент от общего количества выбросов
Энергетика	53,1
Стройматериалы	0,4
Цветная металлургия	15,3
Черная металлургия	24,0
Производство минеральных удобрений	0,5
Химическая промышленность	0,4
Нефтехимическая промышленность	1,9
Машиностроение	2,4
Прочие	2,0

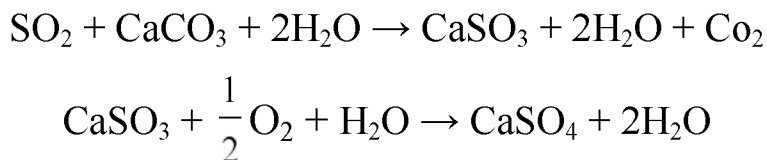
При абсорбции известняковым молочком процесс протекает по реакциям:





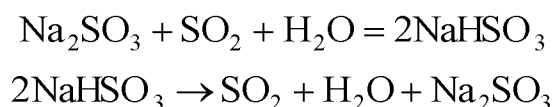


При использовании суспензий известняка суммарные реакции имеют вид



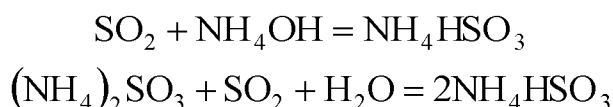
Известняки содержат равное количество  $\text{CaCO}_3$  и примесей, поэтому 1 кг известняка поглощает от 0,4 до 0,6 кг  $\text{SO}_2$ . Для уменьшения отложений  $\text{CaSO}_4$  и  $\text{CaSO}_3$  параметр pH суспензии должен быть не менее 5.

Абсорбция  $\text{SO}_2$  сульфитом натрия протекает в две стадии:

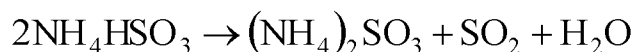


Вторая стадия – регенерация бисульфита натрия – проводится при 130 °С, при этом выделяется газообразный  $\text{SO}_2$ . Охлажденный раствор сульфита натрия снова возвращается на абсорбцию, а диоксид серы направляется на переработку в серную кислоту.

Высокая степень очистки от  $\text{SO}_2$  достигается при использовании аммиачного способа:

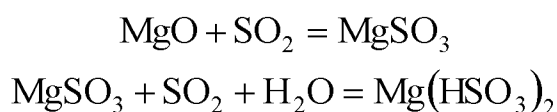


При нагреве бисульфат аммония разлагается:

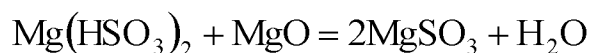


Недостатки метода – большой расход  $\text{NH}_3$ , сложность схем улавливания и регенерации поглощающих растворов.

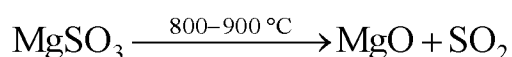
Магнезиальные методы основаны на взаимодействии  $\text{SO}_2$  с суспензией окиси магния и сульфита магния:



Бисульфит магния нейтрализуется добавкой соответствующего количества свежей окиси магния:



Растворимость  $\text{MgSO}_3$  в воде ограничена, и он выпадает в осадок (в виде  $\text{MgSO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  или  $\text{MgSO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), который подвергают термическому разложению:



Окись магния возвращается на абсорбцию, а  $\text{SO}_2$  перерабатывается в  $\text{H}_2\text{SO}_4$  или серу.

По сравнению с известняковым циклический магнезиальный метод имеет ряд преимуществ: возможность очищать большие объемы газов, подавать на очистку газы без предварительного охлаждения, получать в качестве продукта утилизации серную кислоту. Недостаток – сложность технологической схемы.

Процесс абсорбции газов проводят в пленочных, насадочных (с неподвижной и подвижной насадкой), тарельчатых, форсирующих и других аппаратах – абсорберах (рис. 1.36). Абсорберы представляют собой камеру, где очищаемый воздух (газ) встречается с распыленной жидкостью или проходит через нее, при этом газообразные вещества растворяются в жидкости.

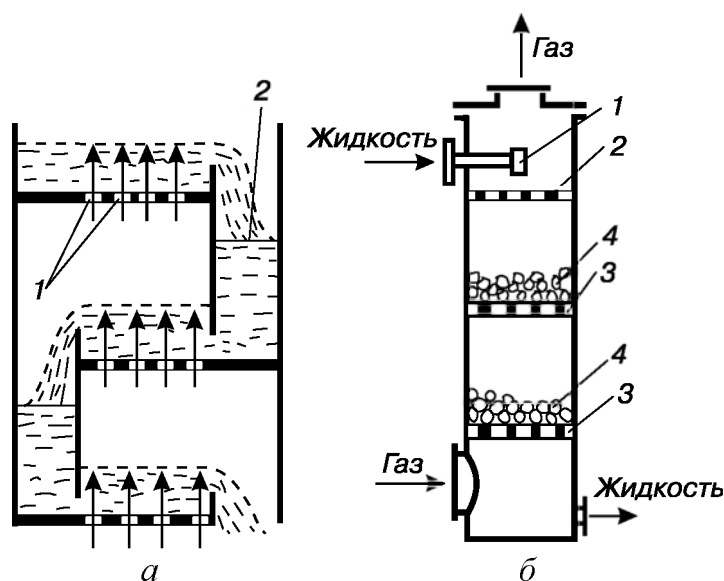


Рис. 1.36. Абсорберы: а – с ситчатыми тарелками: 1 – отверстия; 2 – перелив; б – с подвижной насадкой: 1 – ороситель; 2 – ограничительная решетка; 3 – опорные решетки; 4 – шаровые насадки

Абсорбция – технологический процесс, включающий массоперенос между растворимым газообразным компонентом и жидким растворителем, происходящий в аппарате для контактирования газа с жидкостью. Движущей силой абсорбции является разность между парциальным давлением растворенного газа в газовой смеси и его равновесным давлением над пленкой жидкости, контактирующей с газом. Если значение этой разности отрицательно, то абсорбция не происходит, при этом количество загрязнителей в обрабатываемом газе может увеличиться, т. е. произойдет десорбция.

При расчете абсорберов эффектами, связанными с теплотой растворения, обычно пренебрегают и считают, что аппарат работает в изотермическом режиме, что упрощает формулы. В процессе проектирования абсорберов необходимо иметь следующие данные:

- скорость поступающего газового потока;
- концентрацию газов;
- тип насадки колонны;
- скорость потока абсорбирующей жидкости;
- необходимую высоту насадки;
- диаметр колонны.

Высота насадки определяется скоростью массопереноса, которая зависит от фазового равновесия между газовой и жидкой фазами.

Пусть через поверхность фазового раздела проходят молекулы какого-то одного компонента. Тогда коэффициент молекулярной диффузии  $D_A$  будет равен отношению скорости диффундирующего компонента  $\bar{G}$  к средней скорости полного потока  $G_A$  в направлении, перпендикулярном к поверхности раздела:

$$D_A = \frac{G_A}{\bar{G}},$$

где  $G_A$  – скорость диффундирующего вещества, моль/с;  $\bar{G}$  – общая скорость газового потока через единицу площади, моль/(с·м<sup>2</sup>).

Если в потоке  $\bar{N}$  присутствуют компоненты  $A$  и  $B$ , то суммарный поток в объеме\*

$$\bar{N}_{об} = \bar{N}_A + \bar{N}_B.$$

---

\* Поток имеет размерность «масса в единицу времени на единицу площади, через которую диффундирует вещество». Для обозначения потока применяют черту над символом. Символ без такой черты означает скорость массопереноса размерностью «масса за единицу времени».

Учитывая мольную долю  $y_A$  для компоненты  $A$ , получим

$$\bar{N}_A = y_A(N_A + N_B) - D_{AB}\rho_m \left( \frac{dy_A}{dz} \right),$$

где второй член в правой части равен величине молекулярной диффузии в соответствии с законом Фика:  $D_{AB}$  – коэффициент молекулярной диффузии компоненты  $A$  в компоненте  $B$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\rho_m$  – плотность раствора,  $\text{моль}/\text{м}^3$ ;  $z$  – расстояние молекулярной диффузии или высота насадочной колонны,  $\text{м}$ .

Если из газового потока удалить только компоненту  $A$ , а концентрацию  $B$  оставить постоянной ( $N_B = 0$ ), то

$$\bar{N}_A = y_A N_A - D_{AB}\rho_m \left( \frac{dy_A}{dz} \right).$$

Интегрируя это уравнение по расстоянию  $L$ , когда  $z = L$ , и вводя коэффициент массопереноса

$$k_{my} = \frac{D_{AB}\rho_m}{Ly_{Bm}},$$

получим

$$\bar{N}_A = k_{my}(y_{AO} - y_{AL}).$$

При работе насадочной абсорбционной колонны жидкость будет турбулизирована, поэтому массоперенос более интенсивен, чем при молекулярной диффузии:

$$\bar{N}_A = k_y(y_A - x_{Ai}) = k_x(x_{Ai} - x_A),$$

где  $k_y$  и  $k_x$  – коэффициенты массопереноса, зависящие от концентрации компонентов на поверхности раздела  $y_{Ai}$  и  $x_{Ai}$  соответственно.

Следовательно, массоперенос через пленку в газовой фазе зависит от величины  $k_y$ , а через пленку в жидкой фазе – от величины  $k_x$  (рис. 1.37).

При расчетах обычно находят суммарный коэффициент массопереноса, при этом используют новые характеристики:  $y_A^*$  – равновесная мольная доля растворенного вещества в газовой фазе, равная мольной доле растворенного вещества в жидкой фазе;  $x_A^*$  – равновес-

ная мольная доля растворенного вещества в жидкости, равная мольной доле растворенного вещества в газовой фазе. Зависимость между этими параметрами показана на рис. 1.38.

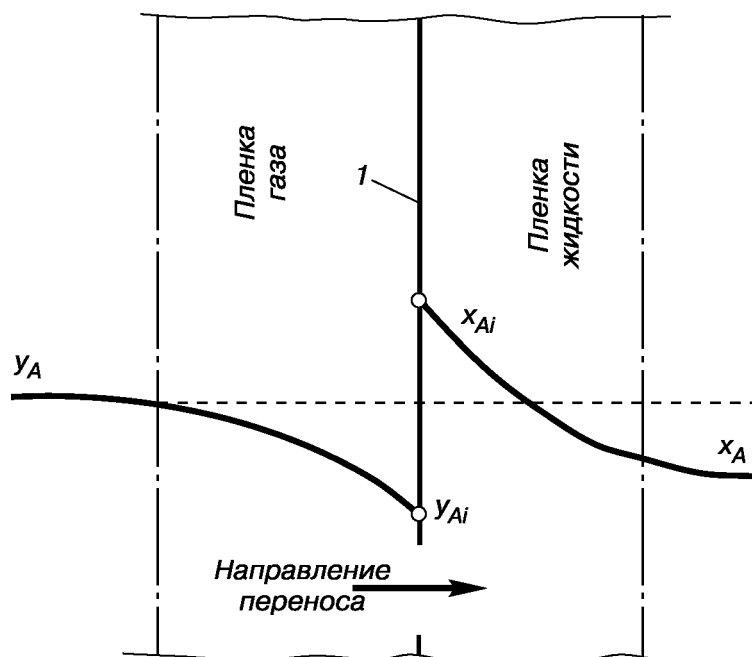


Рис. 1.37. Двухплёночная теория Уиттмена:  $y_A$  – мольная доля компонента  $A$  в газе;  $x_A$  – мольная доля компонента  $A$  в жидкости;  $y_{Ai}$  – мольная доля  $A$  в плёнке газа на поверхности раздела;  $x_{Ai}$  – мольная доля  $A$  в плёнке жидкости на поверхности раздела; 1 – поверхность раздела

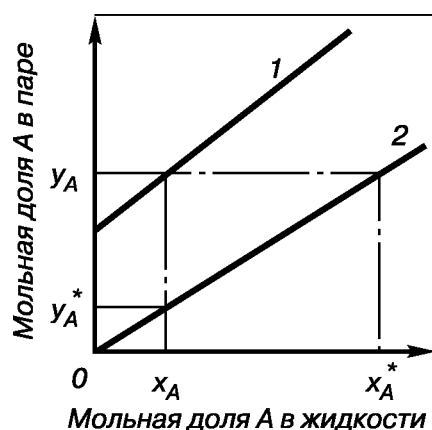


Рис. 1.38. Равновесные соотношения:  
1 – рабочая линия; 2 – линия равновесия

Общее уравнение массопереноса

$$\bar{N}_A = K_y (y - y_A^*) = K_x (x_A^* - x),$$

где  $K_y$  – суммарный коэффициент массопереноса в газовой фазе, моль/(с·м<sup>2</sup>·мольная доля);  $K_x$  – суммарный коэффициент массопереноса в жидкой фазе.

Поскольку предполагается равновесие на поверхности раздела фаз  $y_{Ai} = x_{Ai}$ , получим

$$\frac{1}{K_y} = \frac{y_A - y_{Ai}}{\bar{N}_A} + \frac{m(x_{Ai} - x_A^*)}{\bar{N}_A}$$

или для газовой фазы

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x},$$

для жидкой фазы

$$\frac{1}{K_x} = \frac{1}{k_y} + \frac{1}{k_x}.$$

Два последних уравнения показывают соотношение между коэффициентами массопереноса, которые должны иметь размерность моль/(с·м<sup>2</sup>·мольная доля), где площадь равна площади раздела фаз, через которую происходит массоперенос.

Получить точные данные о коэффициентах массопереноса довольно трудно, так как сложно определить величину поверхности раздела и учесть посторонние воздействия на входе в колонну, а также рассчитать отдельные коэффициенты на основании данных по измерению суммарных коэффициентов.

Скорость массопереноса зависит от величины поверхности межфазного контакта. В общем случае эффективность работы абсорбера может быть оценена по величине коэффициента извлечения  $\eta$  и коэффициента насыщения  $\Phi$ :

$$\eta = \frac{y_1 - y_2}{y_1 - y^*(x_2)}; \quad (1.7)$$

$$\Phi = \frac{x_1 - x_2}{x^*(y_1) - x_2},$$

где  $y_1$  и  $y_2$  – концентрации газообразного компонента в потоке соответственно перед и после абсорбера, кг/м<sup>3</sup>;  $y^*(x_2)$  – концентрация газо-

образного компонента, равновесная с концентрацией поступающего в абсорбер абсорбента, кг/м<sup>3</sup>;  $x_1, x_2$  – концентрации растворенного газообразного компонента в абсорбенте, соответственно выходящем из абсорбера и поступающем в него, кг/м<sup>3</sup>;  $x^*(y_1)$  – концентрация поступающего в абсорбер растворенного газообразного компонента, равновесная с концентрацией его в воде, кг/м<sup>3</sup>.

При  $y^*(x_2) = 0$  выражение (1.7) приобретает вид, наиболее часто используемый в практике и называемый *степенью (эффективностью) очистки*:

$$\eta = \frac{y_1 - y_2}{y_1}.$$

В качестве поглотителей (абсорбентов) многих газовых примесей используются и твердые вещества: активированный уголь, активированный глинозем, силикагель и др. Они применяются для очистки воздуха от органических паров, летучих растворителей, удаления неприятных запахов и газообразных примесей, содержащихся в небольших количествах в промышленных выбросах.

**Утилизация материалов, образующихся при абсорбции.** В результате удаления газообразных загрязнителей путем абсорбции происходит переход этих загрязнителей в раствор, как правило, весьма разбавленный. Чтобы избежать проблем, связанных с удалением таких растворов, желательно их каким-либо образом утилизировать. Если загрязняющее вещество абсорбируется в чистом виде (не реагируя с другими химическими веществами), его практически всегда можно получить в концентрированной форме путем отгонки абсорбирующей жидкости. Полученный таким образом материал может быть использован повторно в том же производственном процессе или в других процессах. Иногда в результате перевода в другую форму этот материал может служить исходным сырьем для промышленных предприятий. После нейтрализации уловленного вещества возможны его осаждение или концентрирование в растворе, а также сушка с получением продукта, имеющего определенную товарную ценность, пусть даже достаточную только для того, чтобы покрыть расходы на транспортировку. Так, выделенные соединения натрия могут найти применение при производстве бумаги. В результате их реакции с аммиаком можно получить удобрения.

Загрязняющие вещества могут быть выделены из абсорбционного раствора в виде нерастворимого осадка при обработке известью

или другими реагентами. Этот осадок концентрируют путем отстаивания, затем из него удаляют воду фильтрацией или центрифугированием. Однако во многих случаях осадки после обезвоживания содержат не более 30–50 % твердых веществ, что создает серьезные проблемы при их удалении. Сброс в водоемы, как правило, запрещен или трудноосуществим. Для сброса отходов можно использовать свободные земельные участки, однако при этом следует учитывать возможность вредных последствий для окружающей среды. Кроме того, после закапывания осадков в землю данные участки могут оказаться непригодными для строительства, поскольку сопротивление грунта нагрузке снижается.

Серьезную проблему представляет выделение хлоридов, нитратов и нитритов, поскольку их осаждение – дорогостоящий процесс. В некоторых случаях практиковалась закачка этих загрязнений в скважины, однако можно предполагать, что в будущем она будет запрещена. То же можно сказать и о захоронении отходов в море.

Необходимо учитывать возможность очистки хлоридов и использования их в качестве сырья для получения хлора. Нитрит можно окислить в нитраты и после концентрирования использовать в качестве компонента удобрений.

При очистке от органических загрязнителей наиболее эффективными, по-видимому, являются отгонка и выделение вещества в концентрированном виде, даже в тех случаях, когда выделяемый материал может быть использован только в качестве топлива. Если органическое соединение растворимо в воде и способно подвергаться биологическому разрушению, то более экономичной может оказаться однократная абсорбция водой с последующим биологическим разложением, особенно в тех случаях, когда образующиеся растворы сильно разбавлены и отгонка малоэффективна.

Кроме отгонки существуют и другие методы регенерации отработанного абсорбционного раствора. К ним относятся обработка озоном и другими окислителями ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{HClO}$ ,  $\text{HNO}_4$  и др.), гидролиз (возможен при высоких температурах и давлениях), обработка другими реагентами, в результате которой получают: а) нетоксичные отходы; б) несмешивающиеся продукты, которые можно отделить отстаиванием; в) нерастворимые осадки. Можно использовать также абсорбцию органических веществ глинами, древесным углем, опилками и смолами, экстракцию растворителями, обработку твердыми или жидкими ионообменными материалами, охлаждение абсорбционного раствора, приводящее к кристаллизации загрязнения.



При однократной абсорбции применяют воду. Использование для этой цели органических жидкостей возможно только в очень редких, специальных, случаях. Примером служит использование в качестве абсорбента органического сырья или топливных нефтей, которые после абсорбции непосредственно направляются или на переработку, или на сжигание.

**Адсорбционные методы.** *Адсорбцией* называют концентрирование веществ на поверхности или в объеме микропор твердого тела – адсорбента. Поглощаемое вещество, находящееся в жидкой или газовой фазе, называется *адсорбтивом*, а после того как оно перешло в адсорбированное состояние – *адсорбатом*.

При адсорбционных методах газы поглощаются твердыми пористыми веществами. Поглощаемые молекулы газа удерживаются на поверхности (внешней и внутренней) твердых тел силами Ван-дер-Ваальса (физическая адсорбция) либо химическими силами (хемосорбция). Процесс происходит в три стадии: первая – перенос молекул газа к внешней поверхности твердого тела; вторая – проникновение молекул газа в поры твердого тела; третья – собственно адсорбция. Самая медленная стадия лимитирует процесс в целом.

Адсорбция рекомендуется для очистки газов с невысокой концентрацией вредных компонентов. Адсорбированные вещества удаляются из адсорбентов десорбцией инертным газом или паром.

В качестве промышленных адсорбентов используют активные угли, силикагели, алюмогели и цеолиты. Активность адсорбента определяется содержанием мелких пор в единице объема или массе адсорбента. Все адсорбенты в соответствии с типом пор (микро-, мезо- (переходные) и макропоры) подразделяют на три структурных класса: микропористые, переходно-пористые и макропористые.

Активированный уголь – единственный гидрофобный тип промышленных адсорбентов, и это свойство предопределило его широкое использование для рекуперации паров, очистки влажных газов и сточных вод.

Адсорбционный метод наиболее эффективен для очистки выбросов от паров органических веществ (метилсернистых соединений, метанола, формальдегида, фурфурола, паров растворителей и др.); возможно его применение для тонкой очистки газов от сероводорода, диоксида серы. Этот метод перспективен при очистке вентиляционных выбросов с последующим использованием их в качестве приточного воздуха.

В непрерывном аппарате со стационарным потоком адсорбента твердая фаза работает так же, как жидкость при абсорбции. Высота слоя адсорбента определяется из расчета массопереноса.

Физическая адсорбция при низких температурах происходит при высоких скоростях. Для осуществления хемосорбции нужна энергия, равная энергии активации. При нагревании физически адсорбированные молекулы легко десорбируются, в то время как химически сорбированные молекулы остаются на поверхности.

Если газ или пар пропускать через адсорбент, то происходит распределение его молекул между газовой и твердой фазами. Через некоторое время достигается состояние равновесия, и процесс прекращается. Количество газа, адсорбируемого 1 г сорбента, зависит от температуры, давления, типа адсорбента. Величины, получаемые для данного количества адсорбента при постоянной температуре, соответствуют изотерме адсорбции. Адсорбируемое количество газа выражают объемом, поглощенным 1 г адсорбента при  $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $P = 760\text{ мм рт. ст.}$  Так как адсорбция – экзотермический процесс, количество вещества, адсорбированного в состоянии равновесия, уменьшается при повышении температуры (рис. 1.39).

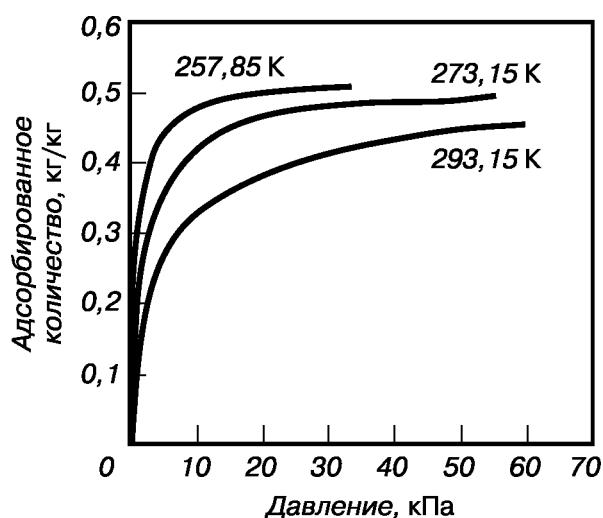


Рис. 1.39. Влияние температуры на процесс адсорбции этилхлорида на древесном угле

Возможно использование чистого адсорбируемого вещества как эталона для сравнения. На рис. 1.40 представлены изотермы адсорбции Н-гексана на активированном угле с использованием ацетона в качестве эталона.

Изотермы адсорбции можно описать, используя различные математические модели. Например, если имеет место мономолекулярная

физическая или химическая адсорбция, то при расчете промышленных процессов применяют уравнение Фрейндлиха:

$$V = kP^{1/n}, \quad (1.8)$$

где  $V$  – объем адсорбата, м<sup>3</sup>;  $P$  – давление, Па.

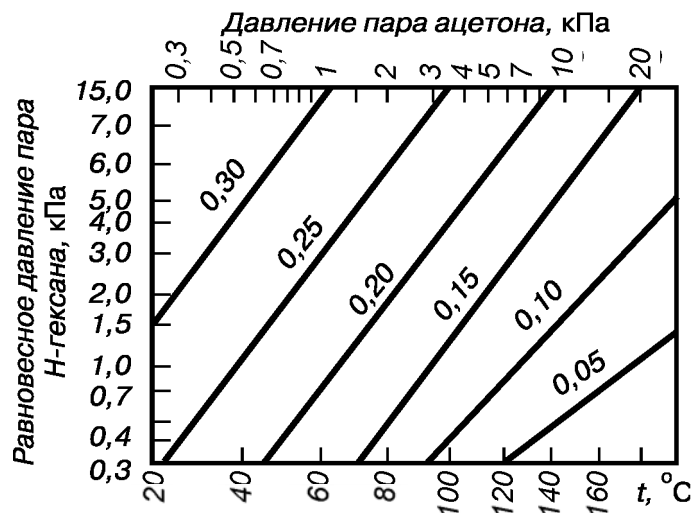


Рис. 1.40. Равновесная адсорбция Н-гексана на активированном угле с использованием стандартного вещества. Числовые значения у прямых – количество адсорбированного Н-гексана, кг/кг активированного угля

Логарифмируя уравнение (1.8), получим

$$\ln V = \ln k + \ln \frac{P}{n}.$$

В логарифмических координатах это будет прямая с наклоном  $1/n$ .

При многослойной адсорбции можно воспользоваться уравнением БЭТ (теория Брунауэра, Эмметта и Теллера):

$$\frac{V}{V_m} = \left( \frac{Cx}{1-x} \right) \left[ \frac{1 + nx^{n+1} - (n-1)x^n}{1 + (C-1)x - Cx^{n+1}} \right], \quad (1.9)$$

где  $V_m$  – объем, адсорбируемый при мономолекулярном заполнении поверхности, м<sup>3</sup>/кг;  $C$  – безразмерная константа, связанная с величиной теплоты адсорбции;  $x$  – функция, зависящая от давления;  $n$  – число адсорбционных слоев. Если  $n = 1$ , то

$$\frac{V}{V_m} = \frac{Cx}{1 + Cx}. \quad (1.10)$$

Так как величина  $Cx$  – функция давления, то уравнение (1.10) будет описывать изотерму адсорбции. Если адсорбция происходит на свободной поверхности, то при насыщении может работать бесконечное количество молекулярных слоев. Если  $n \rightarrow \infty$  и происходит насыщение, то  $x \rightarrow \frac{P}{P_0}$ , где  $P_0$  – давление насыщения, Па, и

$$\frac{V}{V_m} = \frac{CP}{(P_0 - P) \left[ 1 + (C - 1) \frac{P}{P_0} \right]}.$$

После преобразования имеем

$$\frac{P}{V}(P_0 - P) = \frac{1}{V_m C} + \frac{C - 1}{V_m C \left( \frac{P}{P_0} \right)}. \quad (1.11)$$

Из уравнения (1.11) определяют величины  $V_m$  и  $C$ , подставляют их в уравнение (1.9) и методом последовательных приближений находят значение  $n$ .

Скорость адсорбции зависит от величины парциального давления сорбата, скорости его диффузии в порах и степени насыщения слоя. Адсорбционные системы должны обеспечивать:

необходимое время контакта между газовым потоком и слоем сорбента;

достаточную емкость сорбента;

оптимальное сопротивление газовому потоку;

возможность регенерации или замену насыщенного сорбента.

Работа слоя адсорбента может быть представлена с помощью «адсорбционной волны» (рис. 1.41).

Кривая 1 соответствует зависимости концентрации загрязнителя от положения слоя для свежего адсорбента, линия АВ – максимально допустимой концентрации загрязнителя газовых выбросов после обработки. Когда в начале работы наступает насыщение твердой поверхности, загрязнители начинают проникать дальше в глубину слоя (кривая 2). Если достигается максимально допустимая концентрация на выходе из слоя (кривая 3), необходима регенерация.

Как правило, регенерация адсорбента определяется экономическими показателями и осуществляется его нагреванием, вакуумированием, продувкой инертным газом, вытеснением сорбата другим материалом или комбинациями нескольких методов.

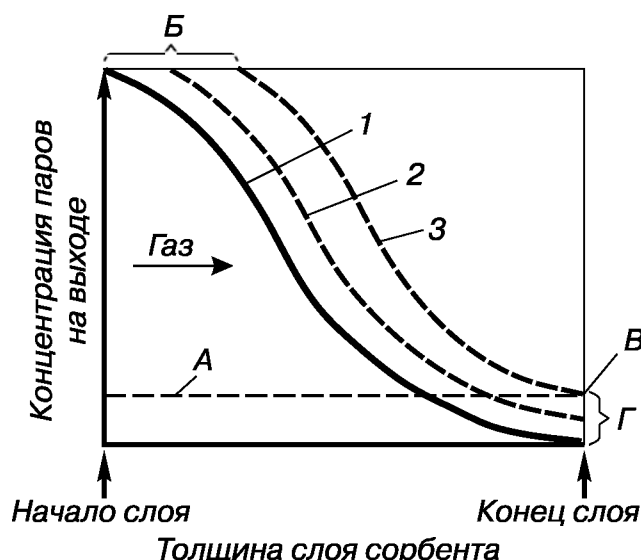


Рис. 1.41. Движение адсорбционной волны по стационарному слою при осуществлении цикла адсорбции: 1 – начало цикла, свежий сорбент; 2 – частично насыщенный сорбент; 3 – конец цикла; А – максимально допустимая концентрация загрязнителя на выходе; Б – полностью насыщенный сорбент; В – прорыв; Г – направление газового потока

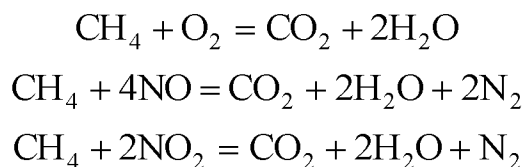
Адсорбционные методы очистки могут обеспечить любое значение ее эффективности. Однако, ввиду экономических и санитарно-гигиенических требований, нет необходимости достигать эффективности, равной 100 %.

Адсорберы подразделяют на аппараты периодического и непрерывного действия. Для адсорбции веществ в стационарном слое обычно используют вертикальные, кольцевые, реже горизонтальные адсорберы, схемы некоторых из них показаны на рис. 1.42.

**Каталитические методы** связаны с химическими превращениями токсичных компонентов в нетоксичные на поверхности катализаторов. Очистке подвергают газы, не содержащие пыль и катализаторные яды.

На практике широко распространено каталитическое разложение оксидов азота. Сущность способа заключается в том, что оксиды азота восстанавливаются газом-восстановителем (водородом, метаном, оксидом углерода и др.) в присутствии катализаторов.

Восстановление метаном:



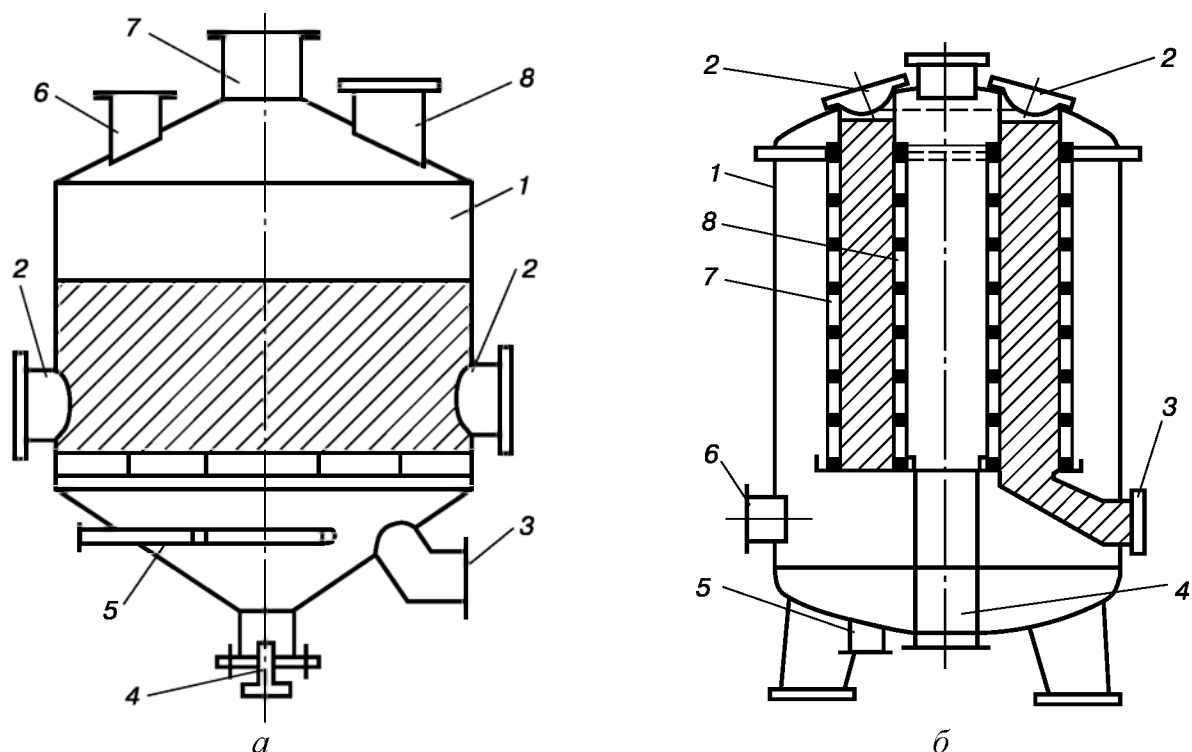
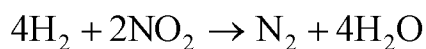
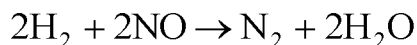
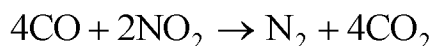
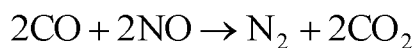


Рис. 1.42. Адсорберы: *а* – вертикальный: 1 – корпус; 2 – люки для выгрузки адсорбента; 3 – патрубок для отвода очищенной ПГС и воздуха (при сушке и охлаждении); 4 – штуцер для отвода конденсата; 5 – барботер для подачи острого пара; 6 – патрубок для отвода паров при десорбции; 7 – патрубок для подачи ПГС; 8 – люк для подачи адсорбента; *б* – кольцевой: 1 – корпус; 2 – люки для загрузки адсорбента; 3 – люк для выгрузки адсорбента; 4 – патрубок для отвода очищенной ПГС, воздуха и подачи пара; 5 – патрубок для отвода паров при десорбции; 6 – патрубок для подачи ПГС; 7, 8 – внешняя и внутренняя цилиндрические решетки

Восстановление водородом:

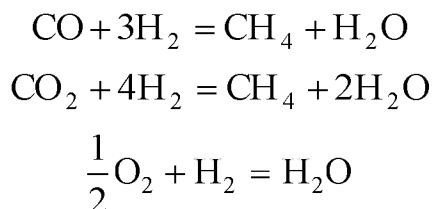


Восстановление оксидом углерода:



В качестве катализаторов используют различные металлы, которыми покрывают огнеупорные материалы (носители). Чаще применяют палладиевый катализатор, нанесенный на окись алюминия. Температура начала контактирования при восстановлении 400–470 °С.

Гидрированием оксида углерода на катализаторах можно практически полностью удалить СО из газов. Процесс проводят при высоких давлениях и повышенных температурах с использованием никелевых и железных катализаторов:



Существует метод очистки газа от  $\text{SO}_2$  с получением сульфата аммония, который можно использовать как удобрение. В этом процессе  $\text{SO}_2$  окисляют до  $\text{SO}_3$  в присутствии  $\text{V}_2\text{O}_5$  при 450–480 °С. Затем при температуре 220–260 °С вводят газообразный аммиак, в результате чего образуются тонкие кристаллы сульфата аммония, которые отделяют в циклонах и электрофильтрах.

На рис. 1.43 показаны схемы аппаратов для каталитической очистки газов.

Активность (интенсивность работы) катализатора характеризуется изменением скорости химической реакции при вводе в систему катализатора:

$$A = \frac{K_{\text{кат}}}{K},$$

где  $K_{\text{кат}}$ ,  $K$  – константы скоростей соответственно каталитической и гомогенной некаталитической реакций.

Общая активность каталитического процесса зависит от многих параметров и может быть представлена функцией:

$$A = f(C_{\text{кат}}, C_{\text{а}}, C_{\text{и}}, C_{\text{п}}, T, P, S_{\text{уд}}, d, r, \omega, M_{\text{и}}, M_{\text{п}}),$$

где  $C_{\text{кат}}$ ,  $C_{\text{а}}$ ,  $C_{\text{и}}$ ,  $C_{\text{п}}$  – соответственно концентрации катализатора, активатора, исходных веществ и продуктов, кг/м<sup>3</sup>;  $T$  – температура, °С;  $P$  – давление, Па;  $S_{\text{уд}}$  – удельная поверхность катализатора, м<sup>2</sup>;  $d$  – средний размер зерна, мм;  $r$  – эквивалентный радиус пор, мм;  $\omega$  – линейная скорость газового потока, м/с;  $M_{\text{и}}$  и  $M_{\text{п}}$  – молекулярные массы соответственно исходных веществ и продуктов, моль.

Каталитический процесс состоит из ряда стадий: внешней диффузии исходных веществ из газового потока к поверхности катализатора; внутренней диффузии в порах катализатора; активированной

адсорбции реагирующих веществ на поверхности катализатора с образованием поверхностного химического соединения; химической реакции между адсорбированными веществами с образованием продуктов; десорбции продуктов катализа; диффузии продукта в порах катализатора и от его поверхности в газовый поток.

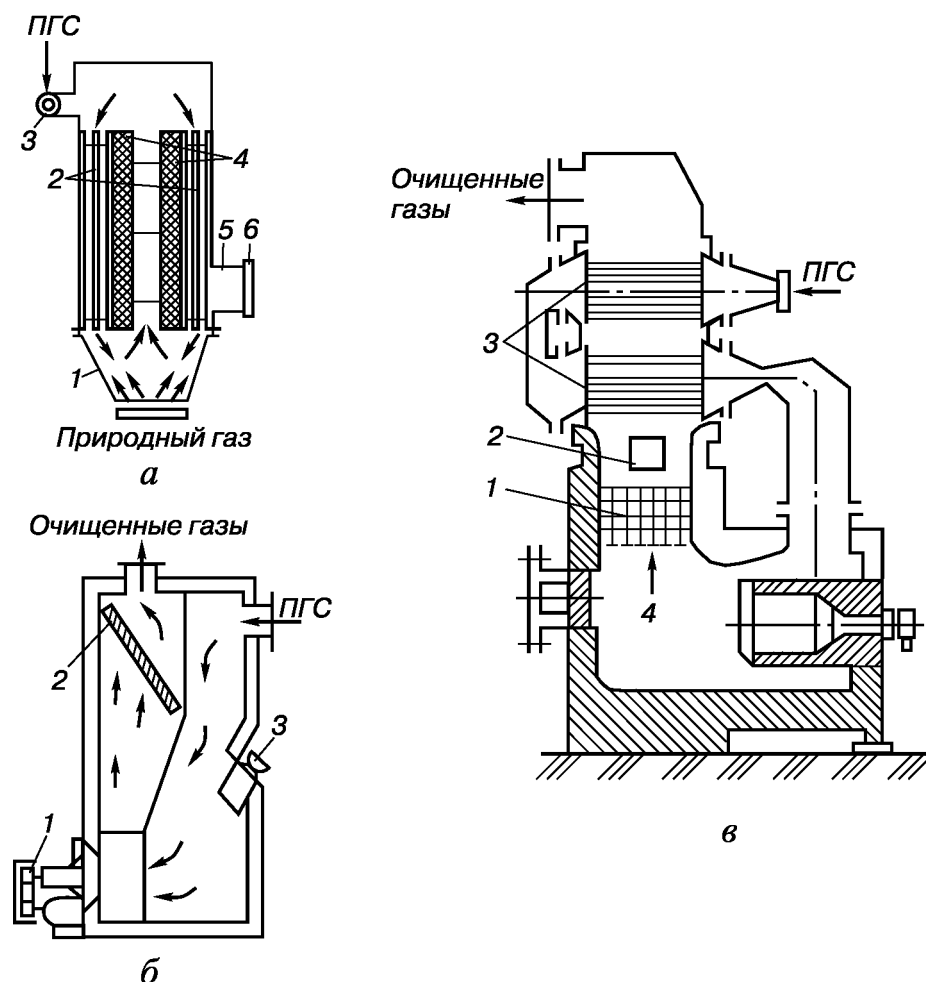


Рис. 1.43. Схемы реакторов: *а* – радиального: 1 – камера сгорания; 2 – теплообменник; 3 – вентилятор для подачи ПГС; 4 – катализатор; 5 – газоход; 6 – шибер; *б* – без использования тепла: 1 – вентилятор; 2 – катализатор; 3 – горелка; *в* – с частичным использованием тепла: 1 – катализатор; 2 – люк для загрузки катализатора; 3 – теплообменники; 4 – камера сгорания

**Сжигание в пламени.** Этот метод применяется для обезвреживания отходящих газов от токсичных горючих веществ органического происхождения (парообразных и твердых – сажи, частиц углерода, древесной пыли и др.). Суть метода – высокотемпературное (973 К и выше) окисление органических веществ до диоксида углерода и паров воды. Высокие значения температуры процесса обуславливают высокие расходы топлива, что делает данный метод более дорого-



стоящим по сравнению с каталитическим: метод целесообразно использовать для обезвреживания газов с относительно высокой концентрацией горючих веществ.

На рис. 1.44 приведен пример устройства для проведения процесса сжигания.

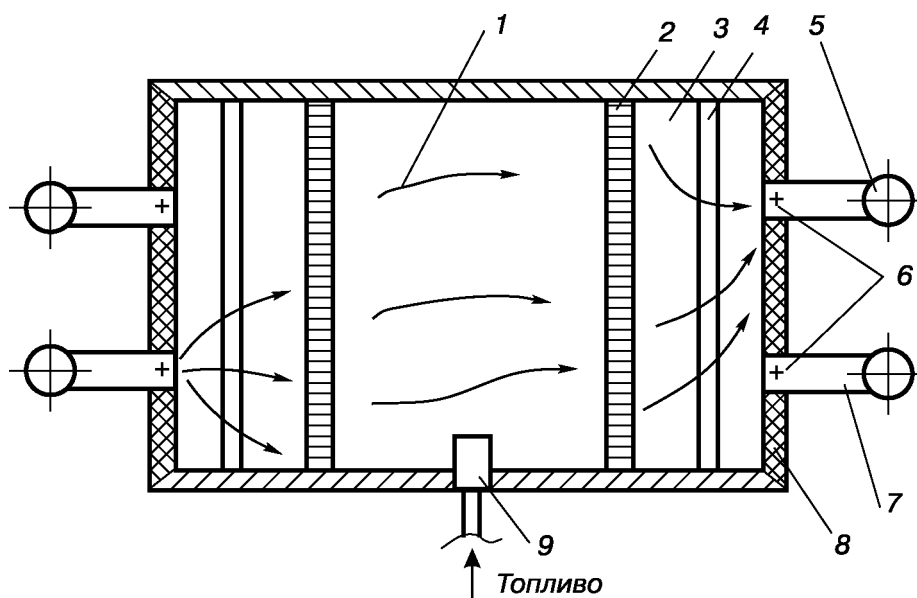


Рис. 1.44. Многокамерный регенераторный реактор: 1 – камера сгорания; 2 – огнестойкие решетки жалюзи; 3 – насадка; 4 – решетки; 5 – выходной коллектор; 6 – дроссельный клапан для переключения направления движения газов; 7 – входной коллектор; 8 – теплоизоляция; 9 – горелка

При практической оценке эффективности удобно пользоваться формулой

$$\eta = 1 - \frac{V_{\text{д.г.}} C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}} Q},$$

где  $V_{\text{д.г.}}$  – расход газов на выходе из реактора (при нормальных условиях);  $C_{\text{вх}}$ ,  $C_{\text{вых}}$  – концентрации соответственно на входе и выходе из реактора;  $Q$  – расход газов на входе в реактор (при тех же условиях).

**Осушка газов.** Влага снижает теплотворную способность газов, образует ледяные пробки, закупоривающие газопроводы и нарушающие режим технологических установок. Особые затруднения вызывают кристаллогидраты углеводородов – снегообразные твердые соединения, образующиеся в условиях повышенных давлений при положительных температурах, т. е. раньше, чем образуется лед. Огромные трудности возникают в зимнее время при использовании влажно-

го воздуха в контрольно-измерительных приборах. Большинство промышленных газов подвергается осушке, которая в ряде случаев является обязательной первой ступенью, предшествующей очистке газов от балластных или вредных веществ.

Содержание влаги в граммах в единице объема *называют абсолютной влажностью*. Отношение действительного содержания влаги к максимально возможному при заданной температуре, выраженное в процентах, называют *относительной влажностью*.

Если газ подвергнут компрессии, парциальное давление водяного пара повысится и может достигнуть, а затем и превысить давление пара; тогда его избыточная часть сконденсируется. Компримирование часто используют на практике для частичного удаления влаги из газа.

Конденсацию пара можно вызвать и понижением температуры и давления насыщенного пара. Если при охлаждении достигнута температура, при которой парциальное давление и давление насыщенного пара становятся равными, т. е. относительная влажность равна 100 %, начинается образование тумана, который затем конденсируется. Эту температуру называют *точкой росы*. Между абсолютной влажностью и точкой росы имеется строгая зависимость: чем суше газ, тем ниже точка росы.

Для осушки газа применяют три основных метода: физический (сжатие или охлаждение), абсорбционный и адсорбционный.

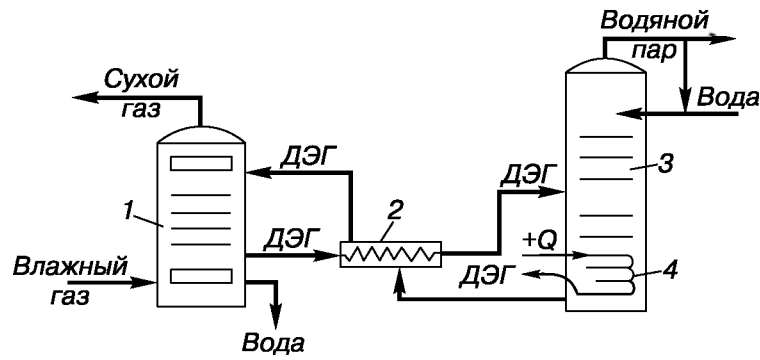
Физический метод обеспечивает сравнительно небольшую степень осушки и часто применяется в качестве первой ступени комплексной схемы удаления влаги из газа.

Абсорбционный метод является основным в газовой промышленности. В качестве абсорбентов применяют гликоли: диэтиленгликоль (ДЭГ) и триэтиленгликоль (ТЭГ). Водные растворы гликолей обладают высокой влагоемкостью, нетоксичны, достаточно стабильны и коррозионно неагрессивны. Гигроскопичность гликолей определяется наличием в их составе эфирных и гидроксильных групп, которые с водой образуют водородные связи.

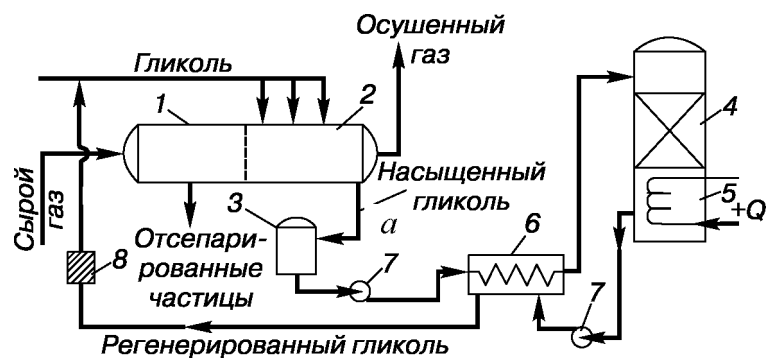
Абсорбционные установки (рис. 1.45) просты в конструктивном отношении, компактны, автоматизированы и удобны в эксплуатации.

Минимальную точку росы осушенного газа в зависимости от температуры контакта и влажности ДЭГ определяют по графику (рис. 1.46).

Регенерацию обработанного гликоля иногда ведут нагреванием под вакуумом или с подачей сухого газа в регенератор для более полного удаления паров воды.



*a*



*б*

Рис. 1.45. Схемы установок для осушки газов: *a* – гликолем (ДЭГ): 1 – абсорбер; 2 – теплообменник; 3 – десорбер; 4 – рибойлер; *б* – с введением гликоля в газопровод: 1 – сепарационная зона; 2 – контактная зона; 3 – емкость насыщенного гликоля; 4 – регенератор; 5 – рибойлер; 6 – емкость-теплообменник; 7 – насосы; 8 – фильтр

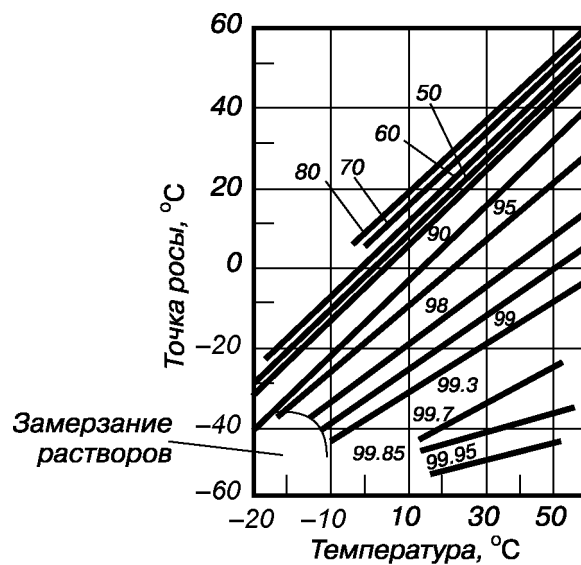
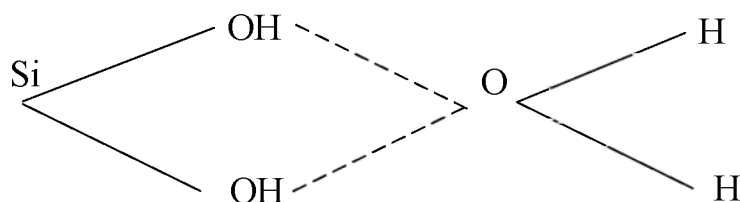


Рис. 1.46. Точки росы газа, равновесные с водными растворами ДЭГ при различных температурах контакта

Преимуществом установок с введением гликоля в газопровод (рис. 1.45, б) является высокая интенсивность процесса вследствие высоких скоростей газового потока в контакторе. Степень осушки в установках такого типа, определяемая точкой росы, соответствует равновесным условиям при конкретной температуре контакта и концентрации гликоля на последней ступени контакта.

Адсорбционный метод осушки основан на применении двух типов пористых гидрофильных веществ – силикагелей (или алюмогелей) и цеолитов. Силикагели имеют корпускулярное строение: их поры образованы промежутками между частицами  $\text{SiO}_2$ , которые в данном случае имеют сферическую форму – форму глобул.

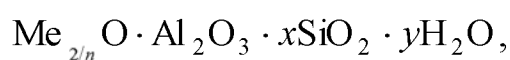
Гидрофильность силикагелей связана с наличием на их поверхности «частокола» гидроксильных групп. Молекулы воды, адсорбированные силикагелем, удерживаются за счет водородной связи через частично протонизированный водород ОН-группы.



При нагревании насыщенного водой силикагеля до  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  происходит удаление физически адсорбированной воды и восстановление его адсорбционных свойств. В подавляющем большинстве случаев осушку производят в динамических условиях, пропуская поток газа через слой адсорбента. В соответствии с системой регенерации (как правило, горячим газом) установки осушки газа подразделяют на установки с открытым и закрытым циклом (рис. 1.47).

Осушка цеолитами (алюмосиликатами) основана на их свойстве активно поглощать воду и другие вещества после удаления воды из его пор.

Цеолиты, содержащие в своем составе окислы щелочных и щелочно-земельных металлов, характеризуются строго регулярной структурой пор, которые в обычных температурных условиях заполнены молекулами воды. При нагреве эта вода, названная цеолитной, выделяется и цеолиты «кипят» (гр. zeo – кипеть, вариться + lithos – камень, т. е. «кипящие камни»). Общая химическая формула цеолитов



где Me – катион щелочного и щелочно-земельного металла;  $n$  – его валентность.

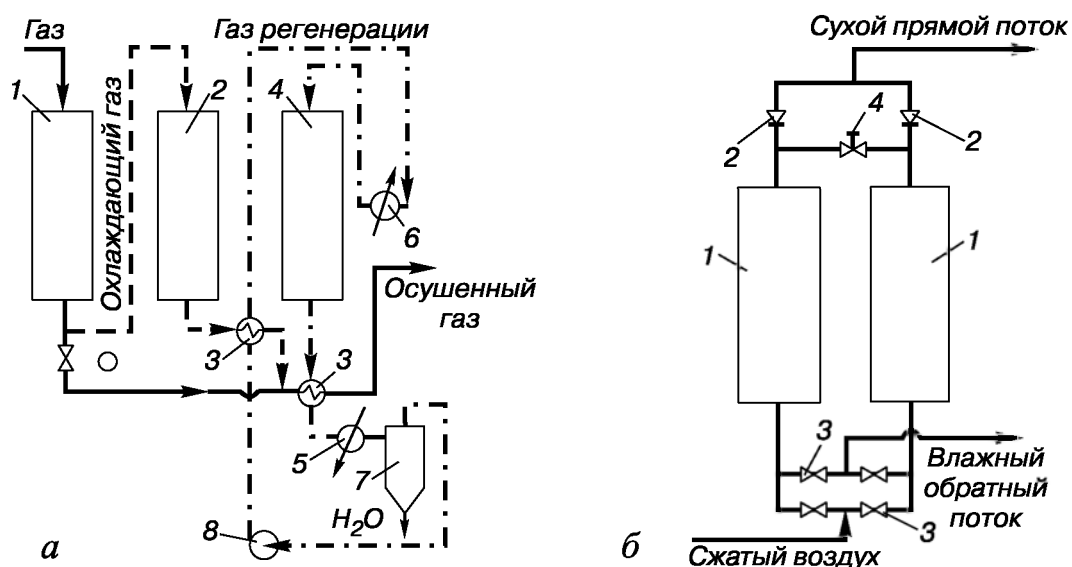


Рис. 1.47. Схемы установок осушки газов: *а* – с закрытым циклом греющего газа: 1 – адсорбер на стадии осушки; 2 – адсорбер на стадии охлаждения; 3 – теплообменники; 4 – адсорбер на стадии регенерации; 5 – холодильник; 6 – нагреватель; 7 – сепаратор; 8 – газодувка; *б* – короткоцикловой безнагревной: 1 – адсорберы; 2 – обратные клапаны; 3 – электро- или пневмоуправляемые клапаны; 4 – дросселирующий вентиль

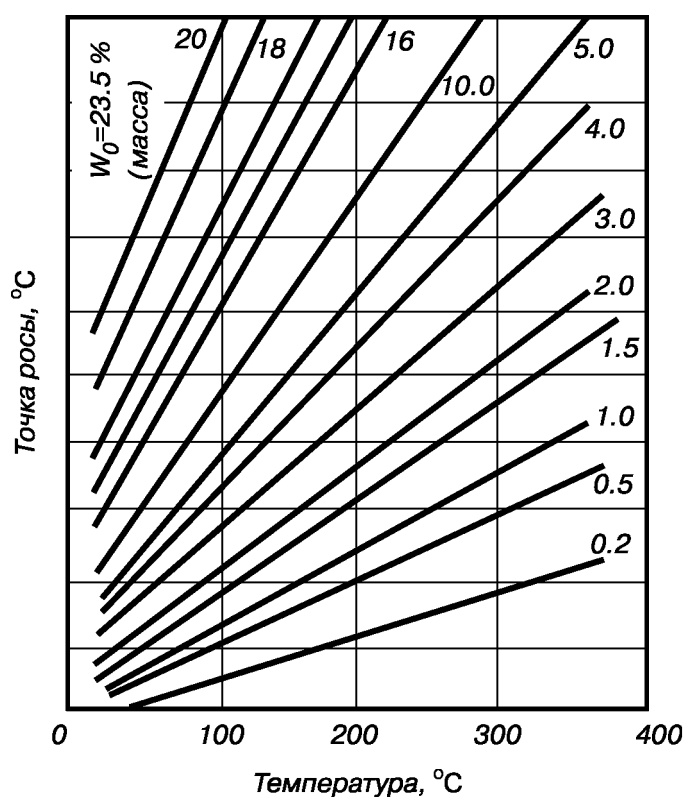


Рис. 1.48. Зависимость степени осушки газов (точка росы) от условий регенерации (остаточная влажность  $W_0$ ) и температуры в стадии осушки

Цеолиты являются «молекулярными ситами». Они используются для разделения веществ не только по принципу избирательности адсорбции, но и на основе разницы в размерах и форме поглощаемых молекул.

Цеолиты легко поглощают воду, но трудно отдают ее при регенерации (обычно горячим газом). Остаточное количество влаги в цеолите после регенерации определяется температурой слоя в конце стадии и влажностью продувочного газа. Выбор условий регенерации обычно проводят по графикам, представленным на рис. 1.48. Так, например, после продувки при 200 °С газом, имеющим точку росы минус 10 °С, остаточная влажность цеолитов составляет 3 % (по массе). Такой сорбент после охлаждения до минус 40 °С обеспечит осушку, соответствующую  $t_p = -70$  °С.

Ряд современных химических процессов, включая подготовку (осушку) газового сырья, проводится при высоком давлении (2–20 МПа) для удаления избытка влаги при компрессии и снижения удельного расхода адсорбента на осушку.

### **1.2.2. Очистка отходящих газов от загрязняющих атмосферу газообразных компонентов и паров**

**Очистка дымовых газов от оксидов серы.** Хотя очисткой уходящих газов от оксидов серы ученые занимаются с начала XX века, по-настоящему серьезное внедрение сероулавливания на ТЭС, являющихся главным поставщиком SO<sub>2</sub> в атмосферу, началось в последние годы, так как с ростом установленной мощности ТЭС и вовлечением в топливный баланс низкосортных углей загрязнение атмосферы сернистым ангидридом стало принимать угрожающие масштабы.

При сжигании жидкого и твердого органического топлива в зависимости от содержания в нем серы образуется до 10–15 г, а в некоторых случаях и до 20 г сернистого ангидрида на 1 м<sup>3</sup> дымовых газов.

В настоящее время более 90 % энергоблоков ТЭС США, Германии, Великобритании, Японии, Австралии, Финляндии и других стран оснащены разнообразными десульфизационными установками (ДСУ). Всего известно около 200 методов удаления SO<sub>2</sub> из дымовых газов, однако промышленное использование нашли лишь 25 способов. В табл. 1.5 и 1.6 представлены некоторые сведения по существующим системам и способам очистки отходящих газов от оксидов серы.

Таблица 1.5

**Существующие на ТЭС системы сероулавливания, основанные на сухой абсорбции и последующем  
выделении SO<sub>2</sub>**

№ п/п	Год сдачи в эксплуата- цию	Местонахождение и принадлежность ТЭС	Установленная электрическая мощность	Топливо	Сорбент	Выделяемый продукт	Примечание
1	1974	Германия	—	Уголь	Кокс	Элементарная сера	Пилотная установка. Эффективность сероулавливания – 95 %. Попутно улавливаются окислы азота и твердые частицы
2	1975	Люнен (Германия)	45 МВт	Уголь	Полукокс	Элементарная сера	Один энергоблок. Сорбент движется сверху вниз. Расход продуктов сгорания – 42 м <sup>3</sup> /с. Регенерация происходит при температуре 870 К
3	1971	Сумитомо (Япония)	—	Уголь	Активированный уголь	Серная кислота	Расход продуктов сгорания 49 м <sup>3</sup> /с, степень сероулавливания 80 %
4	1972	Касимо (Япония)	—	Мазут	Активированный уголь	Серная кислота	Расход продуктов сгорания – 117 м <sup>3</sup> /с. Степень сероулавливания 80 %

Таблица 1.6

**Существующие способы очистки уходящих газов ТЭС от оксидов серы  
(химическая обработка уходящих газов)**

Способы очистки	Химические реакции	Примечание
1	2	3
1. Wellman-Lord и Allied Chemical	<p align="center"><i>Скруббер</i></p> <p>1) <math>\text{SO}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaHSO}_3</math></p> <p>2) <math>2\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Na}_2\text{SO}_4</math></p> <p align="center"><i>Испаритель</i></p> <p>3) <math>2\text{NaHSO}_3 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}</math></p> <p align="center"><i>Реактор</i></p> <p>4) <math>2\text{H}_2 + \text{SO}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{S}</math></p> <p>5) <math>2\text{CO} + \text{SO}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + \text{S}</math></p>	Эффективность процесса определяется интенсивностью массообмена в скруббере. Максимальная степень улавливания $\text{SO}_2$ 96 %. Существует разновидность способа (метод Шово – Денко), при котором используется раствор сульфата натрия и каустической соды, подаваемый в скруббер
2. Двойной щелочной	<p align="center"><i>Скруббер</i></p> <p>1) <math>\text{SO}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaHSO}_3</math></p> <p>2) <math>\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 \rightarrow 2\text{NaHSO}_4</math></p> <p align="center"><i>Реактор</i></p> <p>3) <math>2\text{NaHSO}_4 + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_3 + \text{CO}_2</math></p> <p>4) <math>2\text{NaHSO}_4 + \text{CaSO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4 + \text{CO}_2</math></p>	Эффективность улавливания до 99 %. Расход жидкости в скруббере – 2,04 л/м <sup>3</sup> . Расход энергии на сероочистку – 3,6 % электрической мощности станции. При установившемся режиме отходом является только сульфат кальция
3. Магнезитовый метод CHEMICO	<p align="center"><i>Скруббер</i></p> <p>1) <math>\text{MgSO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{Mg}(\text{HSO}_3)_2</math></p> <p align="center"><i>Реактор</i></p> <p>2) <math>\text{Mg}(\text{HSO}_3)_2 + \text{MgO} \rightarrow 2\text{MgSO}_3 + \text{H}_2\text{O}</math></p> <p align="center"><i>Регенератор</i></p> <p><math>\text{MgSO}_3 \xrightarrow{\text{нагрев}} \text{MgO} + \text{SO}_2</math></p>	Регенератор работает при температуре 1120–1370 К с подвижной насадкой. Окись магния выпадает в виде мелкозернистых фракций и уносится газовым потоком. Уловленный сернистый ангидрид используется для получения серной кислоты
4. Известково-известняковый способ	<p align="center"><i>Скруббер</i></p> <p>1) <math>\text{SO}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_3</math></p> <p>2) <math>\text{SO}_2 + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CaCO}_3</math></p> <p align="center"><i>Сборник</i></p> <p><math>\text{CaSO}_3 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4</math></p>	Способ часто используется для одновременного улавливания летучей золы. Абсорбент чаще всего не регенерируется и сбрасывается в отвалы. Иногда в известковый раствор добавляют окиси магния



5. Метод фирмы «Тиода» (Япония)	<p style="text-align: center;"><i>Скруббер</i></p> <p>1) <math>\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3\text{H}_2\text{SO}_3</math></p> <p style="text-align: center;"><i>Реактор</i></p> <p>2) <math>\text{H}_2\text{SO}_3 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4</math></p> <p>3) <math>\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O}</math></p>	Поглощение $\text{SO}_2$ в скруббере происходит в слабом растворе сернистой кислоты в присутствии катализатора – сульфата железа. Добавки $\text{Ca}(\text{OH})_2$ по стехиометрии соответствуют содержанию $\text{H}_2\text{SO}_4$ в реакторе
6. Водокarbonатный процесс	<p style="text-align: center;"><i>Скруббер</i></p> <p>1) <math>\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{CO}_2</math></p> <p>2) <math>\text{Na}_2\text{SO}_3 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4</math></p> <p style="text-align: center;"><i>Реактор</i></p> <p>3) <math>2\text{Na}_2\text{SO}_3 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Na}_2\text{S} + 3\text{CO}_2</math></p> <p>4) <math>\text{Na}_2\text{SO}_4 + 2\text{C} \rightarrow \text{Na}_2\text{S} + 2\text{CO}_2</math></p> <p style="text-align: center;"><i>Карбонатор</i></p> <p>5) <math>\text{Na}_2\text{S} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{S}</math></p> <p>6) <math>\text{Na}_2\text{S} + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaHCO}_3 + \text{H}_2\text{S}</math></p>	В скруббере происходит распыливание и высушивание раствора карбоната натрия, и поэтому газы фактически реагируют с сухим порошком соды при температуре 420 К. Эффективность до 99 %. При отсутствии регенерации сухие продукты после скруббера улавливаются вместе с летучей золой
7. Аммониевый процесс	<p style="text-align: center;"><i>Скруббер</i></p> <p>1) <math>\text{SO}_2 + 2\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{SO}_3</math></p> <p>2) <math>\text{SO}_2 + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_4\text{HSO}_3</math></p> <p>3) <math>2(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 2(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4</math></p> <p style="text-align: center;"><i>Регенератор</i></p> <p>4) <math>\text{NH}_4\text{HSO}_3 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NH}_3</math></p> <p>5) <math>(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{NH}_3</math></p> <p>6) <math>(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{NH}_4\text{HSO}_2 + \text{NH}_3</math></p> <p>7) <math>2\text{NH}_4\text{HSO}_4 \rightarrow 3\text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{NH}_3</math></p> <p style="text-align: center;"><i>Генератор сероводорода</i></p> <p>8) <math>\text{SO}_2 + 2\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{S} + 2\text{CO}_2</math></p> <p>9) <math>\text{SO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}</math></p> <p style="text-align: center;"><i>Мокрый процесс Клауса</i></p> <p><math>2\text{H}_2\text{S} + \text{SO}_2 \rightarrow 3\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}</math></p>	После скруббера газы промываются водой или слабой кислотой. В регенераторе происходит обработка сульфатов восстановительными газами. Сера выводится в виде сульфата аммония или в виде элементарной серы

Окончание табл. 1.6

8. Метод Мицубиси	<p style="text-align: center;"><i>Скруббер</i></p> <p>1) <math>\text{MnO}_2 + 2\text{SO}_3 \rightarrow \text{Mn}(\text{SO}_4)_2</math>  2) <math>\text{MnO}_2 + 2\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{Mn}(\text{SO}_4)_2</math></p> <p style="text-align: center;"><i>Реактор</i></p> <p>3) <math>\text{Mn}(\text{SO}_4)_2 + \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mn}(\text{OH})_4 + + (\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4</math>  4) <math>2\text{Mn}(\text{OH})_4 \rightarrow 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{MnO}_2</math></p>	Сера выводится в виде сульфата аммония
9. Метод Monsanto (каталитическое окисление)	<p style="text-align: center;"><i>Реактор</i></p> <p>1) <math>\text{SO}_2 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_3</math></p> <p style="text-align: center;"><i>Скруббер</i></p> <p>2) <math>\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4</math></p>	Катализатором окисления сернистого ангидрида является пятиокись ванадия или двуокись марганца. Температура в реакторе $\sim 620 \text{ K}$ . Концентрация серной кислоты в скруббере 78 %. Общая эффективность сероулавливания 90 %

**Очистка дымовых газов от оксидов азота.** Методы снижения выбросов оксидов азота после сжигания органического топлива в топках энергетических котлов разделяются на первичные и вторичные.

Первичные мероприятия связаны с организацией горения топлива, при которой снижается образование  $\text{NO}_x$ . К ним относят: снижение температуры горения, снижение избытков воздуха в зоне активного горения, снижение парциального давления кислорода в воздухе для горения путем рециркуляции дымовых газов, сокращение времени пребывания топлива в зоне горения, использование принципа организации ступенчатого горения. Первичные мероприятия дают хороший эффект при сжигании природного газа, а также мазута, а при сжигании угля их использование ограничивается появлением продуктов неполного сгорания горючих компонентов, что снижает эффективность котельной установки.

Вторичные мероприятия по очистке дымовых газов включают: селективное термическое восстановление  $\text{NO}_x$  (ввод  $\text{NH}_3$  в высокотемпературную зону, в результате чего образуется безвредный молекулярный азот), селективное каталитическое восстановление (СКВ) оксидов азота, электронно-лучевой способ, абсорбционный способ, применение активированного кокса.

Наибольшее распространение из вторичных мероприятий в мировой практике получили первые два способа. Следует отметить, что существуют два варианта СКВ-способа, различающихся по месту расположения каталитического реактора (до и после пылеочистного оборудования), – запыленный (High Dust) и малозапыленный (Low Dust).

Электронно-лучевой способ очистки: с помощью свободных радикалов  $\text{O}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{HO}_2$ , образующихся в электронных пучках, проводится окисление  $\text{NO}_x$  в присутствии воды до  $\text{HNO}_3$ , а затем нейтрализация кислоты дозированием аммиака с образованием конечного продукта – нитрата аммония. Этот способ, так же как и применение активированного кокса, ведет к снижению выбросов  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_x$ .

К абсорбционным, или мокрым, способам очистки относят:

а) окислительно-абсорбционно-редукционный способ связывания при помощи абсорбентов  $\text{NaOH}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaO}$  и  $\text{CaO}/\text{CaCO}_3$  и водного раствора катализатора;

б) абсорбционно-окислительный способ с использованием в качестве окислителя  $\text{KOH}/\text{KMnO}_4$  или  $\text{CaCO}_3/\text{Ca}(\text{OH})_2$ ;

в) абсорбционно-редукционный способ подачи в очищенные от пыли газы ограниченного количества комплексных реагентов с выделением газообразного азота.

Эти способы очистки до настоящего времени не нашли широкого применения в мировой энергетике и поэтому подробно в настоящем учебном пособии не рассматриваются.

**Очистка дымовых газов от окислов углерода.** Способов уменьшения выбросов углекислого газа от ТЭС, имеющих промышленное значение, пока нет, однако попытки разработать проекты по улавливанию и захоронению  $\text{CO}_2$  или утилизации уловленных остатков имеются. Так, например, существует проект, принадлежащий ученым Западной Европы: уловленный углекислый газ предлагается сжигать под большим давлением и по трубопроводам направлять в Средиземное море, где он, будучи тяжелее воды, будет концентрироваться на больших глубинах.

Окислы углерода практически не взаимодействуют с другими веществами в атмосфере и могут существовать до нескольких лет, т. е. довольно долго, вследствие чего выбросы угарного газа ( $\text{CO}$ ) представляют большую опасность для окружающей среды и, прежде всего, для здоровья человека. Однако на ТЭС из всех токсичных газобразных выбросов легче всего предотвратить выбросы угарного газа. Технически это вполне достижимо и давно уже не проблема для теплоэнергетики.

## 2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

### 2.1. Нормирование и контроль качества воды в водоемах

Качество воды во внутренних водоемах нашей страны регламентируется принятыми в 1992 году «Правилами охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами», согласно которым все водоемы подразделяются на четыре категории в зависимости от характера их использования:

I – *хозяйственно-питьевого водоснабжения* и предприятий пищевой промышленности;

II – *культурно-бытового назначения* (для купания, спорта и отдыха);

III – *рыбохозяйственного назначения* (для сохранения и воспроизводства ценных пород рыб, обладающих высокой чувствительностью к кислороду);

IV – *рыбохозяйственного назначения* (для прочих видов рыб).

Для каждой из этих категорий установлены соответствующие нормативы на качество воды, которое для пресноводных объектов в местах водопользования должно удовлетворять следующим требованиям:

1. Промышленные и бытовые стоки не должны увеличивать концентрацию взвешенных веществ в воде более чем на 0,25 мг/л для водных объектов I и III категорий и на 0,75 мг/л для II и IV категорий. Запрещаются к спуску взвеси со скоростью выпадения в осадок более 0,2 мм/с для водохранилищ и более 0,4 мм/с для проточных водоемов. На их поверхности не должны обнаруживаться пленки нефтепродуктов и других примесей.

2. Вода не должна приобретать от стоков запахи, привкусы и окраску сверх допустимой интенсивности и передавать их мясу рыб.

3. В результате спуска горячих стоков температура воды не должна превышать естественную температуру воды самого жаркого месяца года более чем на 3 °С.

4. Содержание растворенного кислорода в водоемах I и II категорий должно быть не ниже 4 мг/л, для водоемов категорий III и IV – не ниже 6 мг/л. Биохимическая потребность в кислороде как показатель загрязнения органическими загрязнителями не должна превышать 3 мг/л для водоемов I, III, IV категорий и 6 мг/л для водоемов II категории.

5. Показатель pH воды для водоемов всех категорий должен находиться в пределах 6,5–8,5.

6. Для водоемов I категории содержание минеральных солей не должно превышать 1000 мг/л, в том числе 350 мг/л для хлоридов и 500 мг/л для сульфатов.

7. В водоемах I и II категорий не должно содержаться болезнетворных микроорганизмов.

8. Содержание токсичных веществ определяется предельно допустимыми концентрациями (ПДК) отдельно для водоемов санитарно-бытового назначения (I и II категорий) и для рыбохозяйственных водоемов (III и IV категорий). Правилами установлены нормы ПДК приблизительно для 500 вредных веществ. Некоторые из них приведены в табл. 2.1.

Состав воды в водоемах санитарно-бытового назначения должен удовлетворять этим требованиям на расстоянии не менее 1 км от пунктов водопользования, а для рыбохозяйственных водоёмов – не далее чем 500 м от места выпуска сточных вод.

Если сточные воды содержат несколько загрязняющих веществ, нормирование их содержания производится в соответствии с соотношением

$$\frac{C_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{C_2}{\text{ПДК}_2} + \dots + \frac{C_n}{\text{ПДК}_n} \leq 1,$$

где  $C_1, C_2, \dots, C_n$  – концентрации вредных веществ в одном и том же месте, мг/л;  $\text{ПДК}_1, \text{ПДК}_2, \dots, \text{ПДК}_n$  – максимальные разовые предельно допустимые концентрации вредных веществ, мг/л.

Правила запрещают сбрасывать в водоемы сточные воды, если можно использовать более рациональную технологию повторного

и оборотного водоснабжения; нельзя сбрасывать сточные воды с содержанием ценных отходов, которые можно утилизировать, и веществ, на которые не установлены ПДК. Контроль за состоянием сточных вод путем лабораторного исследования проб на разных ступенях очистки и перед их выпуском обязателен.

Таблица 2.1

**ПДК некоторых вредных веществ в открытых водоемах, мг/л**

Загрязняющее вещество	ПДК в санитарно-бытовых водоемах	ПДК в рыбохозяйственных водоемах
Аммиак	2	0,005
Анилин	0,1	—
Бензол	0,5	0,5
ДДТ	0,1	Отсутствие
Железо	0,5	—
Кадмий	0,01	0,005
Кобальт	1	0,01
Медь	0,1	—
Мышьяк	0,05	—
Никель	0,1	0,01
Ртуть	0,005	—
Сероуглерод	1,00	1
Свинец	0,1	0,1
Стирол	0,1	0,1
Толуол	0,5	0,05
Фенол	0,001	0,001
Фтор	1,5	—
Хлорофос	0,05	Отсутствие
Хром	0,1	0,001
Цианиды	0,1	0,05
Цинк	1,0	—

## **2.2. Примесные выбросы от энергетических объектов на поверхность лито- и гидросферы**

Основными видами примесных выбросов в энергетике являются твердые частицы, выносимые в атмосферу дымовыми газами и оседающие на поверхность (пыль, зола, шлаки), а также горючие компоненты продуктов обогащения, переработки и транспорти-

ровки топлив. Весьма вредными загрязнениями являются жидкое топливо, его компоненты и продукты потребления и разложения.

Гранулометрический состав твердых частиц, выбрасываемых в продуктах сгорания, разнообразен, что определяет различный характер выпадения частиц из атмосферы. Скорость осаждения (свободного падения) частиц размером более 200 мкм определяют по закону Ньютона:

$$V_{\text{ос}} = \sqrt{\frac{8gD_n\rho_n}{3\rho_b}},$$

от 1 до 100 мкм – по закону Стокса:

$$V_{\text{ос}} = \frac{gD_n^2}{18\mu_b}(\rho_n - \rho_b),$$

где  $D_n$  – диаметр частиц пыли, см;  $\mu_b$  – динамическая вязкость воздуха, Па;  $\rho_n$  и  $\rho_b$  – плотность частиц пыли и воздуха соответственно, г/см<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, см/с<sup>2</sup>.

Характер выпадения частиц основных размеров показан на рис. 2.1, в табл. 2.2 перечислен основной состав золы твердых топлив, сжигаемых в топках котлов ТЭС.

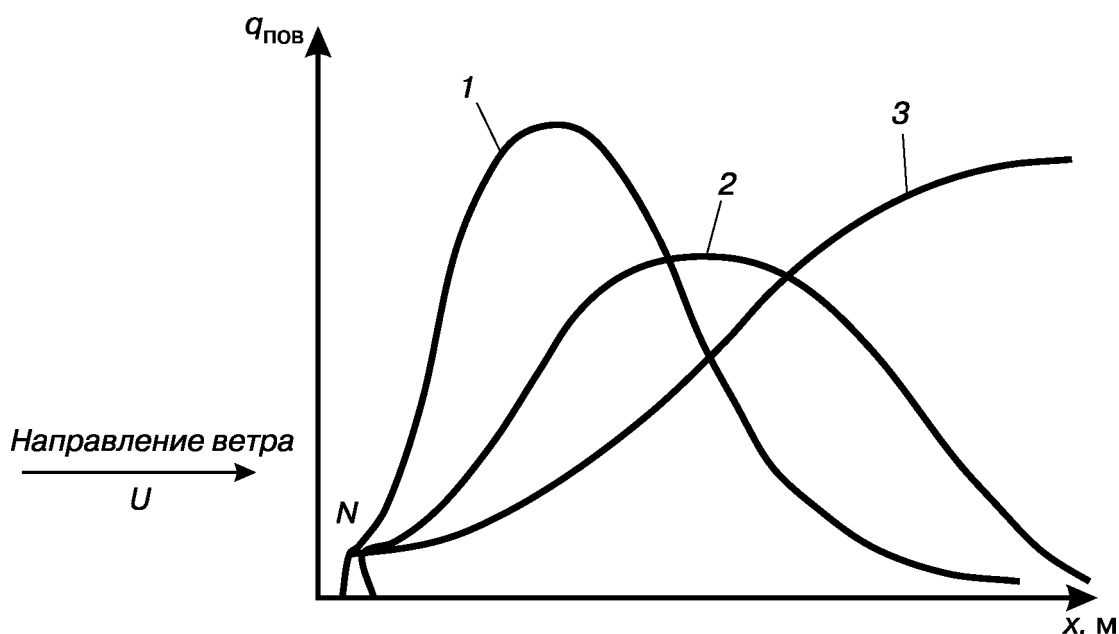


Рис. 2.1. Характер изменения концентрации примесных выбросов  $q_{\text{пов}}$  у поверхности лито- и гидросферы в зависимости от расстояния  $x$  от источника  $N$ :  
1 – крупные частицы; 2 – мелкие частицы; 3 – аэрозоли



Таблица 2.2

**Состав золы (%) основных видов топлив**

Топливо	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO + Mg	Горючие компоненты
Каменный уголь	39–64,7	22–30	4,7–22	1,2–10,5	1–25
Бурый уголь	30–55	12–40	4–18	2,7–40	1–2
Сланцы	20–33	5–13	4–8	46–62	1
Торф	10–80	4–20	2–55	2–65	2–4

Суммарные примесные выбросы на поверхность лито- и гидросферы:

$$\sum \Pi = \sum \Pi_{\text{л}} + \sum \Pi_{\text{г}},$$

где

$$\sum \Pi_{\text{л}} = \Pi_{\text{л}}^{\text{пр}} + \Pi_{\text{л}}^{\text{гл}} - \Pi_{\text{г}}^{\text{лг}}.$$

Здесь  $\sum \Pi_{\text{л}}$  – суммарные выбросы на литосферу, мг/л;

$$\Pi_{\text{л}}^{\text{пр}} = \Pi_{\text{л}}^{\text{а}} + \Pi_{\text{л}}^{\text{э}},$$

где  $\Pi_{\text{л}}^{\text{пр}}$  – прямое поступление выбросов на литосферу, причем  $\Pi_{\text{л}}^{\text{а}}$  – из атмосферы,  $\Pi_{\text{л}}^{\text{э}}$  – непосредственно от энергетических установок,  $\Pi_{\text{л}}^{\text{гл}}$  – из гидросферы;  $\Pi_{\text{г}}$  – суммарные выбросы на гидросферу,

$$\sum \Pi_{\text{г}} = \Pi_{\text{г}}^{\text{пр}} + \Pi_{\text{г}}^{\text{лг}} - \Pi_{\text{г}}^{\text{гл}};$$

$$\Pi_{\text{г}}^{\text{пр}} = \Pi_{\text{г}}^{\text{а}} + \Pi_{\text{г}}^{\text{э}},$$

где  $\Pi_{\text{г}}^{\text{пр}}$  – прямое поступление выбросов на гидросферу, причем  $\Pi_{\text{г}}^{\text{а}}$  – из атмосферы,  $\Pi_{\text{г}}^{\text{э}}$  – от энергетических объектов,  $\Pi_{\text{г}}^{\text{лг}}$  – из литосферы.

Важное значение имеет загрязнение гидросферы нефтепродуктами. Благодаря своим физико-химическим свойствам, нефтепродукты быстро распространяются по поверхности воды, образуя тончайшие пленки толщиной до долей миллиметра, сохраняющие, особенно на спокойной поверхности, высокую устойчивость.

Таблица 2.3

**Классификация примесей воды**

№	Показатели	Примеси			
		гетерогенные		гомогенные	
1	Группа	1	2	3	4
2	Размер частиц	$10^{-1}-10^{-3}$	$10^{-5}-10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$
3	Характеристика системы	Взвеси (суспензии, эмульсии, патогенные микроорганизмы и планктон)	Коллоидные частицы (коллоиды, высокомолекулярные соединения)	Молекулярные растворы (растворенные в воде газы и органические вещества)	Ионные растворы – электролиты, соли, кислоты, основания
4	Влияние примесей на систему	Вызывают помутнение воды	Обуславливают окисляемость и цветность воды	Придает воде запахи и привкусы	Обуславливают минерализацию воды

В табл. 2.3 представлена классификация примесей в сточных водах, предложенная Л. А. Кульским.

### **2.3. Характеристика загрязнителей и физико-химические показатели качества воды**

Показатели, необходимые для характеристики качества воды, определяются характером ее использования различными потребителями. Например, качество воды хозяйственно-питьевого назначения характеризуют с помощью показателей, не принимаемых во внимание при использовании воды на ТЭС и АЭС. В то же время для воды, применяемой на обычных ТЭС, в отличие от воды, используемой на АЭС, не обязателен такой показатель, как содержание различных радиоактивных примесей и т. п.

Ниже рассматриваются основные показатели, используемые при анализе главным образом природных вод, применяемых в теплоэнергетике как исходное сырье, и специфические показатели качества сточных вод электростанций, работающих на органическом и ядерном топливе.

**Минеральные примеси** различных природных вод по качественному составу примерно постоянны и отличаются лишь концентрациями, установление которых и входит в задачу анализа природных вод. Важнейшие показатели качества воды, определяющие применимость

для паротурбинных установок и метод ее обработки, – это концентрация грубодисперсных примесей (взвешенные вещества), концентрация ионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ , pH воды, удельная проводимость, технологические показатели (например сухой и прокаленный остаток, щелочность, жесткость, кремнесодержание, окисляемость), концентрация растворенных газов  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$ .

**Содержание грубодисперсных (взвешенных) веществ** выражают в миллиграммах на килограмм (мг/кг) и определяют фильтрованием 1 л пробы воды через бумажный фильтр, который затем высушивают при температуре 105–110 °С до постоянной массы. Этот способ точен, но весьма трудоемок, в связи с чем для оперативного контроля наличия взвешенных веществ используют либо различные нефелометрические методы, либо приемы, заключающиеся в косвенном определении взвешенных веществ по прозрачности и мутности воды.

**Прозрачность воды** вычисляют с помощью методов шрифта и креста. Для первого способа применяют градуированный на сантиметры стеклянный цилиндр высотой 30 см, под дно которого подложен определенный шрифт. Столб воды в сантиметрах, через который еще можно прочесть текст, и определяет прозрачность воды. Прозрачность по кресту находят по той же методике, используя трубку длиной 350 см, диаметром 3,0 см, на дно которой помещают бумажный круг с крестом, имеющим ширину линий в 1 мм.

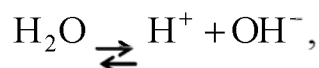
**Мутность воды**, пропорциональную содержанию в воде взвешенных частиц, устанавливают, сравнивая анализируемую пробу с определенным эталоном мутности.

Концентрацию основных ионов-примесей природных вод рассчитывают методами химического анализа и выражают в миллиграммах на килограмм (мг/кг) или миллиграмм-эквивалентах на килограмм (мг-экв/кг). Правильность определения концентраций катионов и анионов, т. е. солей, образованных эквивалентным количеством ионов, проверяют на основании *закона электронейтральности* по уравнению

$$\Sigma C_{\text{кт}} = \Sigma C_{\text{ан}}.$$

**Показатель концентрации водородных ионов (pH) воды** характеризует реакцию воды (кислая, щелочная, нейтральная) и учитывается при всех видах обработки воды.

В соответствии с законом действующих масс для воды, частично диссоциирующей на ионы  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$ , согласно уравнению



можно записать

$$\frac{(C_{\text{H}^+} f_{\text{H}^+})(C_{\text{OH}^-} f_{\text{OH}^-})}{C_{\text{H}_2\text{O}}} = K \quad (2.1)$$

или

$$a_{\text{H}^+} a_{\text{OH}^-} = K C_{\text{H}_2\text{O}} = K_{\text{H}_2\text{O}}.$$

Константа  $K_{\text{H}_2\text{O}}$ , или, как ее часто обозначают,  $K_{\omega}$ , называется *ионным произведением воды*. При диссоциации воды, не содержащей посторонних примесей, ионы  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$  образуются в равных молярных (грамм-ионных) концентрациях, в связи с этим активность каждого из них, согласно уравнению (2.1),

$$a_{\text{H}^+} = a_{\text{OH}^-} = \sqrt{K_{\omega}}$$

и составит при 22 °С  $10^{-7}$  моль/кг;  $\text{pH}_0$  такой нейтральной воды равно 7, в то время как при более высокой температуре  $\text{pH}_t$  той же нейтральной воды будет иным.

Значение  $\text{pH}$  водных растворов определяет интенсивность диссоциации содержащихся в них слабых кислот или оснований. С понижением  $\text{pH}$ , т. е. с повышением активности (или концентрации) ионов  $\text{H}^+$ , процентное содержание недиссоциированных молекул слабых кислот повышается, а содержание их анионов понижается, для катионов слабых оснований наблюдается обратное соотношение;  $\text{pH}$  природной воды обычно колеблется в пределах 6–8 и зависит в основном от соотношения в воде концентраций  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{H}_2\text{CO}_3$ . Измерение  $\text{pH}$  основано на определении разности электрических потенциалов (потенциометрический метод) двух помещенных в анализируемый раствор электродов – индикаторного и электрода сравнения.

**Удельная электрическая проводимость** растворов  $\chi$ , характеризуемая электрической проводимостью 1 см<sup>3</sup> (1 м<sup>3</sup>) жидкости с размером граней куба 1 см (1 м) и выражаемая в сименсах на сантиметр (сименсах на метр), является важным показателем качества природной и обработанной воды, указывающим на суммарную концентрацию ионогенных примесей. Удельная проводимость воды, не содержащей примесей, при 25 °С составляет 0,063 мкСм/см и определяется переносом в электриче-

ском поле только ионов  $H^+$  и  $OH^-$ . Удельная проводимость водных растворов, т. е. проводников второго рода, зависит от температуры, концентрации и типа электролита, степени его диссоциации и скорости движения ионов и измеряется методами кондуктометрии.

Следует иметь в виду, что наблюдается заметная удельная проводимость лишь для таких электролитов, степень диссоциации которых более 0,02. В связи с этим кремниевая кислота – очень слабый электролит – не будет существенно влиять на измеряемую  $\chi$ .

При постоянной температуре и данной степени диссоциации существует прямая зависимость между концентрацией электролита и его удельной электрической проводимостью. Так, удельную электрическую проводимость водных растворов различных солей концентрацией до 500 мг/кг в условном пересчете на NaCl можно примерно оценить из соотношения

$$1 \text{ мкСм/см} \approx 0,5 \text{ мг NaCl/кг H}_2\text{O}.$$

**Общей щелочностью воды** ( $Щ_0$ ), мг-экв/кг, называют сумму милли-нормальных концентраций всех анионов слабых кислот и гидроксильных ионов за вычетом концентрации ионов водорода:

$$Щ_0 = \sum C_{\text{ан}}^{\text{сл.к}} + C_{OH^-} - C_{H^+}.$$

В зависимости от типа анионов, обуславливающих щелочность, различают щелочность *бикарбонатную* –  $Щ_6$  ( $HCO_3^-$ ), *карбонатную* –  $Щ_к$  ( $CO_3^{2-}$ ), *силикатную* –  $Щ_с$  ( $HSiO_3^-$ ,  $SiO_3^{2-}$ ), *гидратную* –  $Щ_г$  ( $OH^-$ ), *фосфатную* –  $Щ_ф$  ( $H_2PO_4^-$ ,  $HPO_4^{2-}$ ,  $PO_4^{3-}$ ):

$$Щ_0 = Щ_6 + Щ_к + Щ_с + Щ_ф + Щ_г.$$

В большинстве природных вод концентрация бикарбонат-иона преобладает над концентрациями других анионов слабых кислот, поэтому общая щелочность обычно численно совпадает с концентрацией бикарбонатов, выраженной в единицах мг-экв/кг.

Так как аналитически достаточно надежно определенным значением щелочности можно считать 0,01 мг-экв/кг, учет гидратной щелочности следует проводить лишь при концентрации ионов  $OH^- > 0,01$  мг-экв/кг, т. е. при  $pH > 9$ .

Экспериментально щелочность определяют титрованием пробы воды кислотой в присутствии кислотно-щелочных индикаторов, меняющих свою окраску при различных значениях pH.

**Жесткость воды** – один из важнейших показателей ее качества. *Общей жесткостью* ( $J_o$ ) называют суммарную концентрацию ионов кальция и магния, выраженную в эквивалентных единицах (мг-экв/кг, а при очень малых значениях – мкг-экв/кг). Общую жесткость воды подразделяют на *кальциевую* ( $J_k$ ) и *магниевую* ( $J_{mg}$ ). Часть общей жесткости  $J_o$  (в предельном случае при  $Щ_o > J_o$  вся жесткость), эквивалентная содержанию бикарбонатов, называется *карбонатной жесткостью*; разность между общей и карбонатной жесткостями называется *некарбонатной жесткостью*.

Процесс выделения из воды ионов  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  получил название *умягчения воды*. Воды с высокой жесткостью дают плотные отложения на теплопередающих поверхностях.

**Окисляемость воды** – это показатель, имеющий условное значение и представляющий собой расход какого-либо сильного окислителя, необходимого для окисления в определенных условиях органических примесей, которые содержатся в 1 л воды. Обычно для этих целей применяют перманганат калия ( $KMnO_4$ ) или бихромат калия ( $K_2Cr_2O_7$ ), различая соответственно *перманганатную* и *бихроматную окисляемость*. Результаты определения перманганатной окисляемости воды выражают в кислородных или перманганатных единицах ( $O_2$ ,  $KMnO_4$ , мг/кг), различающихся в 3,95 раза. Бихроматная окисляемость обычно превышает в 2–2,5 раза перманганатную, а разность между ними позволяет судить об устойчивости органических примесей к действию окислителей.

**Концентрация растворенных газов** в воде зависит от их природы, температуры воды и парциального давления, типа и концентрации минеральных и органических примесей воды, pH воды и т. п.

Для сопоставления показателей качества воды в табл. 2.4 приведена форма анализа воды, используемой для промышленных целей.

Содержание в природных водах примесей различной степени дисперсности вызывает необходимость очистки ее в несколько стадий. На первом этапе из воды удаляются коллоидные и грубодисперсные вещества, на последующих – ионодисперсные вещества и растворенные газы. Такой системный подход к выбранной последовательности технологических приемов обработки воды связан с оптимизацией технико-экономических показателей различных стадий очистки, с возможностью автоматизации работы отдельных аппаратов и повышения надежности работы водоподготовительной установки (ВПУ) в целом. Например, коллоидные примеси органических веществ в природных водах могут вызвать ухудшение показателей анионообменной части ВПУ («старение» анионитов, увеличение

удельных расходов щелочи при регенерации), а коллоидные соединения железа могут быть причиной отравления ионитных мембран в электродиализных аппаратах. Неэффективная очистка добавочной воды от коллоидных и грубодисперсных веществ является одной из причин образования отложений на поверхностях нагрева и коррозии поверхности элементов проточной части турбин, что характеризует важность первого этапа очистки воды от коллоидных и грубодисперсных примесей, называемого *предочисткой*.

Таблица 2.4

### Форма анализа воды

Вода	Катионы			Анионы			Кремниевая кислота, мг/кг	Сухой остаток, мг/кг	Жесткость			Щ <sub>о</sub>	pH
	Тип	Концен-трация		Тип	Концентрация				Ж <sub>о</sub>	Ж <sub>к</sub>	Ж <sub>мг</sub>		
		мг/кг	мг-экв/кг		мг/кг	мг-экв/кг							
Поверхностная	Ca <sup>2+</sup>	63	3,15	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	160	2,62	10	333	4,65	2,62	2,03	2,62	7,5
	Mg <sup>2+</sup>	18	1,50	Cl <sup>-</sup>	43	1,21							
	Na <sup>+</sup>	25	1,08	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	80	1,66							
	Fe <sup>2+</sup>	—	—	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	15	0,24							
В с е г о			5,73	В с е г о		5,73							
Артезианская	Ca <sup>2+</sup>	48	2,40	HCO <sub>3</sub>	350	574	15	387	4,07	4,07	0	5,74	7,0
	Mg <sup>2+</sup>	20	1,67	—	48	1,35							
	Na <sup>+</sup>	49	2,12	Cl <sup>-</sup>	10	0,21							
	Fe <sup>2+</sup>	31	1,11	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Следы								
В с е г о			7,30	В с е г о		7,30							

Предочистка осуществляется на основе методов, в результате реализации которых при дозировке специальных реагентов некоторые примеси выделяются из воды в виде хлопьев, имеющих размеры 0,1–1,0 мм. Основными технологическими процессами предварительной очистки воды являются *коагуляция* (укрупнение) коллоидных примесей и *известкование*, которые обычно совмещаются одновременно в одном аппарате (осветлителе) в целях улучшения суммарного технологического эффекта

и снижения денежных затрат. Дополнительная очистка воды от грубодисперсных примесей после осветлителей производится фильтрационными методами, которые также относятся к предочистке воды.

## 2.4. Коагуляция коллоидных примесей воды

Очистка воды от грубодисперсных примесей может быть принципиально осуществлена обычным отстаиванием, время которого определяется размером и удельной массой частиц. Однако коллоидные примеси за счет их агрегативной устойчивости могут быть выделены из воды только методом коагуляции. *Коагуляция* – физико-химический процесс укрупнения коллоидных частиц за счет их слипания под действием молекулярных сил притяжения. В практике водоподготовки под ней понимают очистку воды от коллоидных веществ с одновременной очисткой от грубодисперсных примесей и обесцвечиванием воды путем дозировки в обрабатываемую воду специального реагента – коагулянта.

Для коллоидных систем характерны два основных признака: *гетерогенность* и *дисперсность*. Первый указывает на наличие межфазной поверхности (поверхностного слоя), определяющей самые существенные и характерные свойства коллоидных систем. Вторым признаком – дисперсность (раздробленность) – либо определяется по трем измерениям тела, либо характеризуется величиной, обратной минимальному размеру, или третьей характеристикой раздробленности – удельной площадью поверхности  $S_{уд}$  (отношение межфазной поверхности к объему тела).

Учитывая эти признаки, коллоидные системы можно охарактеризовать и определенным видом энергии, которым они обладают. Гетерогенность предопределяет наличие поверхностного натяжения  $\sigma$ , причем чем сильнее различаются фазы по своей природе, тем выше поверхностное натяжение.

Поверхностная энергия проявляется при таких явлениях, как адгезия, смачивание, адсорбция, или при электрических явлениях с изменением дисперсности и определяется по формуле

$$G = \sigma S.$$

Коллоидные системы, обладающие большим избытком поверхностной энергии, стремятся уменьшить ее за счет снижения поверх-



ностного натяжения благодаря поверхностной адсорбции других веществ, что формирует структуру поверхностного слоя и наделяет этот слой свойствами, отличными от свойств основной фазы. Избирательная адсорбция приводит к приобретению соприкасающимися фазами зарядов противоположного знака, но различной величины, т. е. возникает двойной электрический слой, обуславливающий различные электрокинетические явления.

Возможны три механизма образования двойного электрического слоя:

- 1) за счет перехода ионов или электронов из одной фазы в другую (поверхностная ионизация);
- 2) благодаря адсорбции соединений – примесей водных сред;
- 3) за счет определенного ориентирования молекул сопряженных фаз в результате их взаимодействия.

Для водных коллоидных систем характерны все три возможных вида двойного электрического слоя, причем роль каждого из них в значительной мере связана со значением pH среды и химическими свойствами коллоидных соединений. Все явления на межфазных поверхностях коллоидных систем обусловлены наличием двойного электрического слоя, и количественные связи между коллоидными частицами зависят от его строения.

Количественная теория кинетики коагуляции была создана М. Смолуховским, рассмотревшим скорость коагуляции монодисперсных золь со сферическими частицами, которые сталкиваются между собой под действием броуновского движения. Критическое расстояние взаимодействия частиц принято равным сумме радиусов частиц, что соответствует их непосредственному контакту. Автор теории считал, что взаимодействия происходят только между двумя частицами – одиночными, одиночными с двойными, двойными друг с другом и т. д., что позволяет представить процесс коагуляции аналогичным протеканию бимолекулярных химических реакций и использовать соответствующий математический аппарат.

Для скорости увеличения числа скоагулированных частиц, зависящей от начальной концентрации частиц  $n_0$ , интенсивности их броуновского движения, радиуса действия сил притяжения и эффективности соударений, Смолуховским получено следующее выражение, соответствующее реакции второго порядка:

$$dn_x / d\tau = K(n_0 - n_x)^2,$$

где  $n_x$  – число скоагулированных частиц;  $K$  – константа скорости коагуляции, выраженная в общем виде пропорциональной распределению Больцмана:

$$K = 8\pi DrP \exp[-\Delta E/(kT)],$$

где  $D$  – коэффициент диффузии одиночных частиц;  $r$  – радиус частицы;  $P$  – стерический фактор, учитывающий расположение частиц при столкновении, их форму, размеры;  $k$  – постоянная Больцмана;  $\Delta E$  – средняя энергия, необходимая для слипания частиц (потенциальный барьер).

Обозначив  $n_0 - n_x$  в единице объема за временной интервал  $\tau$  через  $n_\tau$ , получим

$$\frac{dn_\tau}{n_\tau^2} = -K d\tau.$$

После интегрирования этого выражения в пределах от  $n_0$  до  $n_\tau$  и от 0 до  $\tau$  получим

$$n_\tau = \frac{n_0}{1 + Kn_0\tau}. \quad (2.2)$$

Вследствие трудности теоретического определения константы скорости коагуляции Смолуховский ввел понятие периода половинной коагуляции  $\tau_{1/2}$  (времени уменьшения концентрации частиц до половины от начальной). Из (2.2) следует, что

$$1 + Kn_0\tau_{1/2} = 2; \quad Kn_0 = \frac{1}{\tau_{1/2}};$$

$$n_\tau = \frac{n_0}{1 + \tau/\tau_{1/2}}.$$

Последнее выражение, несмотря на известные допущения в теории М. Смолуховского, нашло экспериментальное подтверждение и широко используется для обработки экспериментальных данных по кинетике коагуляции в монодисперсных системах.

В реальных полидисперсных системах коагуляция протекает быстрее: крупные частицы способствуют коагуляции более мелких.

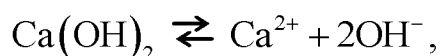
Экспериментально было установлено, что скорость объединения относительно мелких частиц (7–11 мкм) с более крупными (60 мкм) в турбулентном потоке была на несколько порядков выше, чем скорость коагуляции только мелких частиц. Этот факт объясняется различием в механизме встречи частиц – инерционным в случае полидисперсной системы и диффузионным в случае монодисперсной.

Практика эксплуатации водоочистных установок свидетельствует о том, что при любых исходных условиях полнота удаления коллоидных и грубодисперсных частиц в осветлителях при коагуляции зависит от оптимальной скорости, создаваемой при перемешивании воды в камере хлопьеобразования. Причем для каждой заданной скорости устанавливается равновесие между вероятностью образования хлопьев и их средним размером.

## 2.5. Известкование воды

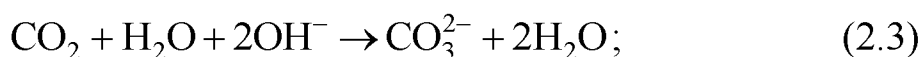
Процесс известкования основан на том, что щелочность природной воды обусловлена в основном ионами  $\text{HCO}_3^-$ , находящимися в химическом равновесии, зависящем от значения pH, с недиссоциированной угольной кислотой и карбонатами. При вводе гашеной извести  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , получаемой гидратацией («гашением»)  $\text{CaO}$ , снижение щелочности достигается повышением pH воды более 9,5 с выводом образующихся карбонат-ионов в составе труднорастворимого вещества  $\text{CaCO}_3$ . В общем виде процесс известкования состоит из следующих стадий:

диссоциации

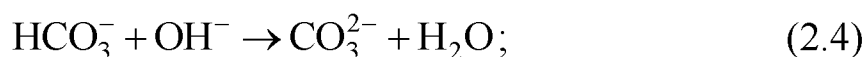


приводящей к повышению pH;

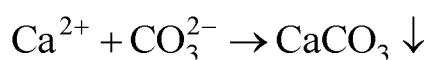
гидратации свободной углекислоты и последующей диссоциации по схеме



диссоциации бикарбонат-ионов, присутствующих в воде и определяющих ее щелочность,

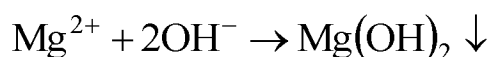


выделения в твердую фазу ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{CO}_3^{2-}$  по реакции



при достижении растворимости  $\text{CaCO}_3$ . Ионы  $\text{Ca}^{2+}$  содержатся в исходной воде и вводятся с известью.

При превышении дозы извести над ее количеством, необходимым для декарбонизации, в воде появляется избыточная концентрация гидроксильных ионов и может быть превышена растворимость  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , которая в этом случае выделится в твердую фазу:



Как следует из процесса известкования, снижение щелочности происходит в результате образования труднорастворимого  $\text{CaCO}_3$ , для чего эквивалентное содержание кальция, имеющегося в исходной воде и введенного с известью, должно быть не меньше, чем количество образующихся по реакциям (2.3) и (2.4) ионов  $\text{CO}_3^{2-}$ , причем по (2.4) из одного одновалентного иона  $\text{HCO}_3^-$  образуется один двухвалентный ион  $\text{CO}_3^{2-}$ , а в эквивалентных единицах количество образовавшихся ионов  $\text{CO}_3^{2-}$  будет в два раза больше количества разрушаемых ионов  $\text{HCO}_3^-$ . Таким образом, суммарное количество образующихся ионов  $\text{CO}_3^{2-}$ , мг-экв/кг,

$$c_{\text{CO}_3^{2-}} = c_{\text{CO}_2}^{\text{исх}} + 2c_{\text{HCO}_3^-}^{\text{исх}} - 2c_{\text{HCO}_3^-}^{\text{ост}},$$

где  $c_{\text{HCO}_3^-}^{\text{ост}}$  – остаточная бикарбонатная щелочность известковой воды при определении pH.

## 2.6. Теория осаждения взвешенных частиц

Процессы осаждения связаны с движением твердых тел в жидкости. В промышленных условиях это происходит в ограниченном объеме при большой концентрации твердой фазы. В таких условиях оседающие частицы могут влиять на движение друг друга вследствие их взаимного трения или столкновений. Такое осаждение называют *стесненным*, а его закономерности отличаются от равномерного движения единичной частицы в среде.

Сила, передвигающая шарообразную частицу диаметром  $d$ , выражается разностью между ее массой и выталкивающей архимедовой силой, равной массе жидкости в объеме частицы:  $\frac{\pi d^3}{6} \cdot g(\rho_T - \rho)$ , где  $\rho_T$  и  $\rho$  – плотности твердой частицы и жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения. Сила сопротивления среды  $R$  движущемуся в ней телу может быть выражена уравнением закона сопротивления:

$$R = \lambda S \frac{\rho \omega^2}{2},$$

где  $\lambda$  – коэффициент сопротивления среды;  $S$  – площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению его движения;  $\omega$  – скорость.

Скорость равномерного движения тела в жидкости, называемую *скоростью осаждения*  $\omega_{oc}$ , можно найти из условия равенства сил движения и сопротивления как

$$\frac{\pi d^3}{6} \cdot g(\rho_T - \rho) = \lambda \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho \omega_{oc}^2}{2},$$

откуда

$$\omega_{oc} = \sqrt{4g \frac{d(\rho_T - \rho)}{3\lambda\rho}}. \quad (2.5)$$

При ламинарном движении тела в жидкости (область действия закона Стокса) приблизительно при  $Re < 2$

$$\lambda = 24 / Re. \quad (2.6)$$

Подставив (2.6) в (2.5), с учетом того, что  $Re = \omega d \rho / \mu$ , после преобразования получим

$$\omega_{oc} = \frac{g(\rho_T - \rho)}{18\mu} \cdot d^2, \quad (2.7)$$

где  $\mu$  – вязкость среды.

Для нешарообразных частиц скорость осаждения меньше на значение коэффициента формы, который находится в пределах от 0,43 до 0,77. Таким образом, скорость осаждения является функцией вязкости жидкости, диаметра частиц, их формы, разности плотностей твердой фазы и жидкости.

При стесненном движении, в отличие от свободного, в процессах осаждения более мелкие частицы тормозят движение более крупных, а частицы больших размеров увлекают за собой мелкие частицы, ускоряя их движение. Возникает коллективное осаждение частиц с близкими скоростями в каждом сечении аппарата.

Стесненное осаждение с гидродинамической точки зрения аналогично поведению кипящего (псевдооживленного) слоя. Скорость псевдооживления  $\omega_{пс}$ , при которой нарушается неподвижность слоя и увеличивается его высота и порозность  $\varepsilon$  (отношение объема жидкости к сумме объемов жидкости и частиц), равна скорости стесненного осаждения  $\omega_{ст}$ . Этот важный вывод позволяет использовать экспериментальные данные, полученные при изучении обоих процессов, для описания каждого из них, так как в настоящее время отсутствуют надежные данные по коэффициентам формы для полидисперсных систем и влиянию движения среды на скорость отстаивания при отклонении падающих частиц от вертикального направления движения.

Для вычисления скорости стесненного осаждения на практике пользуются, в частности, следующими эмпирическими уравнениями:

при  $\varepsilon > 0,7$

$$\omega_{ст} = \omega_{ос} \varepsilon^2 \cdot 10^{-1,82(1-\varepsilon)}, \quad (2.8)$$

при  $\varepsilon \leq 0,7$

$$\omega_{ст} = \omega_{ос} \frac{0,123\varepsilon^3}{1-\varepsilon}, \quad (2.9)$$

где  $\omega_{ос}$  – скорость свободно осаждающейся частицы, определяемая по (2.5).

Уравнения (2.8) и (2.9) дают возможность рассчитывать скорость стесненного осаждения  $\omega_{ст}$ , м/с, в неподвижной среде шарообразных частиц одного размера относительно неподвижных стенок аппарата. Для частиц нешарообразной формы  $\omega_{ст}$  умножается на поправочный коэффициент формы  $\phi$ , значения которого для частиц округлой формы, угловатых, продолговатых и пластинчатых составляют соответственно 0,77; 0,66; 0,58 и 0,43.

## 2.7. Механизм задержания взвесей слоем зернистого материала

Различают две основные причины задержания взвесей фильтрующим слоем: *механическое задержание* частиц взвеси на входе в каналы слоя и *адгезию* (прилипание) частиц взвеси на поверхности зерен слоя. При любой технологической организации процесса очистки воды на зернистых слоях оба явления имеют место.

Если диаметр частиц больше диаметра каналов фильтрующего слоя, то частица взвеси задерживается каналами пористого материала. Перекрывание поровых каналов слоя возможно также и меньшими частицами взвеси. Так, при больших концентрациях улавливаемых частиц перекрывать поры могут группы частиц взвеси, размер которых в 10 раз меньше размера порового канала. В этом случае принято говорить об образовании «сводиков» над входом в поровый канал (рис. 2.2).

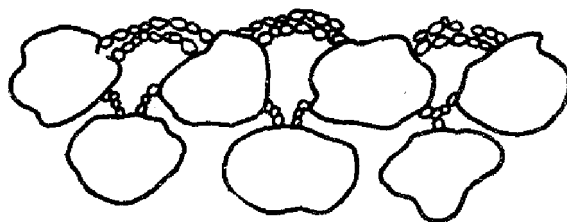


Рис. 2.2. Образование «сводиков» при механической фильтрации

Процесс образования «сводиков» может иметь место не только в самых верхних (лобовых) слоях фильтрующего материала, но и на внутренних его слоях. Перекрывание каналов внутри фильтрующего слоя происходит вследствие локального концентрирования взвеси, движущейся внутри слоя. Если перекрывание лобовых каналов слоя ведет к накоплению частиц взвеси на поверхности фильтрующего слоя, то перекрывание внутренних каналов приводит к накоплению взвеси на поверхности фильтрующего слоя. Отсюда различают два вида механического фильтрования – *поверхностное* и *объемное*. При поверхностном фильтровании мелкие частицы взвеси, обладающие огромными значениями удельной поверхности, образуют собственный фильтрующий слой. Хотя толщина такого слоя и незначительна, его сопротивление, из-за высокой удельной поверхности образующих его частиц, весьма велико.

При объемном фильтровании рост перепада давления на слое фильтрующего материала будет зависеть от всей омываемой поверхно-

сти слоя. При перекрывании отдельных каналов внутри слоя одновременно происходит увеличение поверхности фильтрующего слоя за счет появления поверхности «сводика» и уменьшение ее за счет исключения поверхности перекрытого канала (рис. 2.2). Таким образом, общая омываемая поверхность фильтрующей загрузки практически не изменится. Увеличение перепада давления на слое фильтрующего материала в этом случае происходит главным образом за счет уменьшения его пористости. Из опыта работы насыпных механических фильтров известно, что при объемном фильтровании большая часть частиц взвеси локализуется в верхней части фильтрующего слоя высотой 0,1–0,3 м.

Для полного описания процесса распределения твердой фазы взвеси между потоком и фильтрующим слоем необходимо располагать уравнением, связывающим скорость изменения концентрации твердой фазы на поверхности зерен фильтрующего слоя  $\frac{\partial q}{\partial t}$  с концентрацией взвеси, протекающей по поровым каналам слоя  $C$ . Уравнение, определяющее такую связь, носит название *уравнения кинетики*:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \alpha \left( C - \frac{q}{k_1 q_\infty - k_1 q} \right),$$

где  $q$  – масса твердой фазы взвеси, находящаяся на поверхности фильтрующего материала и отнесенная к объему слоя, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время фильтрации, с;  $\alpha$  – константа скорости прилипания (адгезии), 1/с;  $C$  – концентрация взвеси, кг/м<sup>3</sup><sub>пор</sub>;  $k_1$  – некоторая постоянная величина, характеризующая состояние равновесия, м<sup>3</sup><sub>пор</sub>/кг;  $q_\infty$  – максимально возможная концентрация твердой фазы в слое фильтрующего материала, кг.

Введя концентрацию твердой фазы во взвеси

$$C^* = \frac{q}{k_1 q_\infty - k_1 q},$$

получим

$$q = \frac{k_1 q_\infty C^*}{1 + k_1 C^*}.$$

Последнее уравнение в точности совпадает с известным уравнением Ленгмюра, которое описывает связь концентрации твердой фазы



на поверхности зёрен фильтрующего слоя с равновесной ей концентрацией твёрдой фазы во взвеси. Уравнение кинетики будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \alpha(C - C^*),$$

где  $C^*$  – концентрация твёрдой фазы во взвеси, равновесная с некоторой концентрацией  $q$  на поверхности зёрен слоя.

## 2.8. Принципы очистки сточных вод

Вследствие сильной загрязнённости промышленных сточных вод их очистка от примесей производится в несколько этапов. Во всех случаях очистки стоков первой стадией является механическая очистка, предназначенная для удаления наиболее крупных механических примесей, взвесей и дисперсно-коллоидных частиц.

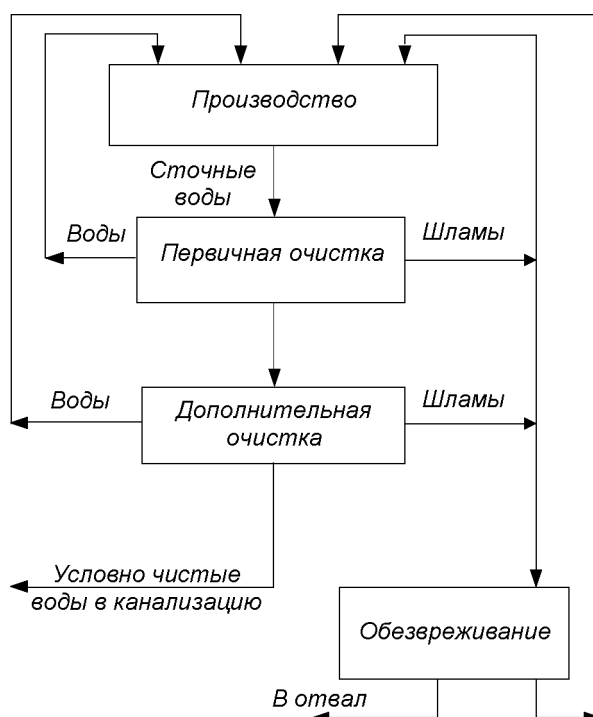


Рис. 2.3. Типовая схема очистки промышленных сточных вод

Последующая очистка от химических веществ осуществляется различными методами: физико-химическими (флотация, абсорбция, ионообмен, дистилляция, обратный осмос и ультрафильтрация и др.), химическими (реагентная очистка), электрохимическими (электрохи-

мическое окисление и восстановление, электродиализ, электрокоагуляция, электрофлотация и т. п.), биологическими. Если в сточных водах имеются весьма вредные вещества, применяют термические методы, позволяющие уничтожить примеси. Как правило, во многих случаях приходится применять комбинацию указанных методов. Одна из типовых схем очистки сточных вод показана на рис. 2.3.

Среди наиболее распространенных методов следует указать:

1) для суспензированных и эмульгированных примесей – отстаивание, флотация, фильтрация, осветление, центрифугирование (для грубодисперсных частиц); коагуляция, флокуляция, электрические методы осаждения (для мелкодисперсных и коллоидных частиц);

2) для очистки от неорганических соединений – дистилляция, ионообмен, обратный осмос, ультрафильтрация, реагентное осаждение, методы охлаждения, электрические методы;

3) для очистки от органических соединений – экстракция, абсорбция, флотация, ионообмен, реагентные методы (регенерационные методы); биологическое окисление, озонирование, хлорирование, электрохимическое окисление (деструктивные методы);

4) для очистки от газов и паров – отдувка, вакуумирование, нагрев, реагентные методы;

5) для уничтожения вредных веществ – термическое разложение.

## **2.9. Механическая очистка**

Для удаления взвешенных примесей из сточных вод используют гидромеханические процессы – процеживание, отстаивание (гравитационное и центробежное) и фильтрование. Выбор метода зависит от крупности взвешенных частиц.

### **2.9.1. Процеживание**

Сточные воды процеживают через решетки из металлических прутьев с зазором 5–25 мм, установленных под углом 60–75° на пути движения сточных вод, и сита с целью извлечения из них крупных примесей во избежание засорения труб и каналов. Решетки могут быть неподвижными и подвижными. Решетки, совмещенные с дробилками для измельчения крупных примесей, называются *коммуторами*. Наибольшее распространение получили неподвижные решетки. Решетки и сита довольно быстро забиваются примесями

и требуют систематической очистки. На рис. 2.4 показаны виды решеток и схемы их очистки специальными граблями.

Скорость воды между стержнями (чаще прямоугольного сечения – круглые быстрее засоряются) принимается 0,8–1 м/с; соответственно, потери напора

$$h_p = \zeta \frac{kV^2}{2g},$$

где  $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления решетки, выбираемый в зависимости от формы стержней;  $k$  – коэффициент, учитывающий увеличение потерь напора вследствие засорения решетки (принимают  $k=3$ );  $V$  – скорость потока перед решеткой, м/с;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

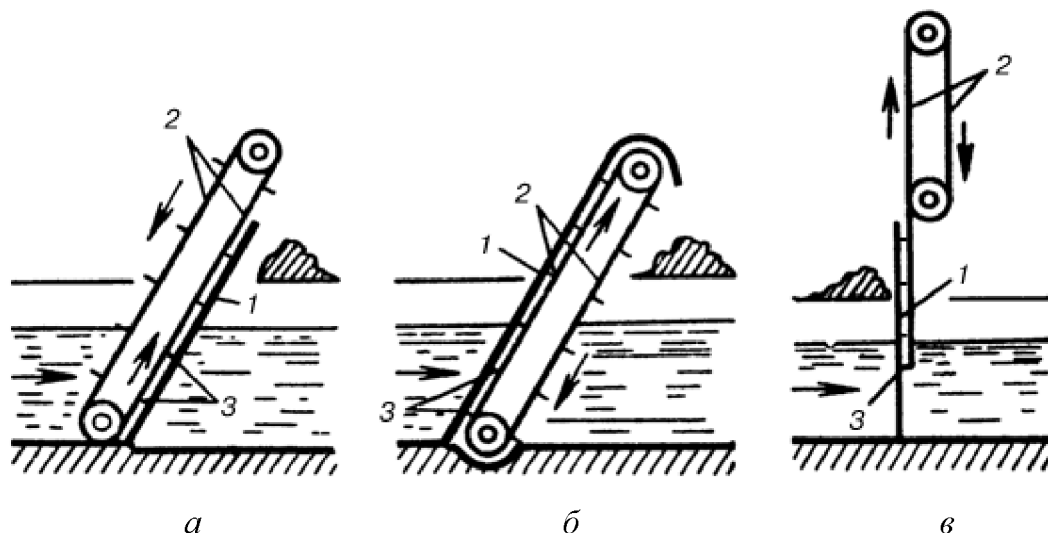


Рис. 2.4. Виды решеток с граблями для очистки:  
1 – решетка; 2 – бесконечная цепь; 3 – грабли

Для удаления более мелких частиц применяют сита – барабанные или дисковые – с диаметром отверстий сетки 0,5–1 мм. При вращении барабана сточная вода фильтруется через его внешнюю или внутреннюю поверхность в зависимости от способа подвода (снаружи или внутрь). Производительность сита зависит от диаметра и длины барабана, а также от свойств примесей.

Для разделения взвешенных веществ на фракции могут быть использованы фракционаторы с диаметром отверстий в сетке 60–100 мкм. При разделении 50–80 % взвешенных частиц остается в грубой фракции. Схема и принцип работы фракционатора показаны на рис. 2.5.

Задержанные крупные примеси при удалении направляются в специальные контейнеры-накопители.

### 2.9.2. Отстаивание

Следующий этап очистки – удаление твердых частиц со средним размером 0,25–1 мм (песка) и некоторых других примесей путем осаждения под действием силы тяжести. Для проведения процесса используют песколовки, отстойники и осветлители. В осветлителях одновременно с отстаиванием осуществляют фильтрацию сточных вод через слой взвешенных частиц. Процесс осаждения происходит в ламинарном потоке жидкости со скоростью от 0,1 до 0,2 м/с.

Скорость осаждения частиц примеси может быть вычислена по формуле (2.7) с учетом влияния концентрации взвешенных веществ и реологических свойств системы.

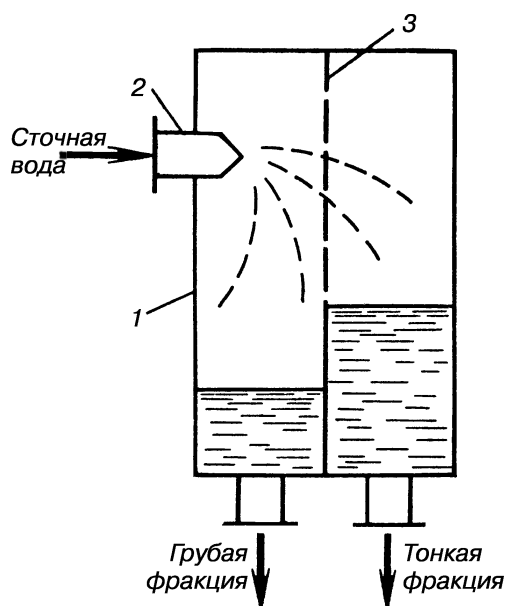


Рис. 2.5. Фракционатор:  
1 – корпус; 2 – сопло; 3 – сетка

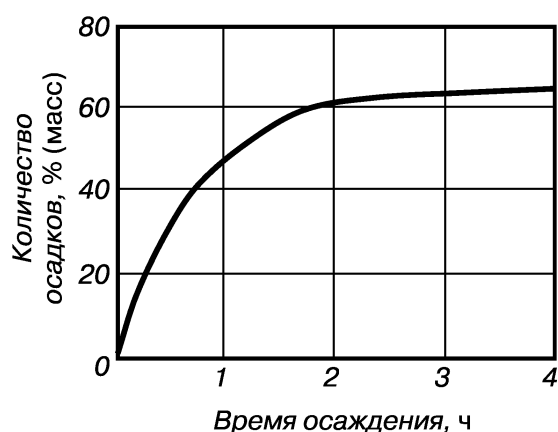


Рис. 2.6. График кинетики процесса осаждения

Для таких полидисперсных систем, как сточные воды, скорость осаждения непрерывно изменяется и устанавливается опытным путем. Она характеризуется кривой, показанной на рис. 2.6.

Песколовки применяют для предварительного выделения минеральных и органических загрязнений. Горизонтальные песколовки – резервуары с прямоугольным или трапециевидным поперечным сечением, скорость воды в них не превышает 0,3 м/с. Минимальная длина песколовки определяется соотношением

$$L = \frac{\omega H}{\omega_{oc}}, \quad (2.10)$$

где  $\omega$ ,  $\omega_{oc}$  – скорости соответственно потока и осаждения, м/с;  $H$  – глубина потока, м.

Вертикальные песколовки имеют прямоугольную или круглую форму; в них сточные воды движутся с вертикальным восходящим потоком со скоростью 0,05 м/с. Горизонтальные песколовки используют чаще.

Отстойники бывают периодического и непрерывного действия. По направлению движения воды они делятся на горизонтальные, вертикальные и радиальные. Эффективность отстаивания составляет в среднем до 60 %. Принципиальные схемы основных видов отстойников показаны на рис. 2.7.

Повысить эффективность отстаивания можно путем увеличения скорости осаждения, увеличив размеры частиц коагуляцией и флокуляцией или уменьшив вязкость сточной воды путем нагрева. Кроме того, можно увеличить площадь отстаивания и провести процесс осаждения в тонком слое жидкости. В последнем случае используют трубчатые и пластинчатые отстойники (рис. 2.7, з и д).

Осветлители применяются для очистки природных вод и для предварительного осветления сточных вод некоторых производств. Используются осветлители со взвешенным слоем осадка, через который пропускается вода, предварительно обработанная коагулянтом (рис. 2.8). Для приближенных расчетов скорости осаждения хлопьевидных частиц при объемных концентрациях взвеси от 0 до 0,2 можно применять следующие формулы:

$$\omega_{ст} = \frac{\omega_{oc}(1 - 3,5C_0)}{\varepsilon};$$

$$\frac{\omega_{ст}}{\omega_{oc}} = \sqrt{\frac{\varepsilon \zeta_{св}}{\zeta_{ст}}},$$

где  $\zeta_{св}$ ,  $\zeta_{ст}$  – коэффициенты сопротивления движению частицы при свободном и стесненном осаждении.

Конструкции осветлителей отличаются: по форме рабочей камеры; наличию или отсутствию дырчатого днища под слоем взвешенного осадка; способу удаления избыточного осадка; конструкции и месту расположения осадкоуплотнителей.

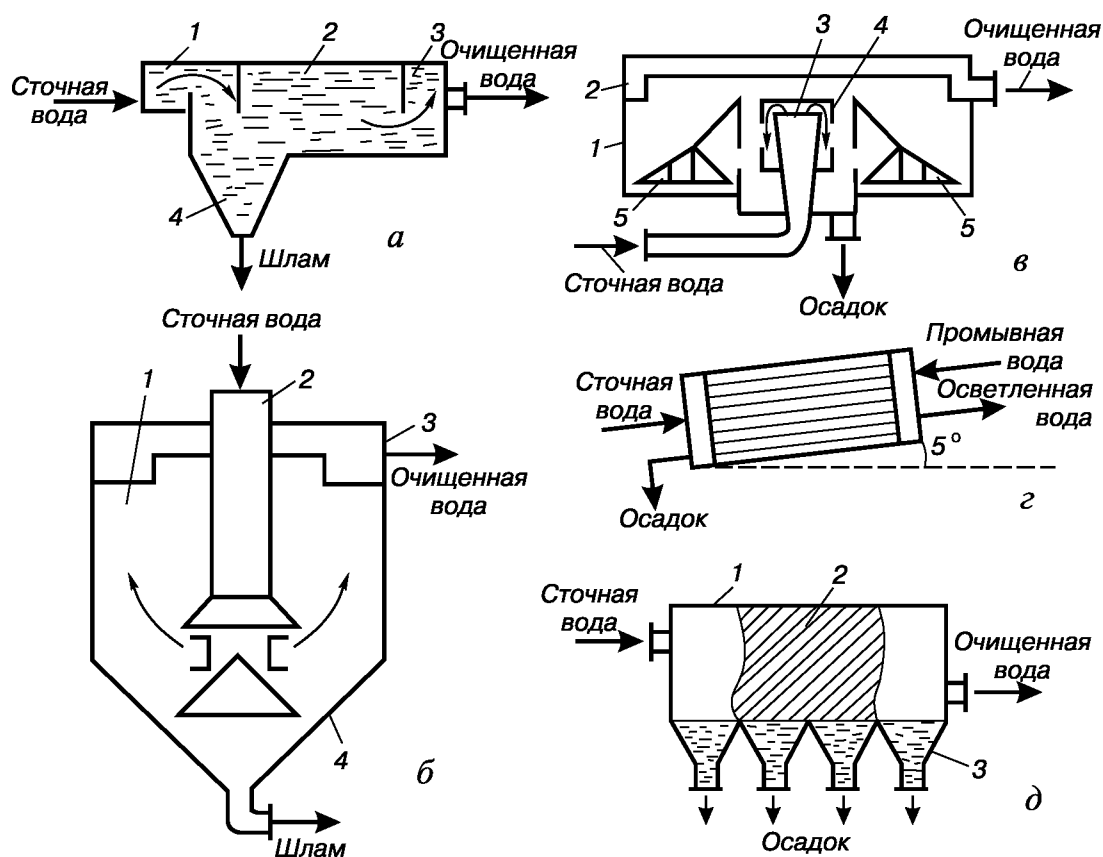


Рис. 2.7. Отстойники: *а* – горизонтальный: 1 – входной лоток; 2 – отстойная камера; 3 – выходной лоток; 4 – прямоток; *б* – вертикальный: 1 – цилиндрическая часть; 2 – центральная часть; 3 – желоб; 4 – коническая часть; *в* – радиальный: 1 – корпус; 2 – желоб; 3 – распределительное устройство; 4 – успокоительная камера; 5 – скребковый механизм; *г* – трубчатый отстойник; *д* – с наклонными пластинами: 1 – корпус; 2 – пластины; 3 – шламоприемник

Процесс отстаивания используют и для удаления всплывающих примесей (нефти, смол, жиров, масел и т. п.) с применением так называемых нефте- и жироловушек (рис. 2.9).

Скорость движения воды в нефтеловушке изменяется в пределах 0,005–0,01 м/с. Для части нефти диаметром 80–100 мкм скорость всплывания равна 1–4 мм/с. При этом всплывает до 96–98 % нефти. Для увеличения эффективности удаления жира из сточных вод применяют аэрирование жироловушки.

В области значений  $Re = \omega_{oc} d \rho / \mu_0 \leq 0,25$  процесс всплывания описывается по закону Стокса, а скорость подъема, с учетом торможения,

$$\omega_{bc} = \omega_{oc} \frac{3\mu_{л} + 3\mu_0}{3\mu_{л} + 2\mu_0},$$

где  $\mu_{л}$  – коэффициент динамической вязкости легкой фракции.

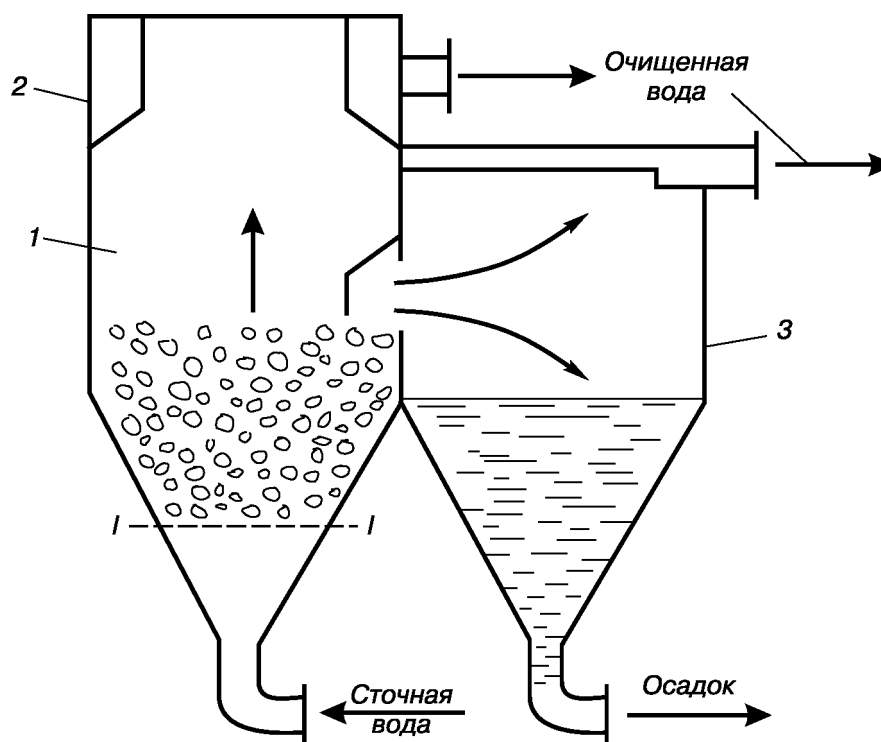


Рис. 2.8. Осветлитель:  
1 – осветлитель; 2 – желоб; 3 – осадкоуплотнитель

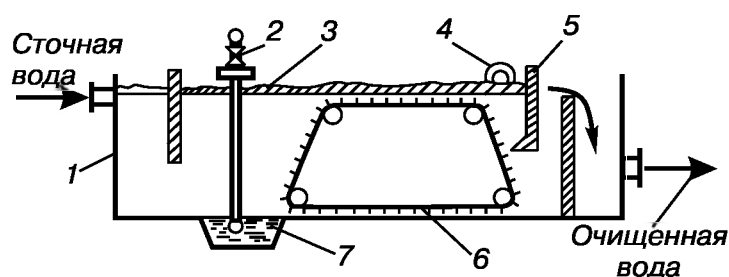


Рис. 2.9. Нефтеловушка: 1 – корпус; 2 – гидрозелеватор; 3 – слой нефти; 4 – нефтесборная труба; 5 – нефтеудерживающая перегородка; 6 – скребковый транспортер; 7 – приямок для осадка

Эффект отстаивания  $\Phi$  (отношение числа отстоявшихся частиц легкой жидкости определенного размера к общему числу частиц легкой жидкости)

$$\Phi = \frac{\omega_{oc} L}{\omega h},$$

где  $\omega_{oc}$  – скорость сточной воды в отстойнике;  $L$  – длина отстойника, определяемая соотношением (2.10);  $h$  – высота слоя легкой жидкости от дна отстойника.

### 2.9.3. Фильтрация

Фильтрация применяют для отделения из сточных вод тонкодисперсных твердых или жидких веществ. Разделение фаз ведут при помощи пористых перегородок под действием гидростатического давления. В качестве перегородки используют перфорированные листы и сетки из кислотостойкой стали, алюминия, никеля, меди, латуни и др., разнообразные тканевые перегородки (асбестовые, стеклянные, хлопчатобумажные, шерстяные, из искусственного волокна), а также керамические. Фильтруют и через слой зернистого материала (кварцевый песок, дробленый гравий, коксовую мелочь, бурый и каменный уголь, торф и т. д.). Фильтрующий материал должен иметь требуемую пористость, обладать достаточной механической устойчивостью к истиранию и химической устойчивостью.

Для фильтрации суспензированных веществ (при больших объемах сточных вод) используют фильтры с сетчатыми элементами (микрофильтры и барабанные сетки) и фильтры с фильтрующим зернистым слоем. При фильтрации сточной воды через слой зернистого материала протекает одновременно два процесса: прилипание частиц примеси к поверхности фильтрующего материала и отрыв ранее прилипших частиц. Задержка частиц поверхностью зерен или ранее осажденными частицами происходит под действием молекулярных сил, сил химического сродства и адсорбции.

Фильтры с зернистым слоем подразделяют на медленные и скоростные, открытые и закрытые. Высота слоя в открытых фильтрах 1–2 м, в закрытых – 0,5–1 м. Напор воды в закрытых фильтрах создается насосами. При содержании взвешенных примесей в сточных водах до 25 мг/л принимают скорость фильтрации 0,2–0,3 м/ч, при 25–50 мг/л – 0,1–0,2 м/ч. Достоинством таких фильтров является высокая степень очистки. Недостатки: большие размеры, высокая стоимость и сложная очистка от осадка.

Скоростные фильтры бывают одно- и многослойные, когда фильтрующий слой состоит из различных материалов.

Процесс микрофильтрации заключается в процеживании сточной воды через слой сеток с отверстиями размером от 40 до 70 мкм. Барабанные сетки имеют размер ячеек от 0,3×0,3 до 0,5×0,5 мм. Микрофильтры применяют для очистки от твердых и волокнистых материалов. Барабан вращается с частотой 6–20 мин<sup>-1</sup>. Скорость фильтрации составляет 25–45 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> · ч). При концентрации примеси 15–20 мг/л эффективность очистки равна 50–60 %. Схемы скоро-



стного контактного и микрофильтров одной из конструкций приведены на рис. 2.10.

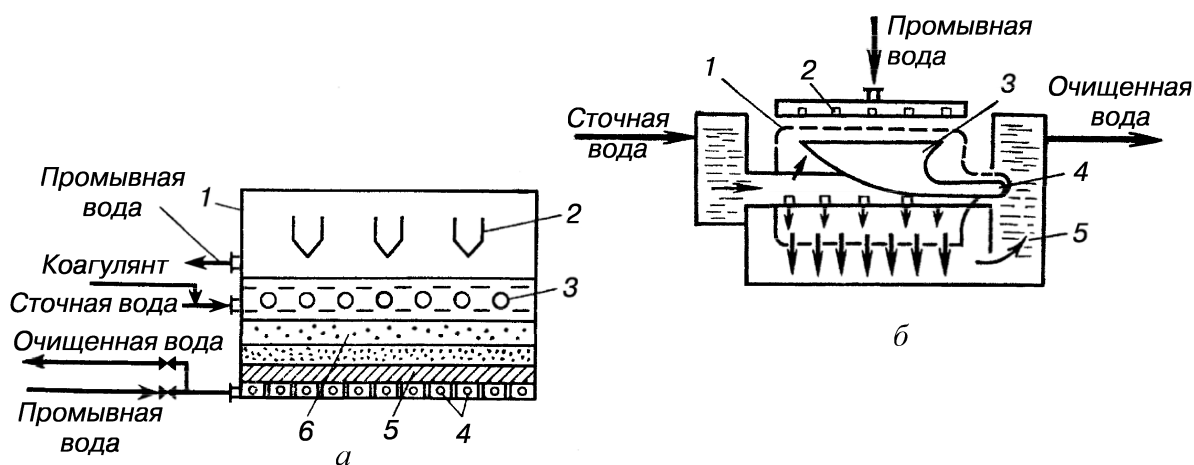


Рис. 2.10. Схемы фильтров: а – скоростной контактный: 1 – корпус; 2 – система удаления промывных вод; 3 – система подачи сточных вод; 4 – система подачи промывной воды; 5 – пористый дренаж; 6 – фильтрующий материал; б – микрофильтр: 1 – вращающийся барабан; 2 – устройство для промывки; 3 – лоток для сбора промывных вод; 4 – труба для отвода промывных вод; 5 – камера для удаления осветленной воды

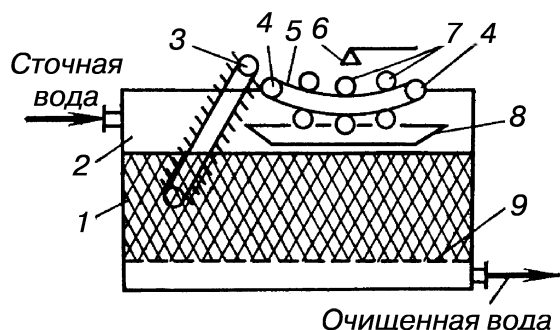


Рис. 2.11. Фильтр с пенополиуретановой загрузкой: 1 – слой пенополиуретана; 2 – камера; 3 – элеватор; 4 – направляющие ролики; 5 – лента; 6 – ороситель; 7 – отжимные ролики; 8 – емкость для регенератора; 9 – решетчатая перегородка

Магнитные фильтры применяются для удаления из жидкостей мелких (0,5–5 мкм) ферромагнитных частиц. При прохождении ламинарным потоком через магнитное или электромагнитное поле ферромагнитные частицы, намагничиваясь, образуют агломераты. Направление потока должно совпадать с направлением силовых линий магнитного поля. При производительности до 60 м<sup>3</sup>/ч эффективность магнитных сепараторов достигает 80–90 %.

На рис. 2.11 изображена одна из схем фильтра для отделения эмульгированных веществ. Высота слоя материала 2–2,5 м. Размер частиц пенополиуретана составляет 5–10 мм. Скорость фильтрования до 25 м<sup>3</sup>/ч. Такие фильтры могут быть использованы при concentra-

ции масел в исходной сточной воде до 1 000 мг/л. После насыщения материала маслом проводят его регенерацию трехкратным механическим сжатием с промывкой водой. Он подается на ленту элеватором и пропускается через отжимные ролики.

#### 2.9.4. Центрифугирование

Процесс центрифугирования проводится в гидроциклонах (напорных и открытых) и центрифугах, простых по устройству, легко обслуживаемых, компактных и имеющих относительно невысокую стоимость. Движение частицы в потоке под действием центробежной силы описывается выражением

$$v_{ц} = C^{0,385} \frac{d^m \rho_c^{\frac{m-2}{3}} \Delta \rho^{\frac{m+1}{3}} I^{\frac{m+1}{3}}}{\mu_c^{\frac{2m-1}{3}}},$$

где  $C$  – коэффициент пропорциональности;  $d^m$  – диаметр частицы;  $\Delta \rho$  – разность плотностей фаз;  $I$  – центростремительное ускорение в поле центробежных сил;  $\mu_c$  и  $\rho_c$  – соответственно вязкость и плотность сточной воды;  $m$  – показатель степени (зависит от режима течения и определяется по табл. 2.5).

Таблица 2.5

Значения  $C$  и  $m$  в зависимости от числа Рейнольдса

Режим течения	Re	$m$	$C$
Ламинарный	1,6	2	$1,7 \cdot 10^{-4}$
Переходный	16–420	1,2	$2,49 \cdot 10^{-3}$
Турбулентный	> 420	5,36	0,5

Производительность напорных гидроциклонов определяется по формуле

$$Q = k_1 d_{bx} D \sqrt{2g\Delta H},$$

где  $k_1$  – безразмерный коэффициент;  $d_{bx}$  – диаметр впускного патрубка;  $D$  – диаметр гидроциклона;  $\Delta H$  – перепад давлений между сливом и впуском воды.

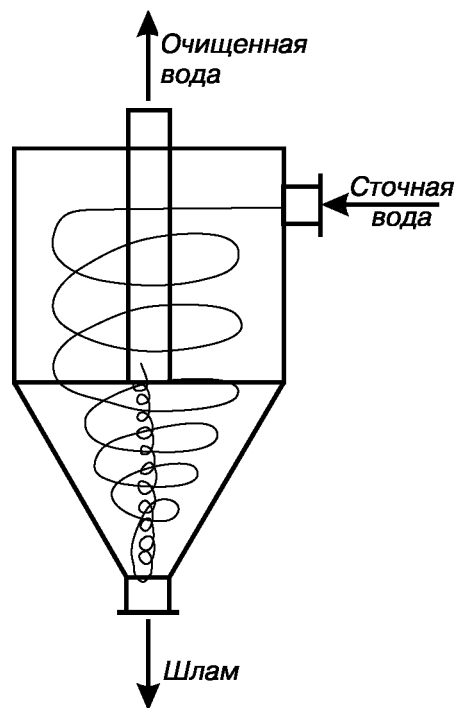


Рис. 2.12. Напорный гидроциклон

Схема гидроциклона приведена на рис. 2.12. Загрязненная вода тангенциально подается внутрь. Сепарация потока сточной воды производится под действием системы сил: центробежной, тяжести, архимедовой и ее аналога в горизонтальной плоскости. Эффективность гидроциклонов находится в пределах 70 %.

## 2.10. Физико-химические методы очистки вод

Выбор того или иного метода очистки (или нескольких методов) производят с учетом санитарных и технологических требований, предъявляемых к очищенным производственным сточным водам с целью дальнейшего их использования, а также с учетом объема сточных вод и концентрации загрязнений в них, необходимых материальных и энергетических ресурсов, экономичности процесса.

### 2.10.1. Флотация

Флотация используется для удаления из сточных вод нерастворимых диспергированных примесей, которые самопроизвольно плохо отстаиваются. В некоторых случаях флотацию используют и для удаления растворенных веществ, например ПАВ. Этот процесс иногда называют «пенная сепарация» (или «пенное концентрирование»).

Флотация используется также для выделения активного ила после биохимической очистки.

К преимуществам этого метода очистки можно отнести следующие: непрерывность процесса; широкий диапазон применения; небольшие капитальные и эксплуатационные затраты; селективность выделений примесей по сравнению с отстаиванием; большую скорость процесса, более низкую влажность получаемого шлама (90–95 %) и высокую степень очистки (95–98 %); возможность рекуперации удаляемых веществ. Флотация сопровождается аэрацией сточных вод, снижением концентрации ПАВ и легкоокисляемых веществ, бактерий и микроорганизмов. Все это способствует успешной дальнейшей очистке сточных вод.

Сущность процесса флотации заключается в слипании всплывающего пузырька воздуха с твердой гидрофобной частицей и ее подъеме в образующийся на поверхности пенный слой при условии, что вес частицы не должен превышать суммарной подъемной силы пузырька и силы слипания. Присутствие в воде ПАВ (реагентов-собирателей) делает процесс более эффективным. ПАВ, адсорбируясь на частицах, понижают их смачиваемость, т. е. делают их гидрофобными. В качестве реагентов-собирателей используют: масла, жирные кислоты и их соли, меркаптаны, амины и т. п. Вероятность слипания пузырька и частицы зависит от смачиваемости последней, характеризуется величиной краевого угла  $\theta$  (рис. 2.13) и может быть определена по формуле

$$\omega = \frac{n \frac{4}{3} \pi (R+r)^3 - n \frac{4}{3} \pi R^3}{V} = C_r \left[ \left( 1 + \frac{r}{R} \right)^3 - 1 \right],$$

где  $n$  – число пузырьков радиуса  $R$  в данном объеме жидкости  $V$ ;  $r$  –

радиус частицы;  $C_r = \frac{n \frac{4}{3} \pi R^3}{V}$  – объемная концентрация газовой фазы.

По некоторым данным оптимальный размер пузырьков 15–30 мкм при размерах частиц (в зависимости от их плотности) 0,2–1,5 мм. Флотация может сочетаться с флокуляцией. При проведении флотации хлопьев после коагуляции необходимо учитывать, что вероятность прилипания пузырьков газа к свежесформованным хлопьям выше, чем к хлопьям, имеющим «возраст» несколько часов.

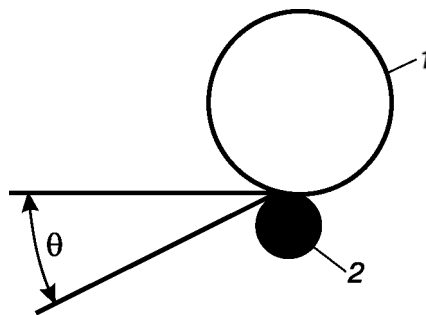


Рис. 2.13. Элементарный акт флотации:  
1 – пузырек газа; 2 – твердая частица

Большое значение имеет стабилизация размеров пузырьков, которая достигается за счет применения пенообразователей, уменьшающих поверхностную энергию раздела фаз (сосновое масло, крезол, фенолы, алкилсульфат натрия и др.). Различают следующие способы флотационной обработки сточных вод: с выделением воздуха из растворов; с механическим диспергированием воздуха; с подачей воздуха через пористые материалы; электрическую и химическую флотации.

Флотация с выделением воздуха из раствора применяется для удаления очень мелких частиц загрязнения. Различают вакуумную, напорную и эрлифтную флотации.

При вакуумной флотации сточную воду насыщают воздухом, а затем обрабатывают вакуумом (порядка 225–300 мм рт. ст.). Выделяющиеся при этой обработке мельчайшие пузырьки выносят часть загрязнений. Преимущества данного способа: слипание пузырька и частицы происходит в спокойной среде, затраты энергии минимальны. Недостатки: незначительная степень насыщения стоков пузырьками газа, ограничивающая его применение при концентрации взвешенных частиц (более 250–300 мг/л), и необходимость сооружать герметически закрытые флотаторы и размещать в них скребковые механизмы.

Напорные установки имеют большее распространение, чем вакуумные, позволяют очищать сточные воды с концентрацией взвесей до 4–5 г/л. Для увеличения степени очистки в воду добавляют коагулянты. Принципиальная схема напорной флотации показана на рис. 2.14, а, на рис. 2.14, б – одна из конструкций флотатора. На рис. 2.15 показаны возможные схемы подачи воды.

В эрлифтных установках организуются встречные потоки воздуха и сточных вод из емкости, расположенной на высоте 20–30 м. Поднимаясь по эрлифту, жидкость обогащается пузырьками воздуха, который выделяется во флотаторе (рис. 2.16).

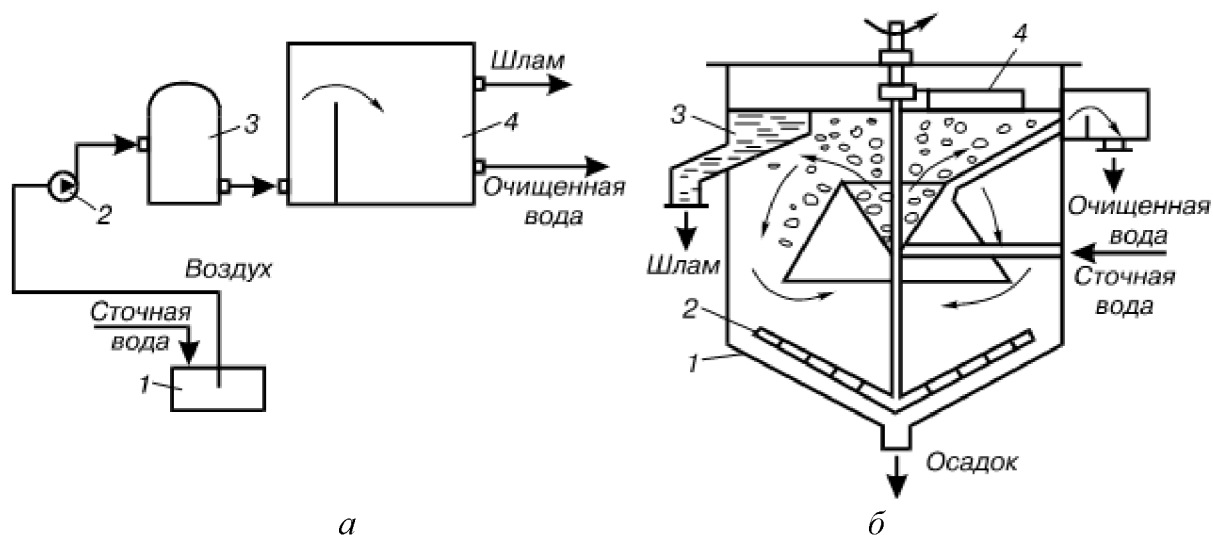


Рис. 2.14. Напорная флотация: *а* – схема напорной флотации: 1 – емкость; 2 – насос; 3 – напорный бак; 4 – флотатор; *б* – флотатор «Аэрофлотор»: 1 – камера; 2 – скребок; 3 – шламоприемник; 4 – поверхностные скребки

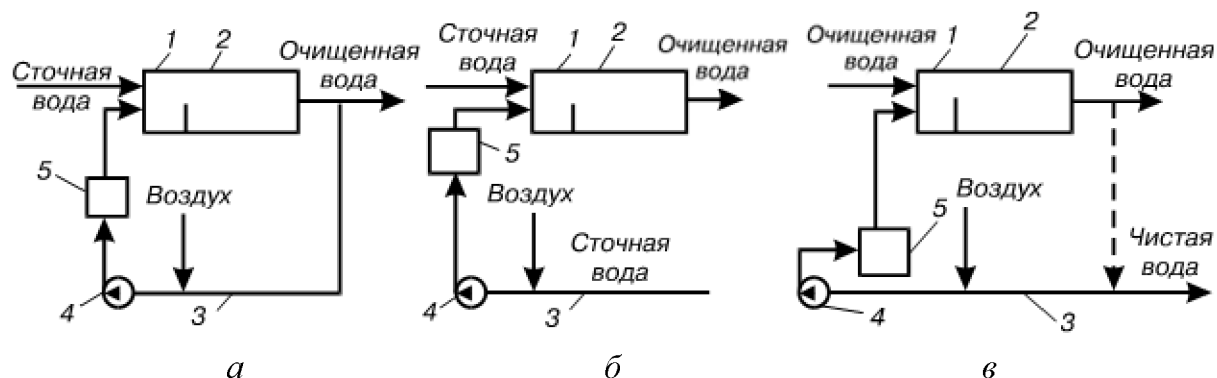


Рис. 2.15. Схемы подачи воды при напорной флотации: *а* – с рециркуляцией; *б* – с частичной подачей воды насосом; *в* – с рабочей жидкостью; 1 – приемные отделения; 2 – флотационные отделения; 3 – линии всасывания; 4 – насосы; 5 – напорные баки

Образующаяся пена с частицами удаляется самотеком или скребком. Флотация с механическим диспергированием осуществляется с использованием импеллера, при вращении которого в жидкости возникает большое число вихревых потоков, которые разбиваются на пузырьки определенной величины. Флотацию применяют для очистки сточных вод с высоким (более 2 г/л) содержанием взвеси. Пример конструкции флотатора с импеллером показан на рис. 2.17.

Пневматические флотационные установки применяются для очистки сточных вод с агрессивными по отношению к механизмам (насосам, импеллерам и т. п.) примесями. Пузырьковый поток созда-

ется подачей сжатого воздуха через специальные сопла воздухораспределительных трубок. Обычно диаметр сопел равен 1,0–1,2 мм, скорость истечения воздуха 100–200 м/с.

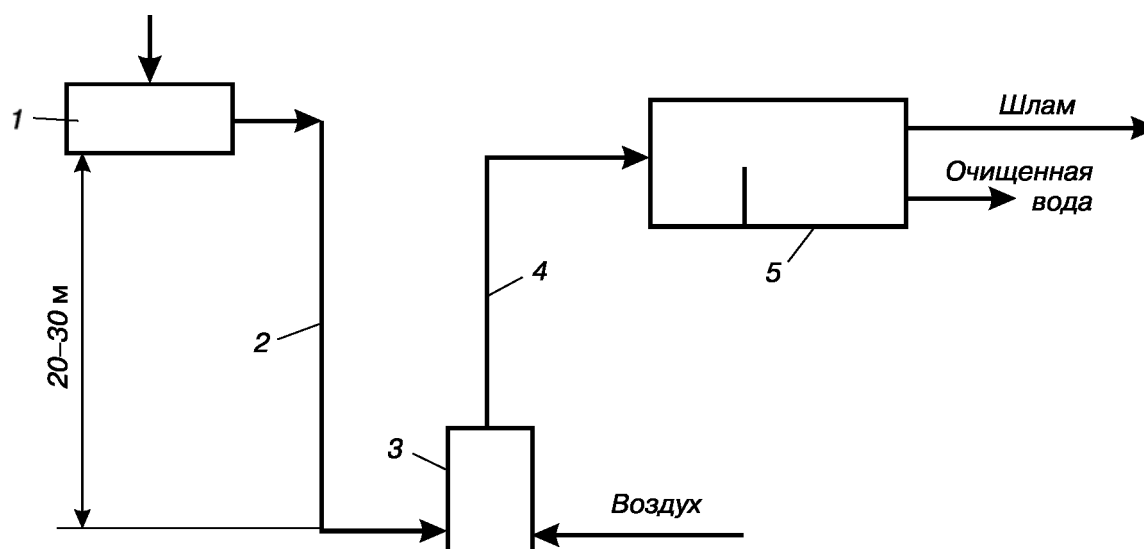


Рис. 2.16. Схема эрлифтной установки: 1 – емкость; 2 – трубопровод; 3 – аэратор; 4 – труба эрлифта; 5 – флотатор

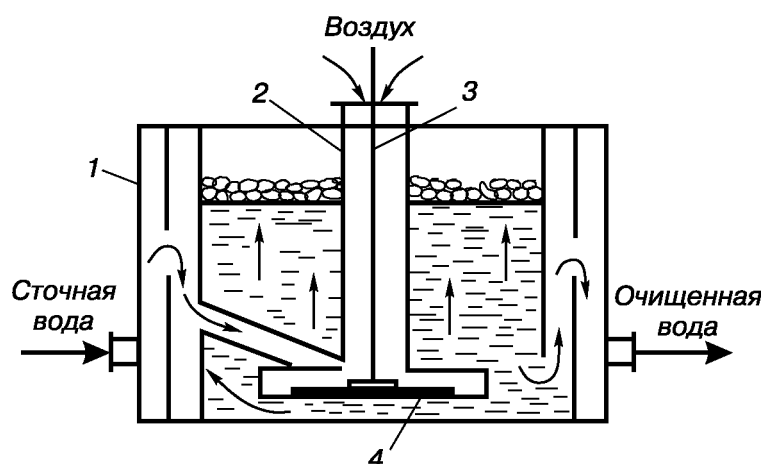


Рис. 2.17. Флотатор с импеллером:  
1 – камера; 2 – труба; 3 – вал; 4 – импеллер

Флотация при помощи пористых пластин или колпачков проводится при пропускании воздуха через пористый керамический материал для получения мелких пузырьков, размер которых

$$R = 6\sqrt[4]{r^2\sigma},$$

где  $r$  – радиус отверстий;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения.

На рис. 2.18 показана примерная схема такого флотатора. Эффект флотации зависит от величины и равнозначности отверстий пористого материала, давления (обычно 0,1–0,2 МПа) и расхода воздуха. При диаметре отверстий 4–20 мкм и расходе 40–70 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> · ч) продолжительность флотации составляет 20–30 мин.

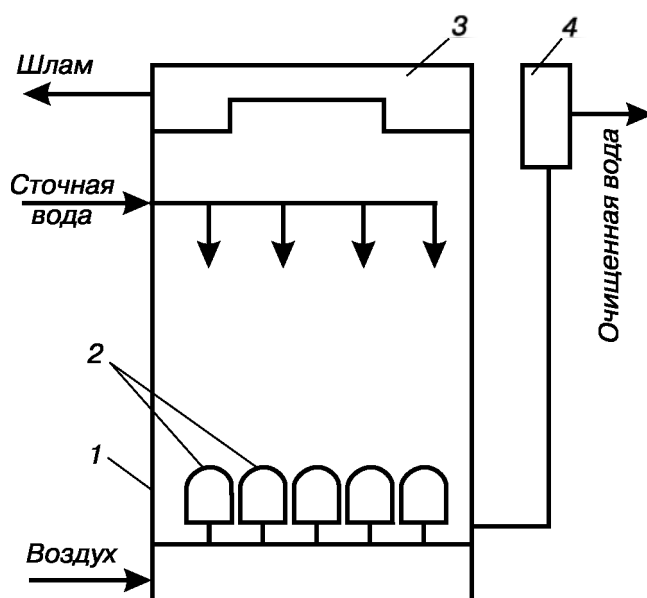


Рис. 2.18. Флотатор с пористыми колпачками: 1 – камера; 2 – пористые колпачки; 3 – кольцевой желоб для удаления шлака; 4 – регулятор уровня

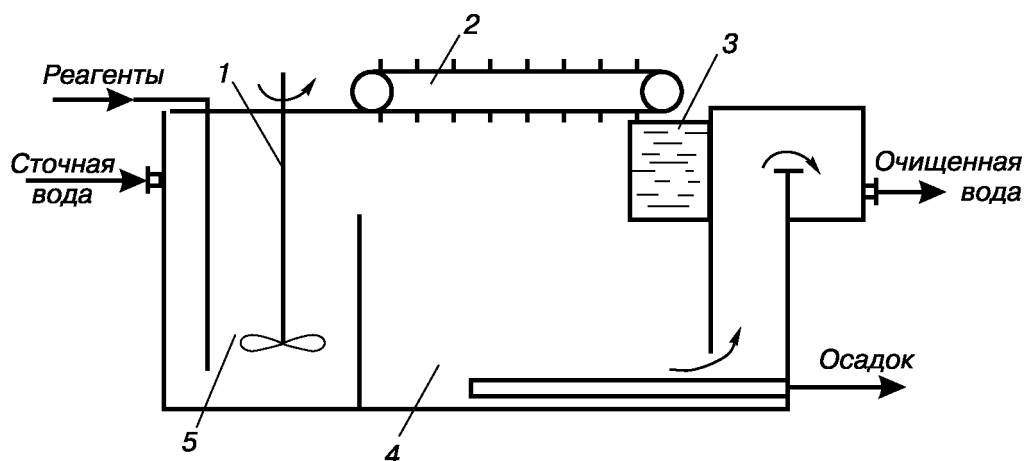


Рис. 2.19. Схема установки для химической флотации: 1 – мешалка; 2 – скребок; 3 – шламоприемник; 4 – флотационная камера; 5 – реакционная камера

Химическая флотация осуществляется при введении в сточную воду некоторых веществ (реагентов) для ее обработки. В процессе происходящих химических реакций выделяются газы ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,



Cl<sub>2</sub> и др.), которые при некоторых условиях могут прилипать к примесным частицам и выносить их на поверхность. Такое явление наблюдается, например, при обработке сточных вод хлорной известью. Схема камеры для химической флотации показана на рис. 2.19. К недостаткам метода можно отнести большой расход реагента.

Биологическая флотация применяется для уплотнения осадка из первичных отстойников при очистке бытовых сточных вод. Осадок подогревается паром в специальной емкости до 35–55 °С и выдерживается несколько суток. Пузырьки газов – результат деятельности бактерий и микроорганизмов – уносят частицы осадка в пенный слой, где они уплотняются и обезвоживаются (~до 80 %).

Ионная флотация – процесс извлечения ионов из растворов методом флотации – эффективна при низких концентрациях извлекаемых ионов ( $\sim 1 \cdot (10^{-3} - 10^{-2})$  г · ион/л). Этот процесс можно использовать для извлечения металлов (Mo, W, V, Pt, Ce, Re и др.). Процесс идет следующим образом: в сточную воду вводят воздух (организуют пузырьковый поток) и собиратель (ПАВ, ионы, которые имеют заряд, противоположный заряду извлекаемого иона примеси). Далее ионы собирателя и примесей концентрируются на поверхности газовых пузырьков и выносятся ими в пенный слой.

### 2.10.2. Адсорбционная очистка

Адсорбцию широко применяют для глубокой очистки сточных вод от растворенных органических веществ после биохимической очистки, а также в локальных установках, если концентрация этих веществ невелика и они биологически не разлагаются или являются сильно токсичными. Локальные установки целесообразны, если вещество хорошо адсорбируется при небольшом удельном расходе адсорбента.

Преимуществами этого метода являются высокая эффективность очистки (до 80–95 %), возможность очистки сточных вод, содержащих несколько веществ, а также их рекуперации.

В качестве сорбентов используют активные угли, синтетические сорбенты и некоторые отходы производства (золу, шлаки, опилки и т. п.). Минеральные сорбенты (глины, силикагели, алюмогели и гидраты окислов) применяют реже, так как энергия их взаимодействия с молекулами воды велика (иногда превышает энергию адсорбции). Сорбенты должны быть относительно крупнопористыми (с эффективным радиусом адсорбционных пор в пределах 0,8–5,0 нм, или 8–50 Å), иметь высокую адсорбционную емкость, высокую селектив-

ность и малую удерживающую способность при регенерации. Используют мелкозернистые адсорбенты с размерами частиц 0,25–0,5 мм и высокодисперсные угли с размерами зерен не менее 40 мкм.

Вещества, хорошо адсорбируемые из водных растворов активными углями, имеют выпуклую изотерму адсорбции, а плохо адсорбируемые – вогнутую. Ее можно определить опытным путем или приближенными вычислениями по формуле

$$a = \frac{a_{\infty} K_w C_p}{\frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_i^*} + K_w C_p},$$

где  $a$  – удельная адсорбция;  $a_{\infty}$  – максимальная удельная адсорбция вещества (адсорбционная емкость);  $K_w = K_a/55,5$  – ионное произведение воды, где  $K_a$  – константа адсорбционного равновесия;  $V_{\text{H}_2\text{O}}$  и  $V_i^*$  – молярные объемы воды и адсорбируемого вещества соответственно.

В сточной воде присутствуют несколько компонентов, их совместная адсорбция возможна, если

$$\Delta E_{\max}^0 - \Delta E_{\min}^0 \leq 10,5,$$

где  $\Delta E^0$  – значение стандартной дифференциальной свободной энергии для каждого вещества, кДж/моль.

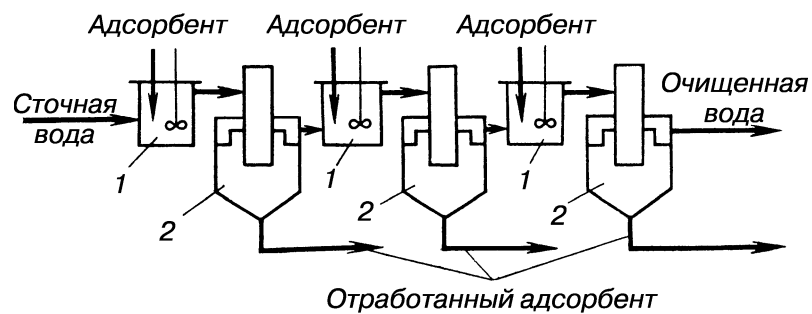
Скорость процесса адсорбции зависит от концентрации, природы и структуры растворенных веществ, температуры воды, вида и свойств адсорбента. Для ориентировочных расчетов рекомендуется принимать следующие значения скорости и диаметра зерна адсорбента:  $\omega = 1,8$  м/ч и  $d = 2,5$  мм.

Процесс адсорбционной очистки воды ведут при интенсивном перемешивании адсорбента с водой, при фильтровании воды через слой адсорбента или в псевдосжиженном слое в установках периодического и непрерывного действия. На рис. 2.20 показаны некоторые схемы адсорбционных установок.

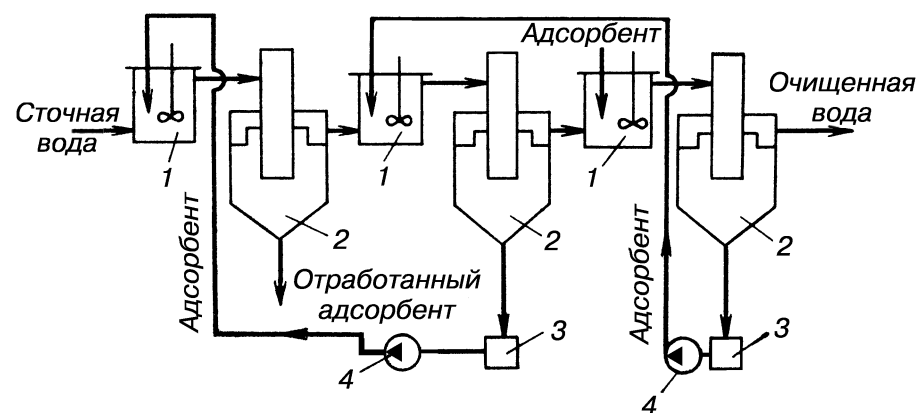
Расход адсорбента для одноступенчатого процесса определяют из уравнения материального баланса:

$$m = \frac{W(C_n - C_k)}{a},$$

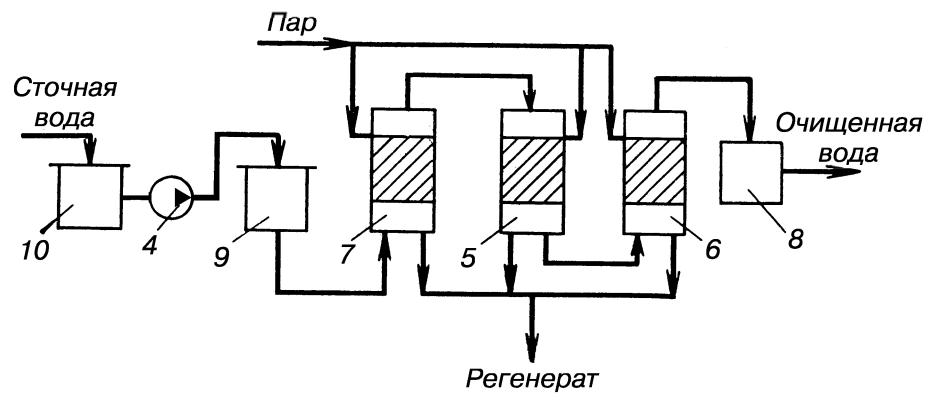
где  $W$  – объем сточных вод;  $C_n$  и  $C_k$  – начальная и конечная концентрации загрязненной сточной воды;  $a$  – коэффициент адсорбции.



а



б



в

Рис. 2.20. Схемы адсорбционных установок с последовательным (а) и противоточным (б) введением адсорбента и непрерывной адсорбционной установки (в): 1 – смеситель; 2 – отстойник; 3 – приемник адсорбента; 4 – насос; 5–7 – колонны; 8 – емкость; 9 – фильтр; 10 – усреднитель

Конечную концентрацию загрязнений после очистки в установках с  $n$  ступенями вычисляют по формуле

$$C_n = \left( \frac{W}{W + km} \right)^n C_{\text{н}},$$

где  $k$  – коэффициент распределения:

$$k = \frac{a_{\tau}}{a} = \frac{C_{\text{н}} - C_{\text{к}}}{C_{\text{н}} - C_{\text{р}}} \approx 0,7-0,8.$$

Здесь  $a_{\tau}$  – значение удельной адсорбции за время  $\tau$ ;  $C_{\text{р}}$  – равновесная концентрация вещества.

Расход адсорбента на каждую ступень находят по формуле

$$m_{\text{н}} = \frac{W}{k} \sqrt{\frac{C_{\text{н}}}{C_n} - 1};$$

необходимое число ступеней

$$n = \frac{\lg C_{\text{н}} - \lg C_n}{\lg(W + km) - \lg W}.$$

В противоточной схеме (рис. 2.20, б) процесс проводят при значительно меньшем расходе адсорбента, чем по схеме с последовательным введением адсорбента. Однако эта установка дороже и сложнее в эксплуатации.

Концентрацию веществ после  $n$  ступеней определяют по формуле

$$C_{\text{к}}^n = \frac{\left( \frac{km}{W} - 1 \right) C_{\text{н}}}{\left( \frac{km}{W} \right)^n - 1}.$$

Число ступеней  $n$  и дозу адсорбента, вводимого в последнюю ступень, можно вычислить по уравнениям:

$$n = \frac{\lg \left[ C_{\text{н}} \left( \frac{km}{W} - 1 \right) + C_n \right] - \lg C_n}{\lg \left( \frac{m}{W} \right)^k} - 1;$$

$$\alpha m^{n+1} - \beta m - \gamma = 0,$$

где

$$\alpha = \left( \frac{k}{W} \right)^{n-1}, \quad \beta = \frac{kC_n}{WC_n}, \quad \gamma = \frac{C_n}{C_n} - 1.$$

При фильтровании сточной воды через слой адсорбента в одной колонне процесс очистки ведут периодически до проскока, а затем адсорбент выгружают и регенерируют. При непрерывном процессе (рис. 2.20, в) две колонны работают последовательно, третья отключена на регенерацию. При проскоке в средней колонне на регенерацию отключают первую колонну.

В момент проскока в колонне появляется слой адсорбента высотой  $L_0$ , который не работает, «мертвый». Если одновременно в процессе менять «мертвый» слой на слой свежего адсорбента через специальные дозаторы, то колонна будет работать непрерывно. Скорость перемещения работающего слоя

$$u = \frac{C_n W_{\text{ср}}}{a_{\text{ад}}},$$

где  $W_{\text{ср}}$  – средняя скорость воды в колонне;  $a_{\text{ад}}$  – динамическая емкость адсорбента; длина работающего слоя

$$L_p = \frac{M}{S\beta\Delta C_{\text{ср}}},$$

где  $M$  – количество поглощенного вещества;  $S$  – площадь поперечного сечения слоя;  $\beta$  – коэффициент массопередачи;  $\Delta C_{\text{ср}}$  – средняя движущая сила адсорбции.

Установки с псевдоожиженным слоем целесообразно применять при высоком содержании взвешенных веществ в воде. При размерах частиц адсорбента 0,5–1 мм скорость потока находится в пределах 8–12 м/ч. Отношение  $H/H_0$  лежит в диапазоне 1,4–1,6, где  $H_0$  – высота неподвижного слоя адсорбента;  $H$  – высота псевдоожиженного слоя. На рис. 2.21 показаны некоторые конструкции адсорберов.

Важнейшей стадией процесса адсорбционной очистки является регенерация активного угля. Адсорбированные вещества извлекаются десорбцией насыщенным или перегретым водяным паром или на-

гретым инертным газом. Для регенерации углей может быть использована и экстракция (жидкофазная десорбция) органическими низкокипящими растворителями, легко перегоняющимися с водяным паром (метиловым спиртом, бензолом, толуолом, дихлорэтаном и др.).

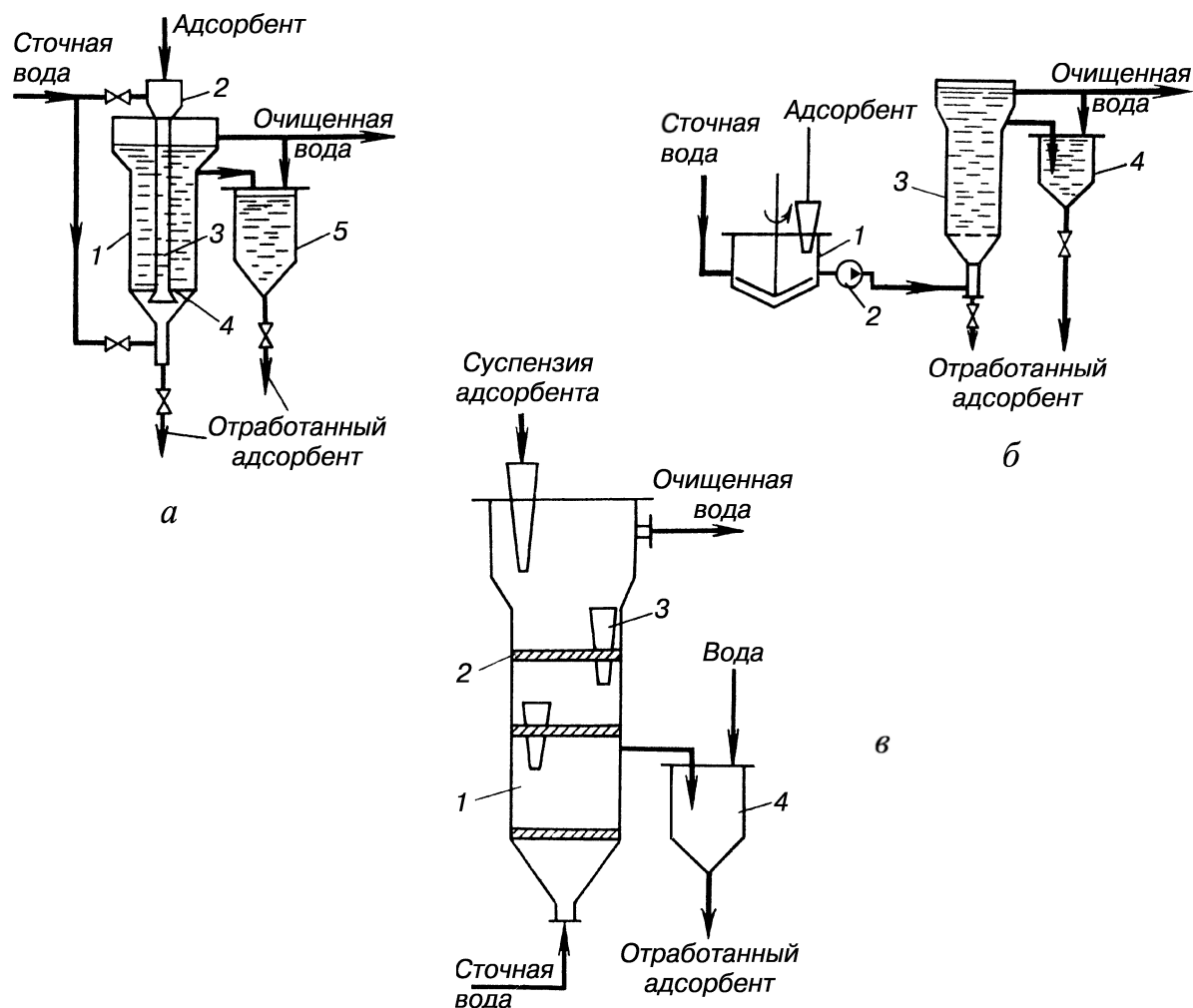


Рис. 2.21. Конструкции адсорберов: а – цилиндрического одноярусного: 1 – колонна; 2 – воронка; 3 – труба; 4 – решетка; 5 – сборник; б – одноярусного с выносным смесителем: 1 – смеситель; 2 – насос; 3 – колонна; 4 – сборник; в – трехъярусного: 1 – колонна; 2 – решетки; 3 – трубки для перемещения адсорбента; 4 – сборник

В некоторых случаях перед регенерацией адсорбированное вещество путем химического превращения переводят в другое вещество, которое легче извлекается из адсорбента. В случае когда адсорбированные вещества не представляют ценности, проводят деструктивную регенерацию химическими реагентами (окисление хлором, озонном или термическим путем).

### 2.10.3. Ионообменная очистка

Ионообменная очистка применяется для извлечения из сточных вод металлов (цинка, меди, хрома, никеля, свинца, ртути, кадмия, ванадия, марганца и др.), а также соединений мышьяка, фосфора, цианистых соединений и радиоактивных веществ. Метод позволяет рекуперировать ценные вещества при высокой степени очистки воды, широко распространен при обессоливании в процессе водоподготовки.

Ионный обмен представляет собой процесс взаимодействия раствора с твердой фазой, обладающей свойствами обменивать ионы, содержащиеся в ней, на другие, присутствующие в растворе. Вещества, составляющие эту твердую фазу, называются ионитами. Они способны поглощать из растворов электролитов положительные (*катиониты*) и отрицательные (*аниониты*) ионы. Если иониты обменивают и катионы, и анионы, их называют *амфотерными*.

Иониты бывают органические и неорганические (минеральные), природные и полученные искусственно. К неорганическим природным ионитам относятся цеолиты, глинистые минералы, полевые шпаты, различные смолы и др. Катионообменные свойства их обусловлены содержанием алюмосиликатов типа  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ . Ионообменными свойствами обладают также фторапатит  $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3]\text{F}$  и гидроксипатит  $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3]\text{OH}$ . К неорганическим синтетическим ионитам относятся силикагели, пермутиты, труднорастворимые окиси и гидроокиси некоторых металлов (алюминия, хрома, циркония и др.).

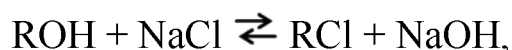
Органические природные иониты – это гуминовые кислоты почв и углей. Для усиления кислотных свойств и обменной емкости угли измельчают и сульфатируют в избытке олеума.

К органическим искусственным ионитам относятся ионообменные смолы с развитой поверхностью, имеющие наибольшее значение для очистки сточных вод. Синтетические ионообменные смолы – высокомолекулярные соединения, углеводородные радикалы которых образуют пространственный каркас (матрицу) с фиксированными на нем ионообменными группами. Синтетические иониты набухают в воде больше и имеют большую обменную емкость, чем природные.

Реакция ионного обмена протекает следующим образом:  
при контакте с катионитом

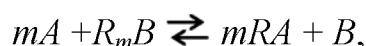


при контакте с анионитом



где R – обозначение матрицы при сокращенном написании ионита; H – противоион и SO<sub>3</sub> – анкерный ион, составляющие активную группу сульфакатионитов RSO<sub>3</sub>H.

Ионный обмен происходит в эквивалентных отношениях и в большинстве случаев является обратимым. Реакции ионного обмена протекают вследствие разности химических потенциалов обменивающихся ионов и в общем виде могут быть представлены формулой



где A и B – ионы.

Реакция идет до установления ионообменного равновесия. Скорость его достижения зависит от гидродинамического режима движения жидкости, концентрации обменивающихся ионов, структуры зерен ионита, его проницаемости для ионов и т. п.

Равновесие ионообменных процессов выражают следующей формулой:

$$K_{AB} = \left( \frac{q_A}{C_A} \right)^n \left( \frac{C_B}{q_B} \right) = \left( \frac{y_A}{x_A} \right)^n \left( \frac{x_B}{y_B} \right) \left( \frac{\theta}{C_0} \right)^{n-1},$$

где  $K_{AB}$  – константа равновесия;  $q_A$  – концентрация ионов в твердой фазе;  $C$  – концентрация ионов (соответственно A и B) в жидкой фазе;  $x = C/C_0$  – безразмерная концентрация в жидкой фазе;  $y = q/\theta$  – то же в твердой фазе;  $C_0$  – общая «эквивалентная» концентрация ионов в жидкости;  $\theta$  – обменная емкость смолы. Значение  $n$  находится в пределах от  $m$  до единицы.

Для внешнEDIффузионной области при значениях Re от 2 до 30 при расчете коэффициента массоотдачи может быть использована следующая зависимость:

$$\text{Nu} = 0,725 \text{Re}^{0,47} \text{Pr}^{1/3},$$

где  $\text{Nu} = \beta d/D$  – число Нуссельта;  $\text{Pr} = \nu/D$  – число Прандтля.

Иониты производятся в виде порошка (размер частиц 0,04–0,07 мм), зерен (гранул размером 0,3–2,0 мм), волокнистого материала, листов и плиток. Крупнозернистые иониты предназначены для ра-



боты в фильтрах со слоями высотой 1–3 м, порошкообразные – со слоями высотой 3–10 мм. На рис. 2.22 представлены примеры конструкций ионообменных установок, дающие представление об установках периодического и непрерывного действия.

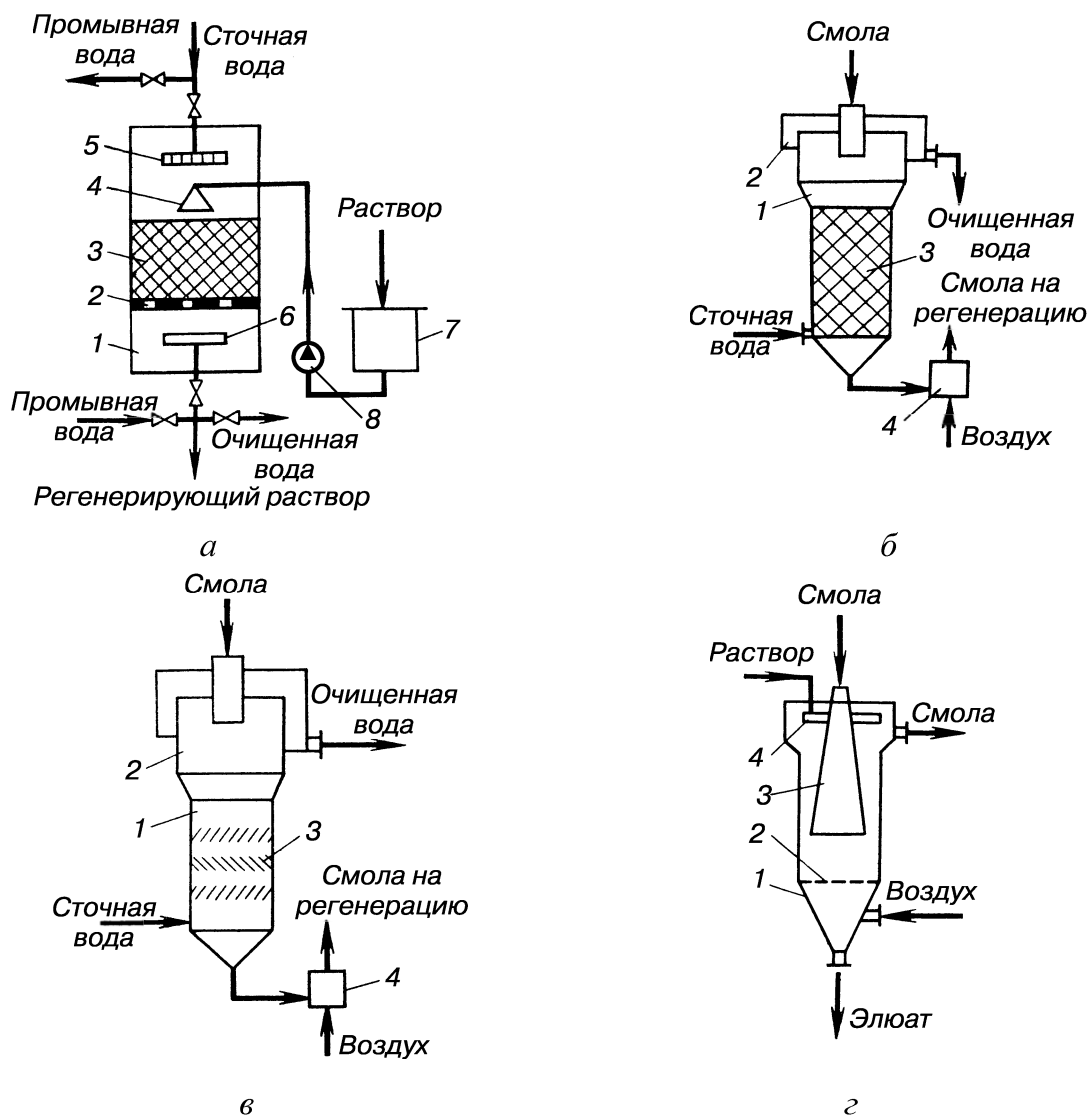


Рис. 2.22. Схемы ионообменных установок: *а* – периодического действия: 1 – колонна; 2 – решетка; 3 – слой ионита; 4–6 – распределители; 7 – бак с регенерирующим раствором; 8 – насос; *б* – с движущимся слоем смолы: 1 – корпус; 2 – разделительная зона; 3 – тарелка; 4 – эрлифт; *в* – с тарелками провального типа: 1 – корпус; 2 – разделительная зона; 3 – тарелка; 4 – эрлифт; *г* – регенерационная пневмопульсационная колонна: 1 – колонна; 2 – решетка; 3 – труба; 4 – распределитель раствора

## 2.10.4. Экстракция

Жидкостная экстракция применяется для очистки сточных вод, содержащих фенолы, масла, органические кислоты, ионы металлов и др. Экстракция выгодна, если стоимость извлекаемых веществ окупает все затраты на проведение процесса. В общем случае для большинства веществ при их концентрации выше 3–4 г/л экстракция предпочтительнее адсорбции.

Очистка сточных вод экстракцией состоит из трех стадий: интенсивного смешивания сточной воды с экстрагентом (органическим растворителем), разделения экстракта и рафината (в условиях развитой поверхности контакта между жидкостями образуются две жидкие фазы: экстракт, содержащий извлекаемое вещество, и экстрагент, и рафинат, содержащий сточную воду и экстрагент), регенерации экстрагента и рафината. Эффективность процесса зависит от правильности выбора экстрагента и скорости его подачи в воду. При выборе растворителя следует учитывать его селективность, физико-химические свойства, стоимость и способы регенерации.

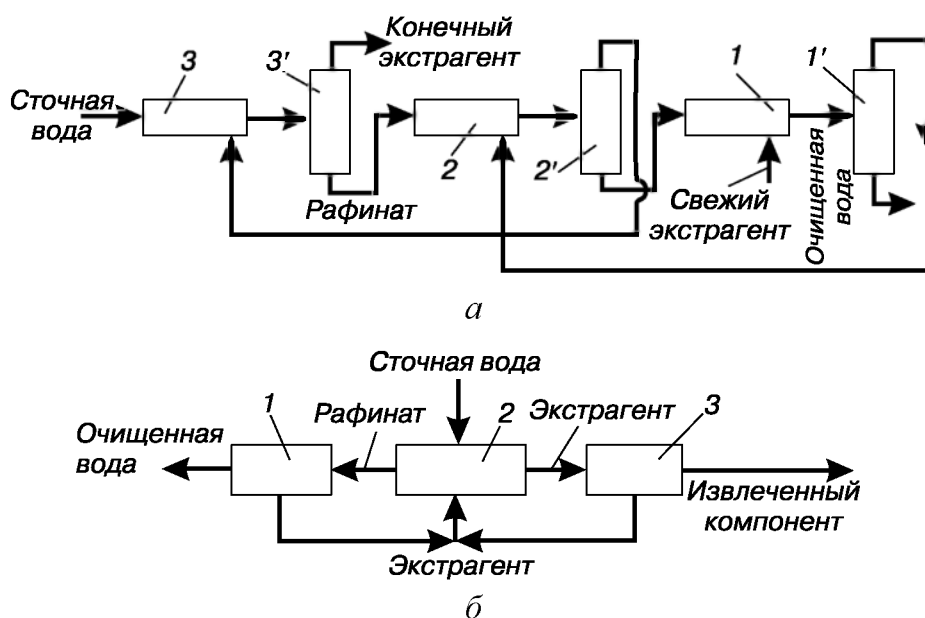


Рис. 2.23. Схемы процесса экстракции: а – многоступенчатого противоточного: 1–3 – смесители; 1'–3' – отстойники; б – непрерывного противоточного с регенерацией экстрагента из рафината и экстракта: 1 – система удаления экстрагента из рафината; 2 – колонна; 3 – система удаления экстрагента из экстракта

При содержании в сточной воде нескольких примесей сначала извлекают один из компонентов – наиболее ценный или наиболее токсичный. При этом для каждого компонента может быть разный

экстрагент. При необходимости одновременной экстракции нескольких веществ экстрагент должен обладать не селективностью извлечения, а иметь близкий и достаточно высокий коэффициент распределения (который выражается отношением концентраций вещества в экстрагенте и воде:  $k_p = C_3/C_B$ ) для всех извлекаемых веществ.

Регенерация экстрагента может быть проведена с применением вторичной экстракции с другим растворителем, а также выпариванием, дистилляцией, химическим взаимодействием или осаждением. На рис. 2.23 показаны примерные схемы процессов экстракции, которые производятся в аппаратах различной конструкции: распылительных, насадочных, тарельчатых колоннах и центробежных экстракторах.

### **2.10.5. Обратный осмос и ультрафильтрация**

Обратным осмосом и ультрафильтрацией называют процессы фильтрования растворов через полупроницаемые мембраны под давлением, превышающим осмотическое. Мембраны пропускают молекулы растворителя, задерживая растворенные вещества. При обратном осмосе отделяют частицы (молекулы, гидратированные ионы), размеры которых не превышают размеры растворителя. При ультрафильтрации размер отдельных частиц на порядок больше, но не более 0,5 мкм. Таким образом, эти процессы от обычной фильтрации (см. пп. 2.10.1) отличаются отделением частиц меньшего размера. Отсюда специфика конструкций фильтров и аппаратов, а также параметров процесса. Давление, необходимое для проведения процесса обратного осмоса, 6–10 МПа, для ультрафильтрации – 0,5 МПа.

Обратный осмос широко используется для обессоливания воды в системах водоподготовки ТЭЦ и предприятий различных отраслей промышленности по производству полупроводников, медикаментов и др., может применяться для очистки промышленных и городских сточных вод. Конструкции некоторых аппаратов показаны на рис. 2.24.

Эффективность процесса зависит от свойств применяемых мембран. Они должны обладать высокой разделяющей способностью (селективностью), большой удельной производительностью (проницаемостью), устойчивостью к действию среды, неизменностью характеристик в процессе эксплуатации, достаточной механической прочностью и низкой стоимостью.

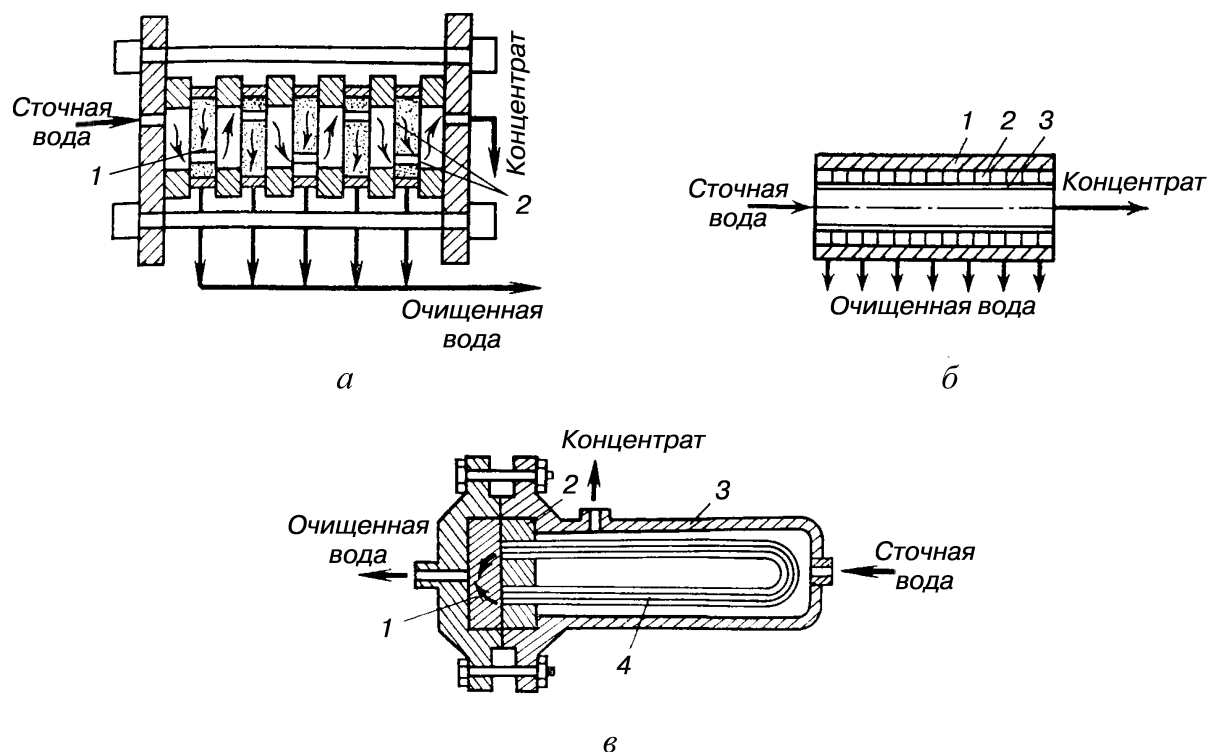


Рис. 2.24. Устройства для проведения обратного осмоса и ультрафильтрации:  
*а* – аппарат типа «фильтр-пресс»: 1 – пористые пластины; 2 – мембраны;  
*б* – элемент трубчатого фильтрующего аппарата: 1 – трубка; 2 – подложка;  
 3 – мембрана; *в* – аппарат с мембранами в виде полых волокон: 1 – подложка;  
 2 – шайба с волокном; 3 – корпус; 4 – полые волокна

Селективность  $\varphi$  (%) процесса разделения определяют по формуле

$$\varphi = \frac{C_0 - C}{C_0} 100 = \left( 1 - \frac{C}{C_0} \right) 100,$$

где  $C_0$  и  $C$  – концентрации растворенного вещества в исходной сточной воде и фильтрате.

Проницаемость определяется количеством фильтрата  $V_{\text{ф}}$ , полученного в единицу времени с единицы рабочей поверхности:

$$V_{\text{ф}} = k_1 (\Delta p - \Delta p_0),$$

где  $k_1$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от проницаемости мембраны;  $\Delta p$  – разность давлений до и после мембраны;  $\Delta p_0$  – разность осмотических давлений.

Проскок  $S$ , кг/(м<sup>2</sup> · сут), т. е. проникание некоторого количества вещества через мембрану, практически не зависит от давления и определяется по формуле

$$S = k_2(C_0 - C),$$

где  $k_2$  – константа для мембран.

Для проведения процесса применяют непористые – динамические и диффузионные (квазигомогенные гели) – и пористые (в виде тонких пленок из полимеров) мембраны. Наибольшее распространение получили полимерные мембраны из ацетатцеллюлозы.

Обратный осмос рекомендуется использовать при следующей концентрации электролитов: для одновалентных солей – не более 5–10 %; для двухвалентных – 10–15 %; для многовалентных – 15–20 %. Для органических веществ указанные пределы несколько выше.

Для уменьшения влияния концентрационной поляризации организуют рециркуляцию раствора и турбулизацию прилегающего к мембране слоя жидкости, применяя мешалки, вибрационные устройства и увеличение скорости потока.

#### 2.10.6. Десорбция летучих примесей

Многие сточные воды загрязнены летучими неорганическими и органическими примесями, сероводородом, диоксидом серы, сероуглеродом, аммиаком, диоксидом углерода и др.

Сущность процесса десорбции летучих примесей состоит в диффундировании их в газовую фазу при пропускании воздуха или другого инертного малорастворимого в воде газа (азота, диоксида углерода, топочных дымовых газов и др.) через сточную воду. Десорбция обусловлена более высоким парциальным давлением газа над раствором, чем в окружающем воздухе. Равновесное парциальное давление удаляемого газа находят по закону Генри. Количество вещества  $M$ , перешедшего из жидкой фазы в газовую, определяется по уравнению массопередачи

$$M = k_y F \Delta_{\text{ср}},$$

где  $k_y$  – коэффициент массопередачи (в данном случае он равен коэффициенту массопередачи в газовой фазе  $\beta_y$ );  $F$  – площадь поверхности контакта фаз;  $\Delta_{\text{ср}}$  – средняя движущая сила процесса десорбции.

Процесс десорбции может быть проведен в тарельчатых, насадочных и распылительных колоннах. Наиболее интенсивно для тарельчатых колонн он протекает в пенном режиме, а для насадочных – в режиме эмульгирования. Тарелки, используемые в десорбционных колоннах, бывают колпачковые, сетчатые, клапанные, провальные и др.

Степень удаления летучих веществ из сточных вод увеличивается с ростом температуры газожидкостной смеси, коэффициента массоотдачи и поверхности контакта фаз. Десорбируемое из воды вещество направляется на адсорбцию (см. пп. 2.10.2) или на каталитическое сжигание.

При небольших количествах отделяемого вещества и небольшой его ценности, а также при условии трудного извлечения его из газовой фазы проводят каталитическое окисление. В этом случае воздух с парами извлекаемого вещества после колонны при температуре 280–350 °С пропускают через слой катализатора (пиролюзит, окись хрома и др.). Большинство органических соединений в этом случае окисляется до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ .

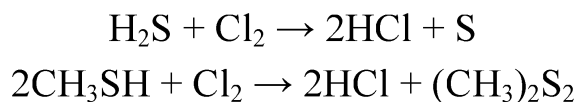
### 2.10.7. Методы дезодорации

В некоторых сточных водах содержатся меркаптаны, амины, аммиак, сероводород, альдегиды, скатол, углеводороды, которые придают им неприятный запах. Для очистки дурнопахнущих сточных вод используют следующие способы: аэрацию, хлорирование, ректификацию, дистилляцию, обработку дымовыми газами, окисление кислородом под давлением, озонирование, экстракцию, адсорбцию, дегазацию и микробиологическое окисление. При выборе метода в каждом конкретном случае необходимо проводить технико-экономическое обоснование на базе оптимизации процесса очистки.

Наиболее эффективным считается метод аэрации, заключающийся в продувании воздуха через сточную воду. На схеме, представленной на рис. 2.25, удаление дурнопахнущих веществ производится в тарельчатой колонне каскадного типа, являющейся примером одной из многочисленных конструкций подобных аппаратов. Для очистки на 85–90 % необходимо иметь удельный расход воздуха 12–15 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> сточной воды, число тарелок – не менее 10, плотность орошения – 20–80 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> · ч), концентрацию щелочи – не менее 40 г/л  $\text{H}_2\text{O}$ .

На некоторых предприятиях очистку дурнопахнущих сточных вод проводят продувкой острым паром, что позволяет удалять серосодержащие соединения, метанол и скипидар (характерно для целлюлозной промышленности).

Промышленное применение имеет хлорирование дурнопахнущих сточных вод. При этом происходит окисление хлором серосодержащих соединений. Однако при недостатке хлора образуется диметилдисульфит (с характерным неприятным запахом):



а при избытке (не менее 600 г на 1 м<sup>3</sup>) образуется метансульфокислота:

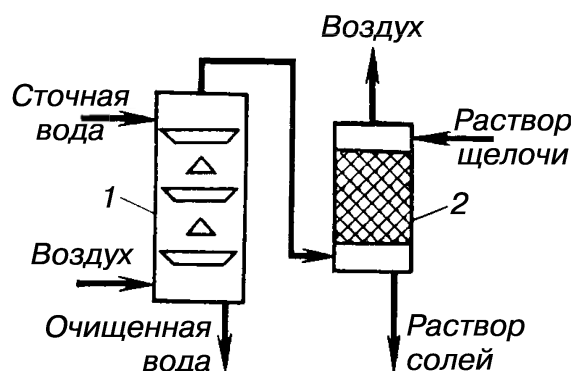
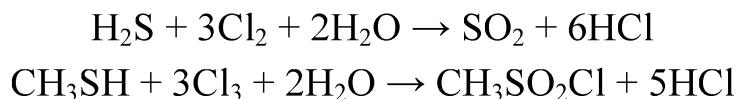


Рис. 2.25. Схема установки дезодорации:  
1 – тарельчатая колонна; 2 – насадочная колонна

Высокая степень очистки может быть достигнута при использовании жидкофазного окисления сернистых веществ кислородом воздуха под давлением.

Для удаления запахов из сточных вод эффективно действует одновременное введение в воду озона или двуокиси хлора и фильтрование воды через активированный уголь. Степень дезодорации в данном случае в зависимости от концентрации загрязняющих веществ (таких как сероводород, диметилсульфид, метилмеркаптан) может достигать 80–100 %. Применение двуокиси хлора вместо озона в равных условиях обеспечивает степень дезодорации на 90–100 %.

Удаление растворенных в сточной воде газов может проводиться при обработке ее в вакуумных установках или в устройствах, использующих эффекты гидродинамической кавитации.

## 2.11. Химические и электрохимические методы очистки вод

К химическим методам очистки сточных вод относят нейтрализацию, коагулирование и флокулирование, окисление и восстановление, которые используются для удаления растворимых и взвешенных веществ. Химические методы очистки являются дорогостоящими, так как связаны с расходом различных реагентов. Химическая очистка

проводится иногда как предварительная перед биологической очисткой или после нее как метод доочистки сточных вод.

### 2.11.1. Нейтрализация сточных вод

Сточные воды, содержащие минеральные кислоты и щелочи, перед сбросом их в водоемы или перед использованием в технологических процессах подвергаются нейтрализации до нормы (рН 6,5–8,5). Для нейтрализации кислых вод используют щелочи, для щелочных – кислоты.

Процесс можно проводить различными способами: смешением кислых и щелочных вод, добавлением реагентов, фильтрованием кислых вод через нейтрализующие материалы, абсорбцией кислых газов щелочными водами или абсорбцией аммиака кислыми водами.

Смешение кислых и щелочных вод производится в емкости (рис. 2.26) с мешалкой или без нее при перемещении воздухом. Этот вид нейтрализации может быть осуществлен, если на одном предприятии или на соседних имеются кислые и щелочные воды, не загрязненные другими примесями.

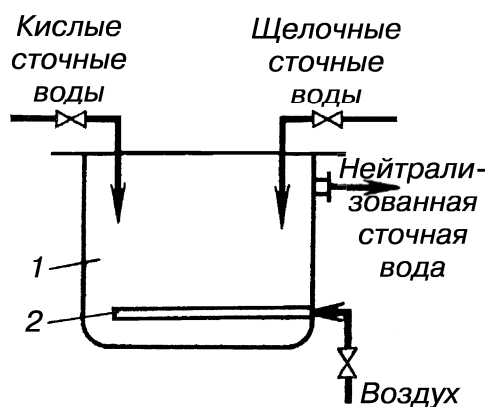


Рис. 2.26. Нейтрализатор смешения: 1 – емкость; 2 – распределитель воздуха

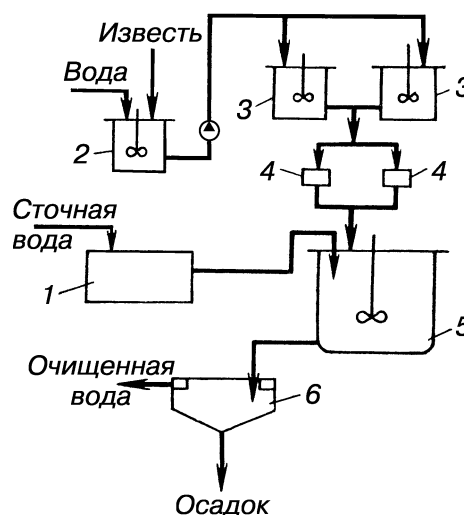


Рис. 2.27. Схема установки для нейтрализации кислых вод известковым молочком: 1 – усреднитель; 2 – аппарат для гашения извести; 3 – растворные баки; 4 – дозаторы; 5 – нейтрализатор; 6 – отстойник

Для нейтрализации кислых вод путем добавления реагентов могут быть использованы щелочи (NaOH, KOH), сода ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), аммиачная вода ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), карбонаты кальция и магния ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ),



доломит ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ), цемент. Наиболее дешевым реагентом является известковое молочко с содержанием активной извести  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  5–10 %. Соду и едкий натр используют, если они являются отходами производства. На рис. 2.27 показана одна из установок для проведения нейтрализации.

В случае нейтрализации фильтрованием кислых вод через нейтрализующие материалы используют слой магнезита, доломита, известняка, твердых отходов (шлак, зола). Процесс ведут в горизонтальных или вертикальных фильтрах-нейтрализаторах, при этом расчет толщины слоя фильтрующего материала и скорости течения воды ведется исходя из требуемой продолжительности контакта не менее 10 мин.

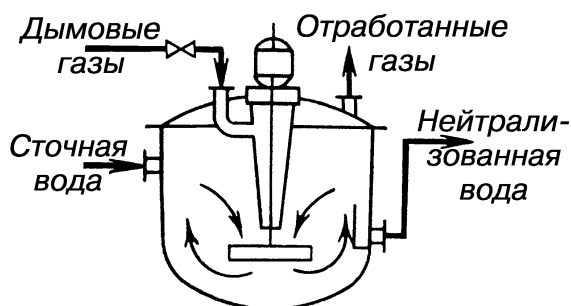


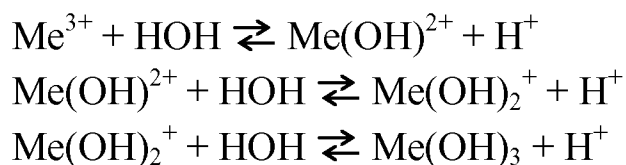
Рис. 2.28. Схема нейтрализации дымовыми газами

На рис. 2.28 показана схема процесса нейтрализации щелочных сточных вод кислыми газами, в качестве которых используют дымовые газы, содержащие  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}_3$  и др. Применение кислых газов позволяет не только нейтрализовывать сточные воды, но и одновременно производить высокоэффективную очистку самих этих газов от вредных компонентов.

### 2.11.2. Очистка вод коагуляцией и флокуляцией

*Коагуляция* – это процесс укрупнения дисперсных частиц в результате их взаимодействия и объединения в агрегаты. В очистке сточных вод ее применяют для ускорения процесса осаждения тонкодисперсных примесей и эмульгированных веществ. Коагуляция может происходить самопроизвольно, под влиянием химических и физических процессов. При очистке сточных вод коагуляция инициируется специальными добавками – коагулянтами, которые образуют хлопья гидратов окисей металлов, быстро оседающих под действием силы тяжести. Эти хлопья обладают способностью улавливать коллоидные

и взвешенные частицы и агрегатировать их в процессе взаимного притяжения (коллоидные частицы имеют слабый отрицательный заряд, а хлопья коагулянтов – положительный). Процесс гидролиза коагулянтов и образования хлопьев происходит по следующим стадиям:



В качестве коагулянтов обычно используют соли алюминия (сульфат алюминия  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ , алюминат натрия  $\text{NaAlO}_2$ , оксихлорид алюминия  $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}$  и др.), железа (сульфаты железа:  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , хлорное железо  $\text{FeCl}_3$  и др.) или их смеси. В последнем случае достигается лучший результат. Кроме названных в качестве коагулянтов могут быть использованы алюминийсодержащие отходы производства, различные глины, травильные растворы, пасты, смеси, шлаки, содержащие кремнекислоту.

Скорость коагуляции зависит от концентрации электролита. В общем виде эта зависимость показана на рис. 2.29. При  $\psi = 1$  наступает быстрая коагуляция, при которой все столкновения частиц заканчиваются образованием агрегатов.

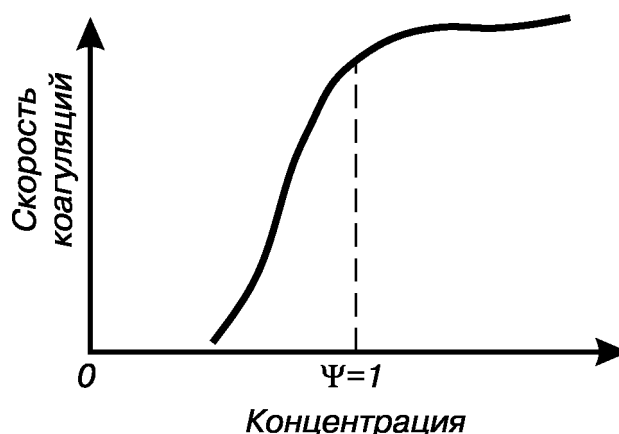


Рис. 2.29. Зависимость скорости коагуляции от концентрации электролита

В полидисперсных системах коагуляция происходит быстрее, чем в монодисперсных, так как крупные частицы при оседании увлекают за собой мелкие. На скорость коагуляции влияет также и форма частиц.

Например, удлиненные частицы коагулируют быстрее, чем шарообразные.

Для характеристики хлопьев пользуются понятием эквивалентного диаметра:

$$d_{\text{экв}} = 0,136 \sqrt{\frac{\nu V}{(\rho_{\text{хл}} - 1)k_{\text{ф}}}},$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость воды;  $V$  – скорость свободного осаждения;  $\rho_{\text{хл}}$  – плотность хлопьев;  $k_{\text{ф}}$  – коэффициент формы хлопьев.

$$\rho_{\text{хл}} = \rho_{\text{в}} + \delta_{\text{т}}(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{в}}).$$

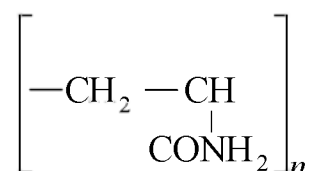
Здесь  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воды;  $\delta_{\text{т}}$  – объем твердого вещества в единице объема хлопьев;  $\rho_{\text{т}}$  – плотность твердой фазы.

Вследствие выделения газов из воды, а также в результате аэрации и флотации происходит газонасыщение хлопьев, уменьшающее их объемный вес и, соответственно, скорость осаждения.

Флокуляция отличается от коагуляции тем, что агрегация происходит не только при непосредственном контакте частиц в результате их столкновений, но и в результате взаимодействия молекул адсорбированного на частицах флокулянта – высокомолекулярных соединений, добавляемых в сточную воду.

Флокуляцию проводят для интенсификации процесса образования хлопьев гидроокисей алюминия и железа с целью повышения скорости их осаждения. Использование флокулянтов позволяет снизить дозы коагулянтов, сократить продолжительность процесса коагулирования и повысить скорость осаждения образующихся хлопьев.

К природным флокулянтам относятся крахмал, декстрин, эфиры, целлюлоза и др. Активная кремниевая кислота ( $x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ ) является наиболее распространенным неорганическим флокулянтом. Из синтетических органических флокулянтов наибольшее применение получил полиакриламид



технический (ПАА) и гидролизированный (ГПАА).

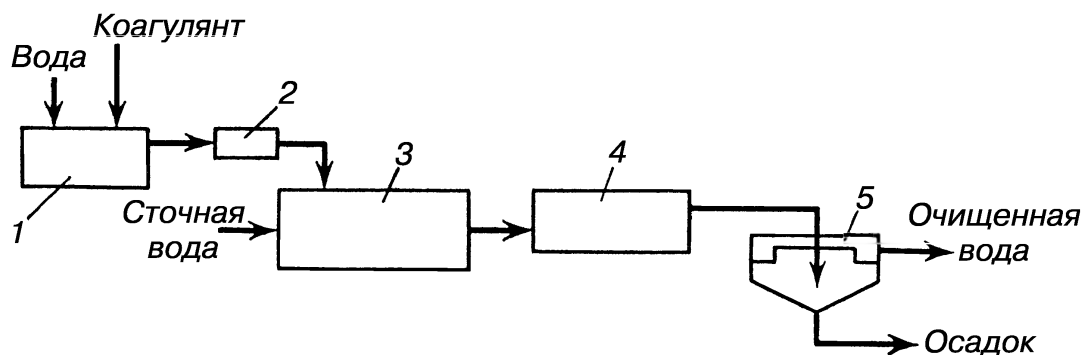


Рис. 2.30. Схема установки для очистки вод коагуляцией: 1 – емкость для приготовления растворов; 2 – дозатор; 3 – смеситель; 4 – камера хлопьеобразования; 5 – отстойник

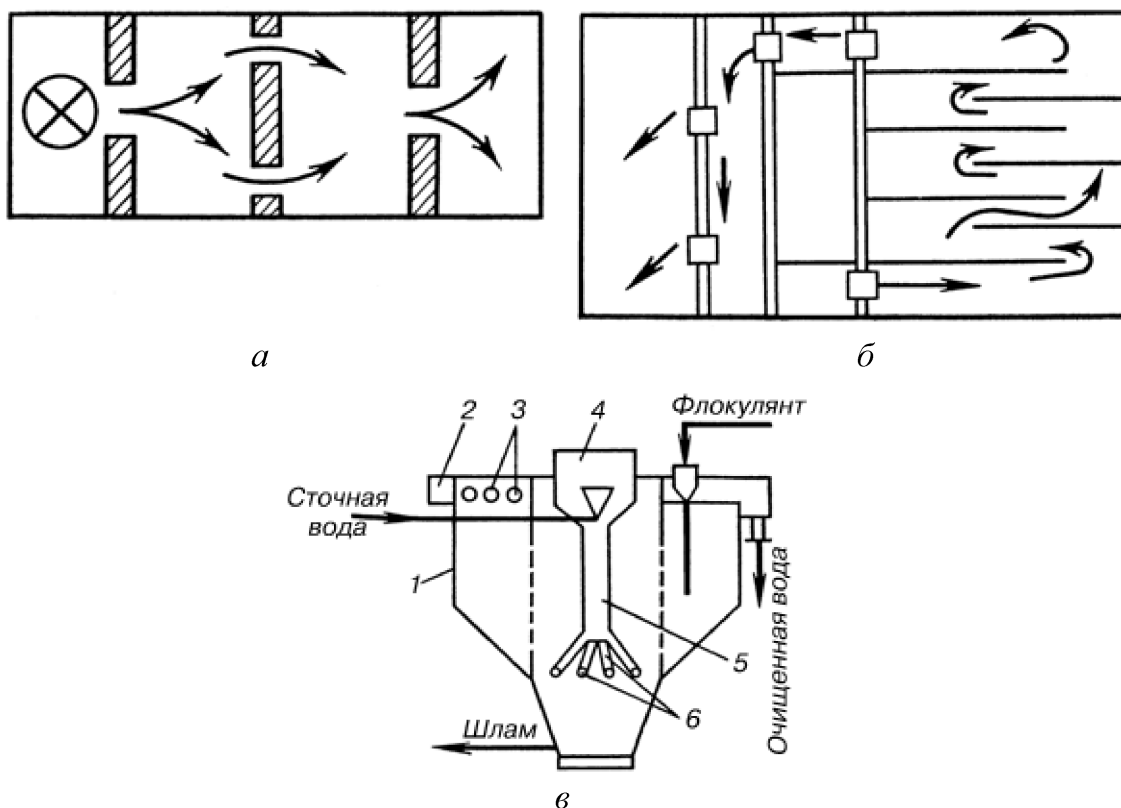


Рис. 2.31. Схемы аппаратов для очистки коагуляцией и флокуляцией: а – перегородчатый смеситель; б – перегородчатая камера хлопьеобразования; в – коагулятор-осветлитель; 1 – корпус; 2 – желоб; 3 – отверстия для удаления осветленной воды; 4 – воздухоотделитель; 5 – центральная труба; 6 – распределительные трубы

Эффективность любого флокулянта рассчитывают по формуле

$$\mathcal{E}_{\phi} = \frac{V_{\text{сф}} - V}{Vq},$$

где  $V_{\text{сф}}$ ,  $V$  – соответственно скорость осаждения сфлокулированного и несфлокулированного шлама;  $q$  – расход флокулянта в граммах на 1 т твердого вещества.

Механизм действия флокулянтов основан на следующих явлениях: адсорбции молекул флокулянта на поверхности коллоидных частиц; ретикуляции (образовании сетчатой структуры) молекул флокулянта; слипанию коллоидных частиц за счет сил Ван-дер-Ваальса.

Итак, процесс очистки сточных вод коагуляцией и флокуляцией состоит из дозировки и смешивания реагентов со сточной водой, хлопьеобразования и осаждения хлопьев (рис. 2.30). На рис. 2.31 показаны некоторые устройства для обеспечения проведения процесса очистки коагуляцией и флокуляцией.

### 2.11.3. Очистка вод окислителями и восстановителями

**Очистка вод окислителями** связана с большим расходом реагентов и поэтому применяется в тех случаях, когда вещества, загрязняющие воду, нельзя или нецелесообразно извлечь другими способами. Эти вещества, в данном случае в результате химических реакций, преобразуются в менее токсичные с последующим удалением их из воды. Очистка окислителями применяется, например, для очистки от цианистых соединений, растворенных соединений мышьяка и др.

Для очистки сточных вод используют следующие окислители: газообразный и сжиженный хлор, диоксид хлора, хлорную известь, гипохлориты кальция и натрия, перманганат калия, бихромат калия, перекись водорода, кислород, пероксосерные кислоты, озон, пирозюлит и др.

Способность веществ проводить окисление определяется величиной окислительного потенциала. Первое место из известных в природе окислителей занимает фтор, который, однако, из-за высокой агрессивности не может быть использован на практике. Окислительный потенциал для озона – 2,07, для хлора – 0,94, для перекиси водорода – 0,68, для перманганата калия – 0,59.

Хлор и вещества, содержащие активный хлор (сумма  $\text{Cl}_2 + \text{HOCl} + \text{OCl}^-$ ), являются наиболее распространенными окислителями. Их используют для очистки сточных вод от сероводорода, гидросульфида, метилсернистых соединений, цианидов, фенолов и др. При введении хлора в воду образуются хлорноватистая и соляная кислоты. Процесс проводят в хлораторах периодического и непрерывного действия, напорных и вакуумных. Принципиальная схема очистки хлорированием показана на рис. 2.32.

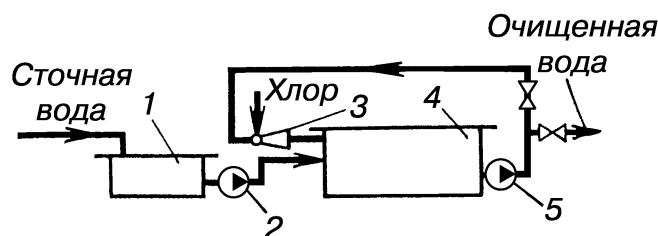


Рис. 2.32. Схема установки для очистки воды хлорированием:  
1 – усреднитель; 2, 5 – насосы; 3 – инжектор; 4 – емкость

При окислении сточных вод перекисью водорода (процесс проводится при интенсивном перемешивании или в барабанных аппаратах) легко разлагаются нитриты, нитрилы, альдегиды, фенолы, сульфаты.

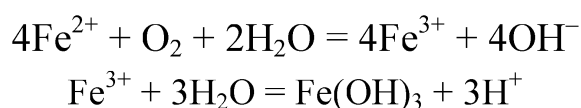
Обесцвечивание сточных вод, содержащих активные красители, при pH 7–10 протекает с высокой эффективностью. Присутствие катализаторов (солей  $\text{FeSO}_4$  и  $\text{CuSO}_4$ ) ускоряет процесс в 8–10 раз.

Потребность реагентов  $x_1$ , кг/сут, для окисления подсчитывается по формуле

$$x_1 = \frac{x_{\text{Cl}} Q n}{a},$$

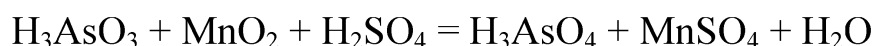
где  $x_{\text{Cl}}$  – расход активного хлора, необходимого для окисления цианидов;  $Q$  – расход воды;  $n$  – коэффициент избытка реагента (1,2–1,3);  $a$  – содержание активного хлора в реагенте.

Кислород воздуха эффективно используют при очистке воды от железа для окисления соединений двухвалентного железа в трехвалентное с последующим отделением от воды гидроокиси железа. Реакция окисления в водном растворе протекает по следующей схеме:



Окисление проводится аэрированием с отстаиванием и отфильтровыванием.

С помощью окисления пиролюзитом (природным материалом, состоящим в основном из двуокиси марганца) трехвалентный мышьяк окисляется в пятивалентный:



Озонирование представляет собой процесс абсорбции, сопровождаемый химической реакцией в жидкой фазе. Окисление озоном по-

звolyет одновременно обесцвечивать сточные воды, устранять привкусы и запахи и проводить обеззараживание. Озонированием можно очищать воду от фенолов, нефтепродуктов, сероводорода, соединений мышьяка, ПАВ, цианидов, красителей, канцерогенных ароматических углеводов, пестицидов и др.

Озон получают из кислорода воздуха в генераторах под действием электрического разряда. Для увеличения выхода озона воздух перед подачей в генератор осушают. Расход энергии на производство 1 кг озона из атмосферного воздуха составляет около 18 кВт/ч; из кислорода – 9 кВт/ч.

Действие озона в процессах окисления может происходить в трех различных направлениях:

непосредственное окисление с участием одного атома кислорода;

присоединение целой молекулы озона в окисляемое вещество с образованием озонидов;

каталитическое усиление окисляющего воздействия кислорода, присутствующего в озонированном воздухе.

Концентрация озона в подаваемой озоно-воздушной смеси – около 3 %. Для усиления процесса окисления смесь диспергируют в сточной воде на мельчайшие пузырьки газа.

Ультрафиолетовое облучение ускоряет окисление в  $10^2$ – $10^4$  раз, процесс очистки сокращается также при совместном использовании ультразвука. На рис. 2.33 показаны схемы некоторых аппаратов для озонирования.

**Методы восстановительной очистки** широко используются для удаления из сточных вод соединений ртути, хрома, мышьяка.

Неорганические соединения ртути восстанавливают до металлической ртути с последующим отделением её от воды отстаиванием, фильтрованием или флотацией. Органические соединения сначала окисляют с разрушением соединения, затем катионы ртути восстанавливают до металлической. Для этих процессов применяют сульфид железа, боргидрид натрия, гидросульфид натрия, гидрозин, железный порошок, сероводород, алюминиевую пудру и др.

Мышьяк в сточных водах находится в виде кислородосодержащих молекул и анионов, а также в виде анионов тиосолей  $\text{AsS}_2^-$ ,  $\text{AsS}_3^{3-}$ . Наиболее распространенным способом удаления мышьяка из сточных вод является осаждение его в виде труднорастворимых соединений (например, в виде трехокси мышьяка).

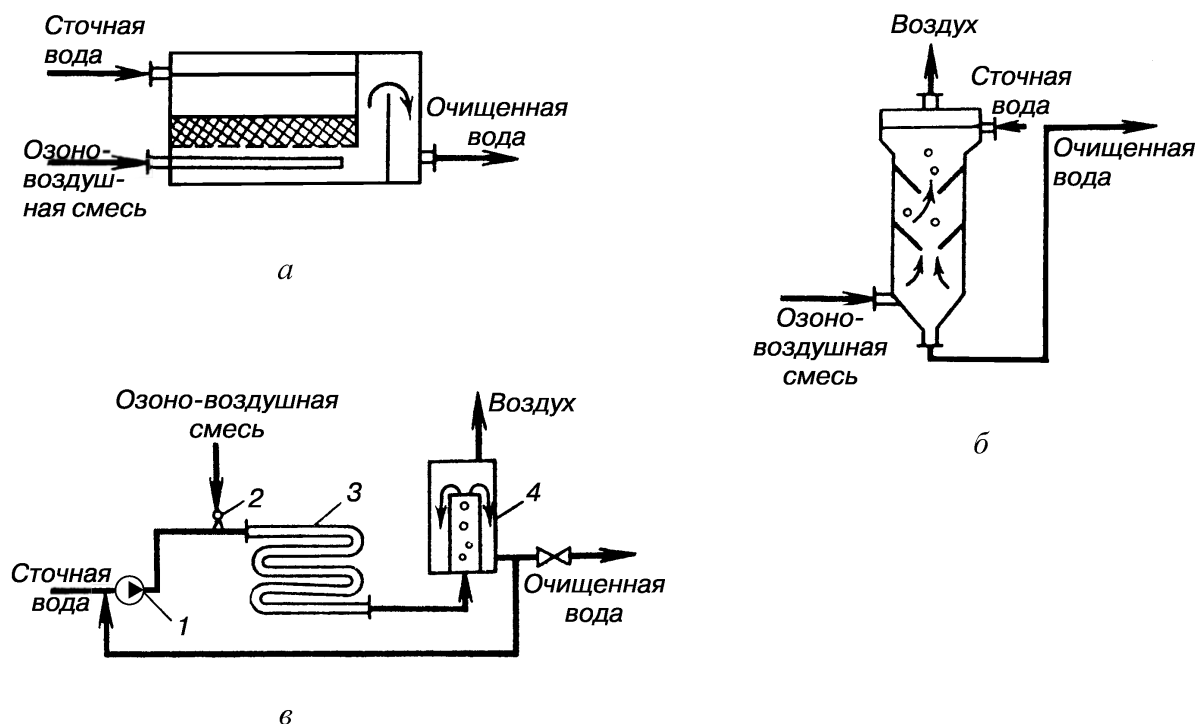
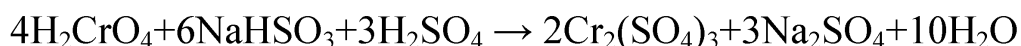
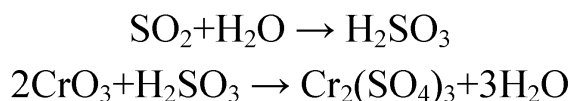


Рис. 2.33. Контактные аппараты для озонирования: *а* – с насадкой; *б* – барботажная колонна; *в* – со змеевиковым реактором: 1 – насос; 2 – инжектор-смеситель; 3 – змеевик; 4 – воздухоотделитель

Шестивалентный хром восстанавливается до трехвалентного с последующим осаждением в виде гидроокиси в щелочной среде. В качестве восстановителей могут быть использованы активный уголь, сульфат закисного железа, бисульфат натрия, водород, двуокись серы, отходы органических веществ (например, газетная бумага), пиритный огарок и др. На практике наиболее часто используют растворы бисульфата натрия:



Реакция протекает быстро при pH 3–4 и избытке серной кислоты. Наиболее быстро такие реакции протекают при pH 2–2,5. Восстановление двуокисью серы происходит по реакциям



Этот процесс является перспективным, так как дает возможность использовать отходящие газы, содержащие  $\text{SO}_2$ , одновременно очищая эти газы от двуокиси серы.



#### 2.11.4. Анодное окисление и катодное восстановление

Электрохимические методы (периодические и непрерывные) позволяют извлекать из сточных вод ценные продукты при относительно простой автоматизированной технологической схеме очистки без использования химических реагентов. Основной недостаток – большой расход электроэнергии.

Эффективность электрохимических процессов оценивается плотностью тока (отношением силы тока к поверхности электрода), напряжением, коэффициентом полезного использования напряжения, выходом по току, выходом по энергии. Напряжение электролизера

$$u = e_a - e_k + \Delta e_a + \Delta e_k + \Delta u_{\text{эл}} + \Delta u_{\text{диаф}},$$

где  $e_a$  и  $e_k$  – равновесные потенциалы анода и катода;  $\Delta e_a$  и  $\Delta e_k$  – величины анодной и катодной поляризации;  $\Delta u_{\text{эл}}$  и  $\Delta u_{\text{диаф}}$  – падения напряжения в электролите и диафрагме, определяемые по закону Ома:

$$\Delta u_{\text{эл}} = i\rho\delta.$$

Здесь  $i$  – плотность тока в сточной воде (при отсутствии пузырьков газа);  $\rho$  – удельное сопротивление;  $\delta$  – расстояние между электродами.

При выделении газовых пузырьков  $\Delta u_{\text{эл}}$  возрастает. Отношение

$$\eta_{\text{напр}} = \frac{e_a - e_k}{u}$$

называют *коэффициентом полезного использования напряжения*.

Выход по току – это отношение теоретически необходимого количества электричества (по закону Фарадея) к практически затраченному, которое выражается в процентах.

На рис. 2.34 показаны примерные схемы процессов электрохимической очистки. Эти процессы разработаны для удаления из сточных вод цианидов, роданидов, аминов, спиртов, альдегидов, нитросоединений, азокрасителей, сульфидов, маркаптанов и др.

На аноде ионы отдают электроны, т. е. протекает реакция электрохимического окисления; на катоде происходит присоединение электронов, т. е. протекает реакция восстановления. Эти вещества в процессах электрохимического окисления полностью распадаются с образованием  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  и воды или образуют более простые и нетоксичные вещества, которые можно удалить другими методами.

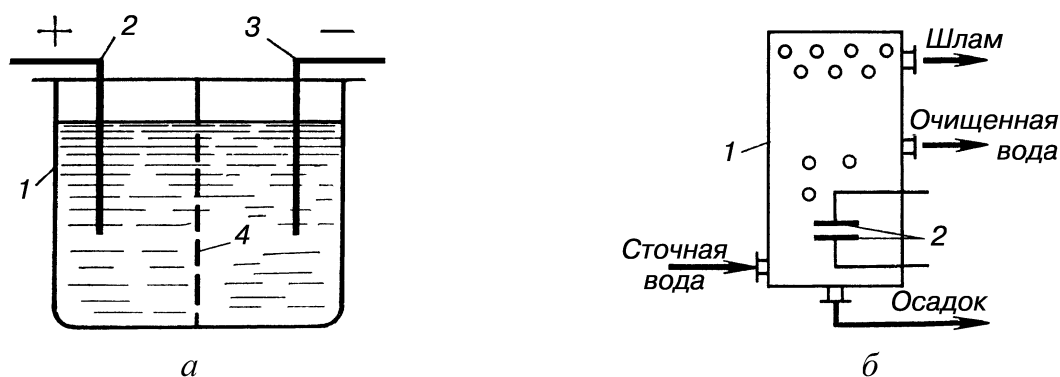


Рис. 2.34. Аппараты для электрохимической очистки сточных вод: *а* – электролизер: 1 – корпус; 2 – анод; 3 – катод; 4 – диафрагма; *б* – однокамерная электрофлотационная установка: 1 – корпус; 2 – электроды

В качестве анодов используют различные электролитические нерастворимые материалы (графит, магнезит, двуокиси свинца, марганца и рутения), которые наносятся на титановую основу. Катоды изготавливают из молибдена, сплава вольфрама с железом или никелем, из графита, нержавеющей стали и других металлов, покрытых молибденом, вольфрамом или их сплавами.

Процесс проводят в электролизерах с диафрагмой или без неё. Кроме основных процессов электроокисления и восстановления одновременно могут протекать электрофлотация, электрофорез и электрокоагуляция.

Параметры процесса, материалы электродов и тип аппарата выбирают исходя из состава сточных вод с целью оптимального проведения электрохимических реакций.

### 2.11.5. Электрокоагуляция

При прохождении сточной воды через межэлектродное пространство электролизера происходит электролиз воды, поляризация частиц, электрофорез, окислительно-восстановительные процессы, взаимодействие продуктов электролиза друг с другом.

При использовании нерастворимых электродов коагуляция может происходить в результате электрофоретических явлений и разряда заряженных частиц на электродах, образования в растворе таких веществ, как хлор, кислород, разрушающих сольватные слои на поверхности частиц. Такой процесс можно использовать для очистки вод при невысоком содержании коллоидных частиц и низкой устойчивости загрязнений.

Для очистки от высокоустойчивых загрязнений проводят электролиз с использованием растворимых стальных или алюминиевых

анодов. Под действием тока происходит растворение металла, в результате чего в воду переходят катионы железа или алюминия, которые, встречаясь с гидроксильными группами, образуют гидраты окисей металлов в виде хлопьев, – наступает интенсивная коагуляция.

На процесс электрокоагуляции оказывают влияние материал электродов, расстояние между ними, скорость движения воды между электродами, её температура и состав, напряжение и плотность тока. С повышением концентрации взвешенных веществ более 100 мг/л эффективность электрокоагуляции снижается.

При всех преимуществах электрохимической очистки недостатком этого метода является повышенный расход металла и электроэнергии.

### 2.11.6. Электрофлотация

В процессе электрофлотации очистка сточных вод от взвешенных частиц проходит при помощи пузырьков газа, образующихся при электролизе воды. На аноде возникают пузырьки кислорода, на катоде – пузырьки водорода. Извлечение загрязнений происходит в результате прилипания к частицам поднимающихся в воде пузырьков (диаметром от 20 до 100 мкм, причем основную роль играют значительно меньшие по размеру пузырьки водорода), а также образования на поверхности частичек пузырьков из перенасыщенного газом раствора. При использовании растворимых электродов образуются хлопья коагулянтов и пузырьки газа, что способствует более эффективной флотации.

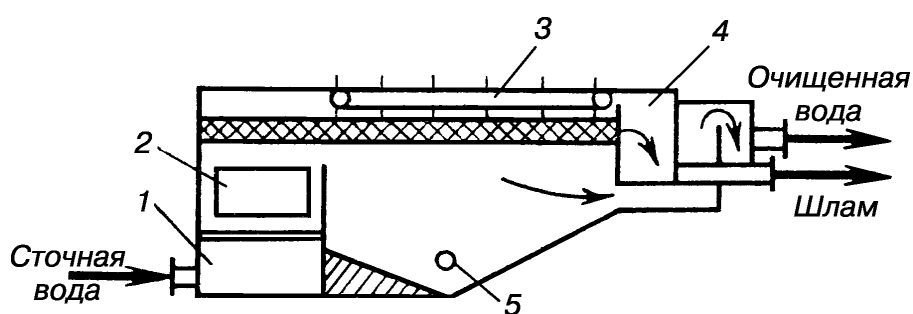


Рис. 2.35. Горизонтальный электрофлотатор: 1 – впускная камера; 2 – электроды; 3 – скребок; 4 – шламоприемник; 5 – патрубок для выпуска осадка

При небольших объемах сточных вод (10–15 м<sup>3</sup>/г) электрофлотационные установки могут быть однокамерными (рис. 2.35), при больших – двухкамерными (которые могут быть горизонтальными и вертикальными), состоящими из электродного отделения и отстойной части.

### 2.11.7. Электродиализ

Процесс очистки сточных вод электродиализом основан на разделении ионизированных веществ под действием электродвижущей силы, создаваемой в растворе по обе стороны от мембран (рис. 2.36). Этот процесс широко используется для опреснения соленых вод, а в последнее время – и для их очистки.

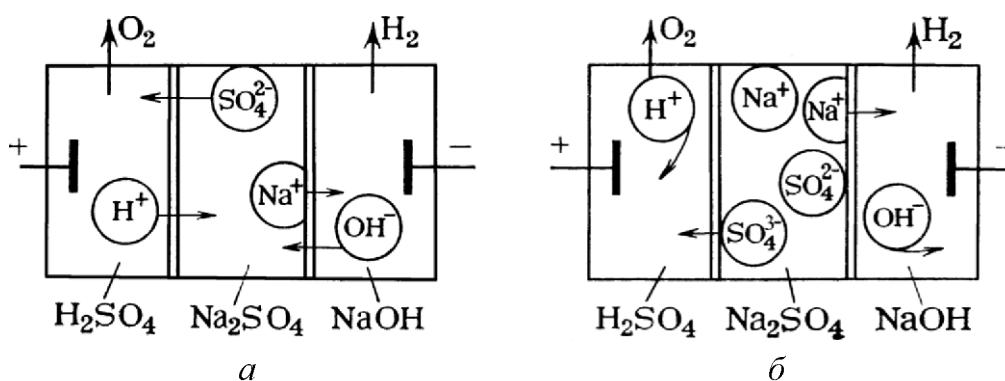


Рис. 2.36. Схемы электродиализа:

а – с пористыми диафрагмами; б – с ионитовыми мембранами

В среднюю камеру электродиализатора, отделенную от анодного и катодного пространств диафрагмами (рис. 2.36, а), заливают раствор. Анионы током переносятся в анодное пространство, а катионы – в катодное. На катоде выделяется водород и образуется щелочь, на аноде выделяется кислород с образованием кислоты. По мере прохождения тока концентрация солей в средней камере уменьшается до близкой к нулю.

При использовании электрохимически активных (ионообменных) диафрагм повышается эффективность процесса и снижается расход электроэнергии. Ионообменные мембраны проницаемы только для ионов, имеющих заряд того же знака, что у подвижных ионов.

В электролизаторе (рис. 2.36, б) одна из мембран ионообменная и пропускает в анодную зону анионы, а другая – катионообменная – расположена со стороны катода и пропускает катионы в катодное пространство. Обычно электролизеры для очистки воды делают многокамерными (100–200 камер) с чередующимися катионо- и анионопроницаемыми мембранами. Электроды помещают в крайних камерах.

## **2.12. Термические методы очистки сточных вод**

Для обезвреживания минерализованных сточных вод в основном используют термические методы, которые позволяют выделить из стоков соли (кальция, магния, натрия и др.) с получением условно чистой воды, пригодной для оборотного водоснабжения. Процесс может быть проведен в две стадии: концентрирование и выделение сухих веществ. Во многих случаях вторая стадия заменяется захоронением концентрированных растворов.

Требования к установкам термического обезвреживания:

обеспечение снижения концентрации вредных веществ в очищаемой воде до значений, меньших ПДК;

незначительная чувствительность к составу стоков;

надежность и экономичность в работе;

высокая производительность.

Выбор методов очистки зависит от состава, концентрации и объема сточных вод, их коррозионной активности и необходимой степени очистки.

### **2.12.1. Концентрирование сточных вод**

Этот способ очистки может быть реализован в выпарных и адиабатных испарительных аппаратах, а также в кристаллогидратных установках и установках вымораживания.

Выпарные установки могут быть одно- и многокорпусными. Наибольшее распространение имеют 4–5-корпусные установки с расходом тепла по пару 600 кДж на 1 кг влаги. Для упаривания сточных вод ряда производств (синтетических смол, лаков и красок, люминофоров, реактивов и др.) применяют выпарные установки с контактными аппаратами, в которых осуществляется непосредственный контакт между теплоносителями и сточной водой. Для нагрева могут быть использованы газообразные, жидкие и твердые теплоносители.

В одноступенчатых установках испарение происходит в аппарате, образующиеся пары уносятся теплоносителем, или в контактном аппарате происходит лишь нагревание воды, а испарение – в адиабатной ступени (рис. 2.37, *а, б*). Наибольшее распространение получили контактные аппараты: с погружными горелками, барботажные, тарельчатые, насадочные, форсуночные, полочные. Отложение солей на поверхностях теплообмена приводит к увеличению расхода тепла и снижению эффективности процесса.

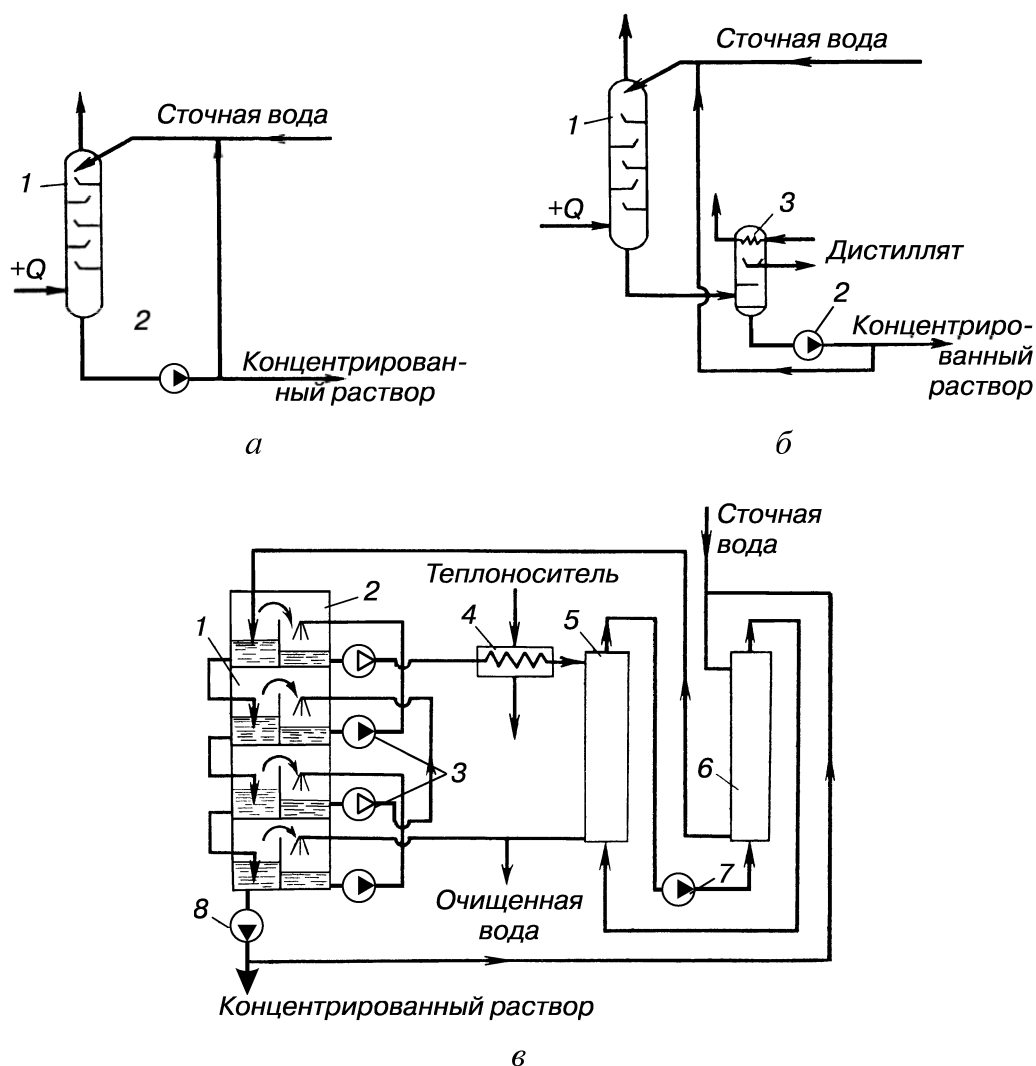


Рис. 2.37. Схемы выпарных установок: *а, б* – одноступенчатых контактных соответственно с испарением в камере контактного теплообменника и в адиабатной ступени: 1 – контактные теплообменники; 2 – насосы; 3 – адиабатный испаритель; *в* – с гидрофобным теплоносителем: 1 – ступень адиабатного испарителя; 2 – конденсатор смешения; 3, 7, 8 – насосы; 4 – подогреватель; 5, 6 – контактные теплообменники

В многоступенчатых установках с гидрофобным теплоносителем (рис. 2.37, *в*) нагревание и испарение сточных вод происходит вследствие контакта с жидким гидрофобным теплоносителем (парафины различных типов, минеральные масла, силиконы и т. п.), который должен быть практически нерастворим в воде, не образовывать эмульсий, не сорбировать растворенные в воде соли, хорошо отделяться от воды, быть термически устойчивым и иметь высокую теплоемкость. В подобных установках возможно упаривать сточные воды до высоких концентраций, при этом исключая отложение солей на теплообменных поверхностях, уменьшая коррозию оборудования.

На рис. 2.38 показаны примерные схемы адиабатных испарительных установок, называемых *установками мгновенного испарения* (УМИ). В них раствор концентрируется за счет испарения перегретой жидкости, подаваемой в камеру, давление в которой ниже давления насыщения, соответствующего температуре поступающей в камеру жидкости.

Производительность одноступенчатой УМИ вычисляется по формуле

$$w = Qc(T' - T_n)/q_{\text{ст}},$$

где  $Q$  – расход жидкости;  $c$  – теплоемкость раствора;  $T'$  и  $T_n$  – соответственно температура раствора на выходе подогревателя и в камере испарения;  $q_{\text{ст}}$  – теплота испарения пара в ступени.

Удельный расход пара для одной ступени  $\sim 1$  кг/кг. Для снижения расхода пара используют многоступенчатые УМИ (рис. 2.38, б).

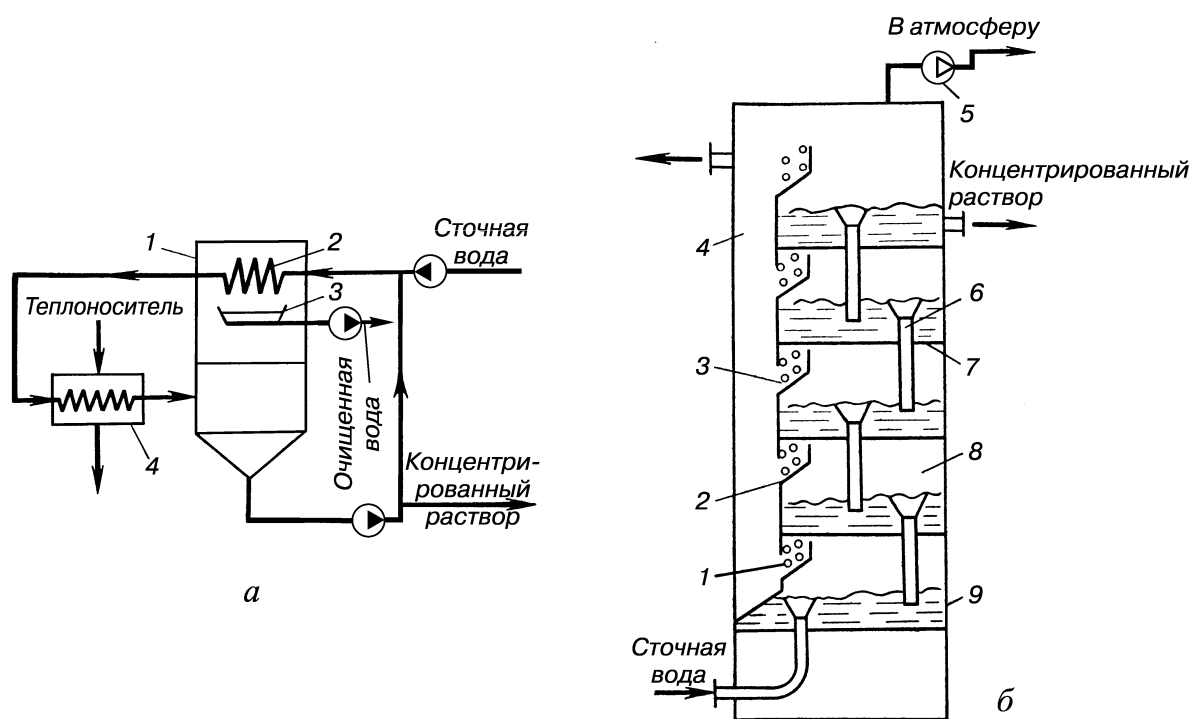


Рис. 2.38. Схемы адиабатных испарительных установок: а – одноступенчатой: 1 – камера испарения; 2 – конденсатор; 3 – поддон; 4 – подогреватель; б – вертикальной: 1 – конденсатор; 2 – желоб; 3 – канал для отвода конденсата; 4 – вертикальный канал; 5 – вакуумный насос; 6 – переточная труба; 7 – перегородка; 8 – испарительная камера; 9 – корпус

Концентрирование минерализованных вод проводят и на установках вымораживания (рис. 2.39). Их действие основано на том, что

концентрация солей в кристаллах льда значительно меньше, чем в растворе (теоретически образуется пресный лед). Вымораживание можно проводить под вакуумом либо при помощи специального холодильного агента.

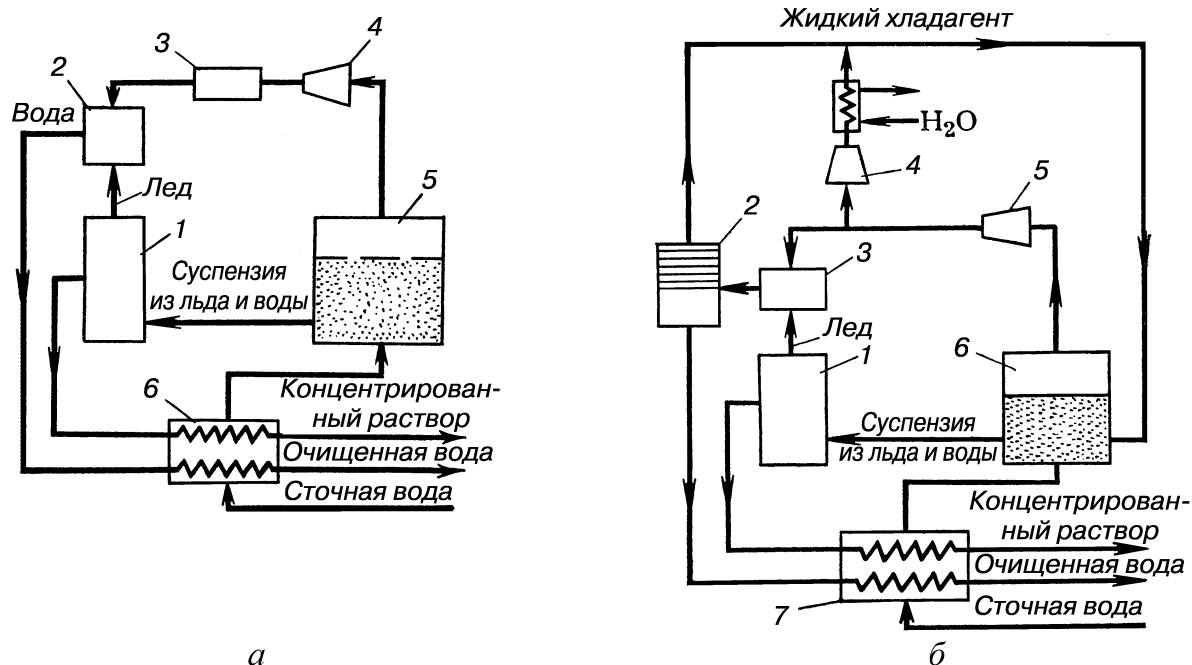


Рис. 2.39. Схемы установок концентрирования растворов вымораживанием: *а* – под вакуумом: 1 – промывная колонна; 2 – конденсатор-плавитель; 3 – вспомогательная холодильная установка; 4 – компрессор; 5 – кристаллизатор; 6 – теплообменник; *б* – при контактном вымораживании: 1 – промывная колонна; 2 – смеситель; 3 – конденсатор-плавитель; 4 – вспомогательный компрессор; 5 – главный компрессор; 6 – кристаллизатор; 7 – теплообменник

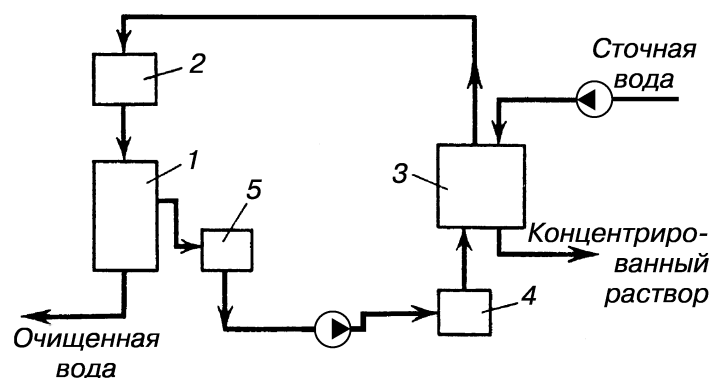


Рис. 2.40. Схема установки для очистки воды методом гидратообразования: 1 – сепаратор; 2 – камера плавления; 3 – камера гидратообразования; 4 – емкость; 5 – конденсатор



Кристаллогидратный процесс состоит в концентрировании сточной воды с гидратообразующим агентом М (пропан, хлор,  $\text{CO}_2$  и др.) и образовании кристаллогидратов, имеющих формулу  $\text{M} \cdot n \cdot \text{H}_2\text{O}$ . При переходе молекулы воды в кристаллогидраты концентрация растворенных в воде веществ повышается. При плавлении кристаллов образуется вода, из которой выделяются пары гидратообразующего агента. Процесс может проходить при температуре выше и ниже температуры окружающей среды. Получение чистой воды может быть осуществлено по схеме, показанной на рис. 2.40.

Преимущества вымораживающих и кристаллогидратных установок: низкий расход энергии (9–12 (кВ·ч)/м<sup>3</sup>), возможность обезвреживания вод различного состава. Недостатки: применение дорогостоящих теплоносителей; усложнение технологического процесса; невысокая степень концентрирования раствора из-за трудности разделения кристаллов льда и вязкой суспензии; повышение расхода энергии с увеличением степени концентрирования раствора вследствие понижения температуры замерзания при увеличении концентрации раствора.

### **2.12.2. Термоокислительные методы обезвреживания жидких отходов**

По теплотворной способности химические промстоки делят на способные гореть самостоятельно и на воды, к которым для термоокислительного обезвреживания необходимо добавлять топливо. Последние имеют энтальпию ниже 2 000 ккал/кг.

При использовании термоокислительных методов все загрязняющие органические вещества полностью окисляются кислородом воздуха при высоких температурах до нетоксичных соединений. К этим методам относятся: метод жидкофазного окисления, метод парофазного каталитического окисления и пламенный, или огневой, метод.

**Метод жидкофазного окисления** основан на окислении органических веществ, растворенных в воде, кислородом при температуре 100–350 °С и давлении 2–28 МПа (для увеличения растворимости  $\text{O}_2$  в воде и, следовательно, интенсификации процесса). Принципиальная схема этого процесса показана на рис. 2.41.

Отличительными особенностями метода являются: высокая производительность без предварительного концентрирования; отсутствие в продуктах окисления вредных органических веществ; легкость ком-

бинирования с другими методами и безопасность при его применении. Среди недостатков – неполное окисление некоторых химических веществ; значительные капитальные затраты и высокая коррозия оборудования в кислых средах.

В основе **метода парофазного каталитического окисления** лежит гетерогенное каталитическое окисление кислородом воздуха при высокой температуре летучих органических веществ, находящихся в промстоках. Процесс протекает весьма интенсивно в паровой фазе в присутствии медно-хромового, цинкхромового, медно-марганцевого или другого катализатора и проводится на установках, одна из которых схематично представлена на рис. 2.42.

Степень очистки достигает 99,98 % при высокой производительности. Основной недостаток – возможность отравления катализаторов соединениями фосфора, фтора, серы, что требует предварительного удаления из сточных вод каталитических ядов.

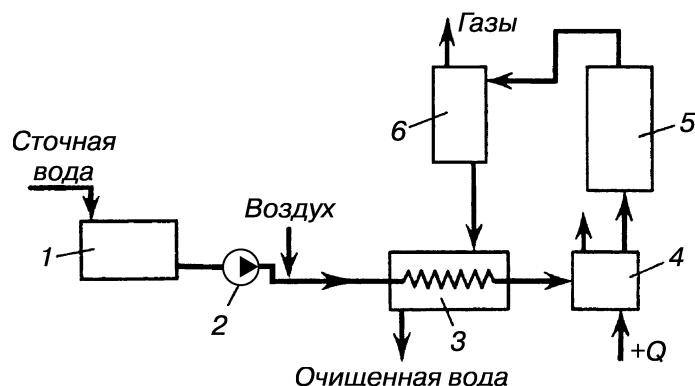


Рис. 2.41. Схема установки для жидкофазного окисления:  
1 – сборник; 2 – насос; 3 – теплообменник; 4 – печь; 5 – реактор; 6 – сепаратор

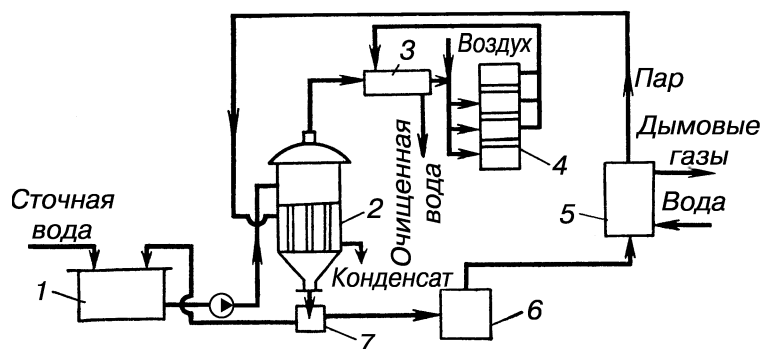


Рис. 2.42. Схема установки для очистки сточных вод каталитическим окислением:  
1 – емкость; 2 – выпарной аппарат; 3 – теплообменник; 4 – контактный аппарат;  
5 – котел-утилизатор; 6 – печь; 7 – центрифуга

Наиболее эффективным и универсальным является так называемый **огневой метод**, заключающийся в распылении сточных вод непосредственно в топочные газы, нагретые до температуры 900–1000 °С. При этом вода полностью испаряется, а органические примеси сгорают. Минеральные вещества, содержащиеся в воде, образуют твердые или расплавленные частицы, которые затем улавливаются.

Огневой метод может быть использован для обезвреживания небольшого объема сточных вод, содержащих высокотоксичные органические вещества, очистка от которых другими способами невозможна или неэффективна, и нецелесообразен для обезвреживания стоков, содержащих только минеральные вещества. Кроме того, этот метод предпочтителен, если имеются горючие отходы, которые можно использовать как топливо.

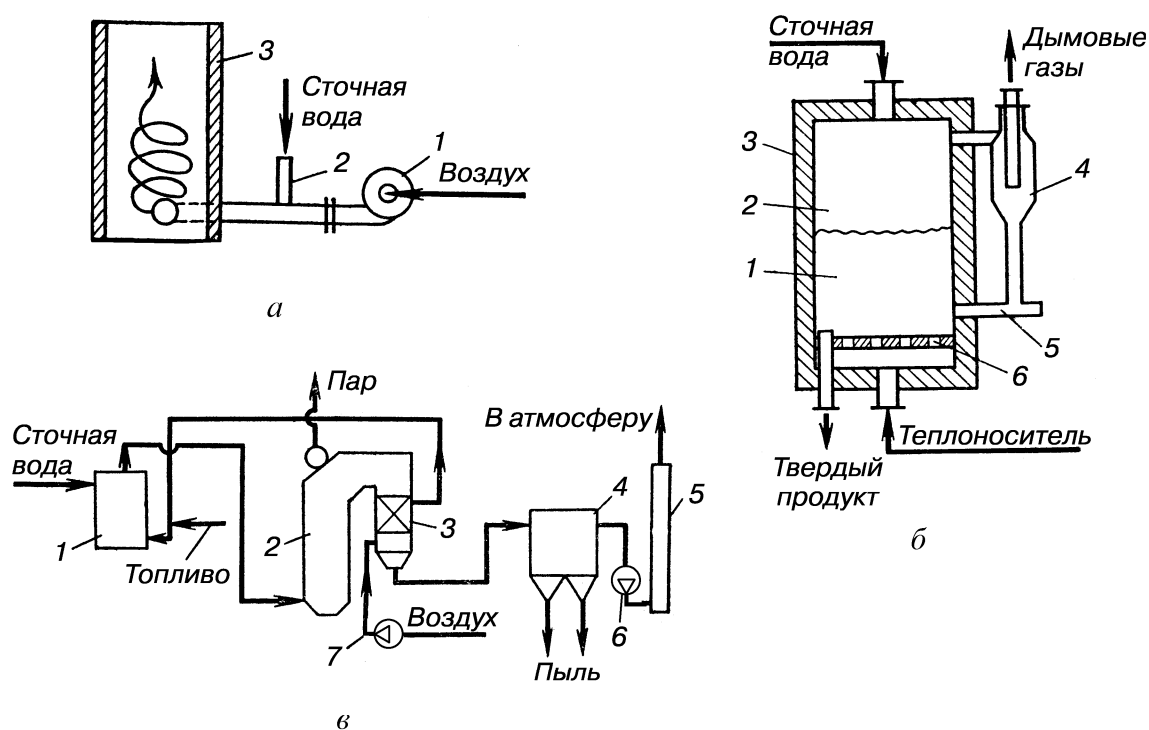
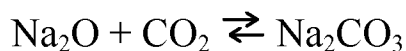


Рис. 2.43. Схемы устройств для огневого обезвреживания сточных вод: *а* – циклонная печь: 1 – воздуходувка; 2 – питающее устройство; 3 – печь; *б* – печь с псевдоожиженным слоем: 1 – плотная фаза ожиженного слоя; 2 – разбавленная фаза; 3 – печь; 4 – циклон; 5 – труба для возврата материала; 6 – газораспределительная решетка; *в* – печь с котлом-утилизатором: 1 – печь; 2 – котел-утилизатор; 3 – воздухоподогреватель; 4 – аппарат сухой очистки газов; 5 – труба; 6 – дымосос; 7 – воздуходувка

В процессе обезвреживания промстоков различного состава могут образовываться окиси щелочных и щелочно-земельных металлов

(CaO, MgO, BaO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O и др.). Некоторые из них могут взаимодействовать с компонентами дымовых газов, например:



При диссоциации хлоридов в дымовых газах содержатся хлор и хлористый водород. Органические соединения, включающие в себя серу, фосфор, галогены, могут образовывать SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, HCl, Cl<sub>2</sub> и др., что вызывает коррозию аппаратуры и является нежелательным в дымовых газах. Из сточных вод, содержащих нитросоединения, могут выделяться различные окислы азота. При сложном взаимодействии этих веществ в газовой фазе могут образовываться новые соединения, в том числе и токсичные, что необходимо учитывать при удалении газов в атмосферу.

Для проведения процесса огневого обезвреживания в зависимости от консистенции и состава сточных вод применяют печи различной конструкции: камерные, шахтные, циклонные и с псевдоожиженным слоем. Камерные и шахтные печи (используются для сжигания сульфидных шлаков, сточных вод анилиноокрасочной промышленности и др.) малопродуктивны, громоздки и капиталоемки. Наиболее эффективны циклонные печи и печи с псевдоожиженным слоем (рис. 2.43).

## **2.13. Биохимические методы очистки сточных вод**

Биохимические методы очистки сточных вод используются для очистки хозяйственно-бытовых и промышленных стоков от многих органических и неорганических веществ (сероводорода, сульфидов, аммиака, нитритов и др.). Процесс основан на способности микроорганизмов использовать эти вещества для питания в ходе своей жизнедеятельности – органические вещества для микроорганизмов являются источником углерода.

Контактируя с органическими веществами, микроорганизмы частично разрушают их, превращая в воду, двуокись углерода, нитрит- и сульфат-ионы и др. Другая часть вещества идет на образование биомассы. Разрушение органических веществ называют *биохимическим окислением*.

Известны аэробные и анаэробные методы биохимической очистки сточных вод. Аэробный метод основан на использовании аэробных групп микроорганизмов, для жизнедеятельности которых необ-

ходим постоянный приток кислорода и температура 20–40 °С. При изменении кислородного и температурного режимов меняется состав и число микроорганизмов. При аэробной очистке микроорганизмы культивируются в активном иле или биопленке. Аэробные процессы могут протекать в естественных условиях (на полях орошения, полях фильтрации и в биологических прудах) и в специальных сооружениях (аэротенки и биофильтры различных конструкций).

Анаэробные процессы биохимической очистки протекают без доступа кислорода и используются для сбраживания осадков, образующихся при биохимической очистке производственных сточных вод, а также как первая ступень очистки очень концентрированных промстоков, содержащих органические вещества, которые разрушаются анаэробными бактериями в процессе брожения. В зависимости от конечного вида продукта различают следующие виды брожения: спиртовое, пропионово-кислое, молочнокислое, метановое и др. Конечными продуктами брожения являются спирты, кислоты, ацетон, газы брожения ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ).

Обработка осадков производится методами уплотнения (гравитационным, флотационным, центробежным и вибрационным), стабилизации, кондиционирования, обезвоживания, а также термическими методами.

## **2.14. Проблема безотходного водопользования на ТЭС и пути ее решения**

Теплоэнергетика является одним из крупнейших водопользователей и вносит заметный вклад в загрязнение природных водоемов: попадая в природные водоемы, сточные воды ТЭС изменяют качество и состав воды, влияют на флору и фауну, затрудняют использование воды на промышленные и бытовые нужды, а иногда делают ее совершенно непригодной для дальнейшего применения.

В настоящее время обозначилась четкая тенденция перехода на строительство ТЭС с высокими экологическими показателями. При создании такой ТЭС представляется целесообразной разработка безотходной системы водопользования, предусматривающей минимальный забор воды из водоемов, исключая сброс жидких стоков и выводящий отходы в виде конечных товарных продуктов. Такой подход к водопользованию позволит не только затормозить процесс загрязнения среды или стабилизировать сложившееся положение, но и обеспечить постепенное улучшение экологической обстановки в районе сооружения ТЭС.

Рассмотрим водоподведение и водоотведение для реальной промышленно-отопительной ТЭЦ с установленной мощностью 1040 МВт, работающей на твердом топливе. При этом все водопользование условно можно разбить на пять систем или контуров: паровой (термодинамический) контур, система пароснабжения промпредприятий, система теплоснабжения, система охлаждения конденсаторов турбин, система гидрозолоудаления. Выбранная в качестве примера ТЭЦ имеет наиболее напряженный водный баланс. Вместе с тем полученные результаты расчета можно использовать для оценки водоподведения и водоотведения и для конденсационной электростанции (КЭС) эквивалентной установленной мощности (около 1000 МВт).

Учитывая, что КЭС, как правило, не используется для подачи пара на технологические нужды предприятий и на КЭС существенно меньше, чем на ТЭЦ, тепловая отопительная нагрузка горячего водоснабжения, можно исключить из водного баланса водопотребление и водоотведение на нужды пароснабжения промпредприятий и теплоснабжение населенных пунктов. В этом случае водопотребление без учета подачи воды внешним потребителям в неотопительный период для ТЭЦ составит 2043–2669 м<sup>3</sup>/ч, водоотведение – 654–915 м<sup>3</sup>/ч, а для КЭС – 2224–2345 и 632–655 м<sup>3</sup>/ч соответственно.

Вместе с тем в результате рационального водопользования на тепловой электростанции можно заметно сократить как водоподведение, так и водоотведение от ТЭС. К числу первоочередных можно отнести мероприятия по сокращению объема безвозвратных потерь воды, а также по сокращению расхода воды на собственные нужды и повторное использование стоков на ТЭС.

Так, например, продувку котлов парового контура можно повторно использовать для уменьшения расхода питательной воды паропреобразовательной установки системы пароснабжения промпредприятий. В свою очередь, продувку паропреобразовательной установки можно использовать для уменьшения расхода воды в системе охлаждения конденсаторов. Засоленные сточные воды водоподготовительных установок, а также стоки после консервации и промывки оборудования можно в ряде случаев использовать для сокращения водопотребления в системе гидрозолоудаления или в системе водоподготовки; воды, загрязненные нефтепродуктами, можно повторно применять как в системе гидрозолоудаления, так и в циркуляционной системе (после предварительной очистки).

Засоленные и частично очищенные загрязненные нефтепродуктами сточные воды можно использовать для подготовки добавочной

воды энергетических котлов термическим методом и питательной воды паропреобразовательных установок. В итоге расход воды на ТЭЦ можно довести до 1810–2071 м<sup>3</sup>/ч, водоотведения – до 61–243 м<sup>3</sup>/ч, а на КЭС – до 2000 и 300 м<sup>3</sup>/ч соответственно.

Дальнейшего сокращения водоотведения от ТЭЦ можно добиться за счет других мероприятий по рационализации использования воды на ТЭЦ, например: за счет сокращения расходов стоков от кислотных промывок оборудования, за счет поддержания оптимального водного режима в цикле, сокращения продувки из циркуляционной системы в результате эффективной обработки подпиточной воды и т. д.

Вместе с тем можно сделать вывод, что замкнутый баланс водопользования без сброса сточных вод можно организовать при определенных условиях только для промышленно-отопительной ТЭЦ. К таким условиям, кроме климатических, относят: организацию замкнутых контуров для всех пяти рассмотренных систем водопользования и применение термического метода водоподготовки, получение добавочной воды из исходной и сточных вод станции. Для КЭС не представляется возможным свести к нулю водоотведение без организации безопасной очистки стоков, например продувки циркуляционной системы. Для этого целесообразно применить, например, прямоточную электродиализную установку, способную снизить солесодержание стоков в 2–3 раза.

К числу наиболее радикальных путей сокращения водопотребления и водоотведения с ТЭС можно отнести такие, как замена системы гидрозолоудаления на систему пневмотранспорта, замена в системе охлаждения конденсаторов испарительных градирен на сухие градирни. В результате для КЭС резко снижается как водопотребление, так и водоотведение.

Дополнительные трудности в создании систем водоподготовки возникают на экологически чистых ТЭЦ. Связаны они с необходимостью десульфуризации и денитрификации дымовых газов, которые, как правило, сопровождаются дополнительным водопотреблением и водоотведением. Освоенные за рубежом (США, Германия, Япония и др.) системы мокрой газоочистки дымовых газов от окислов серы в скрубберах с применением извести или известняка потребляют большое количество воды. На электростанции мощностью 1000 МВт дополнительный расход воды на десульфуризационную установку может достигать 230 м<sup>3</sup>/ч.

Определенные преимущества по сравнению с освоенными методами газоочистки имеют разрабатываемые в настоящее время методы

очистки, практически исключаящие использование воды или сводящие его к минимуму. К их числу можно отнести каталитические методы одновременной очистки газа от оксидов серы и азота, применение активного кокса, облучение дымовых газов потоком электронов и др.

Определенные преимущества с точки зрения защиты окружающей среды дает также применение на ТЭС котельных агрегатов с псевдоожиженным кипящим слоем, работающих на углях с подмешанным к нему известняком. Наиболее радикальным путем сокращения водопотребления на ТЭС является переход на газификацию угля и реализацию на ТЭС комбинированного парогазового цикла. Такая тепловая электрическая станция, наряду с высоким КПД и фактически отсутствующими вредными выбросами в атмосферу, требует меньшего количества воды, так как часть электроэнергии вырабатывается газовой турбиной, которая практически не нуждается в воде.



### **3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

#### **3.1. Взаимодействие энергоустановок с компонентами окружающей среды**

Промышленные предприятия энергетического комплекса следует рассматривать как источники комплексного и концентрированного воздействия на окружающую среду прежде всего через гидро-, лито- и атмосферу. Последствия такого воздействия нередко проявляются на значительном удалении от источников. Обмениваясь с окружающей средой веществом, энергией, информацией, промышленные предприятия формируют единую природно-техническую систему, или технобиогеоценоз. Взаимодействие осуществляется путем переноса, за счет гидравлической связи, фильтрации, сорбции, хемосорбции, осаждения и испарения.

Во всех процессах технической деятельности человека, начиная от добычи топлива и кончая использованием энергоресурсов, идет непрерывная цепь энергетических превращений. В итоге, в силу закона сохранения, природе неизбежно отдается ровно столько энергии, сколько ее забирают первоначально, но уже в другой форме – отработанной.

Поступательное развитие промышленного и сельскохозяйственного производства постоянно изменяет структуру энергопотребления, рост которого на душу населения является одним из важнейших показателей развития энергетики. Представление об изменении суммарного годового потребления энергетических ресурсов в мире дает рис. 3.1.

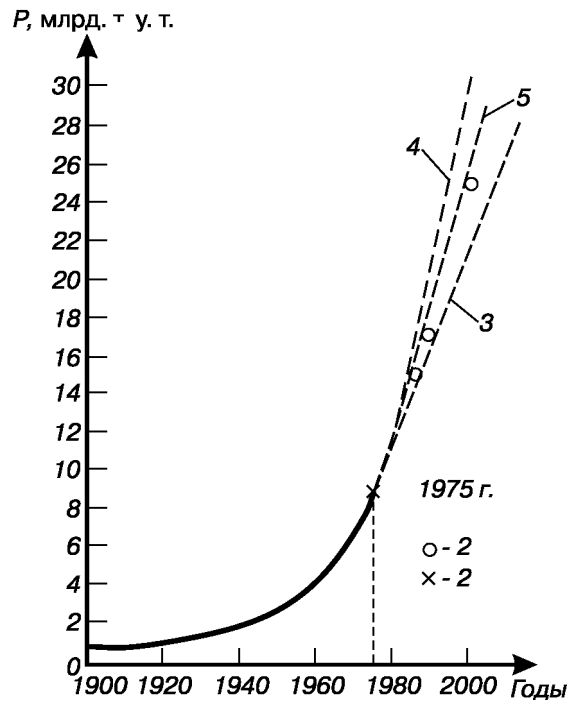


Рис. 3.1. Мировое потребление энергоресурсов: 1(x) – уровень 1975 года; 2(o) – по данным МИРЭК-IX; 3 – по данным С. М. Фейнберга; 4 – по данным Б. М. Томашевского; 5 – по данным С. Л. Прузнера

Энергетические объекты воздействуют на все сферы Земли. Например, по данным различных источников, можно выделить несколько групп наиболее важных взаимодействий энергоустановок с конденсированными компонентами окружающей среды:

1. Водопотребление и водопользование, обуславливающие изменение естественного материального баланса водной среды (перенос солей, питательных веществ и др.).

2. Осаждение на поверхности твердых выбросов продуктов сгорания органических топлив из атмосферы, вызывающее изменение свойств воды, ее цветности, альбедо и пр.

3. Выпадение на поверхность в виде твердых частиц и жидких растворов продуктов выбросов в атмосферу, в том числе кислот и кислотных остатков, металлов и их соединений, канцерогенных веществ.

4. Выбросы непосредственно на поверхность суши и воды продуктов сжигания твердых топлив (зола, шлаки), а также продуктов продувок, очистки поверхностей нагрева (сажа, зола и пр.).

5. Выбросы на поверхность воды и суши жидких и твердых топлив при транспортировке, переработке, перегрузке.

6. Выбросы твердых и жидких радиоактивных отходов, характеризующиеся условиями их распространения в гидро- и литосфере.

7. Выбросы теплоты, следствиями которых могут быть: постоянное локальное повышение температуры в водоеме; временное повышение температуры водоема; изменение условий ледостава, зимнего гидрологического режима; изменение условий паводков; изменение распределения осадков, испарений, туманов.

8. Создание водохранилищ в долинах рек или с использованием естественного рельефа поверхности, а также создание искусственных прудов-охладителей, что вызывает изменение количественного и качественного состава речных стоков; изменение гидрологии водного бассейна, увеличение давления на дно, проникновение влаги в разломы коры и изменение сейсмичности; изменение условий рыбоводства, развития планктона и водной растительности; изменение микроклимата, условий отдыха и спортивных занятий, бальнеологических и других факторов водной среды.

9. Изменение ландшафта при сооружении разнородных энергетических объектов, потреблении ресурсов литосферы, в том числе вырубке лесов; изъятие из сельскохозяйственного оборота пахотных земель, лугов; нарушение взаимодействия берегов с водохранилищами.

10. Влияние выбросов, выносов и изменения характера взаимодействия водных бассейнов с сушей на структуру и свойства континентальных шельфов.

Примесные загрязнения суммарно могут воздействовать на естественный круговорот и материальные балансы тех или иных веществ между гидро-, лито- и атмосферой. Каждое из вышеприведенных взаимодействий не может рассматриваться изолированно из-за тесной взаимосвязи и взаимозависимости, что затрудняет их количественную оценку.

Функционирование и развитие топливно-энергетического комплекса сопровождается негативным экологическим воздействием на социально-экономические условия жизни общества. Анализ экологического состояния малых и средних городов России свидетельствует о том, что именно топливно-энергетическое хозяйство вносит наибольший вклад в неблагоприятное состояние среды обитания. Объекты отечественного ТЭК являются одним из основных источников загрязнения воздушного бассейна продуктами сгорания топлива, загрязнения водных бассейнов и нарушений природных ландшафтов. Сегодня на долю предприятий ТЭК в целом по стране приходится около 50 % объема используемой в промышленности свежей воды, около 48 % выбросов вредных веществ в атмосферу, до 36 % сточных вод, свыше 30 % отходов. Ежегодно нарушается до 2 тыс. га плодородных земель.

Структура вредных выбросов от объектов ТЭК выглядит следующим образом (%):

Парниковые газы (в пересчете на углерод) 98

В том числе:

диоксид углерода 89

метан 9

Кислотные газы 1,3

В том числе:

оксиды серы 0,8

оксиды азота 0,5

зола 0,7

На топливный сектор приходится 30 % выбросов, на электроэнергетику – 70 %.

Основной причиной значительного объема выбросов в электроэнергетике является экологически нерациональная структура топливно-энергетического баланса городов. Кроме того, пылегазоочистное оборудование имеет недостаточную мощность и низкую эксплуатационную надежность.

Существенный объем вредных выбросов от объектов топливного сектора ТЭК объясняется тем, что для целей теплоснабжения малых и средних городов используется множество мелких котельных (свыше 100 тыс.), не отвечающих требованиям экологичности. Основными источниками тепловой энергии в коммунальной энергетике этих городов являются чугунные отопительные котлы и печи, конструкции которых рассчитаны на сжигание высококалорийных сортов углей. Потребность же коммунального хозяйства городов в этих углях удовлетворяется менее чем на 50 %. Применение рядовых углей вместо сортовых приводит к дополнительному загрязнению атмосферы городов.

В малых и средних городах свыше 20 % жилого фонда составляют индивидуальные дома, как правило, с малоэффективными отопительными печами на угле и дровах, существенно загрязняющими атмосферу.

## 3.2. Преобразование материальных ресурсов на предприятиях топливно-энергетического комплекса

### 3.2.1. Классификация и характеристики топлив

*Топливо* – достаточно широко распространенные горючие вещества, выделяющие в результате химико-физических преобразований энергию, которая может быть технически использована. Различают содержащее углерод органическое топливо и ядерное.

По агрегатному состоянию топлива могут быть твердыми, жидкими и газообразными. По происхождению органические топлива делят на природные и искусственные. К природным топливам относят каменные и бурые угли, нефть, газ, сланцы, торф, отходы древесины; к искусственным – продукты переработки природных топлив: мазут, генераторный, доменный и коксовый газы, жидкие синтетические топлива, получаемые из каменного, бурого углей и сланцев, бытовые и промышленные отходы, энерготехнологическое сырье.

Уголь является твердой горючей осадочной породой, образовавшейся преимущественно из отмерших растений в результате их биохимических, физико-химических и физических изменений.

*Метаморфизм угля* – превращение бурого угля последовательно в каменный уголь и антрацит в результате изменения химического состава, структуры и физических свойств угля в недрах преимущественно под влиянием повышенной температуры и давления. Бурые, каменные угли и антрациты отличаются средним показателем  $R_0$  отражения витринита, удельной теплотой сгорания  $Q_s^{af}$  на влажное беззольное состояние и выходом  $V^{daf}$  летучих веществ на сухое беззольное состояние. В зависимости от технологических свойств угли объединены по технологическим маркам, группам и подгруппам. В зависимости от максимальной влагоемкости  $W_{\max}^{af}$  бурые угли делят на три группы (табл. 3.1).

*Теплота сгорания топлива* – количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании твердого, жидкого или газообразного топлива. Различают низшую и высшую, удельную и объемную теплоту сгорания. Низшая теплота сгорания меньше высшей на то количество теплоты, которое затрачивается на испарение воды, образующейся при сгорании топлива, а также влаги, содержащейся в нем.

Таблица 3.1

**Классификация бурых углей в зависимости от  $W_{\max}^{af}$** 

Группа	Максимальная влагоемкость $W_{\max}^{af}$ , %
1Б	50 и более
2Б	30–50
3Б	Менее 30

*Удельная теплота сгорания твердого или жидкого топлива*, кДж/кг, принимается по данным калориметрических исследований. Менее точно она может быть рассчитана исходя из состава топлива.

*Объемная теплота сгорания газового топлива*, кДж/м<sup>3</sup>, определяется экспериментально в газовом калориметре или в уплотненной калориметрической бомбе, а также рассчитывается по составу топлива. Теплота сгорания топлива определяется теплотой сгорания составляющих его горючих веществ.

В зависимости от низшей теплоты сгорания топлива делят на сорта. Согласно международной классификации высококалорийные топлива с низшей удельной теплотой сгорания влажной беззольной массы меньше 23,8 МДж/кг относят к низкосортным.

Газообразное топливо представляет собой природный, нефтяной, попутный или искусственный газ. Природный горючий газ состоит из метана, этана, пропана и бутана, иногда содержит примеси легкокипящих жидких углеводородов – пентана, гексана и др. В нем присутствуют также углекислый газ, азот, сероводород и инертные газы. Низшая объемная теплота сгорания природного газа при нормальных условиях составляет не менее 31,8 МДж/м<sup>3</sup>, массовая концентрация сероводорода – не более 0,02 г/м<sup>3</sup>, а меркаптановой серы – не более 0,036 г/м<sup>3</sup>.

Искусственным горючим газом может быть генераторный, коксовый, доменный и др.

Жидкие топлива являются продуктами переработки нефти. К ним относят бензин, керосин, мазут, дизельное топливо и пр. В зависимости от вязкости производится классификация мазутов. Мазут марки Ф5 содержит 60–70 % мазута, получаемого при прямой перегонке малосернистой нефти, 10–12 % газойля и 20–30 % крекинг-остатков. Топочный мазут состоит в основном из тяжелых крекинг-остатков либо представляет собой смесь крекинг-остатков с мазутом, получаемым в процессе прямой перегонки нефти. Флотский мазут марки 40 предназначен в основном для судовых

котельных установок. Мазут марки 100 применяют в котельных установках электростанций.

По содержанию серы мазут подразделяют на малосернистый ( $S^r \leq 0,5 \%$ ), сернистый ( $0,5 < S^r < 2 \%$ ) и высокосернистый ( $S^r > 2 \%$ ).

Содержащиеся в твердом топливе вещества можно разделить на две группы (табл. 3.2): горючие и негорючие (балласт). К *горючим веществам топлива* относят обычно сложные органические соединения углерода, водорода, серы и кислорода, которые могут изменяться с течением времени в зависимости от внешних условий (температуры, давления, наличия окислителей и др.). *Балластом* являются негорючие минеральные вещества, которые при горении превращаются в золу, и вода (влага) топлива. По содержанию балласта оценивают качество топлива. Каждая составляющая топлива определяет его характеристики, свойства и качество.

Таблица 3.2

**Составные части твердого топлива**

Балласт			Горючие вещества			
Влага	Азот	Углерод	Водород	Сера	Кислород	Азот
	Зола		Летучие вещества			

Углерод С топлива обычно является его основным горючим элементом. Водород Н входит в состав других элементов и занимает второе место по располагаемой теплоте. При горении (окислении) водорода образуется вода.

Сера S в твердом топливе может быть органической  $S^o$ , пиритной  $S^k$  и сульфатной  $S^{SO_4}$ . Пиритная сера состоит из сульфидной  $S^s$  и би-сульфидной  $S^p$  серы. Органическая и пиритная сера участвуют в процессе горения и представляют собой сухую беззольную массу топлива ( $S^r = S^o + S^k$ ), сульфатная входит в состав минеральной части топлива.

Сера в жидком топливе входит в состав сероорганических соединений (меркаптанов, сульфидов, дисульфидов, тиофенов и др.), сероводорода и содержится в свободном виде. Все соединения серы участвуют в процессе горения. Сера в газовом топливе находится в основном в виде сероводорода.

Кислород  $O_2$  топлива может участвовать в окислении горючих составляющих, его содержание – колебаться в широких пределах.

Азот N входит в состав органических соединений и является внутренним балластом топлива.

### 3.2.2. Топочные процессы и устройства

Топочные процессы объединяют процессы и явления, сопровождающие горение топлива и протекающие в пределах топки.

Процессы, протекающие в топке, многообразны, тесно взаимосвязаны, что затрудняет их анализ. Основными топочными процессами являются горение и теплообмен. Вместе с тем аэродинамика топки определяет устойчивость и экономичность этих процессов.

В топочном объеме происходят сложные физико-химические изменения составляющих топлива под воздействием температуры и топочной среды. Свойства и состав конечных продуктов превращения минеральной части топлива – шлака и летучей золы – зависят не только от вида топлива, но и от условий организации топочного процесса (температуры, состава среды, аэродинамических условий). Свойства шлака определяют возможность и развитие процессов шлакования и загрязнения поверхностей нагрева топки, что, в свою очередь, влияет на условия теплообмена, аэродинамику топки и массообмен в процессе горения топлива.

Процессы генерации вредных веществ носят физико-химический характер, тесно связаны с процессами тепломассообмена и горения в топке.

При рассмотрении топочных процессов можно выделить два класса связанных с ними задач: 1) суммарного расчета процессов (статики горения) для получения обобщенных характеристик без учета динамики и механизмов протекающих процессов; 2) динамики горения и сопутствующих топочных процессов.

Совершенствование топочных устройств, оптимизация топочных процессов не возможны без детального анализа динамики топочных процессов. Только на основе глубокого изучения основополагающих закономерностей развития процесса горения во времени при наиболее полном учете всех факторов, определяющих развитие этого процесса, возможно построение достаточно адекватных физико-математических моделей.

Теория процессов горения получила в последнее время значительное развитие, что позволило внедрить в практику расчетные методы выгорания топлива в топочных устройствах, основанные на решении задач динамики горения различных видов топлива, с широким использованием электронно-вычислительной техники.

*Горение* – химический процесс соединения горючих компонентов топлива с кислородом (окислителем) воздуха с интенсивным выделени-



ем теплоты. *Гомогенное горение* имеет место, когда горючее вещество и окислитель находятся в одном агрегатном состоянии. *Гетерогенное горение* происходит, если горючее и окислитель находятся в разных агрегатных состояниях, т. е. химическое взаимодействие осуществляется на границе раздела фаз.

Горючий газ сжигается в топке, как правило, в виде гомогенной смеси с воздухом при разной степени перемешивания в горелках. Жидкое топливо подают в топку в виде тонко распыленных капель. Распыливание жидкого топлива осуществляется с помощью форсунок, установленных в горелках или непосредственно в топках (в малых котлах). Мелкие капли топлива испаряются, пары горючего смешиваются с воздухом, а горение осуществляется также гомогенно. Твердое топливо при всех схемах сжигания, кроме предварительной газификации и сжигания ее газообразных продуктов, взаимодействует с окислителем гетерогенно.

Твердое топливо в топках энергетических и промышленных котлов обычно сжигают в слое, в том числе псевдоожиженном (кипящем) или в факеле. В слоевых процессах сжигают грубодробленое топливо с размером кусков до 100 мм, в факельных – топливную пыль или мелкую дробленку, в кипящем слое – дробленку с размером кусков до 10 мм. Следует отметить сложность процессов горения, связанную с разнообразием топлив (по составу, характеристикам, состоянию) и многообразием условий горения в разных топочных устройствах.

При расчете и анализе процесса горения необходимо учитывать поведение горючих веществ в их исходном и промежуточном состояниях. В процессе горения обязательны два этапа взаимодействия: молекулярный контакт горючего вещества и окислителя (физическое) и непосредственное взаимодействие молекул горючего вещества, находящихся в определенном энергетическом состоянии, и окислителя с образованием продуктов реакции (химическое).

Энергетическое состояние реагирования веществ достигается соответствующим повышением общего энергетического уровня начавшегося процесса (температуры) взаимодействия молекул при столкновениях, приводящих к перераспределению энергии. Поэтому при анализе процессов горения, даже при рассмотрении простейших реакций, необходимо учитывать различие между молекулами, составляющими сложную энергетическую полисистему. Горение не является равновесным процессом. Во время горения обязательно имеют место неоднородность состояния молекул, их концентраций, неравномерность полей температур и скоростей потоков.

Задачи динамики горения можно охарактеризовать как нестационарные задачи турбулентного массо- и теплообмена, решаемые составлением сложных интегрально-дифференциальных уравнений, соответствие которых реальному процессу проверяется сопоставлением результатов решения этих систем (обычно с применением ЭВМ) с данными экспериментальных исследований.

Тесная взаимосвязь химических реакций с физическими процессами тепло- и массообмена определяет сложный физико-химический характер наблюдаемых при горении явлений. Вместе с тем возможно выделение областей, в которых физические или химические факторы являются определяющими. Например, при низких температурах скорость взаимодействия горючего вещества и окислителя может быть значительно меньше скорости массообмена. Следовательно, определяющим будет химическое взаимодействие. В этой кинетической области процесс горения следует рассматривать как чисто химический.

При высоких температурах скорость реакции намного превышает скорость массообмена (диффузии). Процесс горения протекает в диффузионной области, и его рассмотрение и расчет должны проводиться с чисто физической стороны.

Комплексное рассмотрение процесса с учетом физических и химических факторов обязательно, если процесс проходит в промежуточной области, где воздействие физических и химических факторов практически равнозначно. Физико-химический (диффузионно-кинетический) подход к задачам динамики горения широко используется при построении расчетно-математических моделей.

### 3.2.3. Продукты сгорания топлив

Наличие вредных веществ в продуктах сгорания органических топлив обусловлено содержанием в последних неорганических веществ, балласта сернистых и азотистых соединений и других примесей, переходящих в продукты сгорания. Кроме того, при сжигании топлива образуются продукты незавершенного горения (сажа, СО, полициклические ароматические углеводороды, некоторые из них относятся к канцерогенным веществам).

**Оксиды азота.** В продуктах сгорания оксиды азота представляют сумму из оксида и диоксида ( $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$ ).

*Оксид азота* – безцветный газ, при атмосферном давлении и температуре минус  $151,8^\circ\text{C}$  превращается в жидкость. Плотность при  $20^\circ\text{C}$  составляет  $1,34\text{ кг/м}^3$ .

*Диоксид азота* – красно-бурый газ с удушливым запахом, легко сжижается при атмосферном давлении и 21,15 °С в красно-бурую жидкость. При температуре минус 11,2 °С жидкость твердеет, образуя бесцветные кристаллы. Плотность при 20 °С 1,491 кг/м<sup>3</sup>, обладает способностью полимеризоваться.

При поступлении в атмосферу оксид азота в течение нескольких часов в результате фотохимического взаимодействия переходит в диоксид. Дальнейшее преобразование NO<sub>2</sub> в атмосфере может протекать в течение нескольких суток.

В зависимости от первоисточников образования в топках котлов оксиды азота разделяют на три группы: термальные NO<sub>x</sub><sup>t</sup>, топливные NO<sub>x</sub><sup>T</sup>, фронтальные («быстрые») NO<sub>x</sub><sup>Ф</sup>.

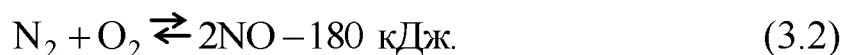
Суммарный выброс

$$\sum \text{NO}_x = \text{NO}_x^t + \text{NO}_x^T + \text{NO}_x^{\Phi} \quad (3.1)$$

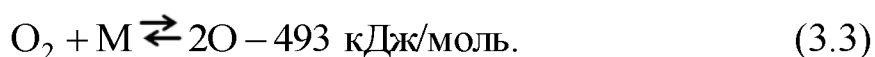
*Термальные оксиды азота* теоретически и экспериментально были изучены Я. Б. Зельдовичем, П. Я. Садовниковым и Д. А. Франк-Каменецким. Теория образования оксидов азота по вышеуказанному механизму была названа термической теорией Зельдовича. Дальнейшее развитие эта теория получила в работах Ю. П. Райзера, А. М. Маркевича, И. И. Тамма, Ю. Н. Рябикина, Н. Н. Семенова и др. Весомый вклад в теорию и практику изучения образования оксидов азота и методов борьбы с ним внес И. Я. Сигал.

Основные положения термической теории:

1. Образование NO происходит за фронтом пламени в зоне высоких температур по цепному механизму, формальная кинетика которого хорошо описывается уравнением



Иницилирующей реакцией будет реакция диссоциации свободного кислорода:



Реакция (3.2) определяет скорость образования NO в зависимости от концентрации атомарного кислорода.

2. Выход NO определяется максимальной температурой горения и концентрацией азота и кислорода в зоне реагирования.

3. Концентрация образовавшегося NO не превышает равновесную при максимальной температуре в зоне реагирования.

4. При наличии свободного кислорода ( $\alpha > 1$ ) выход NO определяется максимальной температурой в зоне реакции, при недостатке ( $\alpha < 1$ ) – кинетикой разложения NO, т. е. скоростью охлаждения продуктов сгорания (закалкой).

5. При сжигании углеводородных или влажных топлив в процессе реакций горения образуется гидроксильный радикал, который участвует в образовании оксида азота.

*Топливные оксиды азота* образуются через азотсодержащие соединения, которые присутствуют в жидких топливах. Содержание химически связанного азота в сырой нефти до 0,65 %, в мазуте – до 1,4 %, в бензине – до 0,07 %.

Азот в топливе в основном входит в состав соединений, легко распадающихся при нагревании и активно вступающих в реакцию с кислородом. На основании результатов исследований можно сделать ряд практических выводов:

конверсия азота топлива в NO происходит во фронте пламени при скорости, соизмеримой со скоростью реакций горения;

степень конверсии уменьшается с увеличением концентрации азота топлива с 20–80 % при  $N^p < 0,1$  % до 10–20 % при  $N^p = 0,1–1,0$  %;

конверсия слабо зависит от температуры пламени (с увеличением температуры она повышается весьма незначительно);

конверсия не зависит от вида азотсодержащего соединения, а определяется содержанием в нем азота;

конверсия увеличивается с ростом коэффициента избытка воздуха;

доля топливного NO в суммарном выходе оксидов азота будет тем больше, чем ниже тепловые напряжения и температура в топке.

*Фронтальные оксиды азота* имеют место при сжигании всех видов топлива. Химически индуцированный механизм синтеза NO близок по своему характеру к механизму топливного NO, который происходит с участием промежуточных продуктов и радикалов во фронте пламени. Скорости протекания реакций сопоставимы со скоростями горения.

Основные закономерности механизма образования фронтальных NO следующие:

фронтальные NO образуются в зоне, характеризующей фронт пламени;

время образования NO соизмеримо со временем реакции горения; образование фронтальных NO слабо зависит от температуры и в основном определяется избытком воздуха;

в суммарном выходе оксидов азота в условиях, характерных для топок отопительных котлов малой мощности, доля фронтальных NO незначительна и будет уменьшаться с увеличением тепловой мощности котлов и температур в топке.

В настоящее время фронтальные NO активно изучаются. Из оксидов азота основными загрязнителями атмосферы являются NO и NO<sub>2</sub>.

Большое значение имеют вопросы локального снижения концентрации оксидов азота в районах расположения ТЭС и других крупных потребителей топлива, а также в зонах интенсивного движения автотранспорта.

При концентрациях около 1,0 мг/м<sup>3</sup> в течение 10–12 суток диоксид азота сдерживает рост растений. Оксиды азота, обладая высокой токсичностью, способны образовывать еще более токсичные комплексы и играть существенную роль в образовании фотохимических туманов (смогов). Переход на сжигание «чистых» с точки зрения загрязнения воздушного бассейна топлив позволяет резко сократить, а иногда полностью ликвидировать выбросы токсогенов, кроме оксидов азота. Сказанное ставит последние в один ряд с такими загрязнителями, как оксиды серы и твердые частицы. Реагируя с атмосферной влагой, NO<sub>x</sub> образует азотную кислоту, которая вызывает повышенную коррозию металлических конструкций.

Французские врачи связывают рост заболеваемости хроническим бронхитом с загрязнением атмосферы, и в частности оксидами азота. Особенно подвержены такому воздействию дети (при концентрации в воздухе оксидов азота до 0,02 мг/м<sup>3</sup> наблюдается рост заболеваемости бронхитом у детей 2–3-летнего возраста).

Большую опасность представляют некоторые комплексные соединения, в состав которых входят NO<sub>x</sub>. К таким соединениям относятся фотохимические оксиданты.

**Оксиды серы.** Горючая сера как сумма органической и колчеданной (S<sup>o</sup> + S<sup>k</sup>) содержится в жидком топливе в количестве 0,05–0,15 % (керосин, ТПБ) и до 3,5 % в мазутах.

В процессе сжигания топлива содержащиеся в нем сернистые соединения сгорают с окислением серы в основном до диоксида серы.

*Диоксид серы* SO<sub>2</sub> – бесцветный газ плотностью 2,93 г/л, температура кипения минус 10,1 °С, плавления – минус 75,5 °С.

В небольших количествах образуется триоксид серы  $\text{SO}_3$  – бесцветные ромбические кристаллы с температурой кипения  $44,7^\circ\text{C}$  и температурой плавления  $16,8^\circ\text{C}$ . Таким образом, при сжигании топлива, содержащего в своем составе серу ( $\text{S}^I$ ), в продуктах сгорания образуются оксиды серы ( $\text{SO}_x$ ), представляющие собой сумму диоксида и триоксида серы ( $\text{SO}_2 + \text{SO}_3$ ). Результаты исследований показали, что примерно 98–99 % серы в дымовых газах находится в виде  $\text{SO}_2$  и лишь около 1 % в виде  $\text{SO}_3$ . Наибольшую опасность для окружающей среды и теплотехнического оборудования представляет триоксид серы.

Максимальная концентрация  $\text{SO}_3$

$$C_{\max} = \frac{k_{\pi} C_{\text{SO}_2} C_M}{k_o}, \quad (3.4)$$

где  $k_{\pi}$ ,  $k_o$  – константы прямой и обратной реакций;  $C_{\text{SO}_2}$  – концентрация диоксида серы;  $C_M$  – концентрация «третьего» компонента.

Отсюда следует, что максимальный уровень  $\text{SO}_3$  будет соответствовать концентрации  $\text{SO}_2$ , равной 1–5 %. Время достижения максимальной концентрации составляет 0,028 с при значениях  $k_{\pi}$  и  $k_o$ , определенных А. Б. Хедли. В богатых смесях максимальную концентрацию будет определять отношение  $[\text{O}]/[\text{H}]$ . Поскольку это отношение мало, то и переход от  $\text{SO}_2$  к  $\text{SO}_3$  будет ограничен.

С увеличением концентрации кислорода количество  $\text{SO}_3$  будет увеличиваться до некоторого максимального значения, фиксирующегося при избытке кислорода (коэффициент избытка воздуха 1,15–1,30). При последующем росте избыточного воздуха  $\text{SO}_3$  будет снижаться.

Дальнейшее превращение  $\text{SO}_2$  в  $\text{SO}_3$  может происходить в атмосфере, но чрезвычайно медленно, однако гетерогенная катализация на поверхности твердых частиц может увеличить скорость превращения. При интенсивном солнечном освещении скорость фотохимической реакции окисления диоксида серы в триоксид составляет 0,1–0,2 % в час. Установлено, что за время, пока газы выходят из дымовой трубы, в них происходит частичное окисление диоксида серы и образование серной кислоты, которая придает синеватую окраску серосодержащим дымовым газам.

Концентрация  $\text{SO}_x$  в уходящих газах полностью зависит от содержания в топливе горючей серы. При сжигании жидкого топлива практически вся сера переходит в  $\text{SO}_x$ .

Оксиды серы относятся к наиболее опасным загрязнителям. На их долю приходится наибольший ущерб животному миру, растительности и различным сооружениям из металла и камня. Наибольший ущерб  $\text{SO}_x$  наносит растительности, нарушая метаболизм растений в целом. Особенно неустойчивы к его воздействию хвойные и фруктовые деревья. Уже при концентрации  $\text{SO}_2$  в воздухе  $0,9 \text{ мг/м}^3$  нарушается процесс фотосинтеза у сосны, ели, клена и по истечении 5–10 суток хвоя рыжеет и опадает. При содержании  $\text{SO}_2$   $1 \text{ мг/м}^3$  урожай подсолнечника, кукурузы, гороха, редиса снижается на 14 %, а при  $2 \text{ мг/м}^3$  – на 26 %. Урон, наносимый сельскому хозяйству США только оксидами серы, оценивается не менее чем в 20 млн долл/год, а общий ущерб растительности – в 100 млн долл/год. Аэрозоли серной кислоты, которые образуются при взаимодействии с водяными парами в воздухе, составляют до 20 % от всех взвешенных частиц в городском воздухе и значительно снижают видимость.

Оксиды серы активно взаимодействуют в атмосфере с оксидами азота, образуя токсичные комплексы, негативное воздействие которых значительно сильнее, чем отдельных компонентов.

Наблюдения показывают, что содержание  $\text{SO}_2$  в воздухе около  $3,0\text{--}20,0 \text{ мг/м}^3$  увеличивает время высыхания краски в 2–4 раза, снижает качество и стойкость покрытия. В зависимости от продолжительности воздействия и типа металла скорость коррозии в городской атмосфере в 2–5 раз выше, чем в сельской местности. Оксиды серы считаются самым опасным загрязнителем для металлов и различных строительных материалов. Особенно чувствительны к этому виду загрязнителей синтетические ткани, и в частности нейлоновые изделия.

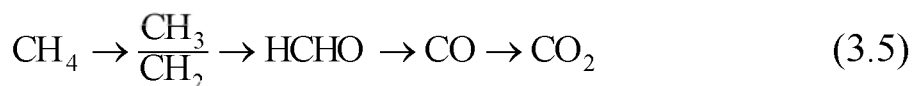
Известно пагубное влияние оксидов серы на дыхательную систему человека. Дети в возрасте до 12 лет особенно чувствительны к загрязнению среды оксидами серы и взвешенными частицами.

В атмосфере оксиды серы способны переходить в сульфат-ион  $\text{SO}_4$  и серную кислоту, воздействие которых в 5–10 раз сильнее, чем воздействие  $\text{SO}_2$ .

**Оксиды углерода.** *Оксид углерода* – ядовитый газ без цвета и запаха, легче воздуха ( $\rho = 0,97 \text{ г/л}$ ), температура кипения минус  $191,5^\circ\text{C}$  и теплота сгорания  $12,9 \text{ МДж/м}^3$ .

Горение жидкого топлива начинается с присоединения к углероду кислорода и образования спиртов и альдегидов. Последние расщепляются или окисляются с образованием формальдегида ( $\text{HCHO}$ ), который при недостатке кислорода распадается с образованием  $\text{CO}$ . Кроме того, при сжигании любых углеводородных топлив в качестве промежуточ-

ных продуктов (радикалов) образуются  $\text{CH}$ ,  $\text{HCO}$  и т. п., благодаря которым также возможно образование оксида углерода. Образование оксида углерода при сжигании природного газа ( $\text{CH}_4$ ) является практически завершающей стадией горения природного газа:



Сложность процессов не позволяет строго говорить о последовательности и характере всех промежуточных стадий выгорания топлива. Однако все исследователи считают, что завершающими реакциями горения углеводорода (в углеводородных топливах) является образование  $\text{CO}$  и его переход в  $\text{CO}_2$ .

Рассмотренный механизм образования оксида углерода позволяет определить условия, при которых возможно возникновение  $\text{CO}$ : отсутствие окислителя или его недостаток в высокотемпературной реакционной зоне; некачественное смешение горючего и окислителя; неудачная конструкция горелочного устройства; снижение температуры в реакционной зоне (или недостаточное время пребывания в ней); слишком большая степень экранирования топки при малом объеме последней; большой коэффициент избытка воздуха; неудачное расположение горелочных устройств и колосниковой решетки; касание пламенем холодных поверхностей нагрева и т. п.

Оксид углерода очень стабилен и в атмосферном воздухе может находиться до 4 месяцев. Суммарная эмиссия  $\text{CO}$  только в результате деятельности человека составляет около 300 млн т/год, т. е. лишь 20 % всех выбросов  $\text{CO}$ , поступающих в атмосферу. Концентрация ядовитого газа в некоторых крупных городах достигает значительных величин, например в Париже – 30–31 мг/м<sup>3</sup>, Лос-Анджелесе – 46 мг/м<sup>3</sup>.

Оксид углерода, по данным многих исследований, не влияет отрицательно на металлы и другие строительные материалы, не оказывает вредного воздействия на жизнедеятельность растений при концентрации менее 125 мг/м<sup>3</sup>.

Воздействие угарного газа  $\text{CO}$  на организм человека общеизвестно. Гемоглобин крови  $\text{Hb}$  имеет в 210 раз большее родство с  $\text{CO}$ , чем с кислородом. Таким образом,  $\text{CO}$  активнее взаимодействует с гемоглобином (в 200 раз и более), образуя карбоксигемоглобин крови  $\text{CO}(\text{Hb})$ , который снижает поступление кислорода к клеткам организма. Вторичный эффект воздействия  $\text{CO}(\text{Hb})$  состоит в том, что он мешает реализации кислорода, переносимого остальным гемоглобином.



**Полициклические ароматические углеводороды.** При сжигании углеводородных топлив в топках котлов и печей наряду с процессами окисления происходит их пиролиз. Экспериментальные исследования термического разложения углеводородных топлив показывают их радикально-цепной механизм, инициируемый мономолекулярным разложением исходного углеводорода.

Сжигание топлив, содержащих углеводороды с высокой молекулярной массой, ведет к эмиссии большого количества ароматических и других углеводородов (например при сжигании мазута). При сжигании газообразного топлива, не содержащего высокомолекулярных соединений, количество образующихся полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) будет меньше.

При сжигании различных топлив механизм образования ПАУ неодинаков. При сжигании газообразного топлива имеет место синтез легких углеводородов в тяжелые, а при сжигании жидких – разрушение (деструкция) и рекомбинация с одновременным синтезом образовавшихся легких углеводородов, а также частичный переход ПАУ, содержащихся в топливе, в продукты сгорания.

Благоприятные условия перехода ПАУ из топлива в продукты сгорания имеют место в топках котлов небольшого объема и с высокой степенью экранирования, что и характерно для котлов малой мощности.

Определяющим условием в конечном выходе ПАУ является режим сжигания топлива, т. е. количество окислителя и качество смесеобразования, температурный режим и время пребывания газов в высокотемпературной зоне.

**Канцерогенные углеводороды** – это химические соединения, способные при воздействии на организм человека вызвать образование злокачественной опухоли. Известно несколько сотен канцерогенных веществ, принадлежащих к разным классам химических соединений.

При сжигании органических топлив в продуктах их сгорания обнаружены ПАУ, часть из которых являются канцерогенными, а именно бенз(а)пирен (Б(а)П), 9,10-диметилантрацен, бенз(а)антрацен, дибенз(а,h)антрацен (рис. 3.2) и др.

Эффект воздействия канцерогенных веществ зависит как от дозы, так и от срока их действия. Новообразования в организме человека возникают не сразу после начала воздействия, а лишь через некоторый срок – 1/5–1/7 максимальной продолжительности жизни (для человека этот срок может быть равен 15–20 годам). Установлено, что

человеческий организм интенсивно накапливает и удерживает Б(а)П в детском возрасте и в возрасте старше 50 лет.

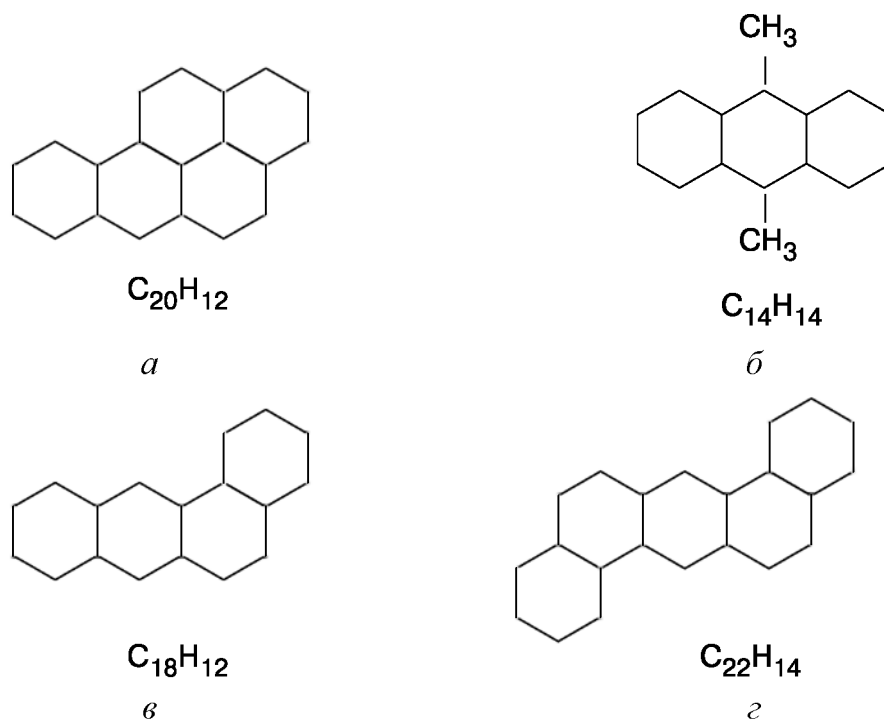


Рис. 3.2. Полициклические ароматические углеводороды, обладающие канцерогенной активностью: *а* – Б(а)П; *б* – 9,10-диметилантрацен; *в* – бенз(а)антрацен; *г* – дибенз(а,г)антрацен

Кроме указанного непосредственного воздействия канцерогенных веществ на организм человека, эти углеводороды, попадая в атмосферу и взаимодействуя с окислителями азота под действием солнечной радиации, образуют фотохимические оксиданты – компоненты фотохимического смога.

В России установлена жесткая, но обоснованная норма среднесуточной предельно допустимой концентрации Б(а)П в атмосферном воздухе – 0,1 мкг/100 м<sup>3</sup> воздуха. При ее определении учитывалось количество воздуха и воды, в среднем потребляемое человеком за жизнь (средняя продолжительность жизни человека – 70 лет).

**Твердые частицы**, выбрасываемые через дымовые трубы котельных, состоят из золовых частиц несгоревшего топлива (коксовые частицы) и сажи. Состав выбрасываемых в атмосферу твердых частиц зависит от вида сжигаемого топлива. При сжигании жидкого топлива образуются нефтяной кокс и сажа, при сжигании газового топлива может образовываться сажа. Во время движения по газоходам котельной они могут образовывать сложные конгломераты, так как об-

ладают довольно высокими аутогезионными свойствами (особенно сажа). Значительная часть компонентов нефтяного кокса при горении испаряется и в дальнейшем конденсируется при снижении температуры дымовых газов.

Первичные размеры частиц – от 0,5 до 5,0 мкм. В процессе агрегирования размеры увеличиваются до 5–30 мкм. Коксовые и сажевые частицы – это продукты неполного сгорания, в состав которых входит на 98 % углеводород, остальное – водород, входящий в состав сажи или сопутствующих ей сложных углеводородов. В конгломерате из золы, кокса и сажи могут также находиться соединения ванадия, натрия, серы, присутствуют железощелочные сульфаты, оксиды железа и серы.

*Сажа* – твердые частицы размером от 0,04 (канальная сажа) до 0,2 мкм (термическая сажа). Дальнейший рост частиц происходит за счет образования агрегатов, размеры которых 10 мкм и более. Вредные свойства сажи объясняются, видимо, присутствием в ней (или входящими в ее состав) сложных углеводородов типа Б(а)П.

Анализ исследований позволяет сделать следующее заключение: образование и рост сажистых частиц зависят прежде всего от наличия достаточного количества окислителя в зоне горения, а также способа и качества смешения топлива с окислителем (воздухом). Кроме того, существенное влияние оказывают состав и вид самого топлива, способ его сжигания, а также ряд технических факторов, например, объем и форма топочной камеры, степень экранирования топки, степень распыливания топлива.

Твердые частицы в атмосфере могут находиться в виде аэрозолей, пыли, летучей золы, коксовых частиц и сажи. Хотя частицы составляют менее 10 % общей массы техногенных загрязнителей атмосферы, ущерб от этого вида загрязнителей значительный. Твердые частицы поражают легкие человека, способствуют повышению скорости химических и фотохимических реакций в атмосфере, снижают прозрачность атмосферного воздуха, увеличивают количество осадков, туманов, изменяют температурный уровень среды, влияют на почву и растительность. Степень воздействия во многом зависит от размера частиц и их концентрации, а также химического состава.

Основной вклад в загрязнение атмосферы вносят частицы размерами от 0,1 до 10 мкм. При размерах менее 0,1 мкм частица проявляет свойства молекулы, частицы размером от 1 до 20 мкм могут длительное время находиться в атмосфере, следуя потоку воздуха. При исследовании воздуха городов было обнаружено, что частицы разме-

рами до 1 мкм составляют не более 3 % от общей массы, но способны проникать в легкие. В связи с этим существенное значение приобретают методы подавления эмиссии именно частиц малых размеров.

Частицы, попадая в атмосферу, играют роль ядер конденсации, способствующих образованию облаков, дождя, снега. Установлена корреляционная связь между интенсивностью выбросов частиц и количеством дождей. В промышленных городах в нерабочие дни уменьшается количество осадков. Наиболее существенную роль частицы играют в снижении видимости в результате поглощения и рассеивания света. Более крупные частицы вызывают локальное снижение видимости (дымовые и пылевые шлейфы, смоги).

Взвешенные частицы как таковые могут быть химически инертными или активными, могут поглощать химически активные вещества или образовывать химически активные комплексы. Инертные частицы наносят ущерб простым загрязнением территории городов, фасадов зданий, сооружений, внутренних помещений. Химически активные частицы вызывают коррозию металлов.

В последнее время появилось много данных, свидетельствующих о том, что большинство мелкодисперсных частиц обладает канцерогенной активностью.

#### **3.2.4. Теория образования сажи при сжигании мазута**

Жидкое топливо (в основном мазут) находит еще достаточное применение в котельных установках промышленных предприятий. По химическому составу мазут представляет собой смесь углеводородов, среди которых преобладающими являются ароматические и мафеновые, а также полициклические углеводороды. Воды в мазуте содержится от 0,5–1 до 3–5 %. В состав мазута входят также минеральные примеси, в основном соли щелочных металлов.

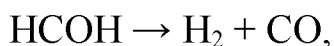
Сжигание мазута происходит следующим образом: поступившее в топочное пространство жидкое топливо за счет теплоты топочных газов прогревается, а затем испаряется. В первую очередь испаряются наиболее легкие фракции. Интенсивность испарения увеличивается с относительным ростом его поверхности и усилением подвода теплоты.

При наличии окислителя и достижении температуры воспламенения происходит загорание образовавшейся горючей парогазовой смеси. Выделившаяся при этом теплота способствует еще более интенсивному испарению топлива. Скорость сгорания жидкого топлива определяется скоростью его испарения с поверхности; эта поверх-

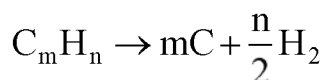
ность многократно увеличивается при распылении жидкого топлива на отдельные мельчайшие капли, для чего и применяются специальные устройства – форсунки.

Поскольку интенсивность сжигания жидкого топлива в значительной мере определяется интенсивностью испарения, важнейшим и первым этапом подготовки жидкого топлива к сгоранию является распыление его на мельчайшие частицы.

При рассмотрении горения жидких топлив следует помнить, что их горючая часть состоит из различных углеводородов, сжигание которых идет с образованием промежуточных соединений и зависит от содержания окислителя в горючей смеси и температуры. При достаточном количестве окислителя образующееся из исходных углеводородов промежуточное соединение формальдегид легко разлагается на водород и оксид углерода:



которые сгорают с образованием  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . В реальном факеле отдельные его участки имеют различные избытки окислителя и различную температуру. При недостаточном количестве окислителя после испарения происходит термическое разложение углеводородов. Характер этого процесса зависит от температуры. При относительно низких температурах (500–600 °С) разложение сложных углеводородов идет симметрично с образованием простейших углеводородов, которые сравнительно легко могут быть окислены до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . При более высоких температурах разложение идет несимметрично с образованием (кроме простейших соединений) тяжелых высокомолекулярных углеводородов, вплоть до сажистого углерода включительно:



Высокомолекулярные комплексы и углерод сжигаются плохо, поэтому горючая часть мазутного факела может представлять собой смесь легких газообразных углеводородов, тяжелых углеводородов и даже сажи.

Итак, из изложенного следует, что процесс сжигания жидкого топлива состоит из следующих этапов:

- 1) распыление (пульверизация) топлива;
- 2) образование горючей смеси, состоящей из продуктов испарения и термического разложения углеводородов и окислителя (карбюрация);

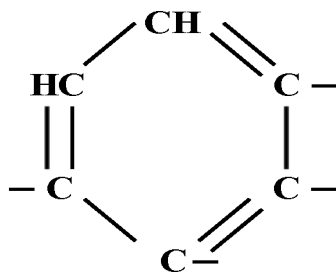
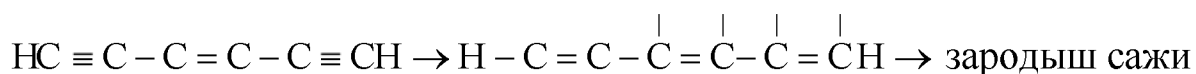
3) воспламенение горючей смеси;

4) горение горючей смеси.

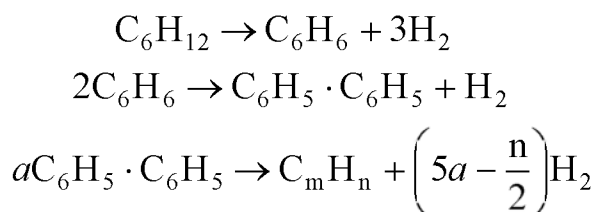
Эффективность сжигания жидкого топлива в значительной степени зависит от первых подготовительных этапов.

Сжигание мазутов при обычно принятых коэффициентах избытка воздуха сопровождается заметным сажеобразованием. Сажа – это продукт неполного сгорания топлива. Принято считать, что сажа в чистом виде представляет собой продукт конденсации углерода (в значительной мере на молекулярном уровне), в то время как мелкодисперсный кокс образуется в процессе сжигания мазута путем конденсации и полимеризации в основном тяжелых углеводородных соединений, а также содержащихся в мазуте карбенов и карбоидов.

С другой стороны, некоторые исследователи (П. А. Теснер, Н. В. Лавров) придерживаются более сложного механизма образования сажи, согласно которому сажа является многоядерным углеводородом. В основе реакции образования сажи лежат процессы полимеризации:



Молекулы сажи образуются в результате дальнейшего роста ее зародыша. Одновременно на начальной стадии сажеобразования возникает бенз(а)пирен – ПАУ высокой канцерогенной активности. Н. В. Лавров предложил дифенильный механизм низкотемпературного образования сажи и Б(а)П, согласно которому основным строительным блоком для образования циклических углеводородов и сажи является дифенил. Это может быть представлено следующей схемой:



Присутствующий в саже водород, по мнению Н. В. Лаврова, результат не физической адсорбции; водород в составе сажи химически

связан с углеродом. Таким образом, сажа и бенз(а)пирен являются продуктами гидролиза углеводородных топлив.

Образование сажи и кокса в ходе топочного процесса происходит параллельно, поэтому образующиеся на поверхности нагрева отложения представляют собой сложный конгломерат собственно сажи, мелкодисперсного кокса и минеральных компонентов – золы мазута. Этот конгломерат будем именовать котельной сажой (или просто сажой). Наличие сажи в продуктах сгорания оказывает определенное влияние на характер топочных процессов и загрязняет окружающую среду. В частности, сажа в топочных газах влияет на интенсивность радиационного излучения факела.

В зоне пароперегревателя отложения влияют на характер протекания высокотемпературной ванадиевой коррозии, а в зоне воздухоподогревателя служат причиной пожаров вследствие присущего им свойства самовозгорания.

Свойства и характеристики сажевых отложений, отобранных с поверхности нагрева ряда парогенераторов, сжигающих мазут марки 100 производства Полоцкого НПЗ с содержанием серы  $S' = 2\text{--}25\%$ , приведены в табл. 3.3. Мазут сжигался с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha_T'' = 1,09\text{--}1,12\%$  в парогенераторе БКЗ-210-160Ф; в парогенераторе ТГМ-94 коэффициент избытка воздуха составил  $\alpha_T'' = 1,08\text{--}1,1\%$ ; в парогенераторе НЗЛ –  $\alpha_T'' = 1,1\text{--}1,2\%$ . Как видно из табл. 3.3, в элементарном составе образцов сажи, отобранных с разных парогенераторов, но из примерно одинаковых температурных зон, наблюдаются определенные колебания. Повышение содержания Н и понижение S в саже Литовской ГРЭС, по-видимому, может быть объяснено тем, что на этой ГРЭС мазут сжигается с жидкой присадкой ВНИИНП-106, в то время как на Могилевской и Минской ТЭЦ-2 мазут сжигается без присадок.

Анализ разновидностей серы в саже показал, что сера сажи в основном относится к органической. Оценить содержание в сажевых отложениях мелкодисперсных частиц кокса можно методом рентгенографического исследования. Рентгенографическое исследование кристаллической структуры горючих уносов (сажи с содержанием золы менее 4 %) показало наличие турбостратной структуры, свойственной саже. Пористость водонерастворимых остатков оказалась равной 92–94 %. Столь высокая пористость характерна для отложений в основном чисто сажевого происхождения. Обращает на себя внимание довольно заметное содержание Н и особенно S в образцах саже-

вых отложений. По данным В. И. Барышева, в коксовых остатках, образующихся при неполном сжигании топлива при температуре выше 1300 °С и тем более при 1600 °С, такие термонестабильные элементы, как S и H, практически отсутствуют. Так, при коксовании эталонных веществ с содержанием исходной серы от 25 до 80 % при температуре более 1600 °С сера из коксовых остатков удаляется полностью, а содержание H в расчете на горючую массу не превышает 1 %.

Таблица 3.3

**Характеристика образцов сажи, отобранных  
из низкотемпературной зоны парогенераторов**

Электро- станция, па- рогенератор	Номер образца	A <sup>c</sup> , %	H <sup>г</sup> , %	C <sup>г</sup> , %	S <sub>общ</sub> , %	S <sub>сульф</sub> , %	Q <sub>б</sub> <sup>г</sup> , Дж/г	Насыщен- ная плот- ность, г/м <sup>3</sup>
Минская ТЭЦ-2, НЗЛ	1	3,2	0,75	92,7	4,41	0,15	31100	0,169
	2	2,5	0,80	96,0	—	—	—	—
	3	2,9	0,658	95,3	3,77	0,20	31000	0,143
	4	3,9	0,69	91,4	4,00	0,26	31100	0,135
Литовская ГРЭС, ТГМ-94	1	4,6	4,73	93,7	—	—	—	—
	2	3,7	4,87	94,1	1,50	—	—	—
	3	8,9	0,45	94,6	—	—	—	—
	4	11,4	1,57	93,6	—	—	—	—
Могилевская ТЭЦ-2, БКЗ-210-160Ф	1	2,0	0,65	93,0	4,20	0,30	—	0,129
	2	3,5	0,70	94,2	—	—	—	0,137

Наличие таких больших количеств H и S в сажевых отложениях может быть объяснено с помощью теории растянутого индукционного периода горения сажи. Для сажи, образовавшейся в средней и хвостовой части факела, время пребывания в топке меньше индукционного периода, и не успевшая воспламениться в горячих зонах сажа закалиется на относительно холодных конвективных поверхностях.

Наблюдения под электронным микроскопом показывают, что размеры сажевых частиц колеблются в пределах от 0,02 до 0,4 мкм. Форма частиц правильная, сферическая, при этом они высокопористы и способны агрегатироваться. На рис. 3.3 показана зависимость насыпной плотности отложений, отобранных из низкотемпературной зоны, от количества сажи в них. Эта зависимость описывается выражением  $\rho_{\text{рас}} = 2100^{-0,63}C$ , где C – содержание углерода в отложениях, %,  $\rho_{\text{нас}}$  – насыпная плотность, кг/м<sup>3</sup>.



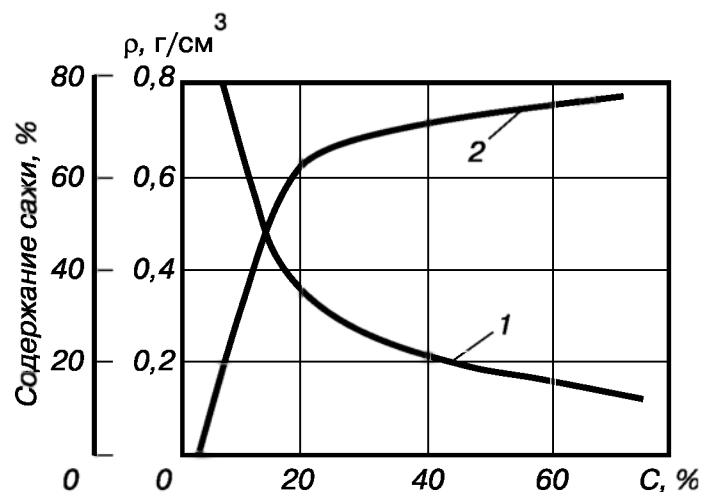


Рис. 3.3. Зависимость насыпной плотности сажи (1) и доли объема низкотемпературных отложений, приходящихся на сажу (2), от содержания в них углерода

Насыпная плотность особенно сильно изменяется с возрастанием содержания сажи в отложениях до 20–25 %, что объясняется большим отличием (в 10–12 раз) насыпной плотности сажи от плотности остальных составляющих отложений. Расчеты показывают, что содержание сажи в отложении равно всего 6 % по массе, доля объема отложений, занимаемая ею, составляет около 50 % (кривая 2 на рис. 3.3).

Рассмотрим некоторые вопросы организации сжигания мазута. Физическую схему горения неподвижной капли полностью испаряющегося топлива обычно представляют в следующем виде. Капля окружена окисляющей средой, имеющей температуру выше температуры самовоспламенения топлива. На первом этапе капля нагревается, частично газифицируется, а затем, после достижения температуры испарения, начинается процесс испарения. Из окружающей среды через пары топлива  $O_2$  начинает диффундировать к капле. Вокруг нее образуется горючая парогазообразная смесь, которая и воспламеняется. В результате горения паров топлива температура окружающей среды повысится, следствием чего будет увеличение подвода тепла к капле и, следовательно, интенсивности испарения. Установившийся режим горения наступит, когда будут уравновешены два процесса: испарение, в результате которого образуется определенное количество паров топлива, и диффузия, обеспечивающая подвод соответствующего количества  $O_2$ , необходимого для сгорания образующихся паров топлива. Если процесс диффузии  $O_2$  в зону горения идет медленнее, чем процесс испарения, то время горения определяется временем диффузии. В случае когда испарение капли идет медленнее диффузии  $O_2$ , время горения определяется временем испарения топ-

лива. Таким образом, горение полностью испаряющегося жидкого топлива есть горение его паров, и с этой точки зрения оно определяется гомогенным химическим процессом. Испарение топлива зависит, в частности, от условий теплообмена. Физические процессы (испарение, теплообмен и др.) являются главными при горении жидкого топлива, и химические реакции горения управляются физическими параметрами.

Известны схемы выгорания жидкого топлива со свободной поверхности и схемы горения капли. В частности, Г. А. Варшавский горение неподвижной капли рассматривал в соответствии с диффузионной теорией (рис. 3.4). Каплю 1 окружает слой пара 2, в районе внешней поверхности которого происходит горение. В слой горения снаружи диффундирует  $O_2$ , а от слоя наружу – продукты горения. Скорость сгорания определяется скоростью испарения топлива, которая зависит от условий теплоподвода к поверхности капли от окружающей среды. Принимается, что скорость сгорания образовавшихся паров относительно велика и не лимитирует процесс горения. Подвод теплоты капли осуществляется как теплопроводностью, так и излучением.

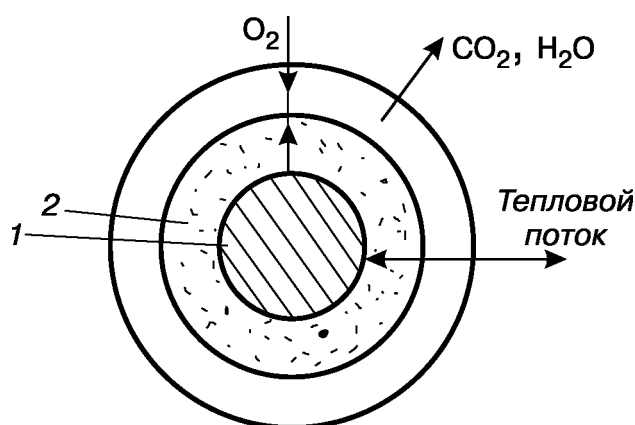


Рис. 3.4. Схема горения капли мазута:  
1 – капля; 2 – слой паров

Время горения капель полностью испаряющегося топлива пропорционально квадрату их начального радиуса. Крупные капли сгорают значительно медленнее мелких. Таким образом, в процессе сжигания распыленного жидкого топлива размер капель играет важную роль. Наиболее крупные капли определяют время полного сгорания топлива, а следовательно, и уровень теплового напряжения топочного объема. С увеличением плотности топлива и теплоты испарения время горения возрастает; при постоянном значении температуры капли

и при возрастании температуры среды скорость горения (и испарения) увеличивается.

Однако горение движущихся капель мазута в воздушном, а затем в газозвушном потоке с ограниченным субъектом (или даже недостатком) воздуха существенно отличается от описанного выше горения неподвижных капель полностью испаряющегося топлива в объеме горячего воздуха при  $\alpha \rightarrow \infty$ . В отличие от описанной схемы процесс горения капли мазута условно следует представить, например, следующим образом. Капля мазута вылетает из форсунки под определенным углом к оси воздушного потока. Скорость относительного движения капли определяется не только конструкцией форсунки, но и разгоном (или торможением) капли газозвушным потоком. Обгон воздушного потока каплями тем сильнее, чем они крупнее, меньше их коэффициент сопротивления, больше разность плотностей топлива и воздуха (или газозвушной смеси). Вследствие вторичного дробления капель дальнейшая траектория их осколков будет изменена. Мелкие капли будут, видимо, двигаться с газозвушным потоком, увлекаясь им. А более крупные нераздробленные капли, обладающие повышенной инерцией, будут либо «скользить» относительно газозвушного потока, либо «выпадать» из него. На основании изложенного можно согласиться с траекториями капель в проточной и противоточной топках, предложенными Ф. К. Велижевым (рис. 3.5).

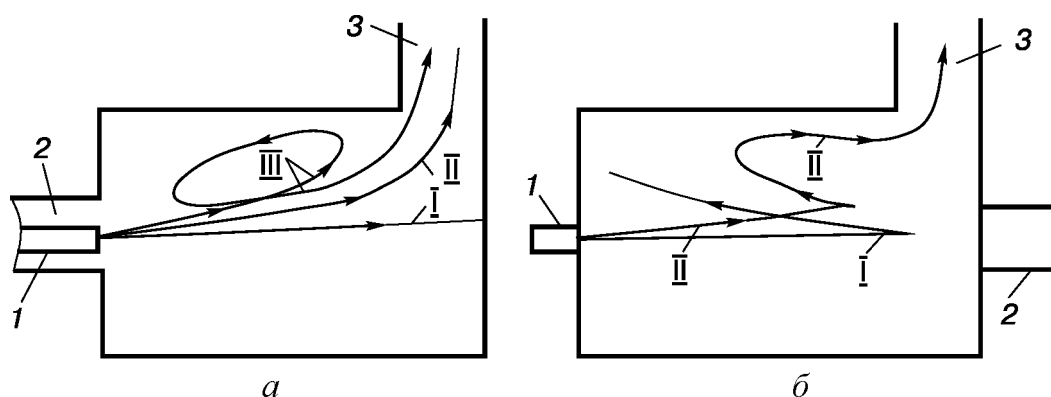


Рис. 3.5. Вид траектории капли в проточной (а) и противоточной (б) топках: 1 – форсунка; 2 – ввод воздуха; 3 – отвод продуктов горения; I – крупная капля; II – средняя капля; III – мелкая капля

При движении в горячем воздухе или газозвушном потоке капли мазута прогреваются, легкие фракции топлива испаряются и сгорают, в первом приближении по квадратичному закону, аналогично каплям полностью испаряющихся топлив. Но содержащиеся в мазуте

высокомолекулярные соединения в виде карбенов, карбоидов, асфальтенов и смол, составляющие коксовый остаток, выгорают значительно дольше. Последовательность процессов при горении тяжелых жидких топлив показана на рис. 3.6.

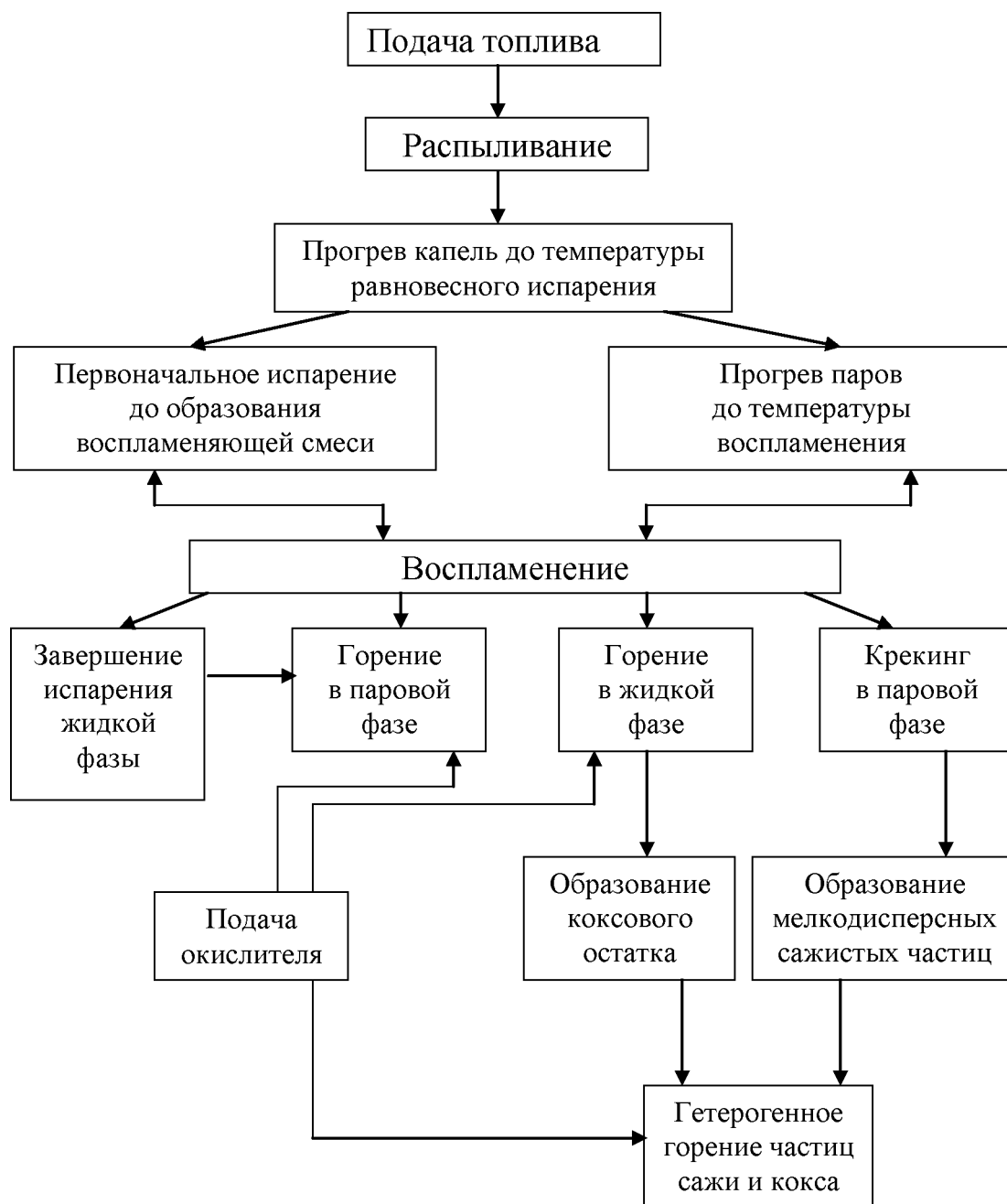


Рис. 3.6. Последовательность физико-химических процессов при горении мазута

Вышесказанное определяет общее увеличение длительности горения этих капель по сравнению с каплями более легких топлив того же диаметра, вследствие чего мазутный факел длиннее, чем факел га-

зоообразного или полностью испаряющегося жидкого топлива. Длина мазутного факела может быть определена, например, как расстояние от среза форсунки до участка факела, где сумма потерь от химической и механической неполноты сгорания составляет 0,5 % – значение, примерно соответствующее погрешности применяемых методов определения  $g_3$  и  $g_4$ .

Обычно неполнота сгорания сказывается в присутствии газообразных ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) и твердых (сажа) продуктов. Соотношение между газообразными и твердыми продуктами неполного сгорания мазутных капель зависит от их диаметра. Действительно, с увеличением диаметра капель уменьшается их активная относительная поверхность, ухудшаются условия для прогрева, испарения и газификации капель и замедляются процессы термического и окислительного крекинга высокомолекулярной части мазута, что ухудшает условия выгорания коксового остатка. Отсюда можно сделать вывод, что выгорание мелких капель будет сопровождаться выделением меньшего количества твердых и большего – газообразных продуктов, – чем в случае крупных капель мазута. Исходя из этого целесообразно перестроить спектр капель таким образом, чтобы образовывались мелкие капли. Этого можно достичь с помощью эффекта вторичного дробления капель мазута. На основании результатов экспериментального исследования вторичного дробления капель М. С. Волынский получил критериальное уравнение

$$\rho_r u_0^2 d_k / \delta = D_{\text{др}}, \quad (3.6)$$

где  $\rho_r$  – плотность окружающей каплю среды;  $d_k$ ,  $\delta$  – размер и поверхностное натяжение капли;  $u_0$  – относительная скорость движения капли;  $D_{\text{др}}$  – критерий деформации (дробления).

Критерий дробления равен 10,7 в момент начала раздробления капли и 14 при полном дроблении всех капель размера  $d_k$  на множество мелких частиц. Последний режим рассматривается как режим распыливания, при этом образующийся спектр частиц тем мельче, чем больше критерий  $D_{\text{др}}$ . Режим дробления сохраняется при всех  $D_{\text{др}} > 14$ . Физическая причина распада капли заключается в том, что деформация ее достигает критической фазы, соответствующей резкому изменению формы, благодаря чему капля становится неустойчивой относительно малых возмущений, в процессе развития которых происходит распад ее на отдельные частицы. На основании формулы (3.6) можно определить критическое значение относительной скорости:

$$u_{\text{окр}} = \sqrt{\sigma D_{\text{др}} / (\rho_{\text{г}} d_{\text{к}})}.$$

Расчеты, проведенные для максимальных размеров капель (0,25–5 мм), показывают, что вторичное дробление капель может иметь место практически при любом режиме работы горелки. При повышении давления распыливания, сопровождающемся увеличением скорости истечения мазута из форсунки, значение минимальной среднерасходной скорости воздушного потока, при которой полностью дробятся капли заданного размера, при одних и тех же  $d_{\text{к}}$  и  $u_{\text{окр}}$  увеличивается, достигая, например,  $d_{\text{к}} = 1$  мм;  $\omega_{\text{мин}} = 60,8$  м/с при  $v_{\text{к}} = 50$  м/с против 34 м/с при  $v_{\text{к}} = 13$  м/с. В реальных условиях это может привести к тому, что при увеличении давления распыливания выше 1,5–1,8 МПа, когда влияние давления на размер капель относительно мало, горение мазута может заметно ухудшиться. По-видимому, это объясняется рассмотренным выше увеличением значения  $\omega_{\text{мин}}$  с повышением давления распыливания, что вызывает переход капель из области вторичного дробления (значение  $D_{\text{др}} > 14$ ) в область со сниженными значениями критерия дробления  $D_{\text{др}} > 10,7$ . Но надо учесть, что не все капли размера  $d_{\text{к}}$  подвергаются дроблению. Это связано с тем, что время их деформации может оказаться больше времени, необходимого для увлечения капли воздушным потоком. Следует иметь в виду, что условия для возрастания размеров капель особенно благоприятны при увеличении единичной мощности форсунок, а также при работе котлов с частичными нагрузками. В первом случае капли увеличиваются за счет роста геометрических размеров форсунок, а во втором – за счет уменьшения давления мазута. В то же время необходимо, чтобы и при этих условиях топливо успевало полностью сгорать в топочном объеме. Поэтому следует знать максимально допустимый диаметр, при котором капля успевает в наилучших условиях практически полностью выгореть в топке при минимальном избытке воздуха. Для определения максимально допустимого диаметра требуется, чтобы суммарное время сгорания капли топлива  $\sum \tau$  не превышало времени ее пребывания в топке  $\tau_{\text{пр}}$ . Полное время горения мазутных капель

$$\sum \tau = \tau_{\text{воспл}} + \tau_{\text{ж}} + \tau_{\text{ко}},$$

где  $\tau_{\text{воспл}}$  – время воспламенения;  $\tau_{\text{ж}}$  – время горения жидкой фазы:

$$\tau_{\text{ж}} = d_{\text{мах}}^2 / K_{\text{г}},$$

где  $d_{\max}$  – максимальный диаметр капли топлива;  $K_T$  – константа горения;  $\tau_{\text{ко}}$  – время горения коксового остатка.

Максимально допустимый диаметр капли определяется из условия

$$d_{\max, \text{доп}} \leq \sqrt{0,5(H_T^r / \omega_{\text{ср}} - 0,85)}.$$

Время пребывания капли топлива в объеме топки не может быть определено однозначно для всех капель топливного факела, так как они движутся по разным траекториям. Наиболее просто величина  $\tau_{\text{пр}}$  находится для капель, траектории движения которых совпадают с осью топки и, следовательно, с общим направлением продуктов горения. В этом случае

$$\tau_{\text{пр}} = \psi V_T^r / Q_c = H_T^r / \omega_{\text{ср}},$$

где  $\psi$  – коэффициент заполнения топки;  $V_T^r$  – объем топки выше уровня горелок;  $Q_c$  – секундный расход газа.

Таким образом, из условия полного сгорания капли топлива определяется максимально допустимый размер капли; в качестве примера на рис. 3.7 приведена кривая, характеризующая необходимое качество распыливания топлива при сжигании в топке котла ТГМ-94. Накладывая на нее кривые, характеризующие качество распыливания мазута штампованными центробежными форсунками различных типоразмеров в требуемом для блочных котлов диапазоне нагрузок 100–30 %, получаем область регулирования для разных форсунок применительно к данному топочному устройству. Как видно из рис. 3.7, с повышением единичного расхода форсунок область регулирования сокращается.

Необходимо учитывать, что нераздробленные, относительно крупные капли, находясь в восходящем потоке газа, будут перемещаться в топке со скоростью, значительно меньшей скорости газового потока и равной разности между скоростью газового потока и равновесной скоростью падения капель (скоростью витания). Таким образом, время пребывания капель в реакционном объеме жидкости окажется тем больше, чем больше размер капель. Это подтверждается результатами сопоставления равновесной скорости падения капель в газе соответствующего состава и температуры со скоростью движения продуктов горения мазута в топке. Следует заметить, что равновесная скорость движения горящих капель может быть определена лишь приближенно, по-

скольку в настоящее время влияние тепло- и массообмена на аэродинамическое сопротивление движущихся тел изучено недостаточно. Известно лишь, что это влияние проявляется слабо.

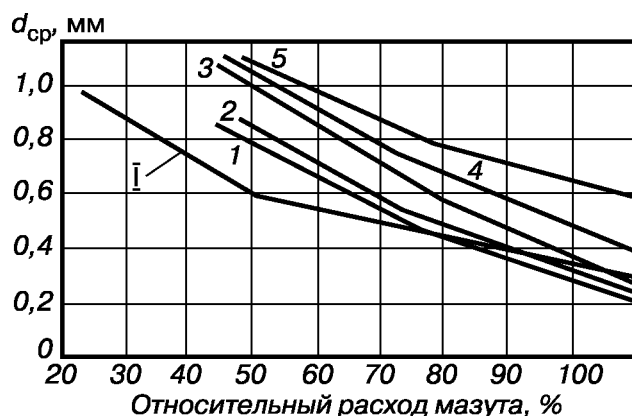


Рис. 3.7. Сопоставление фактических и допустимых диаметров капель: I — кривая, характеризующая необходимое качество распыливания мазута при сжигании в топке котла ТГМ-94 с тепловым напряжением топочного объема  $220 \text{ кВт/м}^3$ ; 1–5 — кривые, характеризующие качество распыливания штампованными форсунками с номинальным расходом (при давлении 1,96 МПа) соответственно 2,22, 1,39, 1,11, 0,83, 0,50 кг/с

По представлениям Д. Б. Сполдинга, испарение жидкости с поверхности капли вызывает уменьшение ее коэффициента сопротивления, которое для капель мазута будет частично компенсироваться увеличением их начального диаметра вследствие нагревания. Поэтому суммарный эффект воздействия капель мазута размером 1–2 мм на коэффициент их аэродинамического сопротивления вряд ли может оказаться существенным. Как показали опыты Д. Дженкинса, значения коэффициента сопротивления капель практически не отличаются от соответствующих значений коэффициента сопротивления шаров, если числа Рейнольдса, отнесенные к размеру капли, не превышают 250–300.

Расчеты равновесной скорости падения капель, проведенные для температуры топочного газа  $\sim 1670 \text{ К}$ , показали, что для капель диаметром 2 мм и более она близка к средней, направленной вверх скорости движения газа в топках существующих котлов, составляющей 10–15 м/с. Это значит, что крупные капли диаметром 2 мм и более практически не будут увлекаться газовым потоком в направлении его поступательного движения.

Если бы такие капли не выгорали, то время их пребывания в топке могло бы быть сколь угодно большим. В действительности



по мере выгорания крупные капли будут все более увлекаться газовым потоком, пока их скорость не приблизится к скорости потока.

Использование закономерностей вторичного дробления капель позволяет утверждать, что последнее способствует переформированию спектра капель в более мелкие. Это значит, что при увеличенных скоростях воздушного потока механическая неполнота сгорания должна быть ниже, чем при пониженных скоростях, а химическая – наоборот. Таким образом, наличие вторичного дробления капель изменяет характер выгорания распыленного мазута и способствует более полному сгоранию топлива.

Как показано выше, пары мазута при нагревании с недостатком окислителя расщепляются несимметрично с образованием как простейших углеводородов, так и высокомолекулярных углеводородов с высоким содержанием углерода, включая твердые частицы сажи. Процесс образования сажи особенно интенсивен при высоких температурах. Поэтому при сжигании мазута необходимо предотвращать термическое разложение паров топлива в зоне испарения и смесеобразования. Для этого следует весь воздух, необходимый для горения, подавать в корень факела. Тогда в зоне испарения и термического преобразования паров топлива увеличивается количество  $O_2$  и понижается температура, т. е. создаются благоприятные условия для протекания процессов предварительного окисления углеводородов. Эти процессы называются *предварительной газификацией*.

Факельное сжигание жидкого топлива можно осуществлять в прямоточном (незакрученном) и вихревом (закрученном) потоках. Сначала рассмотрим прямоточный факел, схема которого представлена на рис. 3.8. Из горелки 2 в топочную камеру подается воздушный поток, в который с помощью форсунки 1 производится распыление топлива. В результате инжектирования к воздушному потоку подмешиваются горячие топочные газы, что вызывает увеличение его сечения, прогрева и испарения частиц топлива.

В факеле в процессе турбулентной и молекулярной диффузии пары горючего и воздух перемешиваются, образуя горючую смесь. Воспламенение смеси происходит в таком сечении струи, где концентрация горючего достигает предела распространения пламени. Поэтому воспламенение в устье горелки происходит не сразу, а на некотором расстоянии от ее среза. Зона воспламенения 4 стабилизируется на такой поверхности факела, где скорость поступления движения горючей смеси равна скорости распространения пламени. Нарушение этого условия может вызвать отрыв факела и его затухание или при-

ближение зоны воспламенения к срезу горелки, что может привести к перегреву и коксованию входного отверстия форсунки.

Горение основной части горючей смеси протекает в слое 5, называемом *фронтом горения*. При ламинарном режиме движения газозоудшного потока фронт горения имеет четкую границу и очень малую толщину. В турбулентном факеле образуется пульсирующий, размытый, местами разорванный факел горения. Его толщина зависит от степени турбулентности и может достигать значительных размеров (до нескольких сантиметров).

Фронт горения делит факел на две части: внутреннюю 3 и наружную 6. Внутренняя часть факела заполнена смесью воздуха, жидких и газообразных горючих, а также продуктами сгорания, диффундировавшими из фронта горения. В ней протекают процессы испарения топлива, образования горючей смеси, нагрев ее, процессы газификации и термического преобразования паров горючего. Наружная часть факела заполнена продуктами сгорания, избыточным воздухом, а также газообразными продуктами неполного горения и твердыми частицами кокса и сажи, которые в этой зоне догорают. Здесь же протекают процессы испарения и горения наиболее крупных капель, испарение которых не завершалось во внутренней части факела. Между фронтом горения 5 и зоной догорания 6 четкой границы не существует. За начало зоны догорания обычно принимают границу, за пределами которой начинается понижение температуры среды факела.

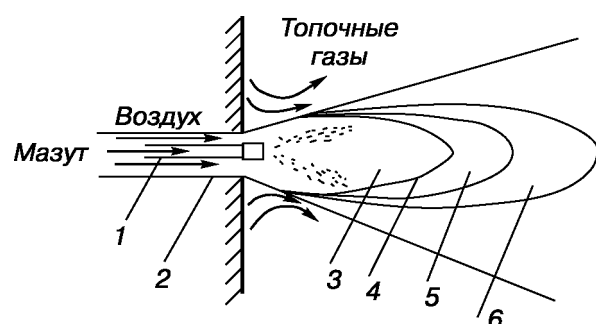


Рис. 3.8. Схема проточного факела жидкого топлива

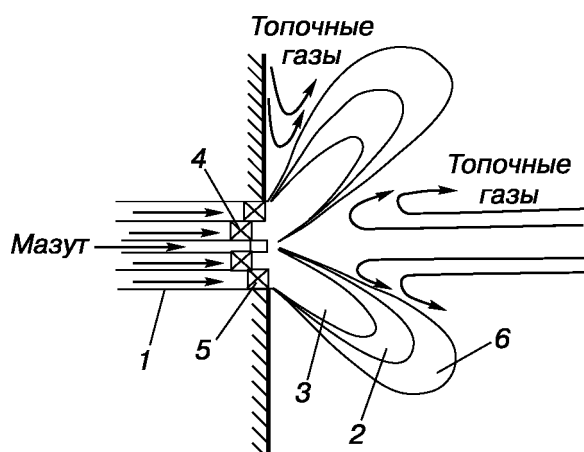


Рис. 3.9. Схема завихренного факела жидкого топлива

При высокой температуре, характерной для мазутного факела, скорость химических реакций очень высока и значительно превышает скорость испарения и диффузии окислителя в зону горения. Таким

образом, при горении мазута наиболее медленными являются процессы испарения топлива и диффузии окислителя. Следовательно, горение мазутного факела в целом протекает в диффузионной области.

Для интенсификации всех стадий горения (жидкого топлива) мазутного факела применяется искусственная турбулизация потока путем завихрения (рис. 3.9) в горелке 1 с помощью направляющих лопаток 4 и 5, называемых воздушными регистрами. Воздух, подаваемый в корень факела, обычно делится на две части. Одна часть, называемая первичным воздухом, вводится в приосевую часть факела, где, смешиваясь с парами топлива, полученными при испарении наиболее мелких капель, образует горючую первичную смесь. Количество первичного воздуха должно быть достаточным для протекания начальных окислительных процессов. Остальной воздух, называемый вторичным, подается в периферийную зону корня факела. Крупные капли благодаря высокой инерции быстро проходят через слой первичной смеси, где происходит лишь начальная стадия их испарения. Испарение крупных капель топлива происходит в периферийной части факела, где, вследствие наличия свободного кислорода и более низкой температуры, создаются благоприятные условия для газификации паров горючего.

Анализ исследования позволяет сделать заключение, что образование и рост сажевых частиц зависит прежде всего от достаточного количества окислителя в зоне горения, а также способа и качества смешения топлива с окислителем. Кроме того, существенное влияние оказывают состав и вид самого топлива и способ его сжигания.

Одним из направлений повышения эффективности использования жидкого топлива, и в частности топочного мазута, является сжигание последнего в виде водомазутной эмульсии (ВМЭ).

*Водомазутные эмульсии* – это принципиально новый вид жидкого синтетического топлива, отличающийся от мазута как физико-химическими свойствами, так и особенностями выгорания и теплообмена. Вода в ВМЭ – своеобразный катализатор, улучшающий и ускоряющий процесс сжигания топлива.

### **3.2.5. Особенности горения водотопливных эмульсий**

**Вязкость водотопливных эмульсий (ВТЭ)** относится к числу важнейших показателей качества жидкого топлива и водотопливных эмульсий. Вязкость – определяющий фактор стабильности ВТЭ при заданной концентрации дисперсной фазы (воды). Вязкость ВТЭ всегда выше вязкости отдельных фаз. Более того, вязкость, определенная

опытным путем, как правило, выше рассчитанной по закону Эйнштейна:

$$\eta_{\text{эм}} = \eta_{\text{т}}(1 + 2,5\varphi),$$

где  $\eta_{\text{эм}}$ ,  $\eta_{\text{т}}$  – динамическая вязкость эмульсии и топлива соответственно;  $\varphi$  – объемная доля дисперсной фазы (воды).

Вязкость ВТЭ возрастает с понижением температуры в сравнении с вязкостью натурального топлива. При температурах более 50–80 °С ВТЭ уже проявляет свойства обычных ньютоновских жидкостей.

Вязкость водомазутной эмульсии подчиняется полученному экспериментальным путем уравнению

$$\mu_{\text{эм}} = \mu_{\text{т}}(1 + aW + bW^p),$$

где  $\mu_{\text{эм}}$ ,  $\mu_{\text{т}}$  – кинематическая вязкость соответственно эмульсии и топлива;  $W^p$  – концентрация дисперсной фазы (воды);  $a$ ,  $b$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от вида и марки жидкого топлива и способа приготовления водотопливной эмульсии.

Вязкость ВМЭ возрастает с повышением дисперсности эмульсии, но до определенного уровня (0,1–0,8 мкм), т. е. до состояния микроэмульсии. Таким образом, вязкость также зависит от технологии получения ВТЭ (см. рис. 3.10, где 1 – кривая вязкости ВМЭ, полученной по схеме «эжектор – насос – эмульгатор»; 2 – кривая вязкости ВМЭ по схеме «эжектор – насос»).

**Плотность** в сочетании с вязкостью играет большую роль в стабильности и долговечности ВМЭ. Плотность мазута 0,97–1,015 т/м<sup>3</sup>. Как для мазута, так и для ВМЭ плотность зависит от температуры (рис. 3.11) и давления.

Плотность может быть определена для эмульсий из выражения

$$\rho_{\text{эм}} = \rho_{\text{т}}m_{\text{т}} + \rho_{\text{в}}m_{\text{в}},$$

где  $\rho_{\text{т}}$ ,  $\rho_{\text{в}}$  – соответственно плотность топлива и воды в заданных условиях;  $m_{\text{т}}$ ,  $m_{\text{в}}$  – массовая доля топлива и воды в эмульсии.

**Теплота сгорания.** Истинная теплота сгорания ВТЭ определяется опытным путем. Для технических расчетов низшую теплоту сгорания можно определить по формуле Менделеева

$$Q_{\text{н}}^p = 0,339C^p + 1,03H^p - 0,109(O^p - S^p) - 0,025W^p,$$

где  $C^p$ ,  $H^p$ ,  $O^p$ ,  $S^p$ ,  $W^p$  – содержание углерода, водорода, кислорода, серы и воды в ВТЭ, %.

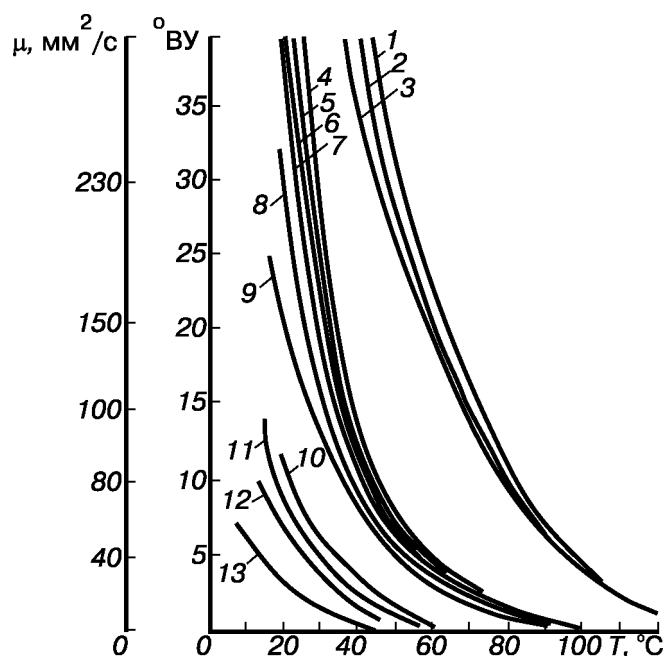


Рис. 3.10. Зависимость вязкости мазута и ВТЭ  $\mu$  от температуры и содержания воды  $W^p$ : 1–13 – состав мазута и ВТЭ: 1 – 80 % мазут 100 + 20 %  $W^p$ ; 2 – 90 % мазут 100 + 10 %  $W^p$ ; 3 – мазут 100; 4 – 70 % мазут 40 + 30 %  $W^p$ ; 5 – 80 % мазут 40 + 20 %  $W^p$ ; 6 – 90 % мазут 40 + 10 %  $W^p$ ; 7 – мазут 40; 8 – 70 % ДТ + 20 % мазут 40 + 10 %  $W^p$ ; 9 – 91 % ДТ + 9 %  $W^p$ ; 10 – 75 % мазут 40 + 15 % ТПБ + 10 %  $W^p$ ; 11 – 61 % мазут 40 + 19 % ТПБ + 20 %  $W^p$ ; 12 – 60 % мазут 40 + 30 % ТПБ + 10 %  $W^p$ ; 13 – 90 % ТПБ + 10 %  $W^p$

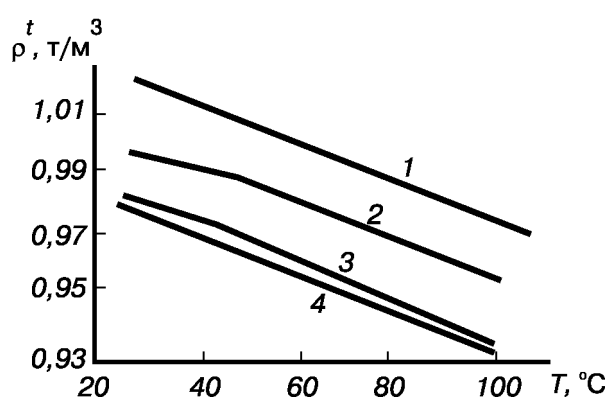


Рис. 3.11. Изменение плотности мазутов и ВМЭ ( $W^p = 20\%$ ) в зависимости от температуры при составе: 1 – крекинг-мазут; 2 – вода; 3 – мазут 100; 4 – мазут 40

Зная теплоту сгорания жидкого исходного топлива, можно определить  $Q_H^p$  ВМЭ:

$$Q_{\text{HЭМ}}^P = (Q_{\text{HМ}}^P + 0,025W_{\text{М}}^P) \left[ (100 - W_{\text{ЭМ}}^P)(100 - W_{\text{М}}^P) \right] - 0,025W_{\text{ЭМ}}^P,$$

где  $Q_{\text{HМ}}^P$  – теплота сгорания мазута (топлива), МДж/кг;  $W_{\text{М}}^P$ ,  $W_{\text{ЭМ}}^P$  – соответственно содержание воды в мазуте и ВМЭ, %.

Экспериментальные исследования процесса горения единичной капли мазута и ВМЭ позволили установить ряд особенностей, присущих этому процессу.

При одинаковых температурных условиях воспламенение паров капли ВМЭ происходит раньше, чем капли обезвоженного мазута. Процесс горения эмульсии сопровождается разрывами поверхности капли и выбросом из нее паров воды. Капля эмульсии сгорает быстрее, чем такая же по размеру капля обезвоженного чистого мазута, вследствие дробления, что происходит благодаря «разрывному» воздействию водяных паров (рис. 3.12). Капля эмульсии начинает закипать в топочной среде раньше по времени и при более низких температурах. Так, при  $t = 350^\circ\text{C}$  капля ВМЭ начинает закипать через 2 с, при  $t = 500^\circ\text{C}$  – уже через 1 с, а капля мазута – только через 7 с.

Кипение ВМЭ происходит в две стадии. Сначала закипает содержащаяся в эмульсии вода в глобулах. Давление в глобулах дисперсной фазы резко возрастает. Внутренние силы разрывают поверхностную пленку и дробят каплю ВМЭ. Частицы капли разлетаются в разные стороны, приобретая дополнительную скорость относительно окружающей среды. Все это ведет к мгновенному испарению и образованию парового облака.

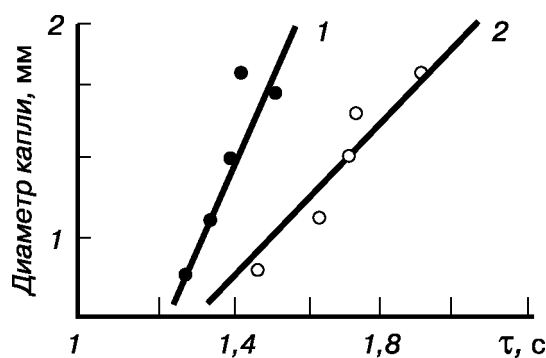


Рис. 3.12. Время выгорания капли ВМЭ и мазута:  
1 – ВМЭ; 2 – мазут

Наблюдения за изменением температуры нагрева и испарения капель мазута и горения его паров показали, что наряду с процессами горения паров топлива в интервале температур  $850\text{--}890^\circ\text{C}$  имеет ме-

сто эндотермический процесс, который вызывает понижение температуры горячей капли на 18–20 °С, обусловленное термическим разложением и рекомбинацией молекул высококипящих углеводородов в паровой фазе.

Заключительная стадия горения мазута представляет собой догорание сажистых остатков, которые вызывают наибольшее свечение пламени. При испарении с поверхности капля мазута сначала выкипает более легкие, а потом тяжелые углеводороды. Легкие углеводороды и радикалы типа СН или ОН более реакционноспособны и поэтому сразу вступают в реакцию с  $O_2$  воздуха.

Тяжелые углеводороды не сразу вступают в реакцию с  $O_2$ : они сначала распадаются на более легкие углеводороды или радикалы и свободный С. Первые перехватывают диффундирующий из окружающей топочной среды  $O_2$ , а отделившийся углерод в условиях пониженных температур и недостаточно быстрого поступления  $O_2$  из окружающей среды может вступать в реакцию с ним лишь в самую последнюю очередь.

Молекулы высокомолекулярных соединений топлива, переплетаясь, образуют микроклубки, которые полностью не окисляются из-за ограничения доступа  $O_2$ . Эти соединения под действием высоких температур подвергаются пиролизу с образованием сажи. Микроклубки выпрямляются, создавая благоприятные условия для выгорания топлива.

Образовавшееся паровое облако состоит из мельчайших частиц как тяжелых, так и легких углеводородов, а также паров воды и продуктов ее диссоциации. Облако, обладая высокой удельной поверхностью, значительно эффективнее контактирует с окислителем. В результате резко сокращается время и возможность пиролиза топлива. Уменьшаются размеры сажистых частиц и их структура, что ведет к сокращению времени их выгорания. Каталитическое влияние водяных паров на выгорание известно давно. Так, например, без  $H_2O$  выгорание СО не происходит, а при 0,5 %  $H_2O$  достигает 100 %. Таким образом, при сжигании ВТЭ в зоне горения значительно возрастает концентрация  $H_2O$  и продуктов ее разложения (ОН; Н; О), оказывающих каталитическое влияние на процесс горения. Дисперсная фаза (вода), на поверхности раздела которой концентрируются асфальтены и смолы, ведет к диспергированию последних, насыщению их радикалами в момент микровзрыва.

Устойчивое интенсивное горение ВТЭ, протекающее в более коротком факеле и характеризующееся высокой полнотой сгорания то-

плива при минимальных избытках воздуха, открывает большие возможности для их эффективного использования в отопительных котельных.

**Эмиссионные свойства факела ВМЭ и теплообмен в топке.** Интенсивность излучения пламени, согласно закону Стефана – Больцмана, определяется температурой  $T$  и степенью черноты излучающей среды  $\varepsilon$ . В результате микровзрыва возникают очаги турбулентности пульсации, благодаря которым факел увеличивается в объеме, более полно заполняя топочную камеру. Интенсивность подвода окислителя в реакционную зону возрастает, в результате увеличиваются скорость выгорания и объем факела. Температурное поле топки выравнивается с уменьшением локальных максимальных температур и одновременным увеличением средней температуры топки, играющей решающую роль в лучистом теплообмене в топке котла. Экспериментальные исследования подтверждают перераспределение температур и фактическое снижение максимальных температур:

$$T_{\text{эм}}^{\text{теор}} = T_{\text{м}}^{\text{теор}} - 2,5W^p,$$

где  $W^p$  – концентрация воды, %.

На теоретическую температуру горения существенное влияние оказывает коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_t$ . С уменьшением  $\alpha_t$  от 1,2 до 1,1 теоретическая температура горения мазута увеличивается примерно на 80 °С.

Излучающая способность топочной среды кроме температуры зависит от степени черноты  $\varepsilon_t$ :

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{\text{ф}} / \left[ \varepsilon_{\text{ф}} + (1 - \varepsilon_{\text{ф}}) \psi_{\text{ср}} \right],$$

которая зависит от среднего значения коэффициента тепловой эффективности экранов  $\psi_{\text{ср}}$  и от степени черноты факелов  $\varepsilon_{\text{ф}}$ :

$$\varepsilon_{\text{ф}} = m\varepsilon_{\text{св}} + (1 - m)\varepsilon_r,$$

где  $m$  – коэффициент заполнения топочного объема светящимся факелом;  $\varepsilon_{\text{св}}$  – степень черноты светящегося факела;  $\varepsilon_r$  – степень черноты топочной среды, заполненной трехатомными газами.

Степень черноты  $\varepsilon_r$  определяется из выражения

$$\varepsilon_r = 1 - \exp(-k_r r_{\text{п}} p_{\text{п}} S),$$



где  $k_r$  – коэффициент ослабления лучей трехатомными газами;  $r_{\text{п}} = r_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{RO}_2}$  – сумма объемных долей трехатомных газов;  $p_{\text{п}} = r_{\text{п}}p$  – суммарное парциальное давление трехатомных газов, где  $p$  – давление топочной среды;  $S$  – эффективная толщина излучающего слоя;

$$k_r r_{\text{п}} = \left\{ \left[ (0,78 + 1,6r_{\text{H}_2\text{O}}) / \sqrt{p_{\text{п}} S} \right] - 0,1 \right\} (1 - 0,37 \cdot 10^{-3} T_{\text{п}}'') r_{\text{п}}.$$

После преобразований степень черноты светящегося факела

$$\varepsilon_{\text{ф}} = 1 - \exp[-(k_r r_{\text{п}} + k_c) p S],$$

где  $k_c$  – коэффициент ослабления излучения сажистыми частицами:

$$k_c = 0,03(2 - \alpha_{\text{т}}) [1,6(T + 273)10^{-3} - 0,5] (C_{\text{C}}^{\text{п}} / C_{\text{H}}^{\text{п}}).$$

где  $0,03(2 - \alpha_{\text{т}})$  – выражение, определяющее влияние  $\alpha_{\text{т}}$  на образование твердых частиц (сажи и кокса);  $C_{\text{C}}^{\text{п}} / C_{\text{H}}^{\text{п}}$  – отношение концентраций углерода и водорода в рабочей массе топлива, которое показывает способность топлива к сажеобразованию, зависит от состава мазута и не зависит от обводнения мазута (для мазута и ВМЭ – 7–8).

С увеличением скорости подвода окислителя снижается диаметр твердых частиц. При сжигании ВМЭ в результате микровзрыва относительные скорости подачи горючего и окислителя возрастают в 2 раза. Концентрация сажистых частиц определяется следующим выражением:

$$\mu_{\text{с}} \approx T d_{\text{к}} (1 / U_{\text{пот}}),$$

где  $T$  – температура в зоне реакций;  $d_{\text{к}}$  – диаметр капли топлива;  $U_{\text{пот}}$  – скорость потока.

Концентрация твердых частиц экспоненциально увеличивается с ростом капель распыленного топлива. Кроме того, при увеличении в топливе на 1 % асфальтенов концентрация твердых частиц в уходящих газах увеличивается на 230 мг/м<sup>3</sup>. Ввод в топливо кислородсодержащих присадок ускоряет процесс окисления паров топлива. Такими свойствами обладает эмульгированная в топливе вода: она содержит  $\text{O}_2$  и способствует диспергированию асфальтенов, что, в свою очередь, ведет к образованию мелкодисперсной фазы твердого углерода (сажи), а последнее способствует интенсификации выгорания углеродных частиц. Указанные факторы в целом должны привести к снижению размеров твердых частиц в топке.

### 3.2.6. Технология приготовления водомазутных эмульсий

Качество эмульсии традиционно характеризуется двумя показателями: дисперсностью и равномерностью распределения глобул в дисперсной среде (мазуте). С повышением дисперсности и равномерности ВМЭ улучшается ее стабильность, а также надежность работы горелочных устройств.

Таким образом, технология приготовления ВМЭ на небольших отопительных котельных должна удовлетворять следующим требованиям:

- простота и надежность в эксплуатации;
- минимальная энергоемкость и возможность автоматизации процесса;
- однородность эмульсии и дисперсность в пределах 8–12 мкм.

Существующие технологии приготовления ВМЭ можно классифицировать по трем следующим признакам:

- 1) характеру и времени работы (периодического действия, непрерывного действия; автоматизированные схемы);
- 2) способу дозирования (по изменению объема в смесительной емкости; с насосом-дозатором для контроля обводненности и давления в системах; с эжектором-дозатором с промежуточной стабилизирующей емкостью или без нее);
- 3) типу диспергатора (эмульсионная форсунка, перфорированный коллектор, роторный эмульсатор; роторно-пульсационный эмульсатор, кавитационный эмульсатор ГК-1, ГАРТ-ПрМ).

Самая простая схема – это периодически действующая система «насос – перфорированный коллектор – расходная емкость с ВМЭ», представленная на рис. 3.13, а. Расходная емкость имеет тарировку, поплавковый уровнемер. На исходный объем мазута в емкость 8 через душевой насадок подается вода, подогретая до 50–70 °С (в большинстве случаев из системы отопления). После добавления требуемого количества воды включается циркуляционный насос 10. Минимальная кратность циркуляции 3–4, оптимальная – 5–6. Минимальный размер глобул 12–14, максимальный – 30–40 мкм. С увеличением кратности циркуляции уменьшаются размеры крупных капель, повышается однородность эмульсии. Минимальные размеры глобул остаются практически неизменными.

Производительность по данной технологии приготовления ВМЭ (1–10 м<sup>3</sup>/ч) зависит от типа циркуляционного насоса и расходной емкости. В котельной желательно иметь два расходных бака.

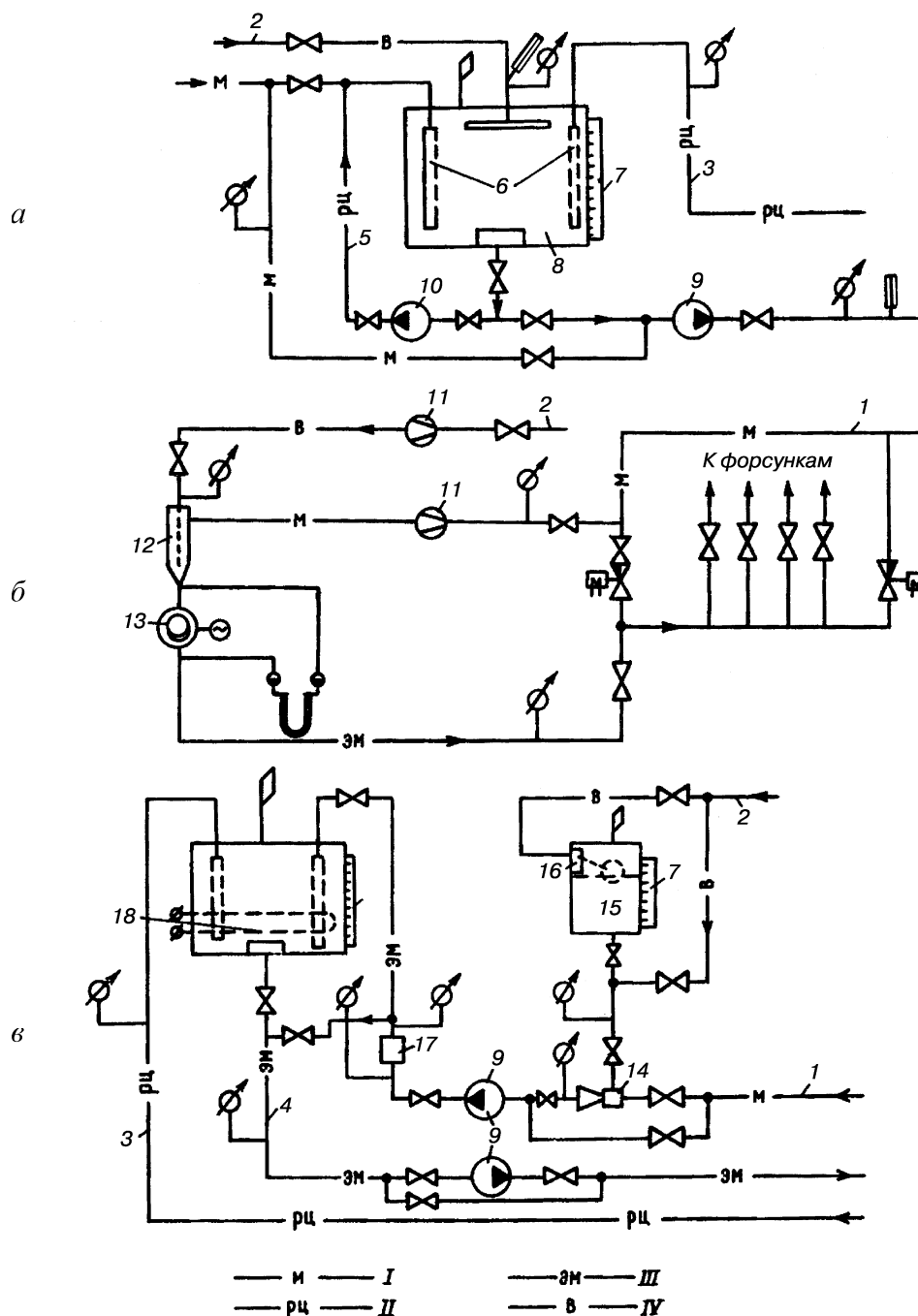


Рис. 3.13. Технологические схемы приготовления ВМЭ: а – периодического действия с эмульсатором – шестеренчатым насосом; б – двухступенчатая непрерывного действия с роторно-пульсационным эмульсатором; в – многоступенчатая с эжектором-дозатором и эмульсаторами роторного типа и шестеренчатым насосом; 1 – мазут; 2 – вода; 3 – рециркуляция от форсунок; 4 – ВМЭ к котлам; 5 – контур циркуляции для приготовления ВМЭ; 6 – перфорированный коллектор; 7 – измеритель уровня; 8 – расходная емкость с ВМЭ; 9 – подающий насос; 10 – циркуляционный шестеренчатый насос; 11 – расходомерная шайба; 12 – предварительный смеситель; 13 – роторно-пульсационный эмульсатор; 14 – эжектор-дозатор; 15 – бак-дозатор воды; 16 – стабилизатор; 17 – эмульсатор; 18 – электроподогрев; I – мазутопровод; II – рециркуляционный трубопровод; III – линия подачи эмульсии; IV – водопровод

К недостаткам такой технологии можно отнести сложность контроля соотношения воды и мазута, периодичность действия, получение грубодисперсных эмульсий, обладающих невысокими стабильностью и однородностью.

Системы, использующие в качестве дозаторов специальные насосы, могут быть периодическими и непрерывно действующими.

Существует также технология приготовления ВМЭ, в которой дозировка осуществляется насосами, а контроль расхода воды и мазута ведется расходомерами дроссельного типа (рис. 3.13, б). Грубодисперсная эмульсия готовится в предварительном смесителе, состоящем из корпуса, в котором вварена перфорированная труба 12. Затем смесь подается в роторно-пульсационный эмульсатор 13 и далее к форсункам. Система непрерывного действия получения ВМЭ обладает высокими дисперсностью (1–10 мкм), стабильностью и однородностью. Однако сложным является контроль соотношения «вода – мазут».

Наиболее приемлемыми для отопительных котельных являются технологические схемы с эжекторами-дозаторами, которые одновременно являются эмульсаторами первой ступени. Эти системы способны автоматически поддерживать заданное соотношение «вода – мазут» при изменении расхода мазута. Вторая ступень диспергирования обеспечивается шестеренчатыми насосами, а при установке эмульсаторов того или иного типа (рис. 3.13, в) образуется многоступенчатая система приготовления ВМЭ.

В качестве эжекторов-дозаторов могут применяться типовые элеваторы с установкой в них специальных струйных смесителей.

Наиболее простая конструкция эмульсатора роторного типа представлена на рис. 3.14. Грубодисперсная эмульсия после эжектора поступает во внутреннюю полость неподвижного перфорированного цилиндра-статора 3, на входе в который установлена турбинка 7. Под действием напора ВМЭ турбинка приводит во вращательное движение подвижный цилиндр-ротор 6, имеющий отверстия. Давление перед эмульсатором не менее 0,6 МПа, скорость потока не ниже 1,1 м/с при температуре 60–70 °С. Оптимальный угол раскрытия лопаток турбинки 30–35 °С. При прохождении грубодисперсной эмульсии через отверстия статора повышается равномерность распределения воды в мазуте. Активный процесс диспергирования происходит в межцилиндрическом пространстве. На поверхностях цилиндров образуется пленка, в которой крупные частицы дисперсной фазы (воды) вытягиваются в нити в плоскости вращения, затем распадаются на более

мелкие глобулы. Толщина межцилиндрического пространства 1,0–1,5 мм. Завершается процесс диспергирования на выходе из радиальных отверстий ротора. Средний размер глобул 8–20 мкм, стабильность эмульсии на базе мазута 100–40 ч. Производительность по эмульсии 0,3–1,2 м<sup>3</sup>/ч, удельная потребляемая мощность данной системы приготовления 1–2 кВт/м<sup>3</sup>. Процесс непрерывно-периодический. Эмульсатор вваривается в мазутопровод в котельной или устанавливается на фланцах в вертикальном положении с направлением движения сверху вниз.

В котельных, оборудованных теплогенераторами типа ДКВР и ПТВМ, применяют центробежный и роторно-пульсационные эмульсаторы, которые относятся к механическим эмульсаторам кавитационного типа. Вращение ротора осуществляют с помощью электропривода с частотой вращения от 4 до 25 с<sup>-1</sup>.

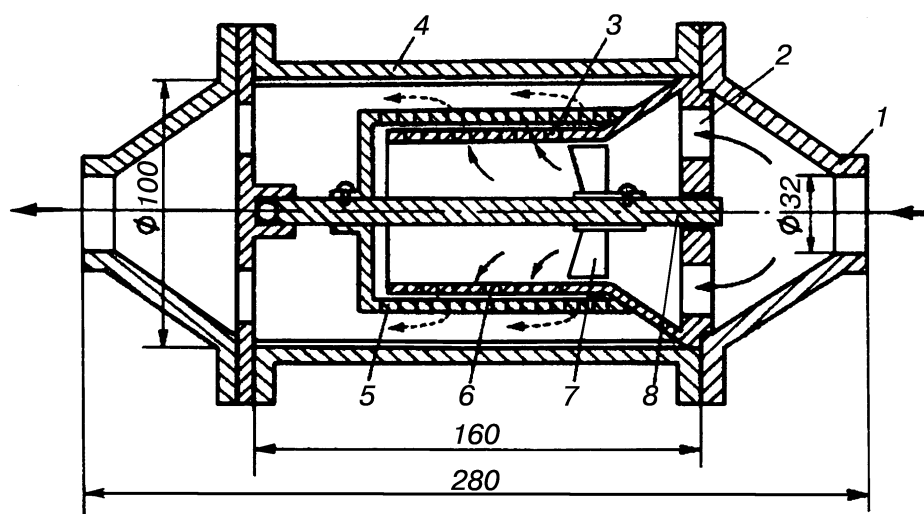


Рис. 3.14. Роторный эмульсатор: 1 – патрубок; 2 – перегородка с распределенными отверстиями; 3 – неподвижный цилиндр-статор; 4 – корпус; 5 – радиальные отверстия; 6 – вращающийся цилиндр-ротор; 7 – турбинка; 8 – вал

На рис. 3.15 изображен эмульсатор, который может работать на сточных водах очистных сооружений промышленных предприятий как в периодически действующем режиме, так и в непрерывном. Зазор между цилиндрами 2 мм. Производительность 4–8 м<sup>3</sup>/ч, время подготовки 30 мин, удельная потребляемая мощность 1–2 кВт/м<sup>3</sup>. Содержание воды в эмульсии от 10 до 30 %. Эмульсатор испытывался на разных режимах вращения ротора. При частоте вращения 4 с<sup>-1</sup> средний диаметр глобул составляет 150–300 мкм, при 24 с<sup>-1</sup> – 15–25 мкм при  $t_{эм} = 90$  °С. Снижение температуры ведет к увеличению раз-

меров глобул и времени приготовления ВМЭ. Эмульсия однородная, стабильность на расслоение не менее 48 ч.

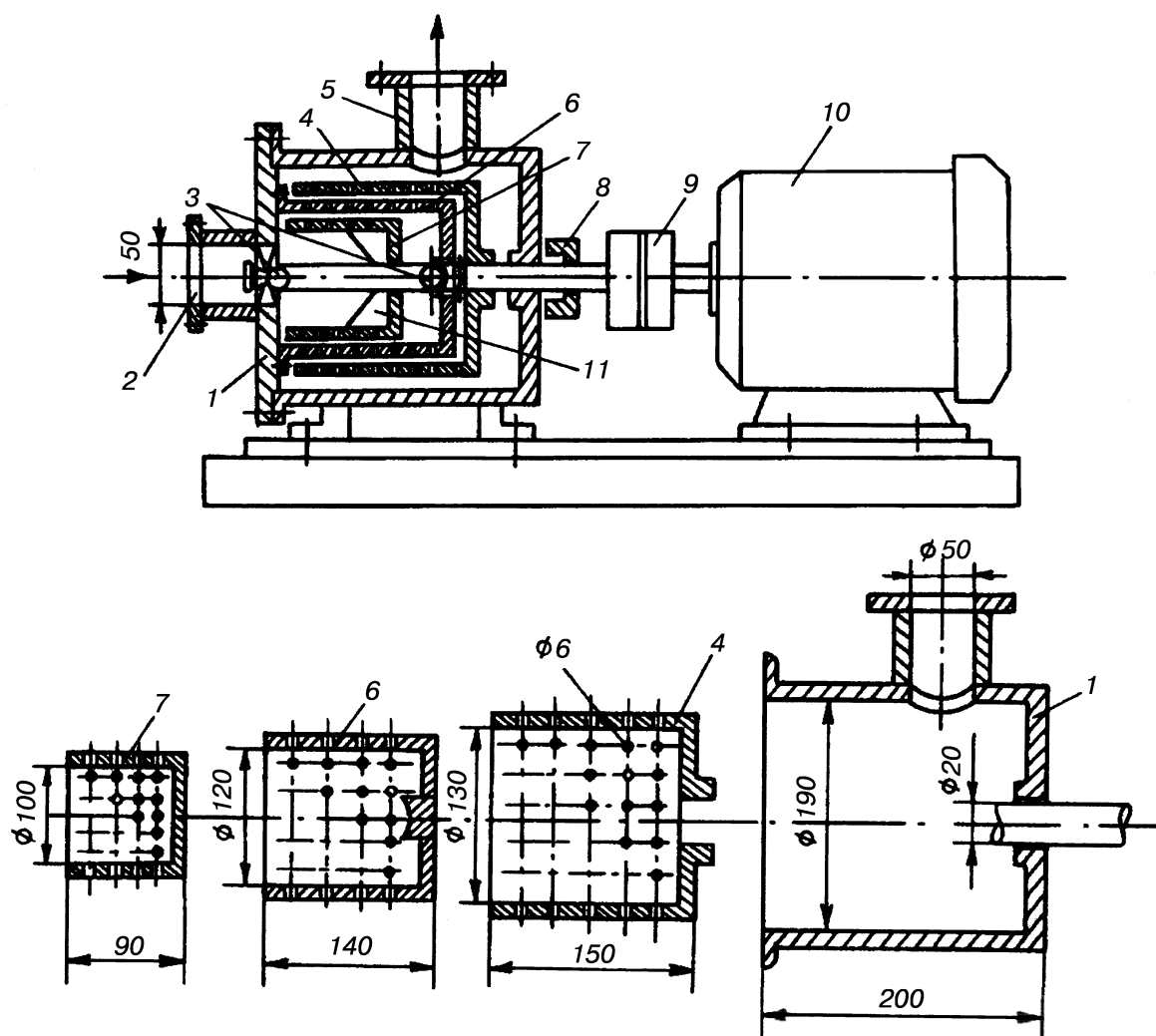


Рис. 3.15. Центробежный эмульсатор: 1 – корпус; 2 – вход эмульсии; 3 – шариковые опоры; 4 – вращающийся перфорированный цилиндр; 5 – выход эмульсии; 6 – неподвижный перфорированный цилиндр; 7 – перфорированный цилиндр с крыльчаткой; 8 – сальниковое уплотнение; 9 – муфта; 10 – электродвигатель; 11 – крыльчатка

Итак, при сжигании ВМЭ следует ожидать снижения токсичных выбросов и повышения КПД котла. Например, в Германии при использовании ультразвукового эмульсатора SID-82E и при содержании воды 4–5 % удалось повысить КПД котлов на 2,5–4,5 % за счет снижения избытка воздуха на 1–2 %, химической неполноты сгорания на 0,1–0,5 %.

Выход оксидов  $\text{NO}_x$  в продуктах горения снижается с увеличением содержания воды по линейной зависимости (рис. 3.16). При

$W^p = 10\%$  в эмульсии содержание  $\text{NO}_x$  снизилось на 34 %. Сложнее изменяется выход СО и сажи. С увеличением влажности до 10–13 % содержание СО и сажи снижается, дальнейшее увеличение влажности вызывает рост концентрации СО и сажи в продуктах сгорания. Снижение выбросов в атмосферу СО и сажи при влажности 10–12 % ВМЭ достигает 50 %.

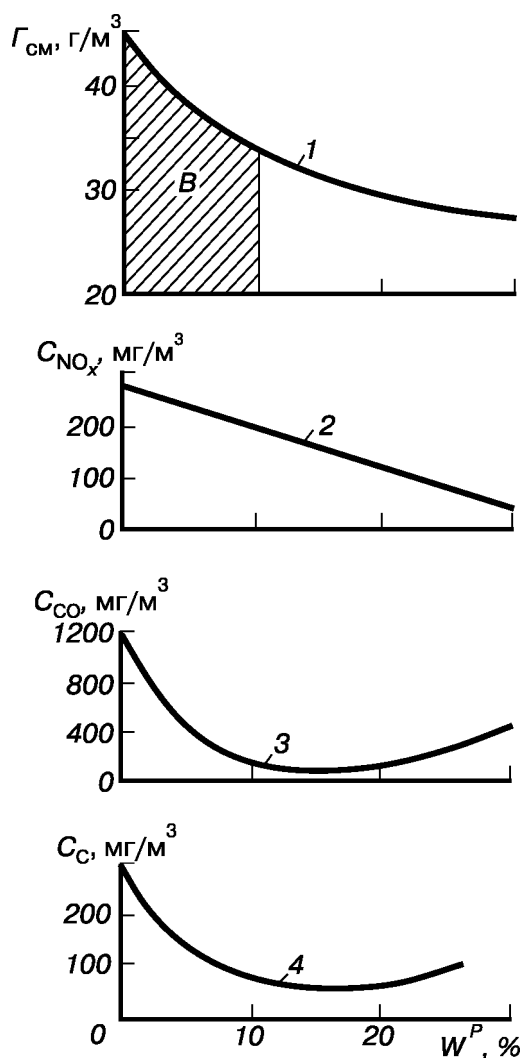


Рис. 3.16. Влияние содержания воды в ВМЭ на выход токсичных веществ в продуктах сгорания: В – зона интенсивного снижения концентраций токсичных веществ; 1 – условный показатель токсичности продуктов сгорания  $\Gamma_{\text{CM}}, \text{мг/м}^3$ ; 2 – концентрация оксидов азота  $C_{\text{NO}_x}, \text{мг/м}^3$ ; 3 – концентрация оксида углерода  $C_{\text{CO}}, \text{мг/м}^3$ ; 4 – концентрация сажи  $C_{\text{C}}, \text{мг/м}^3$

Помимо сжигания ВМЭ для снижения сажи в продуктах сгорания применяют сжигание мазута в голубом факеле. Большие капли с малой скоростью испарения образуют диффузионное пламя желтого цвета. В желтом пламени создаются условия формирования крекинга

углеводородов. Сажевые соединения отличаются большой химической стойкостью, и требуется значительное время, высокая температура и избыток  $O_2$ , чтобы дожечь частицы сажи. Все это приводит к понижению КПД процесса.

В горении с голубым факелом процесс сажеобразования подавляется путем распыления мазута до капель 20–30 мкм. При этом отношение площади поверхности капли к ее объему таково, что обеспечивается полная газификация капли в объеме пламени. Для улучшения процесса смешения применяют распределенную подачу распыленного мазута в воздушный поток, подвод факела и окислителя под углом друг к другу, подачу высокоскоростного потока вторичного воздуха к корню факела. С этой же целью увеличивают время пребывания распыленных частиц в пламени путем закручивания потоков воздуха, установки плохо обтекаемых тел для создания зон рециркуляции, уменьшения скорости воздушного потока воздуха. Ускорение процесса испарения капель мазута в форсунках с голубым пламенем обеспечивают рециркуляцией части горячих продуктов сгорания к потоку воздуха для горения или корню факела.

Время существования голубого пламени зависит от суммарного коэффициента расхода воздуха  $\alpha_\Sigma$ . При  $\alpha_\Sigma = \text{const}$  время существования голубого пламени возрастает с увеличением доли первичного воздуха. При горении топлива с образованием голубого пламени достигается высокая степень выгорания и уменьшается содержание вредных веществ в продуктах сгорания.

### **3.2.7. Основные пути снижения выбросов загрязнителей с продуктами сгорания**

Разработаны пять основных направлений борьбы с загрязнителями приземной атмосферы:

- специальная топливоподготовка, удаляющая элементы, образующие при сжигании загрязняющие вещества;
- оптимизация процесса сжигания топлива;
- подавление образования вредных веществ в процессе сжигания;
- очистка дымовых газов от загрязняющих веществ;
- ассимиляция загрязнителей в атмосферном воздухе.

Рассматривая методы снижения выбросов загрязнителей, необходимо определить критерии их эффективности и возможность использования на небольших котельных, оборудованных котлами малой мощности.



В табл. 3.4 приведены данные по эффективности применения того или иного способа снижения эмиссии загрязнителей в атмосферу.

Таблица 3.4

**Эффективность методов снижения выбросов загрязняющих веществ  
в малых котлах**

Метод	Снижение выбросов, %						Удорожание выработки теплоты, %
	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	Твердые частицы	Сажа	CO	Б(а)П	
Повышение КПД котла на 1 % при N <sub>к</sub> = 1 МВт	1,4	1,4	1,4	Более 1,5			Нет
Оборудование котла и котельной КИП	4,7	4,7	4,7	Более 7,0			Нет
Автоматизация топочных процессов	11–14	4–7	11–14	Более 14			Нет
Оптимизация подачи воздуха	20	–	–	5–10 раз			Нет
Ступенчатый подвод окис- лителя (только для газа)	20–50	–	–	–			Нет
Оптимизация режима работы котла	10–15	0	10	1,5–2,0 раза	Нет данных		Нет
Своевременная и качествен- ная наладка оборудования	10–15	0	10–20	≥20	То же		Нет
Применение современных топочно-горелочных устройств	20–25	80–90	–	20–40	1,5 раза		Нет
Использование искусст- венных топлив из угля и отходов	10–15	3–5 раз	–	2–7 раз	–		70–110
Использование присадок к мазуту	20	Нет данных	Нет данных	1,5–2 раза			10–15
Очистка топлива от серы и азота	20–60	3–5 раз	–	–	–	–	25–50
Перевод с жидкого топлива на газовое	20–25	–	–	5–10 раз	2–3 раза	2–10 раз	Нет
Сжигание смеси из ТПБ и мазута	15–20	20–25	5–7 раз	–			Нет
Сжигание ВМЭ	30	–	50	50	50	–	Нет
Очистка уходящих газов от соединений серы и оксидов азота	8–10 раз		3–6 раз	10	–	–	10–25
Рассеивание дымовых газов с помощью дымовых труб	Снижается концентрация в приземной зоне						Зависит от высоты трубы

Следует иметь в виду, что котельно-топочная техника постоянно совершенствуется и с каждым годом появляются все новые методы борьбы с загрязнением атмосферы.

Более того, на практике имеет место комбинированное (или комплексное) использование ряда методов одновременно, что позволяет значительно повысить эффективность очистки. Например, интенсификация теплоотвода в сочетании с рассредоточением фронта пламени существенно снижает выбросы оксидов азота. Сжигание ВМЭ – комплексный метод, интенсифицирующий выгорание сажи-стого углерода и теплообмен в топке.

### 3.2.8. Оптимизация работы котельной

Для экономии топлива и оздоровления окружающей среды большое значение имеют вопросы организации работы котельной. Так, повышение КПД котла существенным образом влияет на эмиссию загрязняющих веществ.

Расчетная тепловая мощность котлов типа «Тула», «Энергия», «Минск» – до 1 МВт. Эксплуатационные испытания показали, что средний КПД, как правило, ниже паспортных данных и составляет при сжигании мазута 65–70, при сжигании газового топлива 70–75 %, а при повышении КПД на 1 % экономия при сжигании мазута составляет 1,83 кг/ч топлива, при сжигании газового топлива – 1,73 м<sup>3</sup>/ч. Зная удельные выбросы, можно определить абсолютное их снижение (табл. 3.5).

Таблица 3.5

**Снижение эмиссии загрязняющих веществ при повышении КПД  
чугунного секционного котла на 1 %**

Вид топлива	Твёрдые частицы		СО		Б(а)П		SO <sub>x</sub>		NO <sub>x</sub>	
	г/ч	%	г/ч	%	мг/ч	%	г/ч	%	г/ч	%
Мазут	3,0	1,4	120,0	1,4	1,4–1,6	1,4	12,0	1,4	3,1	1,4
Природ- ный газ	0,8	1,3	50,0	1,3	0,075– 2,2	1,3	–	–	2,2	1,3

За сутки от одной котельной тепловой мощностью 3 МВт, работающей на мазуте, в атмосферу попадает 3,0 кг СО и около 1 кг NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, твердых частиц и полициклических углеводородов. Так как повышение КПД в первую очередь получают за счет снижения механической и ликвидации химической неполноты сгорания, то одновременно достигается дополнительное снижение эмиссии твердых частиц и продуктов незавершенного горения. Мероприятия, направленные на сни-

жение эмиссии загрязнителей в атмосферу за счет повышения КПД, не ведут к удорожанию вырабатываемой тепловой энергии.

Известно, что превышение оптимального коэффициента избытка воздуха на 0,1 снижает КПД котла примерно на 1 %. Следовательно, в *оптимизации подачи воздуха* кроются резервы эффективного использования топлива.

Рассмотрим непосредственное влияние избытка воздуха на эмиссию токсичных ингредиентов при сжигании топлива в малых котлах. Обратимся к рис. 3.17–3.19, которые иллюстрируют изменение концентрации продуктов химической неполноты сгорания от избытка воздуха. С увеличением  $\alpha$  концентрация в продуктах сгорания СО и сажи убывает, но снижается и КПД.

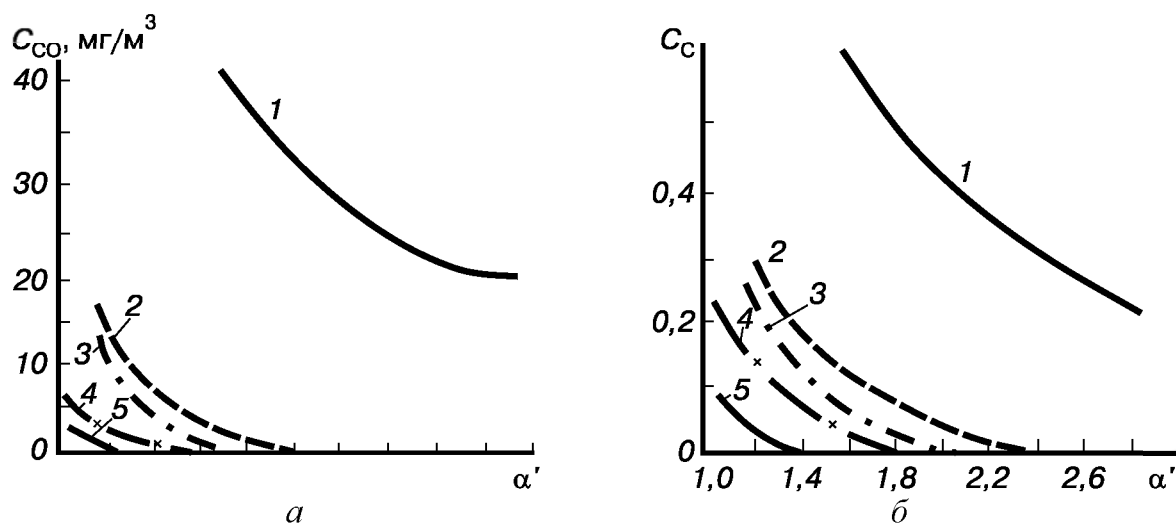


Рис. 3.17. Влияние коэффициента избытка воздуха на выход СО (а) и сажи (б) при сжигании топлива в чугунных котлах: 1 – каменные угли; 2 – мазут 100; 3 – ТПБ; 4 – природный газ при сжигании в диффузионных горелках; 5 – природный газ при сжигании в инжекционных горелках с  $\alpha' = 0,3$

В то же время на примере сжигания каменного угля (рис. 3.17, кривая 1) видно, что и при большом значении  $\alpha$  присутствует достаточное количество продуктов незавершенного горения. Воздух, проникающий через неплотности обмуровки при неисправности гарнитуры котла, не участвует в процессе окисления и транзитом поступает в газоходы, т. е. существенным является не столько абсолютное количество поданного воздуха, сколько то, куда и как он подан.

При сжигании жидкого топлива важно подать достаточное количество воздуха к корню факела для интенсификации процессов газификации топлива. Хорошее диспергирование топлива, обеспечи-

вающее качественное смешение с воздухом, позволяет добиваться отсутствия химической неполноты сгорания,  $\alpha_T = 1,10-1,15$ .

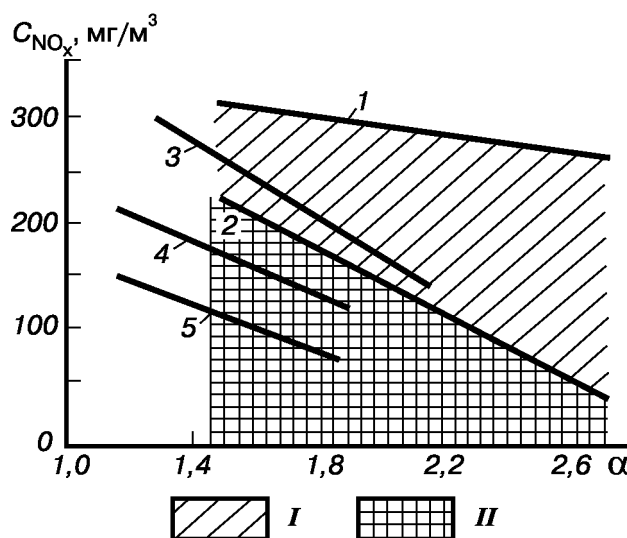


Рис. 3.18. Влияние коэффициента избытка воздуха на концентрацию оксидов азота в продуктах сгорания чугуновых котлов: 1 – каменный уголь; 2 – каменный уголь, термальные  $\text{NO}_x$ ; 3 – мазут 100; 4 – природный газ, диффузионное сжигание в подовых горелках; 5 – природный газ, инжекционные многофакельные горелки с  $\alpha' = 0,3$ ; I – топливные  $\text{NO}_x$ ; II – термальные  $\text{NO}_x$

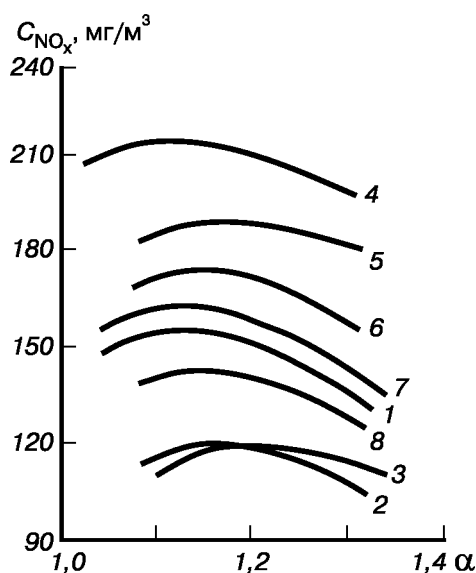


Рис. 3.19. Влияние коэффициента избытка воздуха и типа горелки на выход оксидов азота при сжигании природного газа в отопительных котлах малой мощности: 1, 2, 7 – инжекционные горелки: 1 – среднего давления с  $\alpha' \geq 1,0$ ; 2 – низкого давления с  $\alpha' = 0,4$ ; 7 – БИГ; 3, 6 – щелевые горелки: 3 – подовые диффузионные; 6 – вертикальные; 4, 5 – газомазутные горелки: 4 – типа ГМГБ; 5 – типа ГМГ; 8 – диффузионные подовые горелки с принудительной подачей воздуха

При сжигании газового топлива и ступенчатом подводе окислителя отсутствие в продуктах сгорания химической неполноты сгорания может быть достигнуто при избытке первичного воздуха ( $\alpha' = 1,10\text{--}1,15$ ) и обеспечении хорошей гомогенизации смеси. В горелках полного предварительного смешения (ИГК, БИГ) отсутствие сажи и СО достигается уже при  $\alpha_t = 1,03\text{--}1,05$ . В то же время при работе подовых диффузионных горелок при  $\alpha_t = 1,3$  концентрация СО и сажи достигает значительных величин.

Практика показывает, что перевод котлов с подовых диффузионных горелок на инжекционные горелки низкого давления с  $\alpha' \approx 0,3$  позволяет снизить эмиссию СО и сажи в 3–5 раз, Б(а)П – в 10–15 раз; кроме того, на 25 % снижается выход оксидов азота. Последнее достигается за счет ступенчатого подвода окислителя и рассредоточения фронта пламени (при использовании многофакельных горелок).

Достаточно у горелки удлинить смесительный канал, и концентрация СО при  $\alpha_t = 1,2$  снизится с  $50 \text{ мг/м}^3$  до 0, а Б(а)П – примерно в 10 раз. Концентрация Б(а)П при работе инжекционных горелок в 30 раз ниже, чем у серийных горелок типа ГНП при прочих равных условиях.

Суммарная концентрация диоксида и триоксида серы малочувствительна к тем изменениям избытка воздуха, которые наблюдаются на практике. Однако увеличение последнего до  $\alpha = 1,20\text{--}1,30$  ведет к росту концентрации в продуктах сгорания наиболее опасного из составляющих  $\text{SO}_x$  – триоксида серы.

Зависимость оксидов азота от  $\alpha$  при сжигании природного газа во многом определяется типом горелочного устройства и единичной мощностью котла. На рис. 3.19 все кривые имеют точку перегиба, которая находится в интервале значений избытка воздуха от 1,15 до 1,20. С повышением гомогенности смеси максимум смещается влево. Для чугунных котлов, когда коэффициент избытка воздуха, как правило, больше 1,15–1,20, имеет место только правая часть этой кривой (исключение составляют горелки полного предварительного смешения). В этом случае избыточный воздух является своеобразным балластом, снижающим температуру реакционной зоны. Зависимость носит практически линейный характер (см. рис. 3.18), что позволяет применять для расчетного определения концентрации  $\text{NO}_x$  эмпирические зависимости линейного характера. В то же время топливные оксиды азота будут монотонно возрастать с увеличением избытка воздуха (рис. 3.18, заштрихованная зона).

Обобщая, можно сказать, что главным фактором оптимизации подачи воздуха во всех случаях является его качественное смешение с горючим. Следовательно, необходимо искать пути и способы создания высокогомогенизированной смеси.

При сжигании жидкого топлива трудно отдельно выделить как самостоятельный способ подавления эмиссии загрязнителей регулированием  $\alpha$ . Необходимо добиваться прежде всего отсутствия химической неполноты сгорания. Конечно, в этом случае будет иметь место более высокая эмиссия  $\text{NO}_x$ . Опыты показывают, что суммарный показатель токсичности продуктов сгорания будет все же ниже, к тому же это даст и экономический эффект.

При сжигании природного газа это ступенчатый подвод окислителя, который осуществляется с помощью инжекционных горелок с  $\alpha' \leq 0,4$ . Прежде всего это многофакельные горелки или групповые горелки Ленгипроинжпроекта, дутьевые горелки с каналом предварительного смешения (например, реконструированная ГНП или горелка блока Л1-Н).

Рассмотрим влияние изменения *тепловой мощности* котла на выход токсогенов. Из рис. 3.20, 3.21 видно, что с увеличением тепловой нагрузки растет эмиссия всех загрязняющих ингредиентов. С другой стороны, максимальный КПД у малых котлов наблюдается, как правило, при относительной мощности котла порядка 80–85 % от расчетной. Таким образом, указанная нагрузка позволяет иметь высокий КПД и некоторое снижение выхода загрязнителей, особенно продуктов неполного сгорания. При этом концентрация  $\text{NO}_x$  снижается на 10–15 %, СО и сажи – в 2–2,5 раза. Нечувствительны к изменению нагрузки оксиды серы.

Если говорить точнее, то на выход  $\text{NO}_x$  влияет не мощность котла, а тепловое напряжение топочного объема, от которого, в свою очередь, зависит температурный уровень в топке. При работе горелок со стабилизирующими туннелями (амбразурами) превалирующее влияние на эмиссию оксидов азота будет оказывать тепловое напряжение в объеме туннеля.

В этом причина более высоких концентраций  $\text{NO}_x$  подовых горизонтально-щелевых горелок по сравнению с многофакельными инжекционными. При работе горелок БИГ с кольцевыми металлическими стабилизаторами выход оксидов азота ниже на 15 % по сравнению с такими же горелками, работающими с керамическим туннелем (рис. 3.20), при этом керамический туннель, с одной стороны, резко

интенсифицирует выгорание горючих, снижая выбросы CO, сажи и Б(а)П, с другой – повышает эмиссию NO<sub>x</sub>.

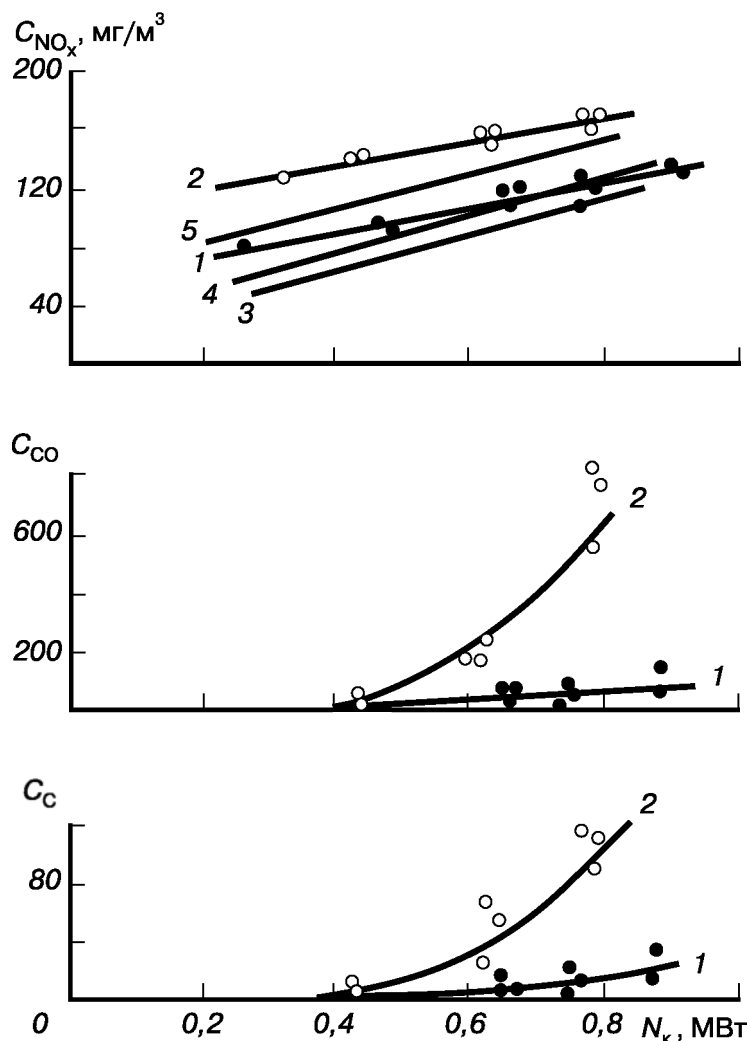


Рис. 3.20. Зависимость концентрации загрязняющих компонентов в продуктах сгорания от тепловой мощности котла «Тула-1» при сжигании природного газа: 1, 4, 5 – при работе инжекционных горелок (1 – многофакельных; 4 – типа БИГ с металлическими стабилизаторами; 5 – типа БИГ-1-6 с керамическим туннелем); 2 – при работе диффузионных подовых горелок; 3 – при работе горелочного блока Л1-Н

Снижение мощности котла как способ борьбы с загрязнением атмосферы очень действенно, особенно в периоды предсмоговых ситуаций. В этот момент на первое место должны выступать экологические аспекты, пусть даже в ущерб экономическим. Работа котлов с 50–60%-ной нагрузкой позволяет практически полностью ликвидировать выбросы продуктов химической неполноты сгорания, а выбросы оксидов азота снизить на 40–45 %. Так, при коэффициенте избытка

воздуха в топке более 1,05 продукты незавершенного сгорания при работе сгорания БИГ и Л1-Н не обнаружены.

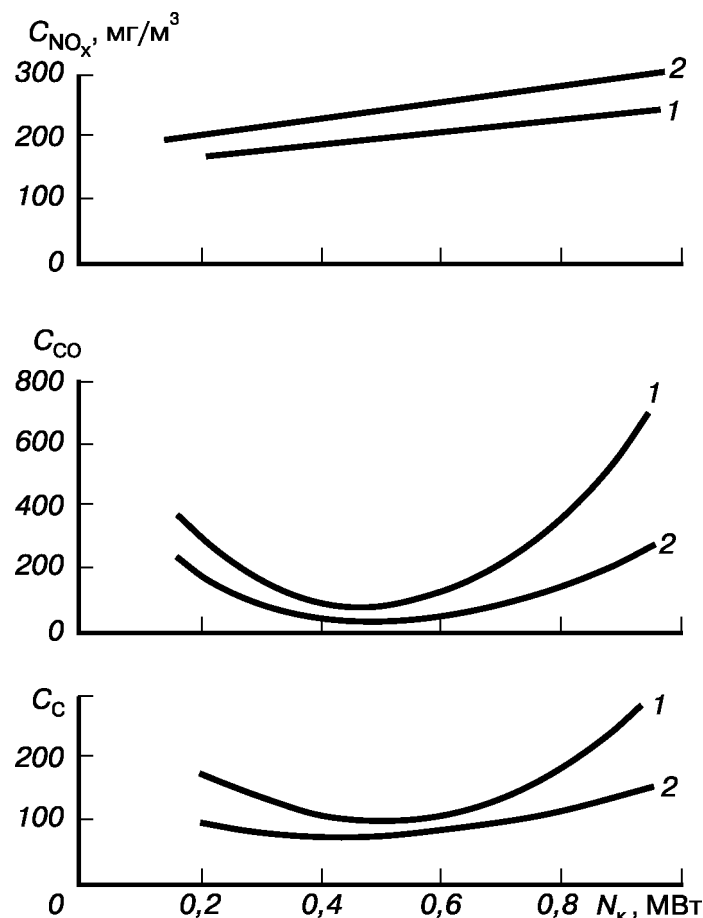


Рис. 3.21. Влияние изменения тепловой мощности котла на концентрацию в продуктах сгорания мазута 100 оксидов азота  $C_{NO_x}$ , оксида углерода  $C_{CO}$ , сажи  $C_s$  на котле «Тула-3» при установке горелок: 1 – типа ФАЖ; 2 – типа Р-1-150

*Режимно-наладочные испытания.* Важное место в выборе оптимальных режимов работы занимают режимно-наладочные испытания, в объем которых в обязательном порядке необходимо включать исследования эмиссии загрязняющих веществ с продуктами сгорания. Как известно, проведение указанных работ в первую очередь направлено на повышение КПД. Средний КПД в этом случае повышается на 2–10 %, а в некоторых случаях и более, что одновременно ведет к снижению выбросов загрязнителей всех видов на 3–15 %.

Как показывает практика, своевременное и качественное проведение подобных испытаний позволяет добиться существенного снижения эмиссии токсогенов, и в первую очередь СО, сажи и Б(а)П, в среднем на 20–25 % и более, оксидов азота – на 10–15 %.



*Оборудование котельной КИП и системой автоматического регулирования.* Установлено, что при оборудовании отопительных котельных системой автоматического контроля процесса горения КПД повышается на 8–10 %. Кроме того, автоматическое поддержание оптимального избытка воздуха с контролем состава продуктов сгорания дает дополнительное снижение продуктов незавершенного горения в уходящих газах (см. табл. 3.4).

### **3.2.9. Снижение эмиссии загрязнителей за счет внедрения современных горелочных устройств**

Обследование отопительных коммунально-бытовых котельных, оборудованных котлами малой мощности, показало, что в ряде случаев горелочные устройства (ГУ) не соответствуют ни типу котла, ни его тепловой мощности. Это ведет к нарушению работы котла в целом. При установке более мощных ГУ котлы работают с пониженными нагрузками, в результате чего падает качество смешения окислителя с горючим. Если не увеличить коэффициент  $\alpha$ , появится химическая неполнота сгорания, увеличится длина факела. В этом случае количество  $\text{NO}_x$  будет меньше, но это не компенсируется снижением экономичности и повышением эмиссии  $\text{CO}$ , сажи и  $\text{B(a)П}$ .

До настоящего времени в небольших котельных имеет место установка подовых диффузионных горелок. Применение последних крайне негативно сказывается на эффективности использования природного газа в малых котлах. Так, выбросы токсогенов в этом случае составляют (рис. 3.20, 3.21):  $\text{NO}_x$  – 170–180 мг/м<sup>3</sup>;  $\text{CO}$  – 700 мг/м<sup>3</sup>; сажи – 100–110 мг/м<sup>3</sup>;  $\text{B(a)П}$  – до 130 мкг/100 м<sup>3</sup>.

Радикальным методом снижения эмиссии загрязнителей является замена устаревших конструкций ГУ на более совершенные. При наличии газа среднего давления рекомендуют использовать инжекционные горелки полного предварительного смешения. Это горелки (ИГК), получившие широкое распространение в центральных областях России, и блочные инжекционные горелки (БИГ).

Блочные инжекционные горелки имеют ряд преимуществ по сравнению с горелками ИГК. Обеспечивая, как и горелки ИГК, коэффициент избытка воздуха 1,03–1,05, горелки БИГ имеют меньшую массу (на 36 %) и длину (на 7 %). Кроме того, горелки БИГ при работе создают меньший шум. При работе на номинальном давлении газа звуковое давление на расстоянии 1 м от горелки не превышает 82 дБ. Уровни звукового давления, измеренные на стандартных частотах,

были еще меньше и изменялись от 68 дБ на частоте 31,5 Гц до 78 дБ на частоте 16 кГц.

При наличии в котельной газа только низкого давления рекомендуют применять инжекционные горелки неполного предварительного смешения. Это многофакельные горелки с  $\alpha' \approx 0,3$  и групповые горелки конструкции Ленгипроинжпроекта с  $\alpha' \approx 0,4$ .

Таблица 3.6

**Выбросы загрязнителей в атмосферу при сжигании природного газа в котлах малой мощности с различными типами ГУ**

Тип горелки	Принцип сжигания газа	Концентрация загрязнителей, мг/м <sup>3</sup>		
		NO <sub>x</sub>	CO	Сажа
Без предварительного смешения (подовые горизонтально-щелевые)	Диффузионный	100–120	250–750	20–80
С неполным предварительным смешением (инжекционные с $\alpha' < 1$ )	Диффузионно-кинетический	80–150	50–200	5–20
Дутьевые (ГНП, Л1-Н)	То же	110–150	100–300	10–30
Полного предварительного смешения (инжекционные типа ИГК, БИГ)	Кинетический	150–220	10–50	0,1–2,0

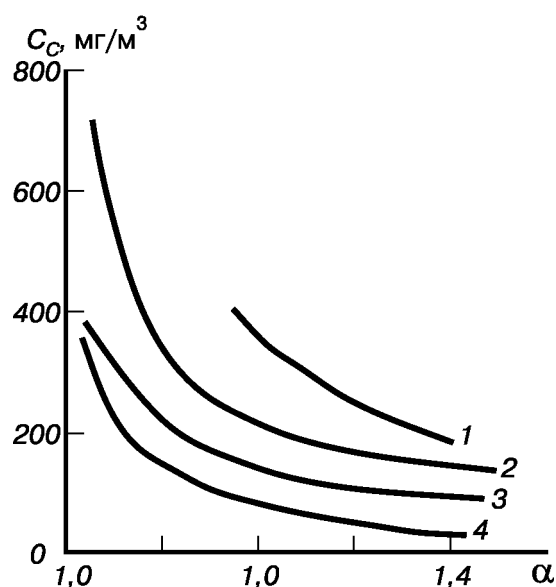


Рис. 3.22. Зависимость концентрации сажи в продуктах сгорания от избытка воздуха и способа распыливания. Форсунки: 1 – механическая; 2 – пневматическая низконапорная; 3 – ротационная; 4 – паровая

В многофакельных горелках проявляется действие рассредоточения фронта пламени, которое влияет на эмиссию оксидов азота. Как известно, выход термальных определяется максимальной локальной температурой реакционной зоны: снижая ее, можно достичь уменьшения содержания оксидов азота в уходящих газах. С увеличением площади фронта горения интенсифицируется отвод теплоты, следовательно, снижается максимальная температура реакционной зоны. В этом случае снижение концентраций оксидов азота достигает 30 %. Сравнительные данные по применению горелочных устройств приведены в табл. 3.6.

При выборе горелочных устройств для сжигания жидкого топлива необходимо руководствоваться рекомендациями, изложенными в данном учебном пособии (см. гл. 5). Наименьший выброс загрязнителей получен при работе ротационных форсунок (рис. 3.21, 3.22).

На рис. 3.21 показаны результаты сравнительных испытаний пневматической форсунки типа ФАЖ и ротационной Р-1-150. При прочих равных условиях в расчетном режиме эмиссия СО оказалась ниже в 2,5 раза, сажи – в 2 раза. Выбросы  $\text{NO}_x$  при работе Р-1-150 выше на 30–35 %.

### **3.2.10. Влияние вида, качества и подготовки топлива на загрязнение воздушного бассейна**

Важное значение для оздоровления окружающей среды имеет улучшение теплотехнических характеристик сжигаемых топлив. В первую очередь это обогащение топлива, очистка от вредных примесей, ввод специальных присадок. Перспективным направлением в этой области можно считать получение синтетических, «чистых» с экологической точки зрения, топлив из твердых и жидких природных топлив.

Основными вредными элементами топлива являются серо- и азотсодержащие соединения. Топливо для отопительных котельных должно содержать минимальное количество серы и азота, однако на практике это условие часто не соблюдается.

Основная масса нефти в России содержит серы до 3 % и более. Десульфатация – дорогостоящий процесс. Получение новых синтетических видов топлив требует больших капитальных затрат. По оценкам зарубежных специалистов, стоимость этих топлив примерно в 2 раза выше. В настоящее время из твердого топлива получают газ, жидкое топливо (метанол, сланцевое масло).

Повышение качества сжигания жидкого топлива достигается комплексным использованием мазута с извлечением вредных компонентов и получением очищенного газа. После предварительной газификации высокосернистых мазутов получаемый газ содержит не более 0,5 % серосодержащих соединений.

Важно, что при получении синтетических топлив увеличивается соотношение Н:С. Для нефти оно приближенно равно 2,0, для сланцев – 1,9, для низкосортных углей – меньше единицы. При увеличении этого соотношения от 1,6 до 2,0 содержание сажи в продуктах сгорания снижается в 8 раз.

Повышают качество сжигания и снижают загрязнение поверхностей нагрева присадки к мазутам, которые широко применяются в энергетике, но практически не используются в промышленных и отопительно-коммунальных котельных, что обусловлено отсутствием достаточного количества присадок и необходимого оборудования для их ввода. Присадки к мазуту оксида магния снижают образование  $SO_3$ , продуктов химической неполноты сгорания и сажи, высокотемпературную коррозию и загрязнение труб, коксование форсунок. Магниево-оксидные присадки (магнезита, доломита) способствуют предотвращению образования ванадиевых отложений на поверхности нагрева.

Потребность в жидком топливе неуклонно растет, что ведет к созданию технологий более глубокой переработки нефти. В результате получают меньшее количество мазута большей вязкости, который, естественно, труднее сжигать, особенно в небольших отопительных котлах. Сложность эффективного сжигания мазута усугубляется тем, что в отопительных котельных применяют чугунные котлы с относительно малым топочным объемом. Эти котельные, как правило, не имеют паровых котлов и хорошо оборудованного мазутного хозяйства. На практике это приводит к значительной химической неполноте сгорания, загрязнению газоходов и атмосферы сажей, снижению КПД и теплопроизводительности котлов.

В России около 1,5 тыс. отопительных котельных сжигают топливо печное бытовое (ТПБ). Физико-химические свойства ТПБ лучше, чем топочных мазутов, и близки к нефтяным керосиновым фракциям. Такое топливо можно сжигать в малогабаритных топках котлов без предварительного подогрева с высокой эффективностью и небольшим содержанием вредных компонентов в продуктах сгорания (табл. 3.7). Были проведены исследования работы котлов на топочном мазуте с добавкой к нему некоторого количества ТПБ. Эксперименты

показали, что такая добавка приводит не только к резкому уменьшению вязкости жидкой смеси, но и к интенсификации смесеобразования. Экспериментальные исследования проводились в отопительных котельных на котлах типа «Тула-1», «Энергия-3», «Универсал-6» и МГ-2Т, оборудованных форсунками типа Р-1-150, АР-90, ФАЖ и пневматическими форсунками с грибовыми насадками конструкции «Леноблэнерго». Полученные результаты свидетельствуют, что по мере увеличения добавки легкого топлива происходит сначала резкое, а затем медленное снижение выхода сажистых частиц (рис. 3.23) и оксида углерода, оптимальное содержание ТПБ в смеси находится в интервале от 25 до 30 %.

Таблица 3.7

**Концентрация загрязнителей в продуктах сгорания жидких топлив и их смесей**

Топливо	Концентрация загрязнителей			
	NO <sub>x</sub> , мг/м <sup>3</sup>	СО, мг/м <sup>3</sup>	Сажа, мг/м <sup>3</sup>	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub> , мкг/100м <sup>3</sup>
Мазут марок 40 и 100	200–250	900–1050	180–250	80–100
Печное топливо ТПБ	180–190	100–120	15–25	–
Смесь мазута и печного топлива (содержание ТПБ в смеси 30 %)	180–200	150–180	20–35	12–80
ВМЭ (содержание воды 10 %)	170–190	160–190	40–70	15–50

Надежность работы секций котлов тесно связана с интенсификацией процесса выгорания жидкого топлива в факеле. За счет сокращения длины последнего предотвращения касания пламени чугунных секций уменьшаются локальные температурные напряжения стенок секций. Резко снижается загрязнение их сажистыми частицами. В результате поверхности нагрева работают в более благоприятных температурных условиях, предотвращающих повышение температуры стенки секций сверх допустимых значений.

Таким образом, установлено, что раздельное сжигание топочного мазута и ТПБ нецелесообразно, а сжигание этих видов топлива в смеси является действенным средством повышения эффективности сжигания топочного мазута и снижения количества продуктов неполного сгорания, загрязняющих газоходы котлов и окружающую атмосферу. Так, концентрация СО и сажи снижается в 5–7 раз, оксидов азота – на 15–20 %, серы – на 20–25 %.

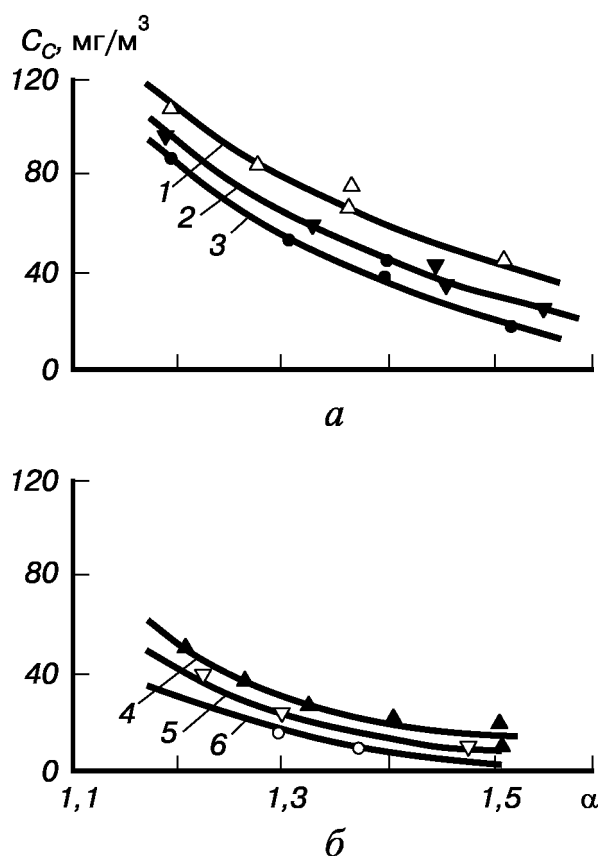


Рис. 3.23. Изменение концентрации сажистых частиц в продуктах сгорания природного газа: *а* – за котлом «Универсал-6», оборудованным однощелевой подовой диффузионной горелкой; *б* – за котлом МГ-2Т, оборудованным двухщелевой подовой диффузионной горелкой. Мощность котлов, % от номинальной: 1 – 88; 2 – 74; 3 – 64; 4 – 76; 5 – 60; 6 – 50

В последние годы на отопительные котельные все больше поступает моторного топлива взамен ТПБ. Использование моторного топлива более эффективно и с экономической точки зрения.

Физико-химические процессы сжигания специально приготовленной водомазутной эмульсии (ВМЭ) в настоящее время исследуются российскими и зарубежными учеными вследствие обострения проблемы защиты атмосферы от вредных выбросов. В ЛИСИ более 10 лет ведутся работы по исследованию эмиссии загрязнителей при сжигании ВМЭ. С увеличением содержания воды в ВМЭ от 2 до 10–12 % происходит резкое снижение образования сажистых частиц, СО и оксидов азота. При дальнейшем увеличении доли воды в эмульсии содержание продуктов незавершенного горения стабилизируется, а затем возрастает. Для приготовления водотопливных эмульсий (ВТЭ) и суспензий можно использовать в качестве добавок различные подтоварные воды, содержащие примеси нефти, масел, оборотных вод технологических производств и т. п.,

тогда термическое обезвреживание этих вод сжиганием в виде ВТЭ выгодно как с экономической, так и с экологической точки зрения.

Комплексные исследования сжигания жидких топлив и их смесей различного состава в чугунных котлах позволили подойти к решению вопроса о получении эмпирических зависимостей выхода токсичных веществ от основных эксплуатационных показателей работы котлов.

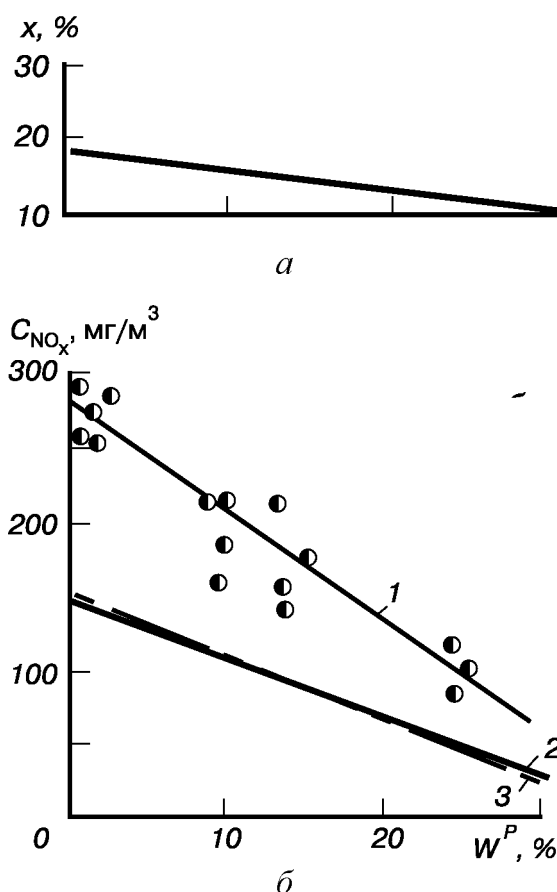


Рис. 3.24. Влияние содержания воды в ВМЭ на степень конверсии (а) и эмиссию оксидов азота (б): 1, 2 – расчетная зависимость суммарного выхода: 1 –  $\text{NO}_x$  по уравнению (3.7), 2 – термального  $\text{NO}$ ; 3 – выход термального  $\text{NO}$  по теории Б. Я. Зельдовича

В результате математической обработки многочисленных экспериментальных данных была получена зависимость, позволяющая находить средние концентрации оксидов азота,  $\text{мг/м}^3$ , в продуктах сгорания жидкого топлива (за определяющие приняты основные эксплуатационные параметры):

$$C_{\text{NO}_x} = 350 - 154\alpha_T + 52N_K + 520N^P - 8W^P, \quad (3.7)$$

где  $\alpha_t$  – коэффициент избытка воздуха в топке;  $N_k$  – тепловая мощность котла, МВт;  $N^p$  – содержание в топливе азота, %;  $W^p$  – содержание в топливе воды, %.

Выражение (3.7) определяет степень влияния эксплуатационных параметров на выход оксидов азота. Ограничения использования этой зависимости: топливо – мазут 40–100, ТПБ, ВМЭ; тип котлов – «Тула», «Энергия», «Минск», «Универсал»; изменение коэффициента избытка воздуха в топке от 1,2 до 1,7; изменение тепловой мощности котлов от 0,3 до 1,0 МВт; изменение содержания в топливе азота от 0,15 до 0,3 %, воды – до 20 %. Коэффициент корреляции уравнения (3.7) больше 0,5, что говорит о возможности использования полученной линейной зависимости (рис. 3.24, прямые 1 и 2).

### 3.2.11. Очистка уходящих газов

Большинство способов десульфатации продуктов сгорания основано на селективном поглощении серы различными соединениями. К настоящему времени известно более 200 методов только мокрой сероочистки с получением в качестве конечного продукта элементарной серы, сульфатных или сульфидных солей. Степень очистки может достигать 86–96 %. Однако использование даже наиболее дешевого известкового способа увеличивает затраты на строительство ТЭС на 10–20 %, эксплуатационные расходы – на 15–20 %, а для этих систем в малых котельных указанные значения резко возрастают, даже при оборудовании одной групповой установкой.

Более дешевыми можно считать сухие и биологические методы очистки с применением оксидов алюминия, марганца, железа, калия, активированного угля, которые в настоящее время широко исследуются.

Интересно, что некоторые способы десульфатации позволяют одновременно улавливать и  $\text{NO}_x$ . В США разработан способ облучения дымовых газов потоком электронов, в качестве реагента используется известь или аммиак, вдуваемые в дымовые газы с последующим облучением потоком электронов. Образуются радикалы, окисляющие  $\text{SO}_x$  и  $\text{NO}_x$  до серной и азотной кислот, которые нейтрализуются с образованием сульфатно-нитритных соединений и используются в качестве удобрений.

Считают, что количество  $\text{NO}_x$  только топочными методами можно снизить не более чем в 2–3 раза, поэтому в регионах с высокой плотностью населения и развитой промышленностью такое снижение



нужно считать недостаточным. Наиболее радикальным следует признать использование методов разложения и поглощения  $\text{NO}_x$  в уходящих газах.

Так как в ближайшем будущем в небольших котельных не ожидается использование указанных в настоящем под параграфе способов борьбы с эмиссией  $\text{SO}_x$  и  $\text{NO}_x$ , выше дан только краткий обзор этих способов, характеризующий их возможности и область применения.

Дымовые трубы – самое древнее и относительно надежное средство снижения опасных концентраций различного рода загрязнителей, образующихся в процессе сжигания топлива.

Трубы уменьшают опасное для здоровья человека и окружающей природы воздействие в приземной зоне, т. е. дымовые трубы не снижают абсолютных выбросов, а позволяют рассеивать последние на большую площадь. Расчет высоты дымовой трубы проводится на последней стадии оптимизации работы котельной. Не следует противопоставлять методы борьбы с выбросами и очистки топлива и газов рассеиванию их в атмосфере. При всех способах подавления загрязнителей некоторое их количество всегда присутствует в дымовых газах.

Наиболее эффективно работают дымовые трубы мощных ТЭС и ТЭЦ, которые имеют значительную высоту (до 200 м и более) и мощный отвод газов. Мелкие отопительные котельные не могут обеспечивать такого отвода газов, так как строительство высоких труб малого диаметра в жилых районах зачастую технически невозможно и экономически нецелесообразно.

Продукты сгорания состоят из смесей газов и взвешенных частиц. Если последние имеют размер менее 20 мкм, то скорость их соединения чрезвычайно мала. Крупные частицы обладают значительной скоростью оседания, которая приводит к повышенным концентрациям этих частиц вблизи трубы. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчетах дымовых труб.

Перемешивание выбросов с атмосферным воздухом обеспечивается атмосферной турбулентной диффузией. Для максимального рассеивания дымовые газы должны покидать трубу, имея достаточную подъемную силу и момент количества движения. Высокие скорости ветра ускоряют рассеивание загрязнителей в атмосфере. Скорость ветра может достичь «опасных» значений, близких или выше скорости выхода газов из горловины трубы. Для предотвращения подобного явления необходимо, чтобы скорость выхода дымовых газов была приблизительно в 2 раза выше скорости ветра.

Таким образом, на эффективность рассеивания влияют следующие факторы: состояние атмосферы; скорость ветра; мощность выбросов, их скорость и состав; высота дымовой трубы.

Высоту дымовой трубы, обеспечивающую приземную концентрацию загрязняющих веществ ниже ПДК с учетом фоновой загрязненности, определяют по формуле

$$h = \sqrt{\frac{AFmn[M_{\text{SO}_2} + (\text{ПДК}_{\text{SO}_2} / \text{ПДК}_{\text{NO}_2})M_{\text{NO}_2}] \cdot [z / (V_r \Delta T)]^{1/3}}{\text{ПДК}_{\text{SO}_2} - C_{\text{SO}_2}^{\Phi} - (\text{ПДК}_{\text{SO}_2} / \text{ПДК}_{\text{NO}_2})C_{\text{NO}_2}^{\Phi}}},$$

где  $C_{\text{SO}_2}^{\Phi}, C_{\text{NO}_2}^{\Phi}$  – фоновые концентрации вредных примесей в атмосфере, мг/м<sup>3</sup>;  $z$  – число труб одинаковой высоты.

### 3.2.12. Выбросы малых элементов

Большие масштабы газификации твердого топлива могут привести к отравлению воздушного бассейна, постепенному накоплению в почве или в грунтовых водах вредных для человека, животного и растительного мира малых элементов. Одним из основных параметров, позволяющих оценить экологическое воздействие выделяющихся при газификации топлива соединений малых элементов, является коэффициент обогащения малыми элементами высокодисперсного зольного уноса  $KO_i$ , обычно выбрасываемого в атмосферу (табл. 3.8).

Ориентировочные значения степени выноса малых элементов  $F_i$  (по отношению к их содержанию в исходном топливе) с дымовыми газами в окружающую среду с учетом осредненных коэффициентов обогащения высокодисперсных зольных уносов в зависимости от эффективности  $\eta$  работы золоулавливающих устройств приведены в табл. 3.9. Масса  $i$ -го малого элемента, выделившегося с дымовыми газами (г), при сжигании 1 т угля:

$$m_i = 10^{-4} m_y C_{iA} A^d F_i, \quad (3.8)$$

где  $m_y$  – масса сожженного угля, т;  $C_{iA}$  – массовая концентрация  $i$ -го элемента в золе угля, г/т;  $A^d$  – зольность угля, %.

Если значения  $F_i$  неизвестны, то масса малого элемента, выбрасываемого в окружающую среду,

$$m_i = 10^{-4} m_y C_{iA} A^d KO_i (100 - \eta), \quad (3.9)$$

где  $KO_i$  – коэффициент обогащения  $i$ -го малого элемента высокодисперсного зольного уноса;  $\eta$  – эффективность золоулавливания, %.

Таблица 3.8

**Коэффициенты обогащения ( $KO_i$ ) малыми элементами высокодисперсных зольных уносов, выбрасываемых с дымовыми газами в атмосферу**

Элемент	$KO_i$	Элемент	$KO_i$	Элемент	$KO_i$	Элемент	$KO_i$
As	$\frac{3 \div 6}{5 \div 12}$	Cr	$\frac{1 \div 3}{2 \div 4}$	Se	$\frac{8 \div 16}{8 \div 16}$	Mo	$\frac{1 \div 3}{2 \div 12}$
Ba	$\frac{1 \div 1,5}{1 \div 2}$	Cu	$\frac{1 \div 2}{1,5 \div 3,5}$	Zn	$\frac{2 \div 4}{3 \div 7}$	Sc	$\frac{0,8 \div 1}{0,8 \div 1}$
Be	$\frac{1}{3 \div 1}$	Mn	$\frac{0,8 \div 1}{0,8 \div 1}$	Ni	$\frac{1 \div 2}{1,5 \div 2,5}$	Sr	$\frac{0,8 \div 1}{0,8 \div 1}$
Cd	$\frac{3 \div 6}{4 \div 12}$	Pb	$\frac{3 \div 6}{5 \div 12}$	Ti	$\frac{1}{1}$	Sn	$\frac{4 \div 11}{5 \div 12}$
Co	$\frac{1 \div 2}{2 \div 4}$	Sb	$\frac{4 \div 11}{5 \div 12}$	Lu	$\frac{0,8 \div 1}{0,8 \div 1}$		

**П р и м е ч а н и е.** В числителе даны значения, полученные для низкотемпературного процесса газификации твёрдого топлива (менее 1200 °C), а в знаменателе – для высокотемпературного (более 1200 °C).

Таблица 3.9

**Степень выноса  $F_i$  малого элемента (%) с высокодисперсным зольным уносом в окружающую среду при сжигании угля в зависимости от эффективности золоулавливания  $\eta$**

Элемент	$\eta$ , %					
	35	90	93	95	97	99
As	$\frac{45 \div 80}{75 \div 90}$	$\frac{30 \div 60}{50 \div 90}$	$\frac{20 \div 40}{35 \div 80}$	$\frac{15 \div 30}{25 \div 60}$	$\frac{10 \div 20}{15 \div 40}$	$\frac{3 \div 6}{5 \div 12}$
Ba	$\frac{15 \div 25}{15 \div 30}$	$\frac{10 \div 15}{10 \div 30}$	$\frac{7 \div 10}{10 \div 20}$	$\frac{5 \div 8}{5 \div 15}$	$\frac{3 \div 5}{3 \div 10}$	$\frac{1 \div 2}{1 \div 3}$
Cd	$\frac{45 \div 90}{60 \div 95}$	$\frac{30 \div 60}{40 \div 85}$	$\frac{20 \div 40}{30 \div 80}$	$\frac{15 \div 30}{20 \div 50}$	$\frac{10 \div 20}{10 \div 30}$	$\frac{3 \div 6}{5 \div 12}$
Co	$\frac{15 \div 30}{30 \div 60}$	$\frac{10 \div 20}{20 \div 40}$	$\frac{7 \div 15}{15 \div 30}$	$\frac{5 \div 10}{10 \div 20}$	$\frac{3 \div 6}{6 \div 12}$	$\frac{1 \div 2}{2 \div 4}$

Окончание табл. 3.9

Элемент	$\eta, \%$					
	35	90	93	95	97	99
Co	$\frac{15 \div 30}{30 \div 60}$	$\frac{10 \div 20}{20 \div 40}$	$\frac{7 \div 15}{15 \div 30}$	$\frac{5 \div 10}{10 \div 20}$	$\frac{3 \div 6}{6 \div 12}$	$\frac{1 \div 2}{2 \div 4}$
Cr	$\frac{25 \div 45}{30 \div 60}$	$\frac{15 \div 30}{20 \div 40}$	$\frac{10 \div 20}{15 \div 30}$	$\frac{8 \div 15}{10 \div 20}$	$\frac{5 \div 10}{6 \div 12}$	$\frac{2 \div 3}{2 \div 4}$
Cu	$\frac{15 \div 30}{25 \div 55}$	$\frac{10 \div 20}{15 \div 35}$	$\frac{7 \div 15}{10 \div 25}$	$\frac{5 \div 10}{8 \div 18}$	$\frac{3 \div 6}{5 \div 10}$	$\frac{1 \div 2}{2 \div 4}$
Mn	$\frac{13 \div 15}{13 \div 15}$	$\frac{8 \div 10}{8 \div 10}$	$\frac{6 \div 7}{6 \div 7}$	$\frac{4 \div 5}{4 \div 5}$	$\frac{2 \div 3}{2 \div 3}$	$\frac{0,8 \div 1}{0,8 \div 1}$
Pb	$\frac{45 \div 90}{75 \div 90}$	$\frac{30 \div 60}{50 \div 88}$	$\frac{20 \div 40}{35 \div 80}$	$\frac{15 \div 30}{25 \div 60}$	$\frac{10 \div 20}{15 \div 30}$	$\frac{3 \div 6}{5 \div 12}$
Sb	$\frac{60 \div 98}{75 \div 98}$	$\frac{40 \div 90}{50 \div 95}$	$\frac{30 \div 80}{35 \div 85}$	$\frac{20 \div 55}{25 \div 60}$	$\frac{12 \div 30}{15 \div 35}$	$\frac{4 \div 10}{5 \div 12}$
Se	$\frac{80 \div 99}{80 \div 98}$	$\frac{80 \div 98}{80 \div 99}$	$\frac{60 \div 90}{60 \div 90}$	$\frac{40 \div 90}{40 \div 90}$	$\frac{25 \div 50}{25 \div 50}$	$\frac{6 \div 16}{8 \div 16}$
Zn	$\frac{30 \div 60}{45 \div 90}$	$\frac{20 \div 40}{30 \div 70}$	$\frac{15 \div 30}{20 \div 50}$	$\frac{10 \div 20}{15 \div 35}$	$\frac{6 \div 12}{10 \div 20}$	$\frac{2 \div 4}{3 \div 7}$
Ni	$\frac{15 \div 30}{25 \div 37}$	$\frac{10 \div 20}{15 \div 25}$	$\frac{7 \div 15}{10 \div 17}$	$\frac{5 \div 10}{8 \div 13}$	$\frac{3 \div 6}{5 \div 8}$	$\frac{1 \div 2}{2 \div 3}$
Ti	$\frac{13 \div 15}{13 \div 15}$	$\frac{8 \div 10}{8 \div 10}$	$\frac{6 \div 7}{6 \div 7}$	$\frac{4 \div 5}{4 \div 5}$	$\frac{2 \div 3}{2 \div 3}$	$\frac{0,8 \div 1}{0,8 \div 1}$
La	$\frac{15}{15}$	$\frac{10}{10}$	$\frac{7}{7}$	$\frac{5}{5}$	$\frac{3}{3}$	$\frac{1}{1}$
Mo	$\frac{15 \div 40}{30 \div 50}$	$\frac{10 \div 30}{20 \div 45}$	$\frac{7 \div 20}{15 \div 30}$	$\frac{5 \div 15}{10 \div 25}$	$\frac{3 \div 10}{6 \div 20}$	$\frac{1 \div 3}{2 \div 12}$
Sc	$\frac{13 \div 15}{13 \div 15}$	$\frac{8 \div 10}{8 \div 10}$	$\frac{6 \div 7}{6 \div 7}$	$\frac{4 \div 5}{4 \div 5}$	$\frac{2 \div 3}{2 \div 3}$	$\frac{0,8 \div 1}{0,8 \div 1}$
Sr	$\frac{13 \div 15}{13 \div 15}$	$\frac{8 \div 10}{8 \div 10}$	$\frac{6 \div 7}{6 \div 7}$	$\frac{4 \div 5}{4 \div 5}$	$\frac{2 \div 3}{2 \div 3}$	$\frac{0,8 \div 1}{0,8 \div 1}$
Sn	$\frac{60 \div 90}{75 \div 95}$	$\frac{40 \div 85}{50 \div 90}$	$\frac{30 \div 75}{35 \div 80}$	$\frac{20 \div 55}{25 \div 55}$	$\frac{12 \div 30}{15 \div 35}$	$\frac{4 \div 10}{5 \div 12}$

Для элементов, образующих газообразные соединения в процессе газификации твердого топлива, характерно неравномерное обогащение ими зольных частиц различного гранулометрического состава. Наиболее изучены эти закономерности для германия. Например, установлено, что в частицах зольного уноса размером 0–2 мкм содержится всего 5–8 % германия при их выходе около 1–1,5 %. Следова-

тельно, концентрация германия в этих частицах примерно в 4–5 раз выше, чем его среднее содержание во всей массе зольного уноса.

Суммарное содержание в неуловленном зольном уносе малых элементов определяется многими факторами: характеристикой исходного топлива, коэффициентом шлакоулавливания, температурой сжигания и др. В целом неуловленный зольный унос отличается повышенным содержанием малых элементов, образующих в зоне высоких температур газообразные соединения, конденсирующиеся при температуре выше 150 °С. Следовательно, при использовании высокоэффективных золоуловителей ( $\eta = 96\text{--}99\%$ ) неуловленные частицы будут иметь повышенное (по сравнению со средним) содержание малых элементов (As, Pb, Sb, Se, Zn и др.), рассчитанные по формуле (3.8) значения необходимо умножить на коэффициент  $\gamma > 1$ . По результатам анализа ряда экспериментальных исследований  $\gamma = 1,5\text{--}2,8$  при  $\eta = 96\text{--}99\%$ .

Вредность какого-либо малого элемента можно оценить исходя из его содержания в 1 м<sup>3</sup> дымовых газов, выбрасываемых в окружающую среду:

$$\Pi_i = 10^3 \frac{m_i}{V_r^\circ \text{ПДК}_i}, \quad (3.10)$$

где  $V_r^\circ$  – объемный расход дымовых газов при нормальных условиях, м<sup>3</sup>/т; ПДК<sub>*i*</sub> – предельно допустимая концентрация *i*-го элемента в атмосфере, мг/м<sup>3</sup>.

Необходимо учитывать рассеяние дымовых газов в атмосфере, приводящее к резкому снижению концентрации токсичных элементов в воздушном бассейне. Точный расчет процесса разбавления, позволяющий оценить реальную концентрацию токсичных элементов в атмосфере, проводится по специальным методикам. Осевший зольный унос приводит к загрязнению почвенного покрова токсичными малыми элементами. Содержание ряда малых элементов в зольном уносе может быть во много раз больше, чем в почвенном покрове.

При оценке загрязнения почвенного покрова малыми элементами необходимо прежде всего оценить содержание их в неулавливаемом высокодисперсном зольном уносе, выделяющемся с дымовыми газами, а также фоновые концентрации этих элементов в почве обследуемого района. Для получения достаточно достоверной оценки

воздействия ТЭС на увеличение содержания малых элементов в почве данного района необходимо оценить среднегодовую плотность выпадения летучего зольного уноса и сравнить ее с фоновой величиной выпадения атмосферной пыли в данном районе.

При естественной и искусственной фильтрации золоотвалов водой в водные растворы могут переходить многие микроэлементы, содержащиеся в зольном уносе и шлаке.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что выщелачивание малых элементов из зольных уносов существенно выше, чем из шлаков. Это связано, очевидно, с повышенными концентрациями малых элементов в зольном уносе относительно шлака, а также с различиями в формах химических соединений, в которых связаны элементы в зольном уносе и шлаке. Следует отметить, что нахождение корреляционных зависимостей между выщелачиваемостью какого-либо микроэлемента, его содержанием и свойствами угля, а также режимами и условиями его сжигания и соответственно свойствами золы и шлака очень затруднительно. Поэтому для анализа этих закономерностей необходимы экспериментальные исследования, позволяющие в каждом конкретном случае оценивать выщелачиваемость малых элементов из зольных остатков углепереработки.

### **3.2.13. Возможности пылеулавливающего оборудования**

Рассмотрим результаты исследований и особенности применения пылеулавливающего оборудования на примере одного из проблемных с экологической точки зрения производства асфальтобетона.

Технике и оборудованию защиты атмосферы от вредных выбросов в различных отраслях производства посвящено достаточно большое количество публикаций. Пылеулавливанию и очистке уходящих газов при производстве асфальтобетона, имеющем специфические особенности, также уделено большое внимание.

Технологическое оборудование и методы улавливания пыли, уносимой из сушильного барабана дымовыми газами, постоянно совершенствуются. Так, предпринимались попытки устанавливать для очистки газов от твердых частиц электрофильтр УГ-2-10: степень очистки – 99,84 % при остаточной запыленности выбросов около 50 мг/м; общая степень очистки – 99,93 % при остаточной запыленности газов 14 мг/м<sup>3</sup>. Широкому внедрению такого способа очистки как в России, так и за рубежом препятствует его дороговизна. Кроме того,

необходимо учесть, что для эффективной работы электрофилтра нужна стабильность в режиме подачи газа на очистку, что не характерно для работы асфальтобетонных заводов. Наибольшее распространение получили комбинированные системы пылеулавливания. Например, сравнительное обследование двухступенчатых систем пылеулавливания на асфальтосмесителях Д-325, Д-597 и Д-597А Запорожского областного асфальтобетонного завода показало, что двухступенчатые системы пылеулавливания на этих установках отличаются по аппаратному оснащению.

Первая система имеет в своем составе группу из четырех циклонов СДК-ЦН-33 и пылеуловитель «Ротоклон» (мокрая очистка). Общая эффективность улавливания составляет 97,5 % при остаточной запыленности 0,475 г/м<sup>3</sup>. Отмечается, что эффективность системы улавливания пыли можно существенно повысить при условии соблюдения проектных режимов ее работы до 99 %.

Вторая система состоит из группы циклонов ЦН-15 диаметром 500 мм (4 шт.) и блока труб Вентури диаметром 180 мм с дисковым распылителем жидкости. Установлена эффективность улавливания 96,7 % при остаточной запыленности 0,79 г/м<sup>3</sup>. Здесь можно отметить неоптимальный режим работы блока из-за недостаточного количества промывочной воды.

В установке пылеочистки третьего типа в качестве второй ступени используется турбулентный промыватель, состоящий из труб Вентури диаметром 250 мм и центробежного скруббера-каплеуловителя. Эффективность улавливания этой системы 97 % при остаточной запыленности 0,174 г/м<sup>3</sup>. Отмечается неоптимальный режим работы второй ступени для установок 2-го и 3-го типа вследствие недостаточной скорости течения промывочной воды.

Исследования установки со скруббером Вентури и дисковым распылителем показали, что остаточная запыленность составила 0,06 г/м<sup>3</sup> при общей эффективности очистки 99,7 %, а эффективность скруббера составила 98,6 %. Однако опыт эксплуатации блока, например, на Симферопольском АБЗ показал наличие отложений затвердевшей пыли на внутренних стенках и конструкциях аппарата. Из-за сложности протекающих физико-химических процессов точно определить причины образования этих отложений не представляется возможным.

Испытания трехступенчатой системы пылеочистки ДС-84-2, где в качестве первой ступени применен дымосос-пылеуловитель, второй – группа из трех циклонов УЦ-40 диаметром 2400 мм, третьей –

мокрый пылеуловитель ударно-инерционного действия, показали ее высокую эффективность ( $\eta = 99 \%$ ) и одновременно уязвимость дымососа по отношению к износу. Для улавливания пыли на выпускающихся в настоящее время установках ДС 117-2К применяется система, состоящая из следующих элементов:

предварительная ступень очистки (ПСО) в виде прямоточного осевого циклона диаметром 600 мм;

группа циклонов (4 шт.) ЦСН-40 диаметром 1000 мм;

пылеулавливатель мокрый сливной.

При испытаниях установок на нескольких заводах получены коэффициенты очистки от 98,1 до 99,2 %. Дымосос надежен в работе, заметному износу не подвергается.

Следует отметить, что в специальной литературе, в том числе и в отчетах СКБ «Дормаш», не приводятся сведения о виде сжигаемого топлива, температуре его нагрева. Качество сжигания топлива сказывается на свойствах пыли, в частности на её гидрофобности. При наличии частичек сажи в пыли будет падать эффективность работы как сухой, так и мокрой очистки.

В 1989–1990 годы в Красноярском государственном техническом университете были проведены экспериментальные исследования по определению эффективности улавливания пыли на установке ДС 117-2К. Исследования показали, что при наличии 8,19 % сажи в твердом выбросе коэффициент эффективности работы пылеулавливающей системы технически исправной установки не превышает 82 %.

Примерно в этот же период Таллинским АБЗ была предпринята попытка снизить концентрацию пыли в газах, поступающих в атмосферу. Мокрый пылеулавливатель «Ротоклон» на установке Д-508 заменен на мокрый пылеулавливатель ПМРР. Отмечены существенное снижение концентрации пыли в газах и эффективность мокрой очистки до 85 %.

Для обеспечения контакта частичек пыли с водой необходимо создавать конструкции, в которых объем очищаемых газов разбивался бы на отдельные струи. Конструкции таких аппаратов известны и применяются в различных отраслях промышленности. Особенно перспективны пенные пылеуловители с орошаемой шаровой насадкой. Однако все эти конструкции имеют повышенное сопротивление и требуют дополнительных затрат электроэнергии.

Зарубежные фирмы – производители асфальтобетонных заводов также придают большое значение очистке уходящих газов от пыли. На рис. 3.25 приведена схема пылеуловителя фирмы «Вибау» (Германия). Поток запыленного газа подводится через входной газоход 1



по касательной к корпусу 2. Завихренный поток газа, взаимодействуя с водой, поднимается через цилиндрическую насадку 3, расположенную по оси пылеуловителя, в брызгоотделитель 4. Очищенный газ засасывается дымососом по касательной из верхней части корпуса пылеуловителя и направляется по выходному газоходу 5 к дымовой трубе. Образующийся в результате осаждения пыли шлам стекает в нижнюю часть корпуса пылеуловителя, откуда он самотеком направляется в отстойник. Вода подается в пылеуловитель из отстойника 10 насосом 9 по трубопроводу 8. В рабочем положении количество воды в нижней части корпуса пылеуловителя поддерживается постоянным с помощью переливной трубы 7 и успокоительной камеры 6.

Фирма «Барбер-Грин» (США) выпускает водные пылеуловители двух видов с подачей воды через трубу с насадками и через распыляющее сопло (рис. 3.26). В обоих случаях пылеуловитель имеет контактор 1 и сепаратор 3. Запыленные газы поступают в контактор, в котором частицы пыли, проходя через водяную завесу, смачиваются в турбулентном потоке. Через перегородку 2 с отверстием газ из контактора поступает по касательной в корпус сепаратора, в котором влажная пыль под действием центробежных сил отделяется от потока газов. Газы проходят по сепаратору вверх, а вода, загрязненная частицами пыли, стекает в отстойник 4. Шлам отводится в осадочный бассейн. Воду из бассейна повторно используют в контакторе без тщательной фильтрации, так как насадки и водоразбрызгивающее сопло имеют большой диаметр и не загрязняются.

В циклоне-промывателе фирмы «Марини» США (рис. 3.27) пыль смачивается водой на входе завихрителя и в трубе, расположенной в центральной части циклона. Образующийся шлам вместе с водой стекает в нижнюю часть циклона, а затем отводится по трубе в отстойник.

Водные пылеуловители с контактором и сепаратором применяют фирмы «Сизмай» и «Ниигита» (Япония). Водные пылеуловители фирмы «Цедерапидс» (США) могут быть выполнены с вертикальным и горизонтальным расположением циклонов-промывателей (рис. 3.28). В корпусе циклонов-промывателей 1 расположена система труб 2, по которым вода подводится к центробежным форсункам 3, распыляющим воду в направлении движения потока газа. Осевший на стенке циклонов-промывателей шлам сливается в нижнюю часть корпуса и удаляется по трубопроводам. После прохождения циклонов-промывателей газ завихренным потоком направляется в дымовую трубу 4, которая в этом случае служит в качестве дополнительного устройства для осаждения обводненной пыли.

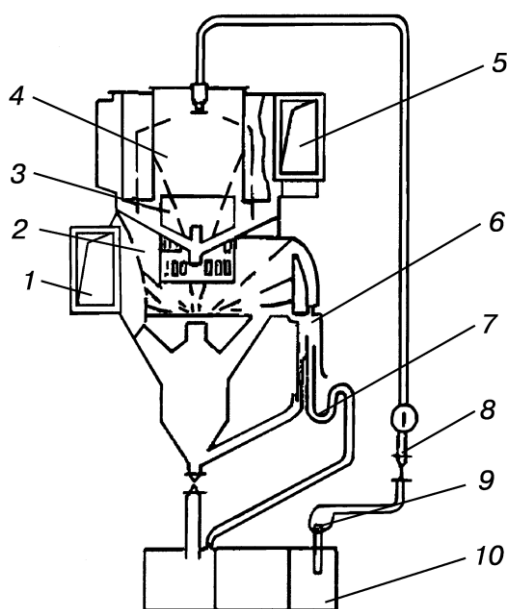


Рис. 3.25. Водный пылеуловитель фирмы «Вибау»

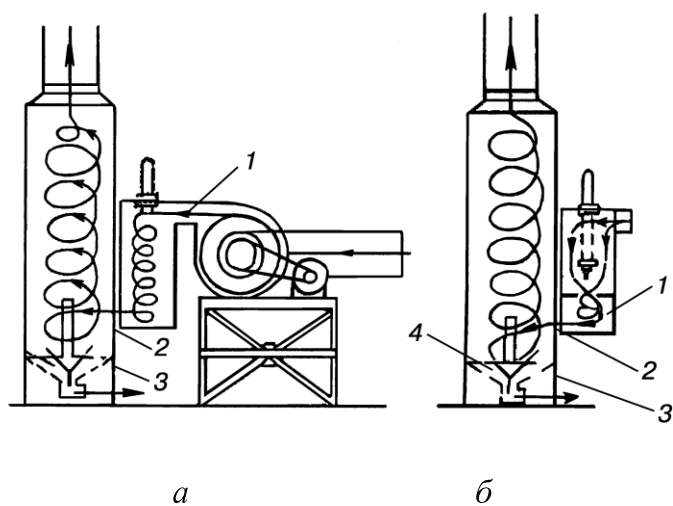


Рис. 3.26. Водные пылеуловители фирмы «Барбер-Грин»: а – с распределительной трубой; б – с соплом

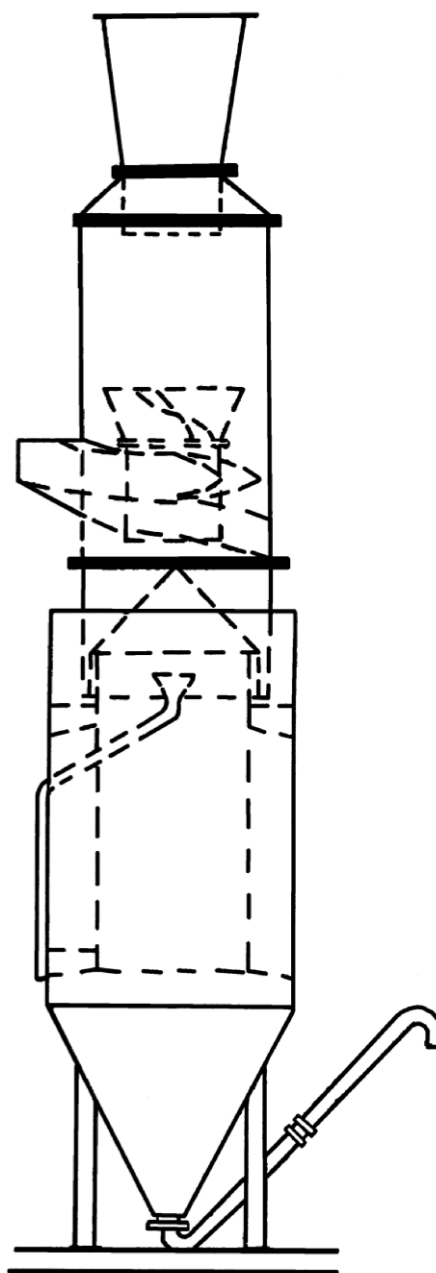


Рис. 3.27. Циклон-промыватель фирмы «Марини»

Вращательное движение газа в дымовой трубе пылеуловителей с горизонтальным расположением циклона-промывателя обеспечивается наклонными лопастями 5, установленными на ее входе. Водные пылеуловители с горизонтальным расположением циклона-промывателя оснащены пневмоколесным ходом и имеют повышенную мобильность. Технические характеристики водных пылеуловителей с циклонами-промывателями фирмы «Цедерапидс» приведены в табл. 3.10.

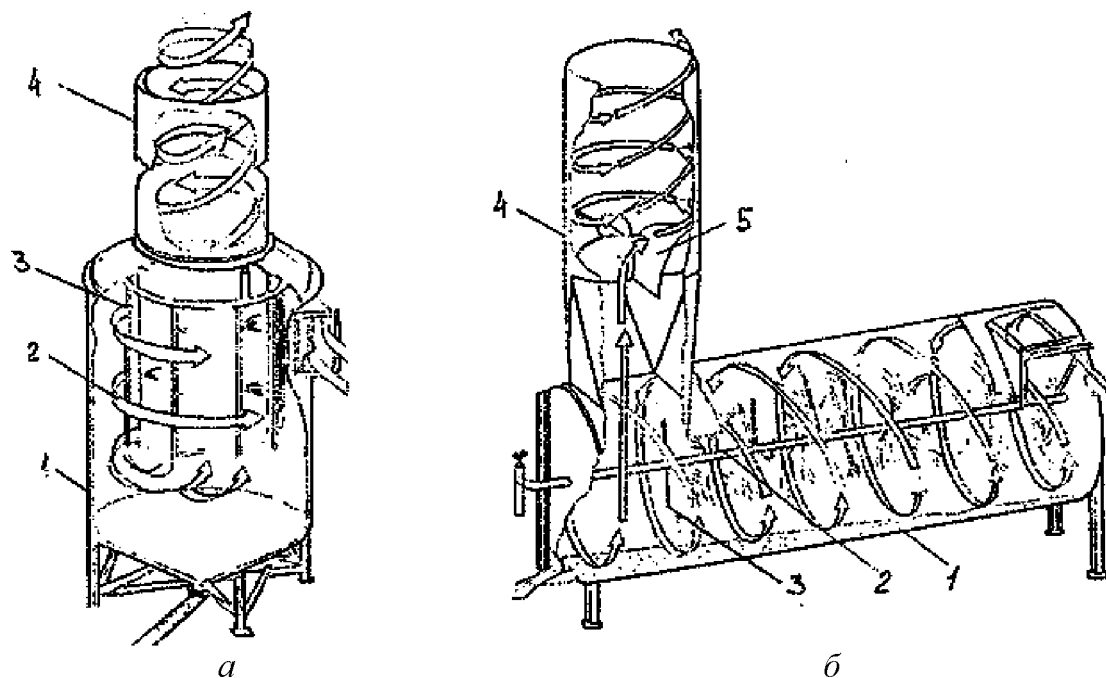


Рис. 3.28. Водные пылеуловители фирмы «Цедерапидс»: *а* – с вертикальным расположением циклона-промывателя; *б* – с горизонтальным расположением циклона-промывателя

На установках фирмы «Стансил», работающих по турбулентному способу приготовления смесей, используют водные пылеуловители-скрубберы (рис. 3.30). В верхней части корпуса 1 пылеуловителя расположены две насадки, одна из которых – центральная 3 – имеет форму конуса, а другая – насадка 2 – выполнена в виде перевернутого конуса и имеет верхнюю кромку зубчатой формы. На внешней поверхности обечайки и внутренней поверхности корпуса пылеуловителя имеются козырьки 5 и 6, образующие брызгоосадительную камеру. Вода подается в пылеуловитель по трубопроводу 7. Она поступает на центральную насадку и замкнутую снизу полость между корпусом и насадкой 2. К верхней кромке обечайки 4 вода подходит тонкими слоями с центральной насадки 3 и зубчатой насадки 2. Запыленный газ поступает по газоходу в верхнюю часть пылеуловителя, обтекает центральную насадку и после водной завесы между насадками 2 и 3 направляется в обечайку 4. Образующийся в результате взаимодействия частиц пыли и воды шлам осаждается в нижней части корпуса пылеуловителя и далее самотеком поступает в шламоотстойник.

Фирма «Марини» применяет водные пылеуловители семи типов-размеров, в которых в качестве рабочего органа используется труба Вентури (рис. 3.29).

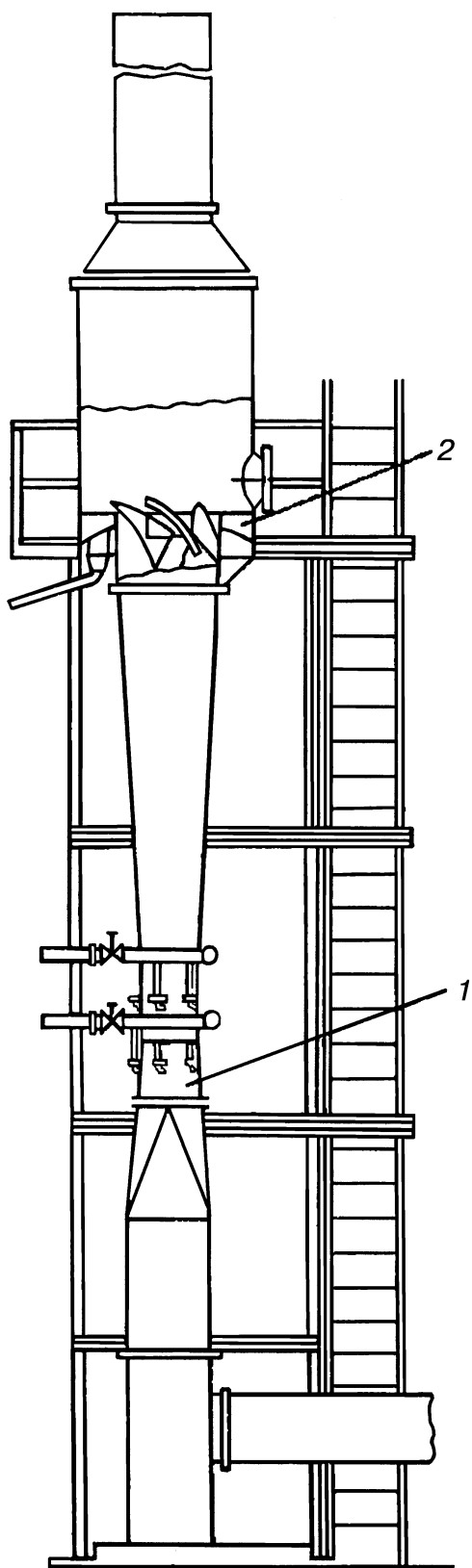


Рис. 3.29. Водный пылеуловитель  
фирмы «Марини»

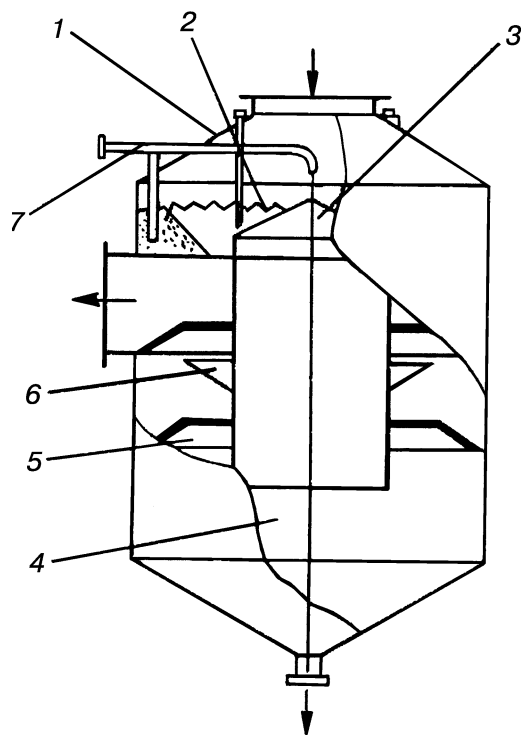


Рис. 3.30. Водный пылеуловитель-  
скруббер фирмы «Стансил»

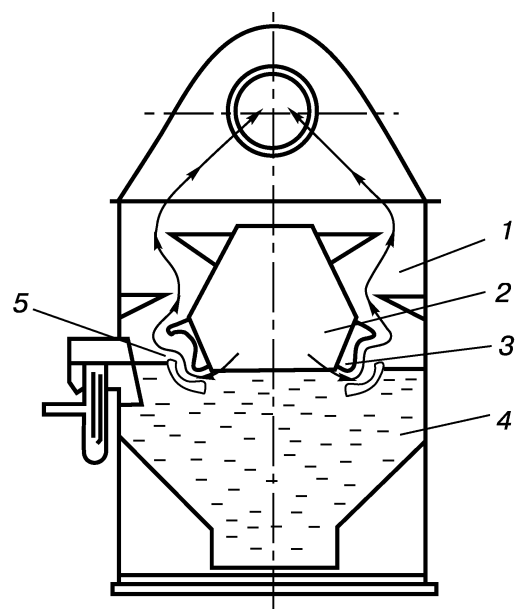


Рис. 3.31. Водный пылеуловитель  
фирмы «Ротоклон»

Таблица 3.10

**Техническая характеристика водных пылеуловителей  
с циклонами-промывателями фирмы «Цедерапидс»**

Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Пылеуловитель с вертикальным расположением			Пылеуловитель с горизонтальным расположением		
	Диаметр циклона, м	Мощность дымососа, кВт	Масса, т	Диаметр циклона, м	Мощность дымососа, кВт	Масса, т
8500	1,83	11,0	1,66	1,83	11,0	1,83
17000	1,83	11,0	1,66	1,83	11,0	1,83
30700	2,44	14,7	2,72	2,44	14,7	3,14
39200	2,44	18,4	2,72	2,44	18,4	3,14
48800	2,44	18,4	2,72	2,44	18,4	3,14
59500	3,048	22	3,92	2,9	22	4,44
68000	3,048	29,4	3,9	2,9	22	4,44
74000	3,36	29,4	4,76	3,36	29,4	5,13
102000	3,36	36,8	4,76	3,36	36,8	5,13

В таких пылеуловителях вода вводится в вертикально расположенные трубы Вентури 1, на выходе из которых расположен лопастной завихритель 2. Образующийся шлам отбрасывается к стенкам и отводится с верхней его части по трубе в шламоотстойник. Эффективность пылеулавливания основана на взаимодействии высокотурбулентного скоростного потока запыленных газов и воды с последующей сепарацией шлама. При высоких скоростях взаимодействия преодолеваются силы отталкивания и плохая смачиваемость мелких частиц, так как последние вступают в контакт с каплями воды и эффективно осаждаются в шламоуловителе. Особенно эффективно работают трубы Вентури при низкой температуре газов, когда их относительная влажность близка к 100 %. В этом случае на частицах пыли происходит конденсация влаги, что способствует процессам коагуляции и образованию агломератов, которые легче прилипают к каплям воды.

Техническая характеристика водных пылеуловителей фирмы «Марини» приведена в табл. 3.11.

Широкое распространение получили водные пылеуловители «Ротоклон» (США). Нижняя часть корпуса 4 (рис. 3.31) этих аппаратов представляет собой резервуар, заполненный водой. Остальное внутреннее пространство разделено перегородкой 3, нижний край которой погружен в воду. Перегородка образует две камеры: входную 2 – для запыленных газов и выходную 1 – для очищенных газов. Обе

камеры по всей длине аппарата связаны газоочистительным аппаратом 5 (импеллером).

Таблица 3.11

**Техническая характеристика водных пылеуловителей  
фирмы «Марини»**

Технические характеристики	Сушильный агрегат								
	E110	E130	E150	E180	E205	E250	E250	E274	E830
Диаметр циклона, м	1,8	1,8	2,4	2,4	2,4	2,95	2,95	2,4	2,95
Высота циклона, м	6,92	6,92	9,1	9,1	9,1	11,1	11,1	9,1	11,1
Высота дымовой трубы, м	1	11,1	15,1	15,1	15,1	13	13,1	15,1	13,1
Мощность привода насосов, кВт	4,05	4,05	9,2	9,2	9,2	18,4	18,4	18,4	28,4
Подача воды, м <sup>3</sup> /ч	12,0	12,0	24,0	24,0	24,0	48,0	48,0	48,0	96,0
Пылеуловитель с трубами Вентури									
Наименьший диаметр трубы Вентури, м	0,328	0,485	0,485	0,590	0,650	0,755	0,83	0,875	0,755
Высота пылеуловителя, м	9,3	11,85	11,85	12,1	13,2	16,1	18,44	–	16,1
Высота дымовой трубы, м	12,2	16,15	16,15	16,8	18,4	22,6	25,74	–	22,6
Мощность привода насосов, кВт	4,05	4,05	4,05	9,2	9,2	9,2	18,4	18,4	18,4
Подача воды, м <sup>3</sup> /ч	4,8	10,0	12,0	16,4	19,2	28,0	32,0	36,8	50,0

Потоки запыленных газов, проходя через импеллер, подхватывают часть воды из резервуара. При соответствующей скорости газов увлекаемая вода сначала движется по нижней направляющей импеллера, а затем отбрасывается к его верхней направляющей и при выходе из импеллера возвращается в резервуар, падая водяной завесой. Циркуляция воды происходит только вследствие движения воздушного потока. В этом случае не требуются дополнительные устройства. Газы от пыли очищаются в результате совместного действия центробежной силы, действующей на частицы пыли, и перемешивания за-

пыленных газов с водой. Уловленная водой пыль попадает в резервуар, из которого она затем удаляется с помощью пластинчатых и винтовых конвейеров. Основные параметры пылеуловителей «Ротоклон» приведены в табл. 3.12.

Таблица 3.12

**Основные параметры пылеуловителей фирмы «Ротоклон»**

Типо-размер	Номинальная производительность, м <sup>3</sup> /ч	Длина импеллера, мм	Размеры, м			Масса, т
			Длина	Ширина	Высота	
1½	2550–2700	800	2,423	1,314	1,308	0,639
2½	4250–4500	800	2,546	1,314	1,308	0,708
4	6800–7200	1225	2,699	1,746	1,335	0,946
6	10000–10200	1830	2,890	2,356	1,587	1,29
8	13600–14400	2500	3,434	2,261	2,013	1,605
12	20400–21600	3700	3,696	2,622	2,261	1,842
16	27200–28800	4930	4,13	3,232	2,261	2,254
20	34000–36000	6150	4,13	3,842	2,261	3,122
24	40800–43000	7380	4,54	4,451	2,464	3,55
28	47600–50000	8600	4,54	5,061	2,464	4,18
32	54500–58000	9800	4,752	5,67	2,464	4,418

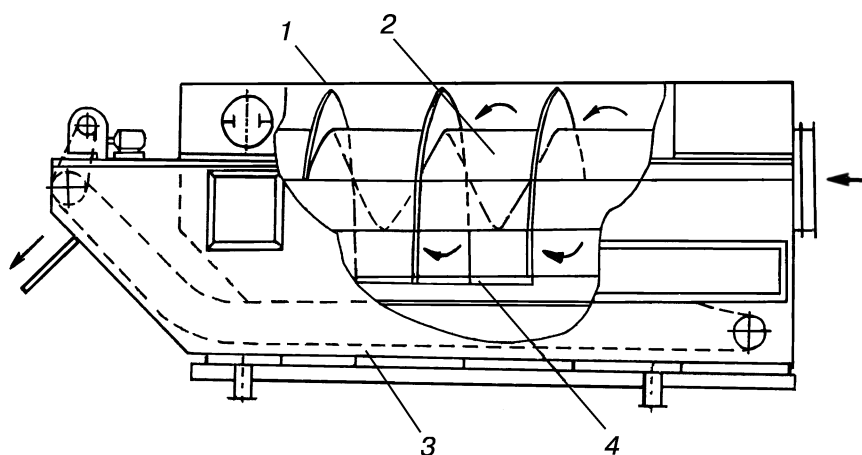


Рис. 3.32. Водный пылеуловитель фирмы «Сим»

Фирма «Сим» (Италия) применяет водные пылеуловители (рис. 3.32), содержащие элементы горизонтального циклона-промывателя и пылеулавливающих устройств типа «Ротоклон». Вращательное движение потока газов внутри корпуса 1 пылеуловителя обеспечивается винтовой насадкой 2. Нижние удлиненные части вит-

ков насадки опущены в воду и срезаны параллельно уровню воды в корпусе. Поток газа, взаимодействуя с водой, проходит нижние кромки 3 винтовой насадки. Захваченная вода осаждается вместе с пылью на корпусе пылеуловителя и стекает вниз. Шлам из устройства удаляется цепным конвейером 4.

При использовании водных пылеуловителей целесообразно по возможности ограничить количество поступающей в них пыли для уменьшения шламообразования. В перспективных пылеулавливающих системах перед водным пылеуловителем устанавливают две ступени с циклонами, первая из которых предназначена для осаждения крупной пыли, а вторая – для осаждения мелкой.

**Тканевые фильтры** имеют высокую эффективность, почти не зависящую от изменения подачи газов. Создание тканевых фильтров является основным направлением усовершенствования пылеулавливающих систем асфальтосмесительных установок. Для успешного и широкого применения таких фильтров необходимо обеспечить надежное управление температурой газов, выходящих из сушильного агрегата.

Тканевые фильтры работают при высоких температурах, повышенной влажности, наличии в газах химически агрессивных составляющих и большой концентрации пыли с абразивными частицами. Поэтому фильтровальная ткань должна быть термостойкой. При повышенной температуре она должна быть устойчивой против химических воздействий, абразивного изнашивания и изгиба. Ткань должна быть также прочной на разрыв и эластичной, иметь незначительное удлинение под действием температуры, быть достаточно легкой и хорошо очищаемой от осевшей на ее поверхность пыли. Такие свойства ткани необходимы для обеспечения возможности регенерации фильтра продуванием и встряхиванием. Ткань фильтра должна быть достаточно плотной для обеспечения улавливания частиц размером 1 мкм и достаточно пористой для того, чтобы газы могли проходить через неё с возможно малым сопротивлением.

В промышленности применяют рукавные и плоские фильтры. В этих фильтрах ткань надета на металлический каркас. Рукавные элементы имеют диаметр 100–200 мм и длину 2–6 м.

Пылеуловитель с рукавными фильтрами фирмы «Барбер-Грин» и схема движения газов вдоль корпуса этого фильтра показаны на рис. 3.33. Корпус пылеуловителя разделен по длине вертикальными перегородками на три части. Центральная часть, разделенная наклонной стенкой 1, имеет две полости: нижнюю 6 – для подвода запыленного газа, поступающего через входной патрубок 3, и верхнюю 7 – для отвода



очищенного газа. В двух крайних частях пылеуловителя расположены секции с рукавными фильтрующими элементами 8, под которыми установлены два пылесборника 5 с винтовыми конвейерами 4. На верхней стенке корпуса (над каждой секцией) расположены быстросъемные люки 2 для обслуживания и ремонта рукавных фильтров.

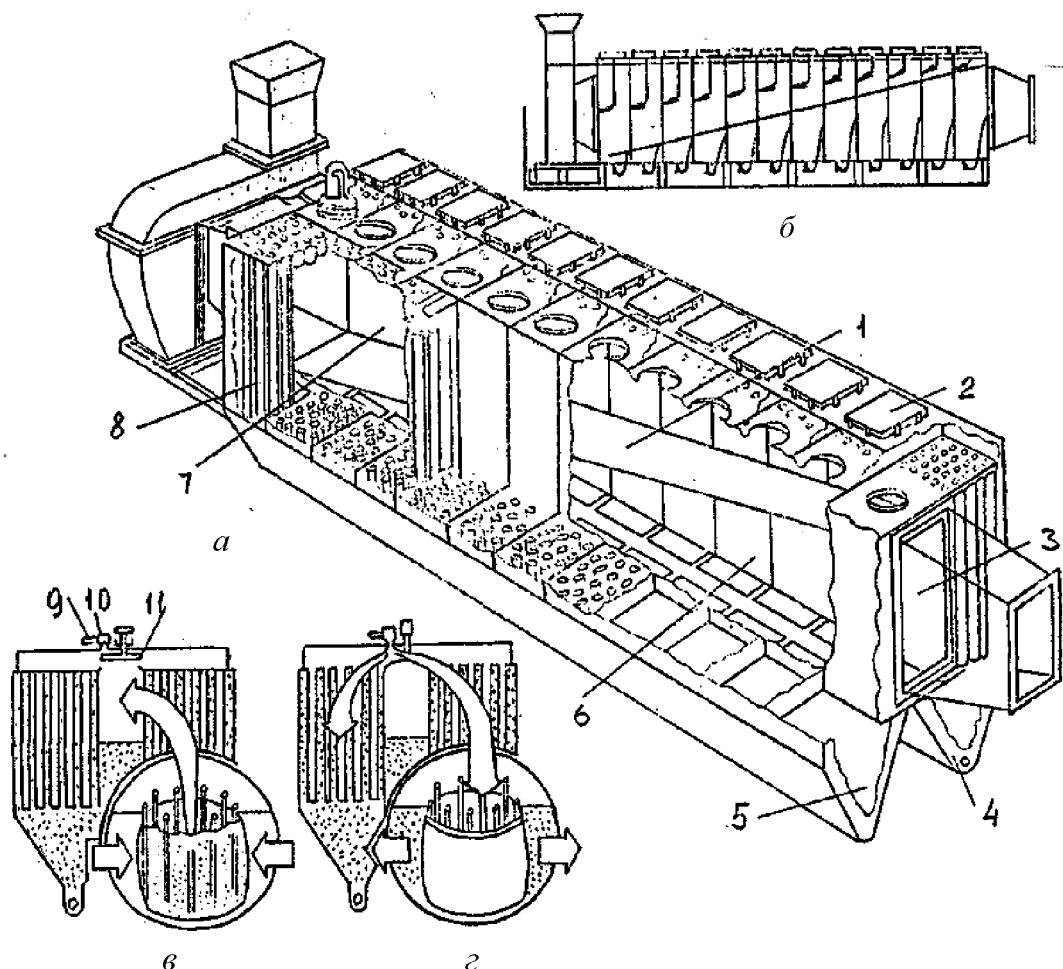


Рис. 3.33. Рукавный тканевый фильтр фирмы «Барбер-Грин»: *а* – общий вид; *б* – схема движения газов в продольном и поперечном сечениях корпуса; *в, г* – схема регенерации

Над корпусом пылеуловителя имеется горизонтальный трубопровод 9 для подвода сжатого воздуха на продувку рукавных фильтров. Воздух подается в каждую секцию через клапан 10 с электрическим или пневматическим приводом. Сверху расположены также заслонки 11 с пневматическим приводом, отключающим попарно секции с рукавными фильтрами от верхней полости отвода очищенного газа центральной части пылеуловителя. Для обеспечения непрерывной работы пылеулови-

теля производится периодическая регенерация рукавных фильтров методом продувки их противотоком сжатого воздуха.

Рукавные фильтры девяти типоразмеров с пылеосадительными камерами на входе применяют на асфальтосмесительном оборудовании фирмы «Марини». Для обеспечения повышенной мобильности оборудования тканевые фильтры могут иметь пневмоколесный ход. Технические характеристики рукавных фильтров фирмы «Марини» приведены в табл. 3.13.

Таблица 3.13

**Технические характеристики рукавных тканевых фильтров  
фирмы «Марини»**

Показатели	M160	M280	M320	M400	M440	M640	M720	M840
Производительность, м <sup>3</sup> /ч	1200	2500	3000	4100	4800	7000	8200	9200
Число рукавов	0	0	0	0	0	0	0	0
Размеры, м:								
Длина	160	280	320	400	440	640	720	840
Ширина	5,93	8,03	8,73	10,13	10,83	14,48	15,88	17,98
Высота	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	—
	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	5,75	6,31	6,31

Фирма «Флекс-Клин» (США) разработала для фирмы «Стансил» серию фильтров с рукавными фильтрующими элементами из ткани «Номекс». При номинальной нагрузке через каждый квадратный метр ткани проходит в среднем 120 м<sup>3</sup> запыленных газов. Угол наклона пылесборников составляет 60°.

Схема пылеулавливающей системы с тканевым фильтром фирмы «Алфалдер» показана на рис. 3.34. В эту систему входят пылеосадительная камера 10 в виде емкости цилиндрической формы, тканевый фильтр 9 с поверхностью фильтрации до 343 м<sup>2</sup>, пылесборник 7, устройство 8 для продувки фильтра и газоходы. Тканевые элементы фильтра (до 50 шт.) расположены внутри емкости по кругу и заклепаны на металлическом каркасе. Устройство для продувки фильтра представляет собой вращающийся от электропривода 1 вертикальный воздухопровод 3, на входе которого расположен вентилятор 2, а на выходе — насадка 4 с щелевым соплом. Удаление с поверхности ткани осажденной пыли происходит непрерывно противотоком воздуха, подаваемого вентилятором. Пыль в виде агломератов падает с филь-

рующих элементов в пылесборник и отводится из него через лопастной затвор 5 при помощи винтового конвейера 6.

Тканевые фильтры фирмы «Алфалдер» (рис. 3.34, *а*) выполнены с устройствами для охлаждения газов сушильного барабана. Принцип работы охладителя, предохраняющего от пережога фильтровальную ткань, показан на рис. 3.34, *б*. Корпус устройства представляет собой осадительную камеру с пылесборником, в котором расположены газоходы 12 и теплообменник 13 с площадью поверхности осаждения до 200 м<sup>2</sup>. Теплообменник составлен из отдельных блоков с пластичными элементами. На охладителе установлено до шести вентиляторов, которые продувают воздухом в горизонтальном направлении внутренние полости теплообменника.

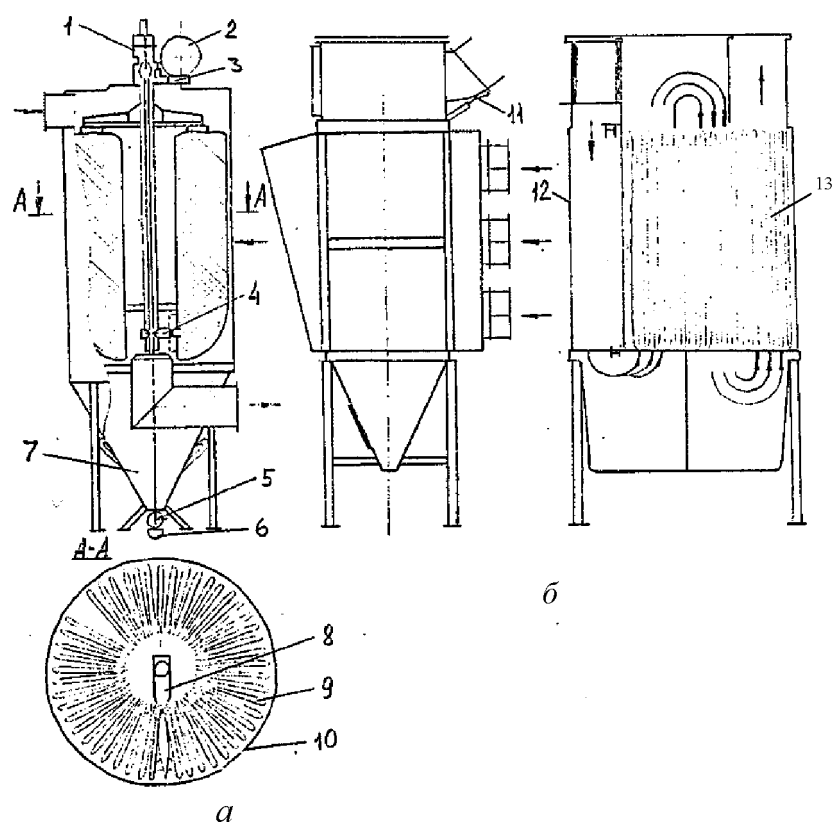


Рис. 3.34. Пылеулавливающая система фирмы «Алфалдер»: *а* – тканевый фильтр; *б* – устройство для охлаждения газа

Горячие газы из сушильного барабана поступают по газоходу в верхнюю часть корпуса охладителя, по вертикальному газоходу подходят к нижней части теплообменника и три раза обтекают его в вертикальном направлении. Газы, охлаждаемые через стенки теплообменника атмосферным воздухом, по газоходу верхней части корпу-

са направляются в тканевый фильтр. Если температура газов на выходе из охладителя остается выше допустимой, то на выходном газоходе открывается заслонка 11 и в тканевый фильтр поступают газы с атмосферным воздухом. Пылеулавливающие системы фирмы «Алфалдер» имеют от одной до четырех секций, каждая из которых состоит из пылеуловителя с тканевым фильтром и охладителя воздуха. Параметры пылеулавливающих систем фирмы «Алфалдер» с тканевыми фильтрами и устройствами для охлаждения воздуха приведены в табл. 3.14.

Таблица 3.14

**Параметры пылеулавливающих систем фирмы «Алфалдер»**

Параметр	Показатели			
Производительность, м <sup>3</sup> /ч	37000	53000	66000	90000
Число секций	1	2	2	3
Мощность электрооборудования, кВт	95	120	143	180

Для напряженных режимов работы фирма «Алфалдер» предусматривает установку за тканевыми фильтрами водных пылеуловителей.

На рис. 3.35 показана двухступенчатая пылеулавливающая система фирмы «Цедерапидс», в которой на второй ступени очистки используются плоские тканевые фильтрующие элементы. Для первой ступени очистки применяют батарейные циклоны или одиночные циклоны с горизонтальным или вертикальным расположением корпуса.

При применении батарейных и горизонтальных одиночных циклонов обе ступени пылеулавливающей системы монтируют на общей раме с партерным расположением оборудования.

Корпус 2 тканевого фильтра (рис. 3.35) разделен по длине вертикальными перегородками 5 на две боковые и одну центральную части. В боковых частях корпуса расположены секции с плоскими тканевыми фильтрующими элементами 6. Каждый элемент выполнен в виде узкой коробки с металлическим каркасом и боковыми стенками из фильтрующей ткани. В нижней части торцевых стенок коробок, обращенных к центральной части корпуса фильтров, имеются два ряда щелей 7, через которые внутренняя полость фильтрующих элементов сообщается с полостью центральной части корпуса фильтра, соединенной со всасывающей линией дымососа 9. Под верхней стенкой корпуса фильтра расположен газоход 8, соединяющий первую и вторую ступень очистки. Осевшая пыль с поверхности ткани удаляется

противотоком сжатого воздуха из коробок фильтрующих элементов через боковые щели. Для этого в центральной части корпуса фильтра имеется подвижное устройство 4 с четырьмя щелевыми соплами 3. Сжатый воздух подается к соплам по гибкому шлангу, навитому на подвижный барабан, который расположен под центральной частью корпуса фильтра. Подойдя к фильтрующему элементу, два сопла перекрывают поток запыленных газов через этот элемент, а подаваемый из сопел сжатый воздух поступает в коробку и удаляет противотоком осевший слой пыли. Пыль падает вниз и осаждается в пылесборниках 10, расположенных под секциями с фильтрующими элементами. Пыль из пылесборников первой и второй ступени отводится отдельно винтовыми конвейерами 11. Между газоходами для подвода запыленных газов к пылеулавливающей системе и газоходам в верхней части корпуса фильтра установлено устройство 1, предохраняющее ткань фильтрующих элементов от воздействия перегретых газов. При высокой температуре газов устройство автоматически обеспечивает возможность подсоса холодного атмосферного воздуха к секциям с фильтрующими элементами.

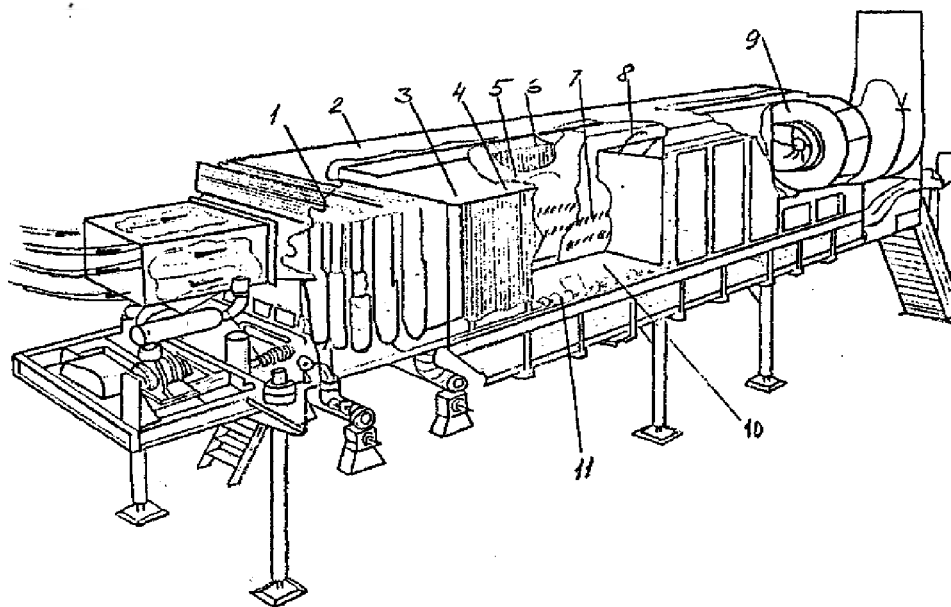


Рис. 3.35. Двухступенчатая пылеулавливающая система фирмы «Цедерапидс»

Тканевые фильтры с плоскими фильтрующими элементами производят также фирмы «Амман» и «Ара». Фильтры фирмы «Амман» рассчитаны на содержание пыли в поступающих на очистку газах не более  $250 \text{ г/м}^3$ . Концентрация пыли в очищенных газах, по данным этой фирмы, не превышает  $100 \text{ мг/м}^3$ .

По сравнению с рукавными фильтрами тканевые с плоскими фильтрующими элементами имеют лучший удельный показатель, характеризующий насыщенность тканью единицы объема секций фильтра, и более удобны в обслуживании, особенно при обнаружении и удалении поврежденных фильтрующих элементов. Технические характеристики тканевых фильтров фирмы «Ара» приведены в табл. 3.15.

Таблица 3.15

**Технические характеристики тканевого фильтра  
с плоскими фильтрующими элементами фирмы «Ара»**

Показатель	Значение
Производительность, м <sup>3</sup> /ч	85000
Площадь поверхности фильтрации, м <sup>2</sup>	1020
Концентрация пыли в тесте после очистки, м <sup>3</sup> , не более	150
Допустимая температура запыленных газов, К, не более	473
Масса 1 м <sup>2</sup> ткани, кг	0,4
Расход воздуха на продувку фильтрующих элементов, м <sup>3</sup> /ч	12
Мощность привода дымососа, кВт	110
Диаметр винта конвейера (для удаления пыли), мм	250
Мощность привода винтового конвейера, кВт	4

Матерчатые фильтры модели TS применены на установках фирмы «Вибау». По данным фирмы, на этих фильтрах используется температуростойкая ткань (температура до 623 К). В связи с этим пылеулавливающее оборудование не содержит устройств для охлаждения газов. Регенерация фильтров производится встряхиванием и обратной продувкой.

В настоящее время в эксплуатации находится более 1000 асфальтобетонных заводов (АБЗ), являющихся источниками загрязнения атмосферного воздуха пылью и вредными газами. Особенно неблагоприятно обстоят дела при использовании в качестве топлива мазута, низкая эффективность сжигания которого (недожог достигает 30 %) приводит к образованию шлейфов дыма, загрязняющего значительные территории.

Опыт показывает, что проблема охраны атмосферного воздуха на АБЗ должна решаться комплексно как с организованными источниками загрязнения, так и с неорганизованными.

**Мокрый пылеуловитель.** Как отмечалось ранее, основной задачей при выборе пылеулавливающего оборудования является опре-

деление адекватного конкретному производственному процессу аппарата, соответствующего технологическим условиям, условиям эффективности, экономичности и т. п.

Технико-экологическое состояние таких установок АБЗ неудовлетворительно вследствие:

- несовершенства существующего очистного оборудования;
- низких значений КПД топливоиспользующих установок (35–65 %), связанных с большими потерями тепла топлива с уходящими газами;

- отсутствия современных средств регулирования и контроля;
- низкой квалификации и высокой текучести кадров эксплуатационного персонала;

- сезонности (в условиях Сибири) работ, что не позволяет производству интегрироваться с предприятиями химической перерабатывающей промышленности с целью утилизации извлеченных из выбросов веществ;

- невозможности по экономическим соображениям организации переработки отходов на месте;

- небольшой высоты дымовых труб и др.

Существует большое количество методов очистки отходящих газов от механических примесей и их конструктивного воплощения. Известные устройства и аппараты для очистки газов от пыли имеют свои преимущества и недостатки. Все более жесткие требования к защите окружающей среды, экономии энергетических и водных ресурсов ставят задачу разработки более эффективных аппаратов газоочистки.

Эффективность работы мокрых пылеуловителей, широко применяемых на АБЗ, в основном зависит от смачиваемости пыли, конструкции технологического очистного оборудования, выделения уловленной пыли из воды и возможности щелочной или кислотной коррозии оборудования.

Асфальтобетонные установки завода «Дормашина» (Украина) в настоящее время оснащаются мокрым пылеуловителем ударно-инерционного действия (типа «Ротоклон»). Эксплуатация подобных установок выявила их существенный недостаток – чрезмерную зависимость эффективной работы от колебания уровня воды в аппарате очистки. Установка нуждается в частой регулировке уровня воды, а сам процесс регулировки требует определенного уровня квалификации обслуживающего персонала.

В Красноярском государственном техническом университете была решена задача создания пылеуловителя, простого в эксплуата-

ции и исключающего возможность работы установки без подачи воды, так как пылеуловитель монтируется в основании дымовой трубы и при отключении смывной воды происходит ее запираение. Схема разработанного пылеуловителя приведена на рис. 3.36.

К основным конструктивным особенностям данного аппарата относится специальная сетка, на которой размещен слой гравия. Толщина слоя подбирается эмпирически и зависит от напора, создаваемого дымососом. В процессе эксплуатации по мере износа рабочего аппарата дымососа толщина слоя засыпки может быть уменьшена с целью снижения гидравлического сопротивления. Для этой цели служит люк в верхней части корпуса.

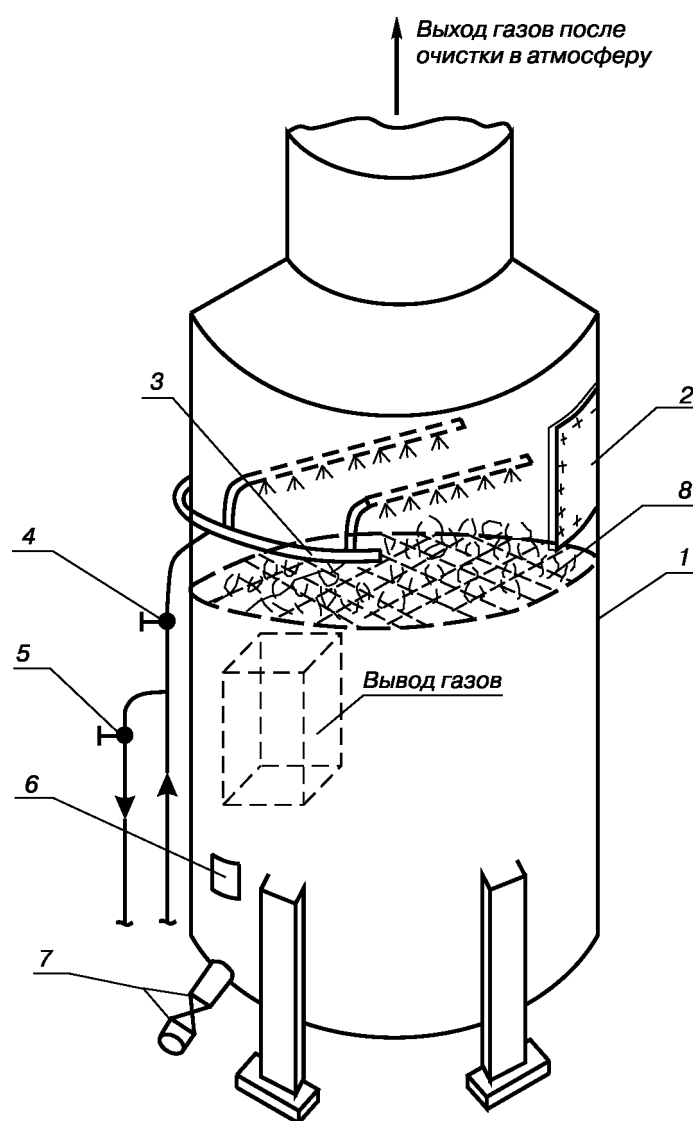


Рис. 3.36. Схема комбинированного мокрого пылеуловителя: 1 – корпус; 2 – люк для загрузки галечника; 3 – коллектор; 4 – вентиль регулировки; 5 – вентиль регулировки сброса воды в приемный колодец; 6 – люк очистки пылеуловителя; 7 – задвижка слива шлама; 8 – решетка с галечной засыпкой



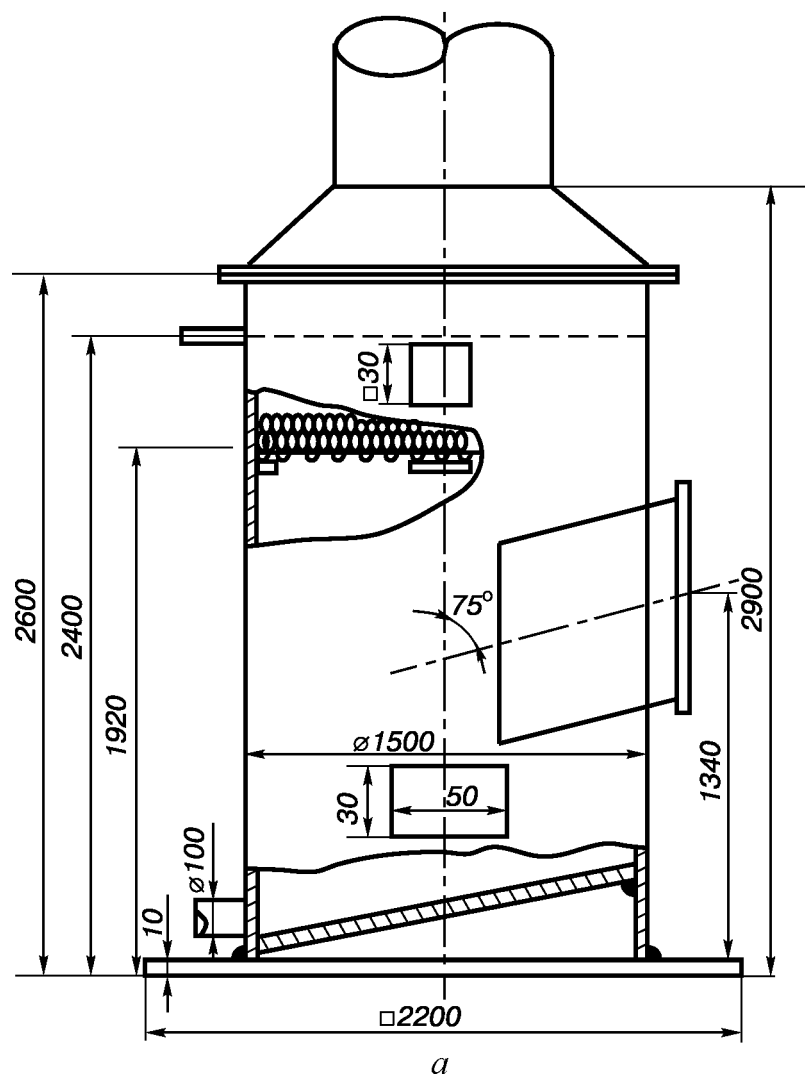


Рис. 3.37. Комбинированный мокрый пылеуловитель: *а* – эскизный чертеж мокрого трехступенчатого пылеуловителя; *б* – комбинированный мокрый пылеуловитель в составе АБЗ

Дымовые газы подаются тангенциально в нижнюю часть корпуса под засыпку. Наиболее крупные частицы пыли попадают на стенку и смываются водой. Гравийная засыпка орошается водой, поступающей из распределительного коллектора. Закрученный и турбулизированный поток запыленных газов поступает снизу. Часть пыли захватывается каплями воды, другая часть смачивается на поверхности отдельных элементов засыпки и смывается потоком воды. При отключении воды пространство между элементами гравийной засыпки быстро забивается пылью и сажей, что приводит к запиранию газохода.

Образующийся шлам через патрубок слива удаляется из аппарата и самотеком по трубе направляется в шламоотстойник. Осветленная вода из шламоотстойника направляется обратно в распределительный коллектор установки. Регулируя толщину слоя гравийной засыпки (создавая максимально возможное гидравлическое сопротивление для данного типа дымососа), удастся практически предотвратить унос воды из аппарата. Расход воды незначителен, идет лишь на некоторое увлажнение отходящих газов и зависит от их температуры. При понижении температуры увлажнение уменьшается.

Расчет коэффициента массоотдачи в данном аппарате может быть проведен по формулам:

$$\text{Nu} = 0,407 \text{Re}^{0,66} \text{Pr}^{0,33};$$

$$\text{Nu} = \frac{\beta d_{\text{экв}}}{D}, \text{Re} = \frac{w d_{\text{экв}}}{\varepsilon \nu_{\text{г}}}, \text{Pr} = \frac{\nu_{\text{г}}}{D},$$

где  $\beta$  – коэффициент массоотдачи;  $d_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр засыпки;  $D$  – коэффициент диффузии;  $w$  – линейная скорость потока;  $\nu_{\text{г}}$  – кинематическая вязкость газа;  $\varepsilon$  – порозность слоя.

Пылеулавливающая установка с мокрым пылеуловителем (рис. 3.37) смонтирована на реальном объекте (АБЗ Березовского ДРСП, Красноярский край). Опыт эксплуатации и экспериментальные исследования показали высокую эффективность работы пылеуловителя. Поскольку коэффициент  $\beta$  для данного типа аппаратов определен экспериментально, используя вышеприведенные формулы, можно проектировать установки на любой расход газов (для любого АБЗ).

### 3.3. Защита окружающей среды от энергетических воздействий

Энергетическими загрязнениями окружающей среды считаются такие виды энергии антропогенного происхождения, которые либо вообще не характерны для природной среды, либо их интенсивность значительно превышает фоновые (природные) величины; кроме того, они вредно действуют на людей, животных, растения и могут вызывать нарушение нормального функционирования различных экологических систем.

Воздействие на биосферу энергетических загрязнителей антропогенного происхождения складывается из теплового, акустического, электромагнитного и радиоактивного (ионизирующего) загрязнений, каждое из которых характеризуется различными свойствами, параметрами, степенью опасности для человека и других живых организмов. Загрязнения веществом и энергией могут действовать на природу комплексно, вызывая отрицательный эффект. Неуклонно возрастаая в масштабах, энергетическое загрязнение при определенных условиях может достигнуть таких уровней, которые станут значимыми для отдельных регионов и крупных экологических систем.

**Тепловое загрязнение.** Этот тип загрязнения обусловлен в основном работой теплоэнергетических агрегатов, к которым относится оборудование ТЭС, АЭС, тепловые двигатели, включая двигатели транспортных средств, преобразующие тепло в механическую и электрическую энергию, а также работой теплообменных технологических установок для нагрева, сушки, плавления, выпарки, спекания различных материалов, для отопления теплиц и других объектов.

Ежегодно в мире сжигается до 5 млрд т угля, нефти, что сопровождается выбросом в атмосферу около 18 млрд т загрязняющих веществ и выделением  $2 \cdot 10^{20}$  Дж тепла. При переходе от минерального топлива к атомному до некоторой степени уменьшается химическое загрязнение среды, но возрастает тепловое. Так, для рассеивания тепла АЭС средних размеров, производящей 3000 МВт электроэнергии, требуется 1800 га водной поверхности в местностях с умеренным климатом.

В настоящее время в России выбросы тепла не регламентируются нормативными документами, так как тепло достаточно быстро рассеивается на большие пространства и не может оказать существенного влияния на экологическую обстановку.

В то же время имеют место локальные вредные воздействия теплового загрязнения на водные экосистемы, а именно:

повышение температуры усиливает восприимчивость организмов к токсическим веществам;

температура может превысить критические значения показателя теплового режима для жизненных циклов водных организмов;

в теплой воде понижено количество кислорода в связи с меньшей его растворимостью.

Таким образом, нагретые сточные воды влияют как на термический, так и на биологический режим водоемов.

Снижение интенсивности теплового загрязнения тесно связано с повышением эффективности и экономичности теплообменного и теплоэнергетического оборудования, с более полным использованием теплоты сгорания топлив, снижением его расхода.

В настоящее время в системах охлаждения электростанций все большее применение находит обратное водоснабжение с использованием градирен. В градирне охлаждение воды происходит за счет непосредственной теплопередачи. Для улучшения условий испарения и теплопередачи от воды к воздуху в оросительное пространство градирен воздух подводится либо принудительным образом с помощью вентиляторов (вентиляторные градирни), либо за счет создания тяги воздуха высокой вытяжной башней (башенные градирни), либо за счет силы ветра и естественной конвекции (атмосферные градирни). Испарения компенсируются постоянной подпиткой в размере 0,8–1,2 м<sup>3</sup>/с на 1 ГВт, т. е. около 1–2 % расхода воды при прямоточном охлаждении. В случае применения градирен сброс тепла происходит главным образом в атмосферу, которая менее чувствительна к тепловому воздействию, чем гидросфера.

Основным и существенным недостатком таких систем охлаждения является выброс в атмосферу огромного количества паров, капельной влаги и тепла удельной мощностью 40 Вт/(м<sup>2</sup> · ГВт), что значительно превышает предельно допустимый уровень. И, наконец, необходимо добавить, что себестоимость электроэнергии на ТЭС с градирнями на 5–6 % выше, чем в случае прямоточного охлаждения. Все эти проблемы в той или иной мере можно решить применением сухой системы охлаждения, не требующей подвода свежей воды извне.

Наиболее проста система прямого сухого охлаждения, включающая в себя воздушно-конденсационную установку, поверхностный конденсатор, непосредственно охлаждаемый атмосферным воздухом, и вентиляторы для подачи этого воздуха. Применение такой установки ограничивается трудностями, вызываемыми низким значением коэффициента теплопередачи, а соответственно, и большими

размерами конденсатора, который приходится выносить за пределы машинного зала, что влечет за собой увеличение протяженности и диаметров вакуумных трубопроводов отработавшего пара, так как существует ограничение падения давления между турбиной и конденсатором. Поэтому воздушно-конденсаторные установки пригодны для турбоагрегатов средней и малой мощности.

В случае применения сухой (радиаторной) охладительной башни требуемая поверхность теплообмена ее ребристо-трубных элементов несколько больше поверхности охлаждения воздушного конденсатора. Однако размещение ее, особенно для более крупных энергоблоков, существенно облегчается тем, что транспортировать в этом случае нужно не пар низкого давления, а теплоноситель, имеющий значительно меньший удельный объем. Затраты на сооружение радиаторной башни оказываются значительно большими, чем на сооружение градирни, из-за больших (в 3–5 раз) расходов воздуха пропорционально площади поверхности труб охлажденных элементов, которая также (в 2–3 раза) больше площади орошаемой поверхности в пленочной градирне. Наряду с более высоким теоретическим пределом охлаждения воды и повышенным расходом электроэнергии на собственные нужды это приводит к заметно более высокому, чем при охлаждении воды в градирне, оптимальному давлению отработавшего пара, а следовательно, и к большему расходу топлива. Применение радиаторных охладительных башен приводит к увеличению капиталовложений в систему технического водоснабжения ТЭС в 2–3 раза (по сравнению с градирнями).

Существенным недостатком сухих градирен является изменение располагаемой мощности паровых турбин в зависимости от температуры, которая влияет на глубину вакуума в конденсаторе и, соответственно, на удельную выработку электроэнергии (термодинамический КПД цикла). Большие суточные (10–20 °С) и сезонные (50–80 °С) колебания температуры воздуха характерны для континентальных районов, к которым относится большая часть территории нашей страны, в том числе практически вся Сибирь. Оценивая эту особенность установок с воздушными конденсаторами, следует учитывать, что при росте температуры воздуха может несколько снижаться и потребность в электроэнергии, так что при определенной структуре энергогенерирования и энергопотребления эти установки могут взять на себя регулирование верхней (пиковой) части графика энергосистем.

Существуют проекты и комбинированных охладительных башен, сочетающих «мокрое» и «сухое» охлаждение воды; это, в част-

ности, позволяет обеспечивать постоянство вакуума в конденсаторе путем увеличения подачи туда воды при повышении температуры воздуха. Предлагается два варианта осуществления такой схемы: 1) охладительная башня, сочетающая «мокрую» и «сухую» секцию; 2) башня типа «сухой», но с возможностью наружного орошения ребристо-трубных элементов в теплое время года.

Комбинированные охладительные башни позволяют решать две задачи:

предотвращение или уменьшение туманообразования в приземном слое атмосферы;

уменьшение годовой потребности в свежей подпиточной воде, затрачиваемой на восполнение безвозвратных потерь воды при испарительном охлаждении ее в градирнях.

Конкретных предложений, внедрение которых в практику позволило бы если не избавиться, то хотя бы в достаточной мере сократить нежелательные последствия сброса низкопотенциального тепла, пока мало. Препятствием к использованию сбросов теплой воды является ее низкая температура. Наиболее эффективна утилизация низкопотенциального сбросного тепла прямоточных систем охлаждения в сельском хозяйстве, животноводстве и рыбоводстве. Для обогрева теплиц и животноводческих помещений в зимний период целесообразно применять тепло с более высоким температурным потенциалом, которым обладает сбросная вода электростанций с искусственными охладителями-градирнями.

Конденсационная электрическая станция мощностью 1200 МВт может обогревать с высокой степенью надежности 100–150 га теплиц. Перспектива использования тепла в этом направлении тем более заслуживает внимания, что лето в большинстве районов России, и в частности в Сибири, где предполагается масштабное строительство энергообъектов, короткое, и для круглогодичного снабжения населения овощами необходимо сооружение теплиц. Обогревать их, сжигая топливо, во-первых, дорого, а во-вторых, это усилит задымленность атмосферы, тогда как обогрев теплиц за счет сброса тепла электростанцией позволит избежать и добавочного загрязнения окружающей среды, и затрат на топливо.

В целях снижения затрат на обогрев предлагается достаточно тонко очищенные дымовые газы также направлять в теплицы. Примеси вредных для человека веществ, содержащиеся в дымовых газах, зачастую не оказывают столь губительного влияния на растения. В частности, наличие окислов углерода и азота благотворно сказывается на их

развитии, разумеется, если концентрация последних не чрезмерна. С другой стороны, газы, проходя через теплицу, остывают, и, следовательно, уменьшается поступление тепла в окружающую среду.

Кроме того, возможно в качестве охладителя при конденсации отработавшего пара использовать грунт теплиц, т. е. отказаться от конденсатора как неотъемлемой части технологической системы ТЭС, а трубы, по которым транспортируется отработанный пар, заглубить в грунт. Тем самым будет достигнута возможность осуществлять прогрев почвы теплиц без передаточного звена – циркуляционной воды – и существенно уменьшится загрязнение водоемов-охладителей. При этом значительно возрастет площадь трубок, где происходит конденсация пара (за счет снижения в сотни раз коэффициента теплопередачи), но зато снизятся расходы на обогрев теплиц.

Следует подчеркнуть, что снижение тепловых выбросов в окружающую среду – это вторичный эффект применения тепла сбросной воды и дымовых газов ТЭС для интенсификации сельского хозяйства. Потребность в тепле любого самого мощного сельскохозяйственного комплекса такого рода слишком мала по сравнению с мощностью теплового выброса с циркуляционной водой крупной ТЭС, чтобы говорить о радикальном снижении тепловых выбросов таким образом.

Одним из негативных последствий сброса подогретой циркуляционной воды в водохранилища-охладители является ускоренное развитие в них различных микроорганизмов и растительности, так называемое «цветение» водоемов. Однако повышенная температура воды прудов позволяет разводить в них теплолюбивые растительноядные породы рыб, что полностью предохраняет пруды от загрязнения высшей водной растительностью и препятствует цветению воды. Рыбная продукция этих прудов без дорогостоящей органической подкормки может составлять 25–30 т/га в год. С учетом пищевой ценности животных белков, по усвояемому протеину, и в денежном выражении это существенно больше того, что могло бы дать сельскохозяйственное производство на землях, затопляемых при сооружении искусственных водохранилищ. Уже имеется целый ряд примеров интенсивного рыбоводства как в искусственных, так и в естественных водоемах, выполняющих функции охладителей сбросной воды ТЭС: пруд-охладитель крупной ТЭС «Тирбах» в Германии, оз. Кенон возле Читы и т. д.

Кроме предложенных вариантов использования тепловых сбросов следует считать вполне приемлемым использование их в техноло-

гических циклах различных тепломеханических производств, для приготовления растворов и смесей, а также в таких установках, как вакуум-испарители. Степень реальности осуществления таких схем зависит от конкретных условий: мощности и места размещения энергопредприятия, параметров потребляемого тепла.

Таким образом, хотя в целом сбросы низкопотенциального тепла следует оценивать с экологических позиций отрицательно, в агропромышленном производстве и технологических процессах они могут давать и локальный положительный эффект для природных объектов и комплексов.

**Виброакустические загрязнения.** *Вибрацией* называют механические колебания упругих тел, проявляющиеся при их перемещении в пространстве или в изменении формы. Колебания тел с частотой до 16 Гц воспринимаются организмом как вибрация, а с частотой 16–20 Гц и более – одновременно и как вибрация, и как звук.

Основные гигиенические характеристики вибрации – это среднеквадратичные значения виброскорости  $V$  (м/с) или ее логарифмические уровни (дБ) в октавных полосах частот:

$$L = 20 \lg \frac{V}{V_0}, \quad (3.11)$$

где  $V_0 = 5 \cdot 10^{-8}$  – пороговая виброскорость, м/с.

Источниками вибрации являются мощные установки, такие как молоты, штамповочное оборудование, транспорт (особенно железнодорожный). Распространяясь по грунту, вибрации достигают жилых и общественных зданий, воздействуют на окружающую среду. Разной степени вибрации подвергаются люди, работающие с ручным пневматическим инструментом, и т. п.

Человек начинает ощущать вибрацию при колебательной скорости  $10^{-4}$  м/с. Очень опасны колебания рабочих мест с частотой, резонансной с колебаниями отдельных органов или частей тела. Так, весь организм и большинство внутренних органов резонируют при воздействии колебаний с частотой от 6 до 9 Гц, голова – 17–25 Гц.

Методы и средства виброзащиты подразделяются на коллективные и индивидуальные. Основные методы коллективной защиты:

снижение вибрации воздействием на источник возбуждения (замена штамповки прессованием и т. д.);

отстройка от режима резонанса изменением массы или жесткости установки;



вибродемпфирование путем превращения энергии механических колебаний в тепловую за счет использования конструкционных материалов с большим внутренним трением (пластмассы, резина), а также путем нанесения на вибрирующие поверхности слоя упруговязких материалов или мастики;

динамическое гашение вибраций путем размещения установок на фундаментах, массу которых определяют амплитудой колебаний 0,1–0,2 мм;

виброизоляция путем уменьшения передачи колебаний от источника защищаемому объекту при помощи устройств, помещаемых между ними, таких как виброизоляторы (пружинные, резиновые, комбинированные и др.), гибкие вставки, «плавающие» поля (настил пола отделяется от перекрытия упругими прокладками), силовые приводы (гидравлические, пневматические и электромагнитные системы, ребра жесткости).

Для защиты окружающей среды от вибраций применяют меры по снижению их в источнике возникновения, как на стадии проектирования, так и при эксплуатации, а также по ослаблению вибрации на пути ее распространения с помощью акустических швов, выполняемых по периметру фундаментов оборудования на всю его глубину (виброгашение) с засыпкой какого-либо рыхлого материала (асбестовой крошки), а также с помощью виброизоляции.

**Шум и окружающая среда.** Под шумом понимают беспорядочное сочетание различных по частоте, интенсивности звуковых колебаний в диапазоне частот от 20 до 20000 Гц.

Звуковая волна характеризуется звуковым давлением  $P$  (Па), колебательной скоростью  $V$  (м/с), интенсивностью  $I$  (Вт/м<sup>2</sup>), частотой  $f$  (Гц):

$$V = \frac{P}{\rho c}. \quad (3.12)$$

Здесь  $\rho$  – плотность среды;  $c$  – скорость звука в данной среде.

$$I = PV = \frac{P^2}{\rho c}. \quad (3.13)$$

Минимальная интенсивность звука на пороге слышимости составляет  $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>, что соответствует  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па; на частоте 1000 Гц  $I = 10^2$  Вт/м<sup>2</sup>, что соответствует звуковому давлению  $2 \cdot 10^2$  Па

и называется *болевым порогом*. Так как болевой порог выше порога слышимости в  $10^{14}$  раз по интенсивности и в  $10^7$  раз по звуковому давлению, принято и интенсивность звука и звуковое давление оценивать в децибелах (дБ):

$$L = 10 \lg \left( \frac{I}{I_0} \right) = 20 \lg \left( \frac{P}{P_0} \right); \quad (3.14)$$

$$P = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P_{\text{cp}}^2(t) dt}, \quad (3.15)$$

где  $P_{\text{cp}}$  – среднеквадратичное (эффективное) значение мгновенных величин звукового давления;  $T$  – время усреднения.

По характеру спектра шум бывает широкополосный с непрерывным спектром больше октавы и тональный, в спектре которого имеются выраженные дискретные тона. По временным характеристикам различают шум постоянный и непостоянный.

Основными источниками шума в городах и населенных пунктах являются автомобильный, рельсовый и воздушный транспорт и промышленные предприятия с вентиляционными и компрессорными установками и другим энергетическим оборудованием, металлообрабатывающими станками и др. Промышленные предприятия, расположенные в жилых кварталах, могут создавать шумы с уровнем 100 дБ.

Средства и методы защиты от шума подразделяют на коллективные (акустические, архитектурно-планировочные, организационно-технические) и индивидуальные (противошумные наушники, вкладыши, шлемы, каски, костюмы), снижающие уровень шума на 7–38 дБ.

Борьба с аэродинамическим шумом в источнике затруднительна, поэтому снижение уровня шума достигается на пути распространения звука при помощи абсорбционных глушителей (затухание шума в порах звукопоглощающего материала), реактивных (в виде соединения камер, имеющих расширения и сужения, резонансные углубления, обеспечивающие эффект отражения и резонансного поглощения звука) и комбинированных.

К акустическим средствам защиты от шума относят также демпфирование (покрытие поверхности материалами с большим внутренним трением – мастиками, линолеумом, войлоком), звукоизоляцию (отражение звуковой волны, падающей на ограждение, с ис-

пользованием металлов, дерева, пластмасс, бетона и др.), звукопоглощение (переход энергии звука в тепло вследствие потерь на трение), проведение акустической обработки нанесением звукопоглощающих материалов на внутренние поверхности помещения и использованием штучных звукопоглотителей.

Звукопоглощающие устройства могут быть пористыми, с экраном, мембранные, слоистые, резонансные и объемные.

Принципиально новым методом снижения шума является метод «антизвука», т. е. создание равного по величине и противоположного по фазе звука. В результате интерференции основного звука и «антизвука» в некоторых местах помещения можно создать зоны тишины.

Архитектурно-планировочные методы снижения уровней шума на рабочих местах и в городах состоят в рациональном акустическом решении планировок зданий, рациональном размещении рабочих мест, шумных и защищаемых объектов, в создании шумозащищенных зон, применении акустических экранов в виде откосов, стен, зданий-экранов, а также в использовании рельефа местности, шумозащитных полос озеленения, заглублении трасс магистралей и др.

Организационно-технические методы защиты от шума включают в себя применение малошумных технологических процессов, а также дистанционного управления шумными установками, стендами, автоматического контроля и др. Уменьшение шума, создаваемого промышленными предприятиями, достигается применением наружного ограждения, обладающего определенной звукоизоляцией, и санитарно-защитных зон.

**Снижение шума от ТЭЦ.** Источником сильного внешнего воздействующего на население шума являются городские ТЭЦ. Вынесение их за город, радикальным образом снижающее воздействие дымовых выбросов в зоне городской застройки, зачастую не дает заметного эффекта по уменьшению акустического воздействия шума, создаваемого при выбросе пара предохранительными клапанами. Примером тому является Ново-Иркутская ТЭЦ: при достаточно частых (иногда регулярно в течение нескольких дней) сбросах пара сильный шум слышен в квартирах многоэтажных зданий на расстоянии 3–4 км, а в отдельных случаях акустическое воздействие вызывает вибрацию стекол в окнах. Думается, это является основанием для установки на выхлопных патрубках акустических ловителей (например, спирального лабиринта или фильтра с извилистыми каналами). Снижению шумового загрязнения способствует включение звукоизоляционных и звукопоглощающих материалов

в состав теплоизоляционных покрытий горячих поверхностей источников шума.

Уменьшение воздействия шума от газового тракта ТЭС во многом определяется снижением звуковой энергии дымососов во внешних газоходах и дымовых трубах. В ряде работ приводится расчет снижения уровня звуковой мощности в системах вентиляции, однако для газовых трактов ТЭЦ характерны свои особенности, в частности наличие протяженных каналов большого и переменного сечения. Снижение уровня звуковой мощности в многоствольной металлической трубе составляет примерно 3 дБ, а в футерованной кирпичной трубе – 21 дБ. Следовательно, газовые тракты оказывают большое акустическое воздействие на окружающую среду. Как показывают акустические измерения, для соблюдения санитарно-гигиенических шумовых норм в жилом районе на расстоянии 800 м от ТЭЦ при работе осевых дымососов снижение уровня звуковой мощности в газовом тракте должно быть приблизительно до 20–25 дБ, при работе центробежных дымососов – до 10–15 дБ. Если требуемое снижение уровня звуковой мощности не обеспечивается, необходимо принять меры по шумоглушению.

С учетом требований к снижению шума разрабатываются эффективные глушители на выхлопных паропроводах блочных ТЭС. Снижению уровней шума в помещениях ТЭС способствуют ограничение скорости пара в трубопроводах до 90 м/с и требование виброизоляции от опор трубопроводов.

Наиболее радикальным способом борьбы с шумом является акустическое совершенствование самого источника шума. Однако сложность разработки мероприятий в этом направлении определяется тенденцией повышения шума при увеличении единичной мощности энергоблоков. Характеристикой акустической среды в помещениях и на территории блочной ТЭС должны служить шумовые карты, составляемые, согласно требованиям стандарта, не реже одного раза в 5 лет. Методы контроля уровней шума регламентированы в различных стандартах и в общем случае применимы для блочных ТЭС, особенно для характеристик рабочих мест. Однако до сих пор не решена задача выделения источников шума и определения доли каждого в формировании шумовых полей.

К градостроительным мероприятиям по защите населения от шума относят: увеличение расстояния между источником и защищаемым объектом; применение акустически непрозрачных экранов, откосов, стен и зданий-экранов; использование специальных шумо-

защитных полос озеленения; различные приемы планировки, рациональное размещение шумовых и защищаемых объектов микрорайонов и т. д. Возможны и различные комбинации шумозащитных средств. Существенный защитный эффект достигается в том случае, если жилая застройка размещена на расстоянии не менее 25–30 м от магистралей и зоны разрыва озеленения.

**Методы защиты от воздействия инфра- и ультразвука.**  
*Инфразвук* (ИЗ) – акустические колебания упругой среды в диапазоне частот ниже 20 Гц, характеризующиеся инфразвуковым давлением и интенсивностью. В условиях производства инфразвук, как правило, сочетается с низкочастотными вибрациями и шумом. Источники ИЗ могут быть естественные (обдувание сильным ветром водной поверхности или строительных и инженерных сооружений) и антропогенные (промышленные) механического и аэродинамического происхождения: двигатели внутреннего сгорания, реактивные двигатели, турбины, вентиляторы, компрессоры, машины и механизмы, совершающие возвратно-поступательные или вращательные движения с повторением цикла менее чем 20 раз в секунду.

Снизить интенсивность ИЗ можно изменением режима работы оборудования (увеличением быстроходности или изменением его конструкции), звукоизоляцией источника ИЗ (достаточно сложная инженерная задача), поглощением звуковой энергии с помощью резонирующих панелей (прямоугольные рамы с укрепленной на них мембраной с большим затуханием, изготовленной из металла, дерева, холста, покрытого лаком, и др.), при помощи глушителей (интерференционного, камерного, резонансного), снижения скорости истечения в атмосферу рабочих тел (авиа- и ракетные двигатели), при помощи механического преобразователя частоты ИЗ, принцип работы которого основан на методе амплитудной модуляции звуковых колебаний.

*Ультразвук* (УЗ) – волновое колебание упругой среды частотой свыше 20 кГц, характеризующееся наряду с частотой ультразвуковым давлением и интенсивностью. Источником УЗ является оборудование, в котором генерируются ультразвуковые колебания для выполнения технологических процессов, технического контроля и измерений, а также оборудование, при эксплуатации которого УЗ возникает как сопутствующий фактор.

Защитные меры состоят в снижении уровня УЗ в источнике, в изоляции и звукопоглощении. Наиболее эффективна звукоизоляция в виде стальных кожухов из листов толщиной 1,5–2 мм, покрытых резиной, или поролоном, или органическим стеклом толщиной до 1 мм.

**Защита от электрических и магнитных полей, электромагнитного излучения.** В соответствии с санитарными нормами напряженность постоянного электрического поля при длительности воздействия до 1 часа не должна превышать 60 кВ/м; при времени воздействия от 1 до 8 часов напряженность постоянного электрического поля определяют по формуле

$$E_{\text{доп}} = \frac{60}{\sqrt{T}}, \quad (3.16)$$

где  $T$  – время (ч), а при длительности воздействия свыше 9 часов – не более 20 кВ/м.

Согласно Предельно допустимым уровням воздействия постоянных магнитных полей при работе с магнитными устройствами предельно допустимая напряженность постоянного магнитного поля для производственных помещений установлена равной 8 кА/м, а напряженность магнитных полей промышленной частоты (А/м) можно определить по формуле

$$H = 8 \cdot 10^{-2} \exp[-1,35 \lg(f + 1)], \quad (3.17)$$

где  $f$  – частота поля, Гц.

Для защиты от действия электрического или магнитного поля в зависимости от характера и местонахождения источников полей, условий облучения людей на производстве применяют разные методы и средства: защиту временем пребывания, расстоянием, стационарные и переносные экраны из металлических заземленных сеток и др.

Мощным источником электрического поля являются воздушные линии электропередач (ЛЭП). Основным мероприятием по уменьшению вредного действия электрического поля ЛЭП является выделение санитарно-защитных зон, в которых напряженность поля превышает 1 кВ/м.

В пределах санитарно-защитной зоны запрещаются строительство жилых и общественных зданий, хранение нефтепродуктов, манипуляции с горючим, ремонт машин и механизмов.

В производственных условиях основными мерами защиты от электромагнитных излучений могут быть: защита временем пребывания, расстоянием, экранирование источников излучения, рабочих мест, уменьшение излучения в самом источнике, радиопоглощающие покрытия и др.

**Воздействие ионизирующего излучения.** При радиозэкологическом нормировании, помимо решения задачи охраны биологических

ресурсов нашей планеты, необходимо в первую очередь обеспечить сохранность генофонда живых организмов в биосфере Земли и прежде всего человека, так как защита его от ионизирующих излучений – это обеспечение радиационной безопасности самой среды, ведь человек является самым радиочувствительным объектом в биосфере.

Меры защиты детально регламентированы и предусматривают: требования к проектированию защиты от проникающих излучений; правила размещения предприятий с источниками ионизирующего излучения (ИИ);

порядок получения, учета, хранения, перевозки источников ИИ; правила работы с открытыми и закрытыми источниками; устройство и эксплуатацию систем вентиляции, пылегазоочистки, отопления, водоснабжения, канализации;

организацию сбора, удаления и обезвреживания твердых и жидких радиоактивных отходов;

содержание, дезактивацию рабочих помещений;

индивидуальные защитные меры;

устройство дозиметрических пунктов в санпропускниках, саншлюзах.

Основными принципами защиты от внешнего облучения являются: защита количеством – использование источников с минимально возможным выходом ИИ; защита временем пребывания в зоне облучения; защита расстоянием – обеспечение во время работ с источником ИИ максимального расстояния до рабочего места от источника, так как доза и ее мощность обратно пропорциональны квадрату расстояния; защита экранами для уменьшения интенсивности облучения; защита с помощью средств индивидуальной защиты и радиопроекторов.

Для поглощения альфа-частиц достаточен слой воздуха или несколько миллиметров плотного вещества (стекло, алюминий и др.), так как они имеют небольшой свободный пробег.

Экраны для защиты от бета-частиц изготавливают из материала с малым атомным номером во избежание образования тормозного излучения (из алюминия, стекла, плексигласа). Целесообразно делать двухсторонние экраны: изнутри – материал с малым атомным номером, снаружи – с большим, для поглощения тормозного излучения.

Для защиты от рентгеновского и гамма-излучения применяют экраны из материалов с большим атомным номером (свинец, железо), а для стационарных защитных устройств – бетон, кирпич, воду, чугуны, баритобетон и др. Толщина защитного слоя строго рассчитывается.

Защита от нейтронов заключается в замедлении быстрых нейтронов с последующим поглощением медленных нейтронов, при этом используются вода и водосодержащие материалы, парафин, а также графит, бериллий и др. Нейтроны малой энергии хорошо поглощаются бором, поэтому он вводится в состав бетона, резины и других материалов.

Чтобы исключить воздействие ИИ на население, проживающее вблизи предприятия, устанавливают санитарно-защитную зону согласно Санитарным нормам проектирования промышленных предприятий.



## **4. ДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В АТМОСФЕРЕ И ГИДРОСФЕРЕ**

В процессе практической деятельности мы так или иначе имеем дело с явлениями механики жидкости и газа в масштабах, сравнимых с размерами человеческого тела, города или страны. Излагаемые в литературе гидродинамические модели для всех явлений такого рода сильно отличаются от реальной среды, так как в них мало учитываются силы плавучести и вихревые движения, которые как раз и преобладают в аэрогидродинамике окружающей среды. Общепринятые статистические и феноменологические подходы к механизму турбулентности, как правило, малоприменимы к процессам в свободной атмосфере, которые, в свою очередь, важны в описании, например, процессов рассеяния атмосферных примесей. Поэтому в настоящей главе описано развитие основных положений и уравнений классической гидродинамики и их приложение к процессам и явлениям, происходящим в больших воздушных и водных массах в природных условиях.

### **4.1. Основные понятия турбулентности**

Впервые при изучении движения жидкости по трубам в результате опыта, проведенного Рейнольдсом, было дано определение турбулентного течения как неупорядоченного движения. Турбулентное движение наблюдается не только в трубах, но и в пограничных слоях.

При изучении турбулентности встают два вопроса: 1) причины ее возникновения; 2) свойства течения с вполне развившейся турбулентностью. Для объяснения сложнейшего вопроса о возникновении турбулентности в разное время выдвигалось много гипотез. В одной из них обсуждались условия, при которых малые возмущения растут и вызывают превращение ламинарного течения в турбулентное. Данный подход к проблеме наиболее рационален, поскольку такое пре-

вращение весьма обычно в атмосферных процессах. Здесь следует подчеркнуть, что для природы естественны не критическая ситуация, в которой может или не может возникнуть турбулентность, а неустойчивые или устойчивые состояния, которые проявляются в течение нескольких минут или часов. Однако сведения в литературе о турбулентных процессах в безграничных потоках почти отсутствуют.

Некоторые сложные волновые движения могут иметь много признаков турбулентного течения, но не вызывать при этом рассеяния или диффузии какой бы то ни было субстанции, переносимой жидкостью.

Рассмотрим некоторые идеи, с тем чтобы понять два основных положения: для явления турбулентности не существует единого универсального определения; имеющиеся определения в достаточной степени несовместимы.

Итак, существует некоторое среднее движение с добавленными к нему пульсациями. Среднее движение описывается точно, а флуктуации – статистическими методами. Разделение потока на среднее и флуктуационное движение на основе различных критериев может проводиться достаточно субъективно. В результате турбулентность (флуктуационная часть процесса) уже выступает не как объективное свойство движения, а как объект, произвольно выбранный по нашему усмотрению. Таким образом, формулировка определения турбулентности для данной ситуации может стать отражением реальных особенностей течения.

Часто встречается определение турбулентности как сложного движения, вызывающего диффузию. Это определение основано на том соображении, что при размешивании молока в чае или красителя в растворителе однородная смесь получается в результате очень сложного типа движения и что такое перемешивание много эффективнее, чем молекулярная диффузия. Диффузия есть необратимый процесс. Более того, размешав ложкой чай, мы вызываем движение, имеющее масштаб ложки или чашки, которое затем быстро преобразуется в гораздо более сложное движение существенно меньшего масштаба. Процесс, который способствует рассеянию табачного дыма, также может быть определен как турбулентная диффузия, и потребуется не слишком много времени после появления дыма в помещении, чтобы запах можно было ощутить в любом его месте.

Турбулентность способствует диффузии частиц вещества в сплошной среде (применительно к атмосфере – аэрозолей типа дыма и паров воды), а также любой из его характеристик: цвета, химического состава и т. п.

Частицы жидкости обладают тепловой энергией, плотностью, количеством и моментом количества движения, а также кинетической энергией вращательного и поступательного движений. Некоторые из них могут диффундировать благодаря механизму молекулярного переноса или под действием градиента давления, причем в последнем случае много быстрее, чем при молекулярной диффузии. Пульсации плотности могут передаваться в жидкости посредством звуковых волн, тогда как пульсации концентрации какой-либо примеси могут передаваться только при движении самого этого вещества.

Скорость жидкости в точке может пульсировать либо из-за вихрей, переносящих частицы жидкости, либо из-за волн, проходящих во всех направлениях и вызывающих колебания частиц относительно их среднего положения, причем частицы возвращаются в прежнее положение, когда возмущения прекращаются.

Ранняя и поздняя стадии диффузии в жидкости легко различимы, но в случае безвихревого пульсационного течения поздняя стадия не будет существенно сложнее ранней. Подобно этому, если смотреть кинофильм о движении волн, происходящем без диссипации или потерь энергии в сосуде, содержащем жидкость, будет невозможно определить, идет ли этот фильм в прямом или обратном направлении.

Наблюдатель может рассматривать движение волн на морской поверхности или в колеблющемся сосуде как турбулентное из-за случайной природы пульсаций скорости в точке, но движение, в котором вихри вызывают диффузию, принципиально отличается от указанного выше.

Далее рассмотрим случаи, когда имеется вихревое поле и процесс очевидным образом необратим во времени. Это, возможно, приводит к наиболее простому определению турбулентности как хаотического вихревого процесса. Обратимся к механизмам, при помощи которых хаотический вихревой режим вызывает эффекты, которые определим как турбулентность.

## **4.2. Напряжения Рейнольдса. Путь смешения. Вырождение вихрей**

Из курса гидрогазодинамики (теорема о количестве движения для потоков с пульсациями скорости) известно, что при течениях с пульсациями скорости перенос количеств движения, вызванный пульсациями, создает дополнительные напряжения, например касательное напряжение:

$$\tau' = -\rho \overline{V_i' V_j'}, \quad (4.1)$$

где  $\overline{V_i'}$  и  $\overline{V_j'}$  – пульсационные скорости, т. е. отклонения составляющих скорости  $V_x$  и  $V_y$  от их средних во времени значений  $\overline{V_x}$  и  $\overline{V_y}$ .

Уравнения движения и неразрывности для несжимаемой жидкости могут быть объединены:

$$\rho \frac{dV_i}{dt} = \rho F_i + \frac{\partial}{\partial x_j} P_{ij}, \quad (4.2)$$

где  $\rho$  – плотность;  $F_i$  – массовые силы;  $P_{ij}$  – нормальные напряжения сжатия (гидростатическое давление). Если теперь взять среднее значение каждого члена, то случайная составляющая появится только в произведении. Так,

$$\rho \left[ \frac{d\overline{V_i}}{dt} + \frac{d}{dx_j} (\overline{V_i V_j}) \right] = \rho \overline{F_i} + \frac{d}{dx_j} (\overline{P_{ij}} - \rho \overline{V_i V_j}). \quad (4.3)$$

Уравнение (4.3) аналогично (4.2), но является уже уравнением для ускорения среднего движения, выраженного через среднюю массовую силу  $\overline{F_i}$  и градиенты средних напряжений  $\overline{P_{ij}}$  с добавочным членом  $\rho \overline{V_i V_j}$ , который называется *напряжением Рейнольдса*, а уравнение (4.3) – *уравнением Рейнольдса для среднего движения*.

Здесь величина  $\overline{P_{ij}}$  есть сила, действующая по направлению оси  $i$  на единичную площадку перпендикулярно оси  $j$  и представляющая собой величину переноса  $i$ -й составляющей импульса в направлении  $j$  посредством вязких напряжений. Величина  $\rho \overline{V_i V_j}$  – среднее значение переноса  $i$ -й компоненты импульса  $\rho \overline{V_i V_j}$  со скоростью  $\overline{V_j}$  в направлении оси  $j$ . Эта величина называется *турбулентным напряжением*, и в вихревом режиме она может быть больше  $\overline{P_{ij}}$ , за исключением случая  $i = j$ .

Для того чтобы сделать формулу (4.1) пригодной для практических вычислений, необходимо заменить в ней пульсационные скорости какими-нибудь величинами, связанными с распределением средней скорости.

Пусть некоторая масса жидкости из слоя, находящегося от стенки на расстоянии  $y$ , перемещается перпендикулярно потоку в слой,

находящийся от стенки на расстоянии  $y + l$  (рис. 4.1). Тогда, если  $V_x$  возрастает в направлении  $y$ , частица жидкости, движущаяся в направлении  $y$ , обладает в среднем меньшей  $V_x$ , чем в области, куда она движется, и, следовательно, несет отрицательное приращение  $x$ -й компоненте импульса. Если частица проходит расстояние  $l$ , называемое *путем перемешивания* (смешения), до того, как она смешивается с новым окружением, то приращение ее скорости

$$V'_x = -l \frac{dV_x}{dy}.$$

Путь смешения для различных частиц не одинаков, а представляет собой среднестатистическую величину и может быть разным для различных характеристик. Так, частица может более легко обмениваться со своим окружением количеством движения вдоль градиента давления, нежели теплотой или примесью, которые рассеиваются путем молекулярного мелкомасштабного перемешивания.

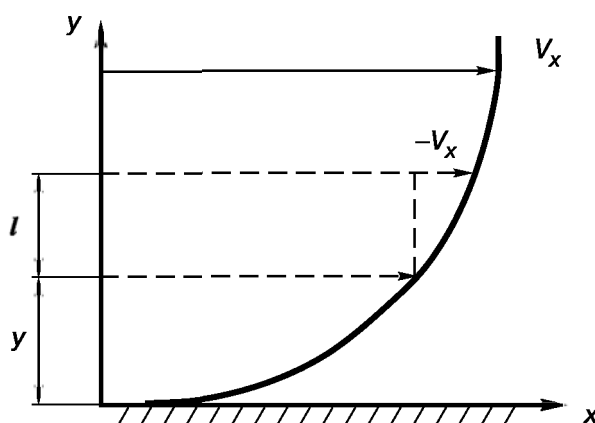


Рис. 4.1. Возникновение приращения скорости в потоке со сдвигом

Принимая гипотезу Прандтля о том, что масштаб вихря и путь смешения зависят только от расстояния до границы  $y$ , получим

$$\tau' = \rho \overline{V'_x V'_y} = \rho l y \left| \frac{\partial V_x}{\partial y} \right| \frac{\partial V_x}{\partial y}. \quad (4.4)$$

Обозначив

$$A = \rho l y \left| \frac{\partial V_x}{\partial y} \right| \quad (4.5)$$

и подставив выражение (4.5) в (4.4), получим уравнение

$$\tau' = A \frac{\partial V_x}{\partial y},$$

которое по своей структуре формально совпадает с формулой

$$\tau = \mu \frac{\partial V}{\partial y}$$

для вязкого напряжения. Таким образом,  $A$  в (4.5) имеет размерность вязкости. Однако численное значение величины  $A$  превышает численное значение коэффициента вязкости в десятки и даже сотни тысяч раз. Величина  $A$  называется турбулентной вязкостью.

В случае переноса тепла или примеси вследствие разности соответственно температур и концентраций имеет место либо турбулентная теплопроводность, либо турбулентная диффузия. Так, при турбулентном перемешивании в единицу времени и на единицу площади происходит перенос тепла:

$$Q = -C_p \rho l^2 \left| \frac{\partial V_x}{\partial y} \right| \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} = -C_p A_Q \frac{\partial \bar{T}}{\partial y},$$

где  $C_p A_Q$  – коэффициент турбулентной теплопроводности. В случае когда в потоке имеется химическая или механическая примесь с концентрацией  $C$ , при турбулентном перемешивании в единицу времени и на единицу площади возникает перенос массы примеси:

$$M = -A_M \frac{\partial C}{\partial y}.$$

Турбулентное напряжение есть механизм, посредством которого энергия основного движения или отдельного крупномасштабного вихря (являющегося частью основного движения) передается вихрям меньшего масштаба. Мелкие вихри быстро разрушаются вязкостью, увеличивается диссипация энергии. Следовательно, происходит непрерывное уменьшение масштабов вихрей, сопровождающееся переходом кинетической энергии основного движения крупных вихрей в энергию мелкомасштабных вихрей.

Наименьший масштаб вихря определяется скоростью, с которой подводится кинетическая энергия в соответствующую часть спектра,

которая, в свою очередь, определяет, насколько малым должен стать вихрь перед тем, как совершить последние вращения, полностью исчерпывающие его кинетическую энергию. Скорость перераспределения энергии вдоль спектра в направлении от вихрей крупного масштаба к мелкомасштабным зависит только от скорости преобразования крупных вихрей в мелкие, но не от режима диссипации энергии.

Для однородной турбулентности, как правило вдали от границы, справедлив закон Колмогорова, который определяется выражением

$$\overline{u'}^2 E(k) \sim \varepsilon^{2/3} k^{-5/3},$$

где  $\overline{u'}^2$  – среднеквадратическая пульсация скорости;  $E$  – энергия вихря;  $k$  – волновое число;  $\varepsilon$  – величина, имеющая размерность  $\text{м}^2/\text{с}^3$ .

Закон Колмогорова применим только в так называемом инерционном интервале масштабов вихрей, который соответствует затуханию турбулентности и расположен достаточно далеко как от наиболее крупных, так и от наиболее мелких вихрей.

### 4.3. Приложение теории турбулентности к атмосферным процессам

В стратифицированной жидкости турбулентное движение перемещает частицы жидкости с увеличением их потенциальной энергии. Рассмотрим воздушную среду, в которой теплый воздух, подвергающийся воздействию турбулентного перемешивания, находится сверху. Тогда распределение потенциальной температуры становится более однородным, так как верхние слои охлаждаются, а нижние нагреваются. Для всей массы среды потенциальная энергия в поле силы тяжести возрастает вследствие подъема ее центра тяжести. В то же время основное движение горизонтального течения с вертикальным градиентом скорости работает против турбулентных напряжений, и его энергия будет расходоваться на усиление турбулентности. Ричардсон показал, что если количество энергии, расходуемое таким образом, меньше работы против силы тяжести, то турбулентность затухает. Если

$$\text{Ri} = \frac{g\beta}{\eta^2} > 1,$$

где  $Ri$  – критерий Ричардсона,  $g\beta$  – коэффициент статической устойчивости,  $\eta = du/dz$  – вертикальный градиент скорости, то энергии для поддержания турбулентности недостаточно. В действительности турбулентность начинает затухать при еще меньшей степени стратификации, поскольку значительная часть энергии турбулентного режима перераспределяется в пользу меньших вихрей и затем рассеивается за счет вязкости. Число  $Ri$  является локальной характеристикой, которая может меняться от точки к точке.

Количество движения может передаваться поперек основного потока стационарными гравитационными волнами (возникающими при обтекании препятствий) при условии, что поверхность, содержащая гребни, смещена относительно вертикали.

Поток количества движения направлен вверх от препятствия на подстилающей поверхности, которая, в свою очередь, испытывает в направлении течения действие силы, называемой *волновым сопротивлением*. Это условие излучения энергии, которое справедливо для бесконечной среды.

Применительно к атмосфере существуют две математические трудности. Первая: убывание плотности с высотой означает постепенное увеличение амплитуды волн, что делает задачу существенно нелинейной. Вторая трудность возникает, когда скорость волн относительно воздуха оказывается равной нулю на некоторой высоте над земной поверхностью (это обычно означает, что на указанной высоте скорость ветра равна нулю относительно препятствия, порождающего волны). Кроме того, полагают, что волны отражаются или затухают на высоте свыше 150 км за счет вязкости, тем самым упрощая задачу, связанную с первой трудностью.

Уравнение Рейнольдса справедливо лишь в том случае, когда в атмосфере имеется набор разновидностей вихрей с размерами, соответствующими диапазону турбулентного спектра, который практически не содержит энергии; с другой стороны, без существования такого «провала» в спектре невозможно определение основного «осредненного» течения. Эта трудность может быть преодолена с помощью общего предположения о том, что, во-первых, независимо от сути турбулентного процесса его эффекты могут быть описаны в терминах  $K$ -теории и, во-вторых, что для описания этого процесса можно применять уравнение молекулярной диффузии, но с коэффициентом, в  $10^3$ – $10^4$  раз большим, чем коэффициент молекулярной диффузии. Однако проблема определения операции осреднения не может быть решена простым умолчанием о ней, а коэффициент турбулентного



переноса  $K$  не имеет смысла без такого определения, так как неясно, как он изменяется в пространстве, в частности с высотой, и с какой скоростью изменяется в разных направлениях. Скорости переноса в атмосфере часто изменяются на несколько порядков за сравнительно небольшой промежуток времени (в несколько часов) и очень сильно различаются для разных диффундирующих субстанций. Разнообразие форм турбулентных процессов столь велико, а их эффекты столь различны, что не существует единой теории турбулентности. Ограничимся рассмотрением механизмов лишь некоторых явлений, типичных для атмосферы.

## 4.4. Частично турбулентные движения

### 4.4.1. Движение воздушного пузыря в воде

Частично турбулентное течение возникает, когда в покоящейся среде начинает двигаться тело, обладающее импульсом или обретающее его в процессе всплывания.

Рассмотрим течение, возникающее при движении полости в однородной покоящейся среде. Под полостью понимаем аналог воздушного пузыря в воде, но движущегося в суспензии, состоящей из твердых частиц, взвешенных благодаря силам аэродинамического сопротивления в восходящем воздушном потоке. В целом такая смесь ведет себя как жидкость, плотность которой много больше плотности исходной однородной среды. Так, в случае пылевых частиц, взвешенных в восходящем воздушном потоке, образуется свободная поверхность, выше которой частицы пыли не поднимаются. В такой суспензии достаточно крупные объемы с плотностью, меньшей, чем плотность двухкомпонентной пылевоздушной смеси, будут всплывать, как в однородной жидкости (рис. 4.2).

Рассмотрим поведение больших пузырей в воде. Давление внутри пузыря считаем постоянным. Течение перед пузырем приближенно безвихревое, а давление на его поверхность, при сохранении формы, равномерное и с учетом гравитационного члена

$$p = p_0 - g z p - \frac{g}{8} \rho V^2 \sin \theta,$$

где  $p_0$  — постоянное давление на некотором уровне  $z = 0$  вдали от сферы (рис. 4.2, а).

Условие постоянства  $p$  будет иметь вид

$$V = \frac{2}{3} \sqrt{gR}.$$

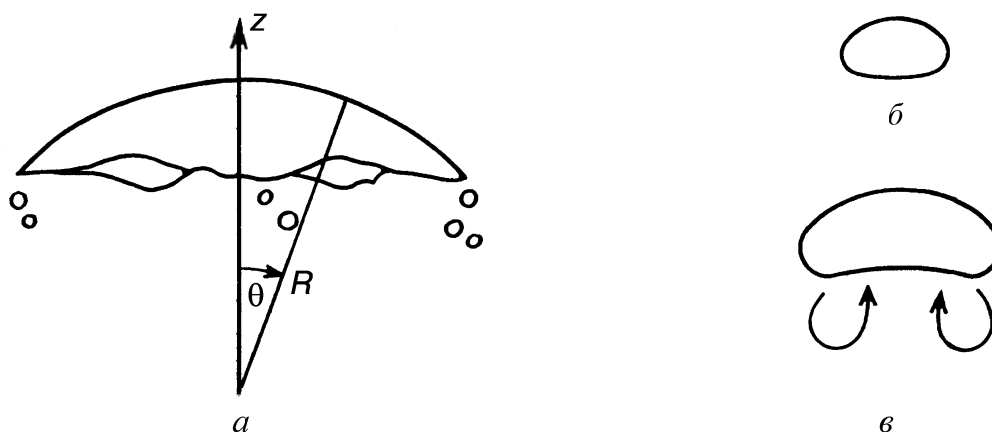


Рис. 4.2. Всплывание воздушного пузыря в воде:  $a$  – координаты для описания поведения крупного ( $\sim 10$  см в диаметре) пузыря, имеющего сферическую головную часть;  $b$  и  $в$  – формы соответственно небольшого ( $< 2$  см) и умеренно крупного пузырей

Если вместо воздушного рассматривать пузырь жидкости с плотностью  $\rho'$ , не смешивающейся с водой, можно пользоваться формулой для скорости

$$V = \frac{2}{3} \sqrt{gR \frac{\rho - \rho'}{\rho}},$$

где введена архимедова сила, порожденная разностью плотностей  $\rho$  и  $\rho'$ .

#### 4.4.2. Понятие термика

*Термик* представляет собой массу всплывающей жидкости, которая при всплывании может перемешиваться с окружающей жидкостью. Планеристы называли так потоки теплого воздуха от нагретого солнцем грунта, в которых они могли парить. В атмосфере свободная конвекция порождает чрезвычайно сложные движения. Здесь же рассмотрим поведение одного изолированного термика в невозмущенной среде (рис. 4.3).

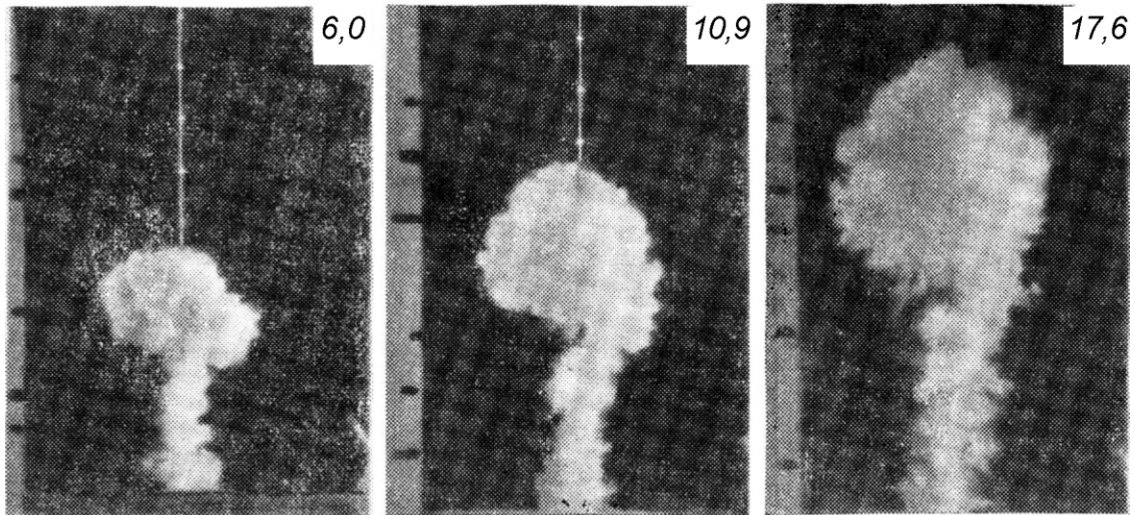


Рис. 4.3. Последовательные стадии развития термика

Термики находятся в турбулентном движении и напоминают кучевые облака. Предполагается, что молекулярная вязкость не играет важной роли. Из-за турбулентности начальное распределение плотности в термике слабо влияет на более позднее распределение. Все скорости, включая типичные для развития вихрей, при этом определяются общей плавучестью и размерами термика; на основании теории размерности скорость может быть представлена в виде

$$V = C\sqrt{gBR},$$

где  $C$  – константа, зависящая от определения  $V$  и  $R$ ;  $B$  – удельная плавучесть по объему  $mR^3$  (общая плавучесть, или подъемная сила, равна  $gBmR^3$ ). Например, если  $R$  определен как радиус максимального горизонтального сечения, а  $V$  – скорость головной (или самой верхней) точки термика, то  $C \cong 1,2$ . Так как плавучесть – величина постоянная, то

$$gB = gB_0 \left( \frac{R_0}{R} \right)^3,$$

где индекс 0 относится к значениям в некоторый фиксированный момент времени. Тогда

$$R \frac{dR}{dt} = C' \sqrt{gB_0 R_0^3}$$

ИЛИ

$$R^2 \sim t,$$

а коэффициент пропорциональности есть  $2C'\sqrt{gB_0R_0^3}$ . Здесь  $C'$  – другая константа, относящаяся к скорости возрастания радиуса. Если  $z$  – высота вершины термика, то таким же образом получим

$$z^2 \sim t,$$

так что можно считать, что

$$z = nR.$$

Здесь и выше  $m$  и  $n$  – универсальные константы, определяющие расстояние от воображаемого источника до вершины термика. Из экспериментальных данных  $n = 4$  и  $m = 3$ , тогда  $C \approx 1,2$ .

В процессе существования термика величина  $n$  иногда меняется, и притом скачкообразно. Большой, чем обычно, протуберанец (вырост) может появиться сбоку и отделиться, не будучи вовлеченным в циркуляцию, которая происходит в тыловой области. В этом случае  $n$  уменьшается. Величина циркуляции

$$\oint \vec{V} \cdot d\vec{S} \sim VR$$

остаётся постоянной для всего времени существования термика.

Первоначально термик представляет собой компактный объем теплого воздуха или иной всплывающей жидкости. Но кольцевые вихри, образующиеся вокруг всплывающей массы жидкости, помогают ей проникать в окружающую жидкость и одновременно способствуют проникновению окружающей жидкости вдоль оси термика от заднего фронта к переднему (рис. 4.4), так что постепенно образуется тороидальный вихрь. Жидкость, прошедшая через осевую часть термика, турбулизируется и перемешивается со всплывающей жидкостью. Таким образом, перед фронтом термика образуется турбулентное течение. На рис. 4.4 правая половина диаграммы иллюстрирует течение жидкости относительно внешней границы термика. Тонкие сплошные линии в левой части диаграммы – изолинии направленной вверх компоненты скорости. Жирные сплошные линии там же – изолинии компоненты, направленной от оси.

Все термики считаются геометрически подобными, differing только радиусом  $R$  и величиной относительной плавучести  $B$ , которая выражается в долях веса вытесненной жидкости.

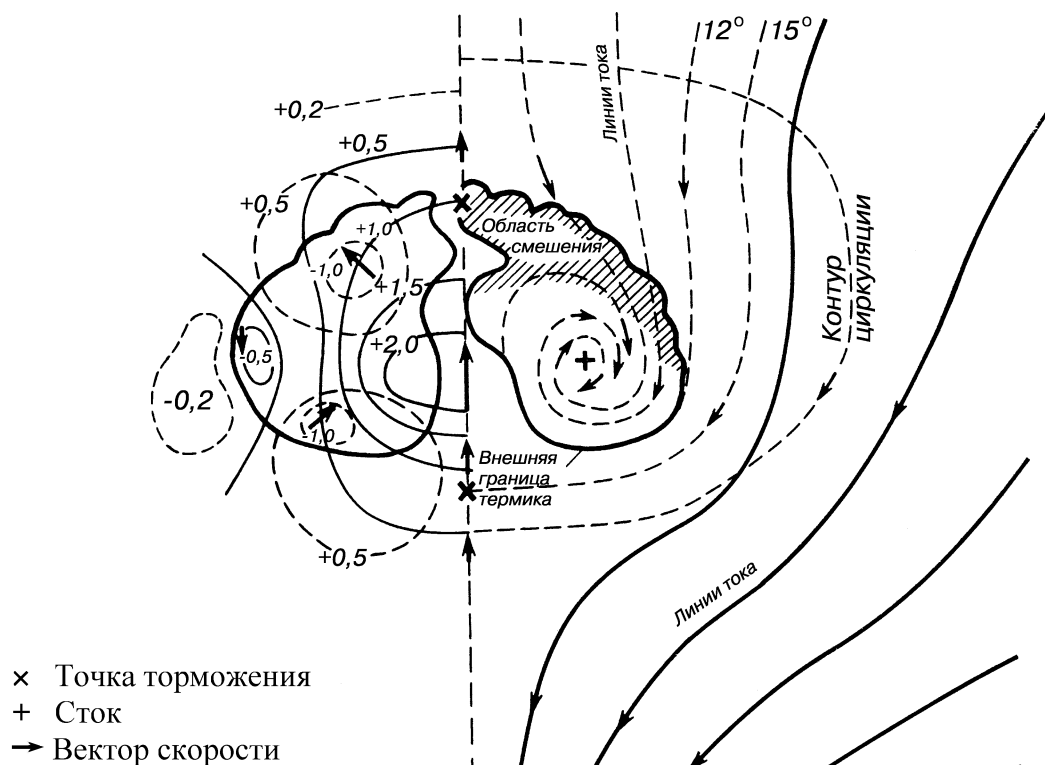


Рис. 4.4. Термик и его характеристики

#### 4.4.3. Клубы дыма

*Клуб дыма (газа)* представляет собой турбулентную массу газа, инжектированную в прежде не возмущенную среду. Хорошее модельное представление о клубе дает стрельба из орудий. Вихревое кольцо не клуб, поскольку оно не турбулентно. Предполагая, что существует единственная конфигурация клуба и суммарный импульс остается постоянным, получаем следующие соотношения между скоростью  $V$ , размером  $R$  и пройденным расстоянием  $z$ :

$$VmR^3 = \text{const} = V_0 m R_0^3,$$

$$\frac{dR}{dt} \sim V = \frac{dz}{dt}. \quad (4.6)$$

Отсюда

$$z = nR,$$

$$\frac{V}{V_0} = \frac{R_0^3}{R^3},$$

$$z^4 = 4V_0 R_0^3 n^3 t.$$

Здесь индекс 0 обозначает величины, отнесенные к определенному моменту времени,  $mR^3$  – объем, а  $n$  – константу, характеризующую угол расширения.

Распределение скоростей внутри и вне клуба, измеренное в лабораторных условиях, показало, что оно такое же, как и в термиках. Даже внешне клуб очень похож на термик. Картина движения слабо зависит от того, каким образом это движение реализуется, хотя скорость термика снижается в меньшей степени, так как плавучесть постоянно дает приращение импульсу. Движение клуба вскоре становится ламинарным из-за уменьшения числа Рейнольдса.

Предположив, что конфигурация термиков и клубов одна и та же, можно ожидать, что клуб, обладающий плавучестью, станет термиком, если первоначальный импульс направлен вертикально, поскольку изменения формы не требуется. В этом случае импульс записывают как

$$kVmR^3 = kV_0mR_0^3 + gB_0mR_0^3t,$$

где  $k$  – размерный коэффициент, дающий импульс при умножении на произведение скорости и объема. Используя (4.6), получим выражение

$$z^4 = 4n^3 R_0^3 \left( V_0 t + \frac{1}{2k} g B_0 t \right).$$

#### 4.4.4. Напорные струи

Установлено, что осесимметричная струя, проникающая в покоящуюся жидкость той же плотности, приобретает коническую форму. Это неизбежно, если единственными параметрами, определяющими движение, являются поток количества движения и расстояние от отверстия. На достаточном удалении от отверстия развившаяся турбулентность, во-первых, нивелирует всякое влияние особенностей формы отверстия и профиля скоростей в нем и, во-вторых, интенсивность турбулентности может стать достаточно большой, чтобы пренебречь вязкостью. Если эти два условия выполнены, то можно сделать вывод, что ширина струи  $R$  пропорциональна расстоянию от эффективного источника и характерный для движения масштаб вихря в любой точке струи также пропорционален этому расстоянию.

Следовательно,

$$z = nR.$$

Так как поток количества движения пропорционален квадрату скорости и площади поперечного сечения струи, то

$$V^2 z^2 = V_0^2 z_0^2 = \text{const},$$

или

$$V \sim z^{-1}.$$

Число Рейнольдса  $VR/\nu$  постоянно вдоль струи. Это означает, что если струя турбулентна вблизи отверстия, то она турбулентна и на бесконечности (в отличие от клуба).

Скорость подсоса внешней жидкости  $U$  у границы вертикальной струи (рис. 4.5) на расстоянии  $R$  от ее оси может считаться горизонтальной:

$$d(VR^2) \sim 2\pi R U dz,$$

где

$$V = \bar{V}(r, z) + V'(r, z, t).$$

Здесь  $\bar{V}$  – усредненное значение скорости по времени в точке. Усредненный по времени поток импульса

$$\begin{aligned} & \overline{\int_0^R \int_{\theta=0}^{2\pi} V^2 r d\theta dr} + 2\pi \overline{\int_0^r \left( \bar{V}^2 + V'^2 + 2\bar{V}V' \right) dr} = \\ & 2\pi \int_0^R \left( \bar{V}^2 + \overline{V'^2} \right) dr = \dot{M}_m + \dot{M}_f, \end{aligned}$$

где  $\theta$  – азимут в плоскости  $z = \text{const}$ ;  $\dot{M}_m$  и  $\dot{M}_f$  – потоки импульса соответственно среднего и пульсационного движений.

Если в напорной струе содержится какая-либо пассивная примесь с концентрацией  $\sigma$ , то ее поток постоянен вдоль струи:

$$V\sigma R^2 = \text{const}.$$

Движение вне вертикальной напорной струи можно считать горизонтальным для всех  $z$  при  $r > R$ :

$$u = UR/r.$$

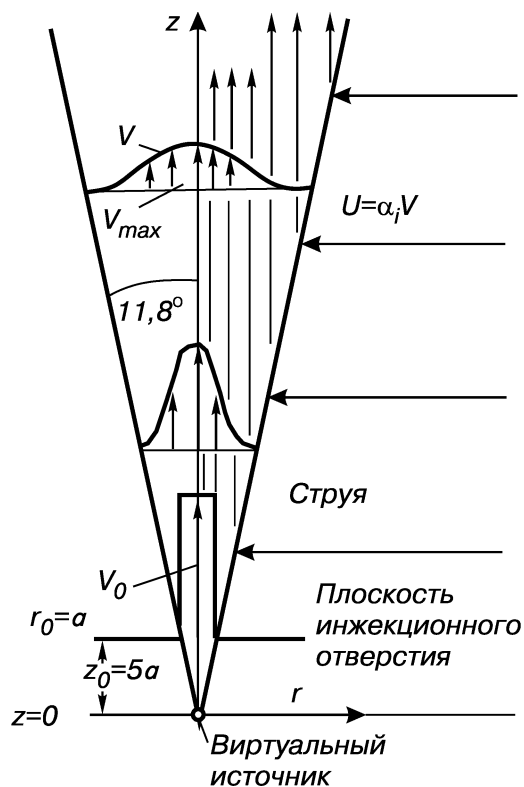


Рис. 4.5. К описанию напорной струи

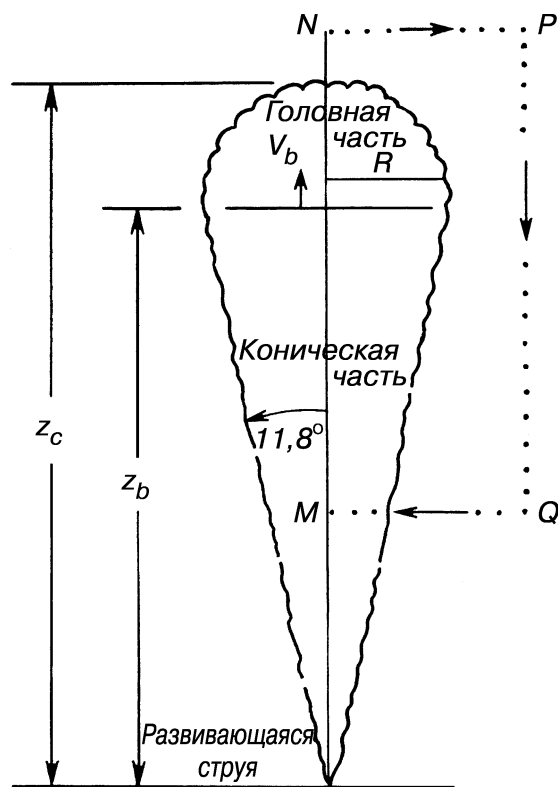


Рис. 4.6. Геометрия развивающейся струи

Для развивающейся струи, которую называют *неустановившейся*, или *свежей струей* (рис. 4.6), существуют довольно простые соотношения и коэффициенты, определяющие ее форму и движение. Развивающаяся струя состоит из головной части, которая выглядит как фронтальная область развивающегося клуба, и следующей за ней конической части, которая подобна напорной струе. Следовательно, суммарный импульс вдоль струи

$$Vz^3 \sim t,$$

$$V = \frac{dz}{dt},$$

так что

$$z^2 \sim t.$$



Спэкман определил для развивающейся струи следующие значения параметров: угол расширения  $\theta = 11,8^\circ \pm 0,3^\circ$ , среднее значение  $n = 4,76$ , а также  $\dot{M}_f / \dot{M}_m = 0,74$ . Для развивающейся струи, по Спэкману,

$$z_c^4 = 180 \frac{\dot{M}}{\rho} t^2,$$

где  $\dot{M}$  – поток импульса через отверстие. Коэффициенты формы имеют следующие значения:

$$z_c/z_b = 1,3; dz_c/dt = 2V_b; W_{\text{кон}} = 0,012 z_c^3; W_{\text{г.ч}} = 0,021 z_c^3.$$

Здесь  $W_{\text{кон}}$  и  $W_{\text{г.ч}}$  – объем конуса и головной части струи соответственно. Величина  $V_b$  – средняя скорость жидкости в сечении  $z = z_b$ , определяемая по уравнению

$$U = \alpha V,$$

где  $\alpha$  – коэффициент захвата;  $U$  – средняя горизонтальная скорость вовлечения жидкости в струю.

#### 4.4.5. Факелы

Течение, порождаемое постоянным источником всплывающей жидкости, обычно называется *факелом*, а понятие «напорная струя» используется для обозначения течения с начальной скоростью в источнике в отсутствие плавучести. Осесимметричный факел имеет постоянный поток всплывающей массы или концентрации примеси, обозначаемый  $B$ , в направлении вдоль оси, а возрастание потока количества движения при подъеме на высоту  $dz$  равно подъемной силе, действующей на слой толщиной  $dz$ . Следовательно (рис. 4.7),

$$\begin{aligned} VBR^2 &= \text{const}, \\ d(V^2R^2) &\sim BR^2dz. \end{aligned}$$

Таким образом, так как  $R \sim z$ , из этих уравнений получаем

$$\begin{aligned} V &\sim z^{-\frac{1}{3}}, \\ B &\sim z^{\frac{5}{3}}. \end{aligned}$$

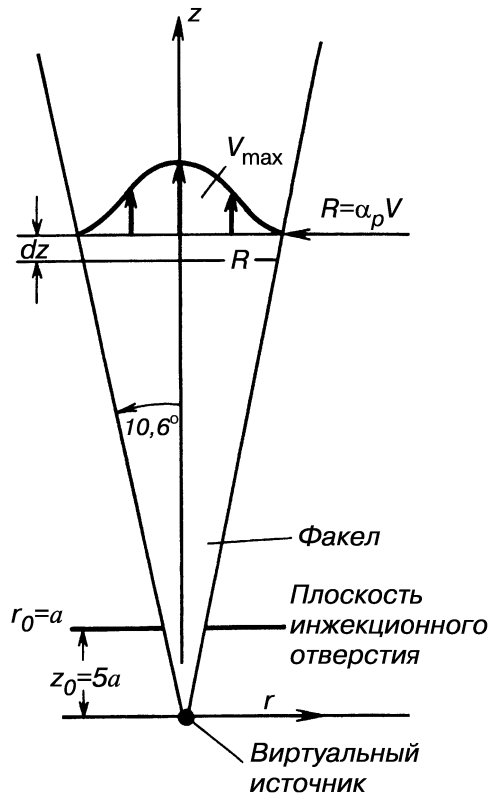


Рис. 4.7. Геометрия и параметры факела

Следовательно, факел замедляется с меньшей скоростью, чем напорная струя, вследствие подъемной силы, а разбавляется быстрее вследствие дополнительного перемешивания, вызванного градиентами плотности.

## 4.5. Атмосферная конвекция

Когда происходит свободная конвекция, в атмосфере возникают значительные вариации температур по горизонтали. Воздух, имеющий наибольшую плавучесть, находится во внешней кольцеобразной части термиков, тогда как в их центре, где скорость подъема больше всего, плавучесть воздуха невелика из-за вовлечения воздуха извне.

Скорость повышения температуры у поверхности оказывает решающее влияние на картину конвекции. Такие картины над травяным покровом, лесом, морем днем, вечером, ночью будут сильно различаться. В каждом конкретном случае исследователь должен сам определить, какой режим он будет рассматривать, чем образована данная картина конвекции – свободными ли струями или термиками, а также какими фактами он располагает, и на основании этих данных принимать для анализа ту или иную модель явления.

Вблизи твердой подстилающей поверхности движение в атмосфере тормозится за счет вязкости. Оно замедляется также вследствие наличия теплопроводности, благодаря которой тепло от нагретой нижней границы передается вверх без движения самого воздуха и уменьшается горизонтальный температурный градиент, без которого не происходит вертикальных движений. Когда вертикальное движение все же имеет место, на некотором расстоянии от границы ему препятствует вязкость, которая тормозит встречные вертикальные движения в соседних струях. Если восходящие и нисходящие движения распространяются и выше, то горизонтальные градиенты температур уменьшаются, а горизонтальное движение усиливается: вблизи границы этому препятствуют вязкие напряжения.

Таким образом, условия теплопередачи вблизи подстилающей поверхности оказывают большое влияние на картину конвекции в вышележащих слоях. Эта ламинарная конвекция создается силой тяжести, которая приводит к относительному изменению плотности  $\Delta\rho/\rho$ . Для его определения можно воспользоваться следующей зависимостью:

$$\frac{g \Delta\rho}{\rho h} = \text{Ra} \frac{\nu}{h^4},$$

где  $h$  – глубина участвующего в движении слоя;  $\text{Ra}$  – число Рэлея – безразмерная величина; для начинающегося движения при жестких проводящих границах  $\text{Ra} = 27\pi^4/4$ , т. е. дает значение порядка  $10^3$ ;  $\nu$  – коэффициент молекулярной (кинетической) вязкости.

Если конвекция происходит в виде термиков, струй типа факела или развивающегося факела (аналог развивающейся напорной струи, но имеющий суммарную величину количества восходящего движения, пропорциональную общей подъемной силе всей выделившейся нагретой массы), то можно предположить, что число их в единичном объеме убывает с высотой и восходящими потоками на каждой высоте будет занята одна и та же доля горизонтальной поверхности. Вследствие слияния локальных элементов конвекции, когда конусы, внутри которых происходит подъем этих элементов, перекрываются, вертикальная скорость возрастает как  $z^{1/3}$  вместо того, чтобы убывать с увеличением  $z$ , как это происходит в любом изолированном термике, факеле или развивающемся факеле. Это объясняется тем, что плавучесть убывает медленнее, когда часть захваченной жидкости сама обладает плавучестью.

#### **4.6. Общие принципы рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере**

Рассеяние веществ в атмосфере не определяется диффузией и не может быть в полной мере объяснено теорией переноса, так как коэффициент диффузии, который лучше всего ее характеризует, очень сильно меняется во времени и пространстве. В случае когда выбрасываются загрязняющие вещества, обладающие значительной плавучестью, именно последняя является основной причиной их рассеяния. Принцип аналогии Рейнольдса, гласящий, что количество движения и масса разбавляются одинаково, отвечает действительности только в теории частично турбулентных течений.

Действительно, рассеяние вызывается движениями, которые могут быть названы вихревыми. Для использования статистических методов необходимо, чтобы интервал времени наблюдений или объем контролируемого пространства охватывал достаточно большое число этих вихрей. Однако это может быть неэффективно, поскольку временной масштаб флуктуаций не ограничен. Необходимо также учитывать, что время отбора проб всегда влияет на значение полученных концентраций, следовательно, есть и ограничения применения теории турбулентной диффузии.

В общем случае диффузионные теории сводятся к определению коэффициентов диффузии и анализу результата сопоставления с данными имеющихся измерений. Данные измерений, как правило, характеризуются большим разбросом и не могут обеспечить проверку какой бы то ни было гипотезы. Такие измерения обычно относят к ситуациям, когда погодные условия, объемы выбросов и многие другие факторы различны.

Эти и многие другие обстоятельства привели к созданию новых теорий, в частности теорий баланса загрязняющих веществ, которые грубы в предельных случаях, но просты и доступны. Они представляют собой простое математическое выражение принципа неразрывности, из которого следует, что загрязняющие вещества либо остаются вблизи источника, либо переносятся в соседние области пространства, либо могут быть разбавлены в большом объеме путем подъема и перемешивания в вышележащих слоях.

Детальность рассмотрения каждой конкретной ситуации, источников и стоков разнообразных загрязняющих веществ зависит от детальности имеющейся информации. Используемые концепции метеорологии и механики жидкости и газа обычно элементарны, но техника

вычислений может быть чрезвычайно сложна и зависит в большей степени от выбранной физической и феноменологической моделей рассматриваемого процесса. Разберемся в сути явления (без подробного изучения вычислительных процедур) на довольно простой модели: изолированная труба, находящаяся в поле стационарного ветра, выбрасывает известное количество загрязняющих веществ, обладающих плавучестью.

**Распространение загрязняющих веществ от трубы.** Движение воздуха в атмосфере почти всегда происходит с большими числами Рейнольдса и малыми числами Маха  $M$ , поэтому (за исключением случая, когда ветер слаб и изменчив) при всех прочих равных условиях оно происходит в режиме подобия. Суть его состоит в том, что объем воздуха, в который выбрасываются загрязняющие вещества, пропорционален скорости ветра  $u$ , так что концентрация  $C$  пропорциональна интенсивности выброса  $Q$  и обратно пропорциональна  $u$ .

Из геометрического подобия следует, что концентрация загрязняющих веществ пропорциональна  $d^2$ , где  $d$  – диаметр конуса (рис. 4.8). На определенной стадии дымовой шлейф должен соприкоснуться с землей. Если загрязняющее вещество поглощается поверхностью, то его концентрация в шлейфе уменьшается.

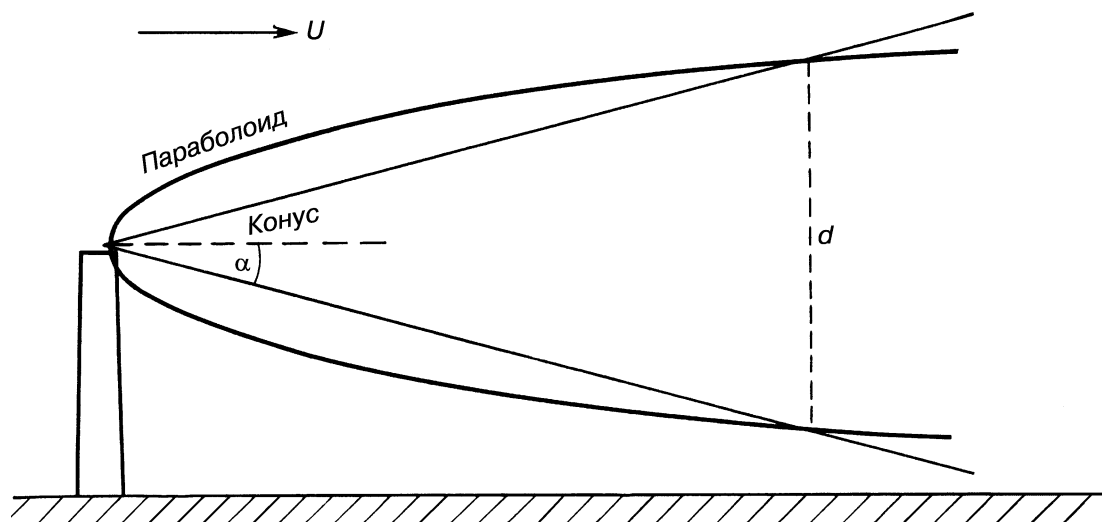
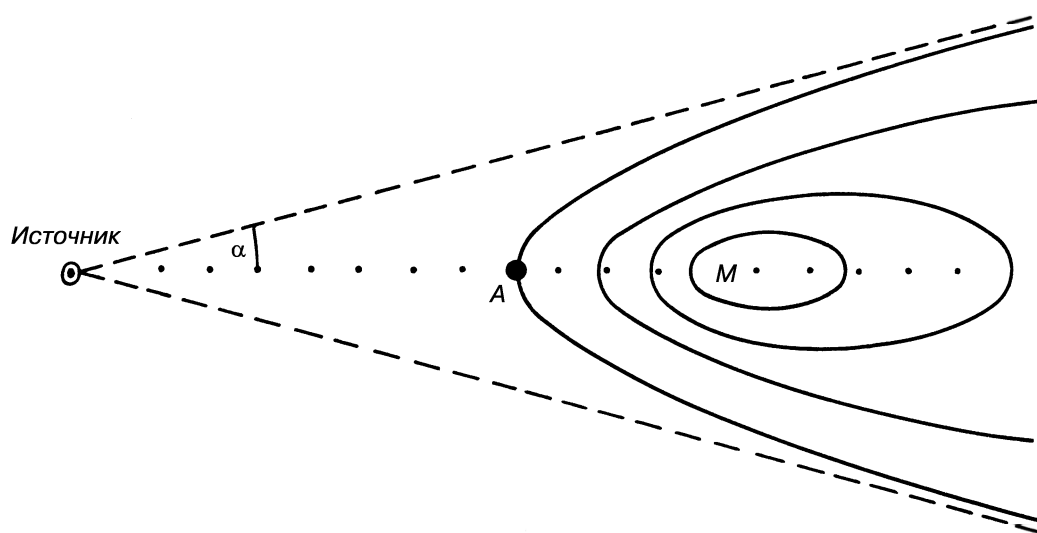
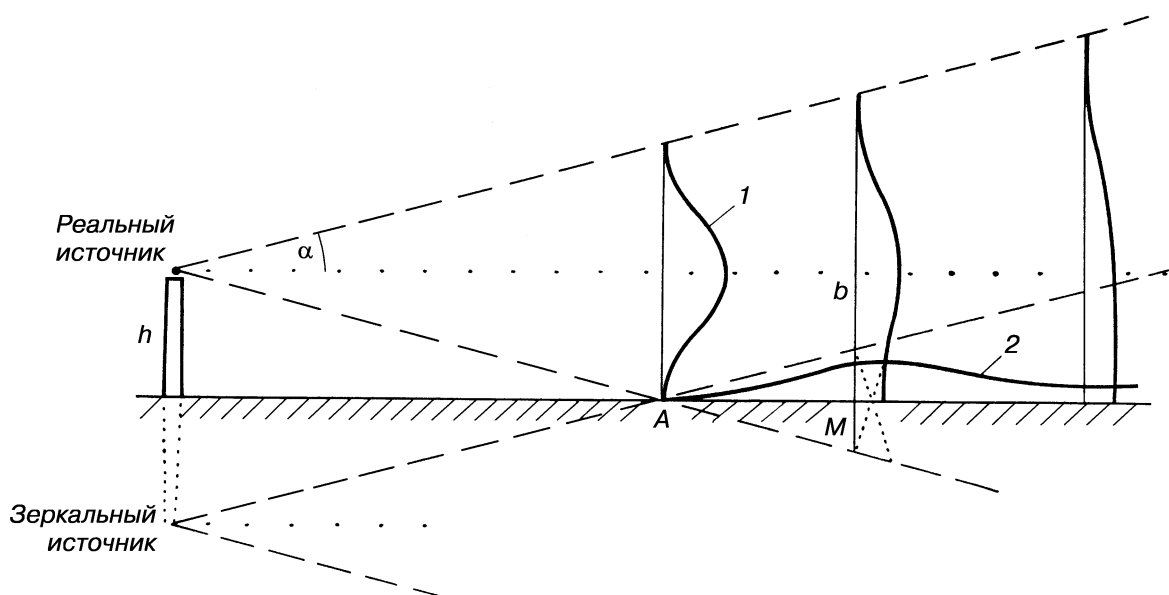


Рис. 4.8. Распространение загрязняющих веществ в параболической и конической струях

Если поглощение отсутствует, то загрязняющее вещество в шлейфе вблизи поверхности находится в такой концентрации, как если бы существовал фиктивный источник, симметричный действующему относительно отражающей поверхности (рис. 4.9).

На рис. 4.10 представлена схема приземных концентраций в форме изолиний равной концентрации.



Действительная величина  $C_{\max}$  в точке  $M$  зависит только от  $d$  – диаметра конуса в точке  $M$ . Величина  $d \sim H$  (рис. 4.11) – высота источника; коэффициент пропорциональности зависит от формы про-

филя концентрации в поперечном сечении струи. На рис. 4.8 и 4.9  $H$  равно высоте трубы  $h$  и  $C_{\max} \sim h^{-2}$ .

На практике многие источники загрязнения являются одновременно и источниками тепла. Архимедовы силы вызывают подъем выбрасываемых газов на условную высоту  $h'$ , называемую *термическим подъемом* (рис. 4.11).

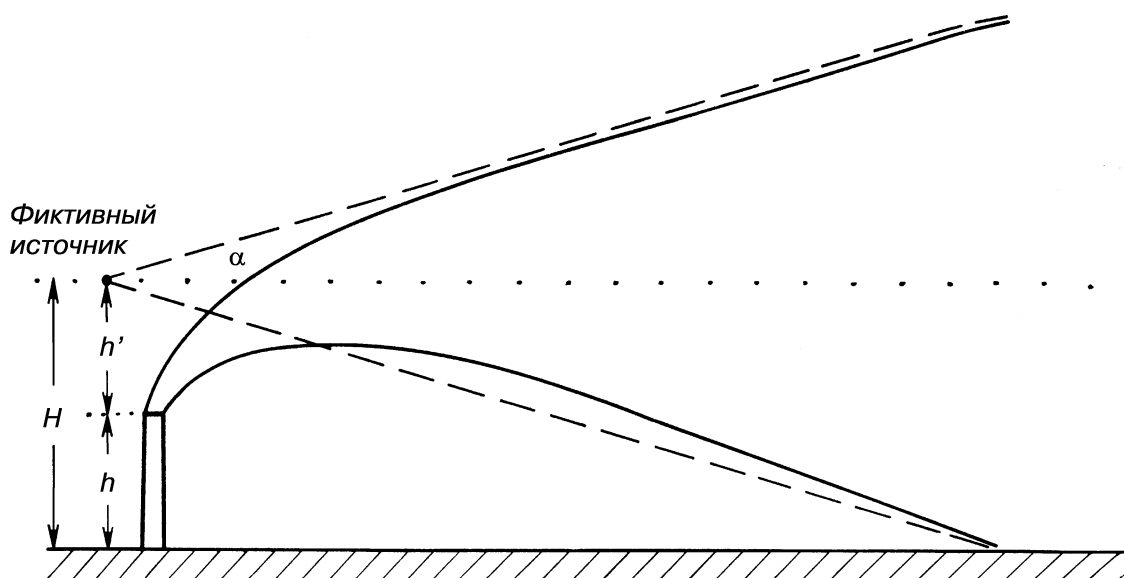


Рис. 4.11. Использование фиктивного (воображаемого) источника для описания распространения всплывающей струи

Тогда формула для максимальной концентрации может быть представлена в виде

$$C_{\max} = N \frac{Q}{U(h + h')^2}, \quad (4.7)$$

где  $N$  – числовой множитель, определяемый через угол при вершине конуса и профиль концентраций в поперечном сечении.  $N \approx 0,15$ , но в некоторых случаях меняется от 0,05 до 0,5, особенно если величина  $h'$  неизвестна. Формула (4.7) показывает, что концентрация в приземном слое существенно уменьшается с увеличением высоты трубы.

Поток загрязняющих веществ проходит через всю площадь сечения

$$Q = \frac{2}{3} \pi \left( 9 \frac{H^2}{4} \right) U C_{\max}.$$

Нагретые газы, выбрасываемые из трубы, поднимаются выше, чем ненагретые. Горизонтальный ветер может заставить вытекающую струю изогнуться (рис. 4.12).

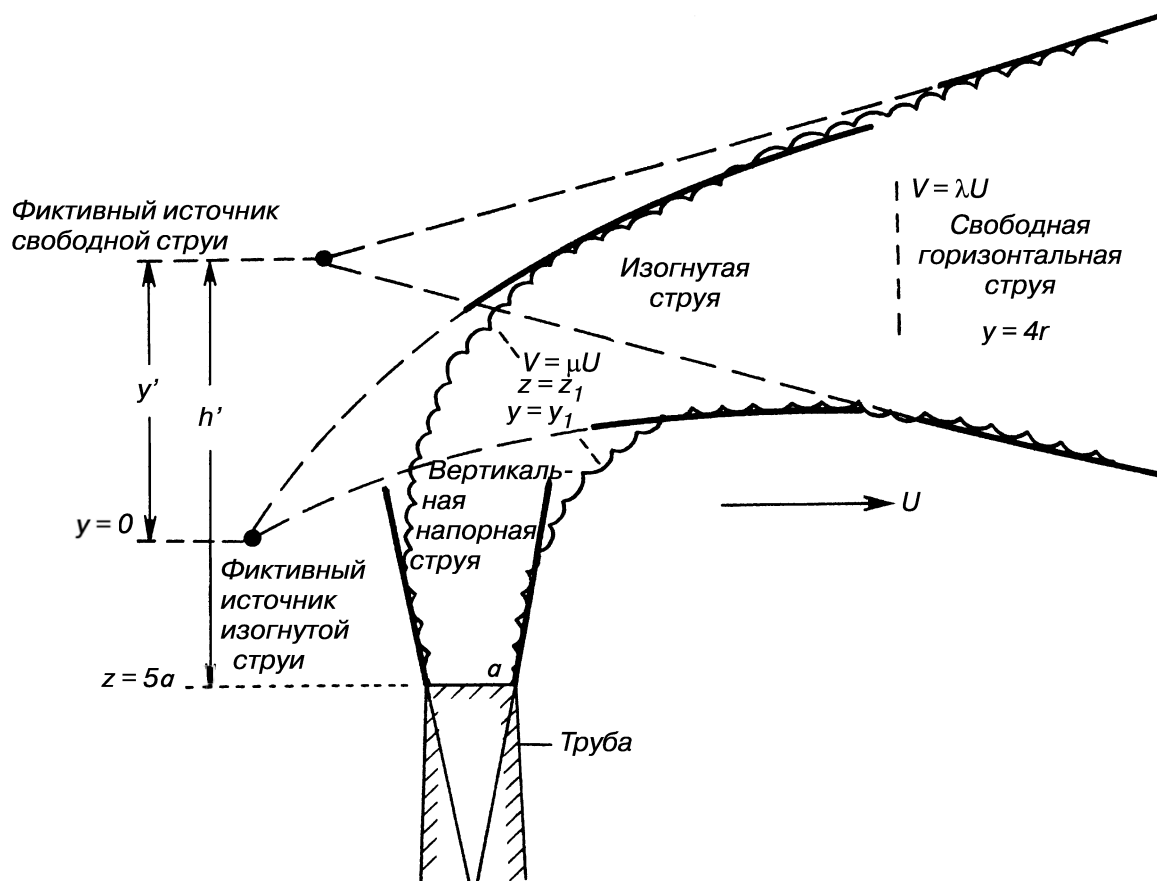


Рис. 4.12. Стадии рассеяния струи

Для вычисления скорости истечения из трубы всплывающей напорной струи используем формулу

$$V^3 = C^3 \left( \frac{1}{z} + \frac{c^2}{z^3} \right),$$

где  $C^3 = \frac{3n}{4km} \Phi$ . Здесь  $\Phi$  – поток плавучести, определяемый архимедовой силой;  $k$  и  $m$  – коэффициенты пропорциональности, которые должны быть измерены; константы  $C$  и  $c$  определяют, как будет вести себя струя: как свободная, как напорная или как нечто среднее.

Считается, что после изгиба скорость струи приобретает скорость ветра. Тепловой подъем осуществится в полной мере, когда вертикальная составляющая скорости, обусловленная архимедовыми



силами, уменьшится до значения, имеющего тот же порядок, что и абсолютные величины скоростей внешних вихрей, которые можно представить в виде  $\lambda U$ . Здесь  $\lambda$  принимает значения от 1,0 до  $10^{-3}$  в зависимости от шероховатости поверхности, наличия препятствий, стратификации атмосферы, конвекции и силы ветра.

Рассмотрим сначала случай нулевой плавучести. Пусть концентрация загрязняющих веществ  $\sigma$ , а радиус выходного отверстия трубы равен  $a$ . Индекс 0 соответствует значениям величин в выходном сечении трубы, а индекс 1 – их значениям на высоте, где струя начинает изгибаться и  $V = \mu U$ . В изогнутой части струи вертикальная координата  $y$  считается от уровня, на котором был бы расположен фиктивный источник изогнутой струи. При типичном  $n = 4$  ширина изогнутой части

$$y = 4r. \quad (4.8)$$

В вертикальной части струи имеем

$$V = V_0 z_0 / z, \quad V_1 = \mu U \cong V_0 z_0 / z_1, \quad \sigma = \sigma_0 z_0 / z, \\ \sigma_1 = \sigma_0 z_0 / z_1 = \sigma_0 \mu U / V_0, \quad z_1 = z_0 V_0 / \mu U.$$

Поток загрязняющих веществ определяется выражением

$$F = \sigma_0 V_0 \pi a^2. \quad (4.9)$$

В изогнутой части струи площадь сечения принимается равной  $2,4r^2$ , тогда как поток загрязняющих веществ, движущийся со скоростью ветра  $U$ ,

$$F = 2,4 r^2 \sigma U.$$

Используя (4.8) и (4.9), получаем

$$2,4 \left( \frac{y_1}{4} \right)^2 \frac{\sigma_0 \mu U}{V_0} U = \sigma_0 V_0 \pi a^2$$

или

$$y_1 = 4 \left( \frac{\pi}{2,4\mu} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{V_0 a}{U}.$$

Для изогнутой части струи

$$V = V_1 \frac{y_1^2}{y^2},$$

тогда высота  $y'$ , на которой изогнутая напорная струя становится пассивной, т. е. свободной ( $V = \lambda U$ ), задается выражением

$$y' = y_1 \left( \frac{V_1}{\lambda U} \right)^{\frac{1}{2}} = 4 \left( \frac{\pi}{2,4\lambda} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{V_0 a}{U} \cong \frac{4,5 V_0 a}{U \sqrt{\lambda}}.$$

Если принять для напорной струи  $z_0 = 5a$  (рис. 4.12), т. е.  $n = 5$ , то высота подъема  $h'$  (до уровня, где струя становится пассивной)

$$h' = y' - y_1 + z_1 - z_0 = a \left[ \frac{V_0}{U} \left( \frac{4,5}{\sqrt{\lambda}} - \frac{4,5}{\sqrt{\mu}} + \frac{5}{\mu} \right) - 5 \right].$$

Если отверстие в трубе сужается, а объемный поток не меняется, то

$$V_0 a^2 = \text{const.}$$

В этом случае

$$h'_j \cong 4,5 \frac{V_0 a}{U \sqrt{\lambda}},$$

так как действие большой скорости истечения проявляется в подъеме воображаемого начала струи на высоту нескольких диаметров трубы. Учет этого явления при проектировании позволяет избежать захвата вытекающей струи вихрями с подветренной стороны от трубы. Если это происходит, такая струя называется *флагообразной*, или *провисшей*.

Для изгибающейся нефлагообразной струи на удалении от трубы, большем, чем ее высота, наиболее важным эффектом является подъем под действием плавучести. В этом случае вместо формулы (4.8) в грубом приближении будем иметь

$$y \cong 2r;$$

$$V = 1,0 (gBr)^{\frac{1}{2}},$$

а поток плавучести  $F$  описывается выражением

$$F = 2,4r^2gBU.$$

Полагая  $V = \lambda U$ ,  $y = y'$  и исключая  $B$  и  $r$ , получаем, что величина теплового подъема

$$h'_b \cong y' = \frac{2F}{2,4\lambda^2 U^3} \cong 0,8 \frac{F}{\lambda^2 U^3}. \quad (4.10)$$

Так как у отверстия

$$F = \pi a^2 V_0 g B_0,$$

то

$$\frac{h'_b}{h'_j} = \frac{0,8\pi a g B_0}{4,5\lambda^{\frac{3}{2}} U^2}, \quad (4.11)$$

и тепловой подъем играет бóльшую роль, чем подъем за счет напорного истечения, если

$$gB_0 \gg 3\lambda^{\frac{3}{2}} \frac{U^2}{a}. \quad (4.12)$$

Самым существенным фактором в выражениях (4.11) и (4.12) является большая зависимость величины теплового подъема от величины  $\lambda$ , данные о которой недостаточны.

Это указывает на то, что высота подъема струи до ее изгиба сильно зависит от уровня внешней турбулентности.

Из формулы (4.10) при  $B_0 = 0,3$ ,  $g = 10 \text{ м/с}^2$ ,  $V_0 = 210 \text{ м/с}$ ,  $a = 3 \text{ м}$  (что типично для электростанций) и  $\lambda = 10^{-2}$ ,  $U = 3 \text{ м/с}$  (что естественно, например, для ясного вечера, когда грунт начал охлаждаться) получаем  $h' = 170 \text{ км}$ ; с другой стороны, при  $\lambda = 10^{-1}$  имеем  $h' = 1,7 \text{ км}$ . В любом случае подъем струи очень большой, но при  $u = 10 \text{ м/с}$  получаем  $h' = 4,6 \text{ км}$  и  $46 \text{ м}$  (для  $\lambda = 10^{-2}$  и  $10^{-1}$  соответственно), что достаточно близко к реальности.

#### **4.7. Распространение растворов и тепла в вязких потоках**

В этом параграфе рассмотрим вопросы, связанные с перемешиванием водных масс в реках и водоемах, имеющим несколько принципиальных отличий в сравнении с аналогичными процессами, происходящими в атмосфере. По-прежнему важнейшую роль в рассеянии (разбавлении) примесей играют процессы турбулентного перемешивания, которые происходят в присутствии твердых границ потока и при наличии свободной поверхности. Однако к основному механизму турбулентной диффузии добавляются биологические и химические процессы обезвреживания вредных примесей, которые, в свою очередь, могут быть связаны с кинематическими условиями потока; не последнюю роль начинают играть вязкость, аэрация потока и др.

Разбавление сточных вод сопровождается размножением или гибелью микроорганизмов, распадом органогенных веществ, происходит окисление органических веществ, сопровождающееся потреблением кислорода из воды. Пополнение его запаса происходит за счет аэрации через свободную поверхность, протекающую особенно интенсивно при бурном режиме течения, а также за счет турбулентного переноса из смежных, менее загрязненных слоев и благодаря деятельности водорослей. При этом наблюдается процесс разбавления примесей, и в определенных условиях на более или менее значительном расстоянии от места поступления раствора или сброса промышленных или хозяйственных сточных вод концентрация значительно снижается и может стать практически незаметной в процессе самоочищения, который при определенных условиях может быть достаточно полным. С другой стороны, наличие устойчивых токсических веществ в примеси существенно затрудняет процесс самоочищения и требует принятия научных и технических решений для исключения попадания таких примесей в открытые водоемы.

Гидродинамическая постановка вопроса о разбавлении примесей, загрязнении и самоочищении предполагает решение следующих практических задач:

- распространение и разбавление сточных вод в реках в водохранилищах;

- перемешивание растворов при изменении расходов методом смешения (химическим методом);

- смешение водных масс реки и ее притока ниже места их слияния.

Конечный эффект перемешивания может быть оценен с помощью уравнения баланса вещества, которое имеет вид

$$S_e Q + S_{ст} Q_{ст} = S_{п}(Q + Q_{ст}),$$

где  $Q$  и  $Q_{ст}$  – соответственно секундные расходы реки (потока) и сточных вод;  $S_e$  – естественная концентрация рассматриваемого вещества в воде;  $S_{ст}$  – концентрация этого вещества в сточных водах;  $S_{п}$  – концентрация вещества в потоке ниже места выпуска сточных вод в створе достаточного перемешивания, т. е. когда распределение его в поперечном сечении потока оказывается практически равномерным.

Для расчета разбавления сточных вод и растворов и определения полной картины распределения концентрации примесей в воде используют с теми или иными допущениями и упрощениями дифференциальное уравнение турбулентной диффузии. В случае когда отсутствуют поперечные скорости ( $V_y = V_z = 0$ ), процесс разбавления стационарен ( $ds/dt = 0$ ), а коэффициент турбулентного обмена  $A = \text{const}$ , уравнение диффузии записывают в виде

$$V_{ср} \frac{\partial S}{\partial x} = \frac{g}{\gamma} A_{ср} \left( \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \right),$$

где  $S$  – концентрация внесенного в поток вещества.

Граничные условия

$$\begin{cases} (q_s)_{y,0} = -\frac{g}{\gamma} A_{ср} \left( \frac{\partial S}{\partial y} \right)_0 = 0, \\ (q_s)_{z,0} = \frac{g}{\gamma} A_{ср} \left( \frac{\partial S}{\partial z} \right)_0 = 0, \end{cases} \quad (4.13)$$

показывающие, что перенос растворенного вещества через поверхности, ограничивающие поток (через дно, боковые стенки, свободную поверхность), отсутствуют;  $q_s$  – секундный расход вещества через единичную площадку.

Если

$$A \neq 0,$$

то

$$\left( \frac{\partial S}{\partial y} \right)_0 = \left( \frac{\partial S}{\partial z} \right)_0 = 0.$$

Индекс 0 означает, что значения производной берутся у граничных поверхностей потока. Условия, выраженные формулами (4.13), тождественны условию постоянства расхода  $Q_s = Q_{ст} S_{ст}$ , которое можно записать в следующем виде:

$$Q_{ст} = \int_{\omega} SV d\omega = \text{const},$$

где  $\omega$  – поперечное сечение потока. Начальные условия задаются либо в виде расхода и концентрации поступающего в поток раствора, либо в виде распределения концентрации примесей в начальном сечении.

Расчет разбавления сточных вод можно выполнить и относительно общего фона, создаваемого естественной концентрацией рассматриваемого вещества в потоке. В этом случае за расчетную концентрацию вещества в сточных водах принимается разность между действительным его содержанием в сточных водах и естественной концентрацией. Решение поставленной задачи может проводиться различными способами (например, методом конечных разностей, графически, методом сеток и т. д.), и при использовании методов, позволяющих учесть поперечную циркуляцию в потоке, можно видеть, что поперечная циркуляция очень сильно ускоряет процесс разбавления (в 2–4, иногда в 10 и более раз).

Для определения расстояния  $L_\delta$  до створа достаточного перемешивания применима формула Родзиллера:

$$L_\delta = \left[ \frac{2,3}{\alpha} \lg \frac{(1 - \delta)Q + Q_{ст}}{\delta Q_{ст}} \right]^3,$$

где  $\delta$  – полнота выравнивания концентрации:

$$\delta = \frac{S_{наиб} - S_{ст}}{S_{ср}} \cdot 100,$$

где  $S_{наиб}$ ,  $S_{ср}$  – соответственно наибольшая и средняя концентрации;  $(1 - \delta)$  принимают от 0,8 до 0,95;  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий гидравлику потока;

$$\alpha = \varphi \xi_3 \sqrt{\frac{gA}{\gamma Q_{ст}}},$$

где  $\varphi$  – коэффициент извилистости реки;

$$\varphi = l_{\text{ср}} / l_{\text{п}},$$

где  $l_{\text{ср}}$ ,  $l_{\text{п}}$  – расстояние между двумя створами реки соответственно по фарватеру и по прямой;  $\xi$  – коэффициент, принимаемый равным 1 при выпуске раствора у берега и 1,5 – посередине реки;  $\frac{gA}{\gamma}$  – коэффициент турбулентной диффузии.

Здесь следует заметить и целесообразно повторить, что все вышепредложенные зависимости являются в той или иной степени приближенными: это и приближенность методов расчета, и использование опытных данных и коэффициентов.

#### 4.7.1. Неустановившаяся диффузия

В озерах, водохранилищах может возникнуть ситуация, когда в месте сброса сточных вод будет происходить их накопление в условиях незначительных течений. Выход сточных вод все время будет происходить в сильно загрязненные массы воды, т. е. в облако загрязнения, середина которого будет лишь блуждать под влиянием слабых, изменяющихся по направлению течений возле места сброса сточных вод и пополняться последними. Турбулентность в этом случае обусловлена слабыми течениями, которые ввиду их малости и изменчивости в иных случаях просто не учитываются. При появлении устойчивых течений облако загрязнений получает поступательное движение и, оторвавшись от места выпуска сточных вод, в процессе перемещения продолжает расширяться за счет диффузии, уменьшая постепенно свою концентрацию. Уравнение турбулентной диффузии, записанное в цилиндрических координатах для случая расположения источника в центре координат, имеет вид

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \left( \frac{g}{\gamma} A - \frac{Q_{\text{ст}}}{\varphi H} \right) \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial S}{\partial r} + \frac{g}{\gamma} A \frac{\partial^2 S}{\partial r^2},$$

где  $H$  – глубина погружения центра координат.

Расчет концентрации накоплений загрязняющих веществ, движения облака загрязнений и других характеристик процесса может быть проведен, например, конечно-разностным методом, разработанным Караушевым (см. гл. 6).

#### 4.7.2. Турбулентная теплопроводность

Применительно к случаю установившегося процесса охлаждения или нагревания с поверхности или от дна равномерного установившегося турбулентного потока уравнение турбулентной теплопроводности оказывается более простым, чем в общем случае. Если в порядке первого приближения пренебречь поперечными течениями, характеризующимися скоростями  $V_y$  и  $V_z$ , т. е. исключить из рассмотрения сильноизвилистые потоки, то задача сводится к плоской, определяемой следующим приближенным уравнением:

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{gA_{\text{ср}}}{\gamma V_{\text{ср}}} \cdot \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2},$$

где местная скорость  $V$  и местное значение коэффициента турбулентного обмена  $A$  заменены на средние их значения по вертикали  $V_{\text{ср}}$  и  $A_{\text{ср}}$ . Это уравнение может быть также решено с помощью метода конечных разностей.



## 5. РАСЧЕТ РАССЕЙВАНИЯ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ

Для описания процессов рассеивания примесей в атмосфере, определения поля их концентрации используют два альтернативных подхода. Первый основан на решении полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии, с использованием градиентной теории переноса (перенос вещества пропорционален градиенту его концентрации), называемой также *K-теорией*. Вторым подходом базируется на статистической модели, предполагая наличие нормального закона распределения (распределения Гаусса) концентрации в газовом облаке.

Наиболее известными моделями рассеивания, доведенными до расчетных методик, являются:

- модель, разработанная в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО) (является основой общероссийского нормативного документа ОНД-86);

- модель Института экспериментальной метеорологии (ИЭМ);

- модель Паскуилла – Гиффорда (основа методик МАГАТЭ).

Две первые методики являются комбинированными и используют с разными подходами градиентную и гауссову теории. Особенностью модели ГГО является возможность определения поля концентраций лишь для опасной скорости ветра и для наиболее неблагоприятных условий рассеивания в атмосфере.

### 5.1. Модель Паскуилла – Гиффорда

Рассеяние примеси в атмосфере определяется многими факторами, главными из которых являются: мощность источника выброса примеси; его высота; температура смеси; скорость ветра; состояние атмосферы, характеризующееся классом устойчивости.

*Мощность источника примеси* – это масса примеси, выходящей из источника в единицу времени.

Источники делят на высокие и низкие. К низким источникам относят выбросные трубы, вентиляционные шахты, дефлекторы и другие источники, выбросы которых производятся непосредственно в зоны аэродинамических теней зданий и сооружений. К высоким источникам относят трубы, выбрасывающие вентиляционный воздух и технологические газы в верхние слои атмосферы. Классификацию источников на высокие и низкие производят по их эффективной высоте, которая складывается из геометрической высоты трубы  $h$  и высоты подъема факела  $\Delta H$  за счет собственной скорости струи и ее перегрева относительно окружающего воздуха:

$$H = h + \Delta H. \quad (5.1)$$

Чем выше температура выбрасываемых газов и скорость их выхода через устье трубы, тем больше эффективная высота источника.

По геометрическим характеристикам источники делят на точечные, линейные и площадные. К точечным источникам примеси можно отнести дымовые трубы. Примером линейного источника может служить оживленная транспортная магистраль, от которой распространяются выхлопные газы автомобилей. Промышленный район, в котором сосредоточено большое количество дымовых труб различных предприятий, в ряде случаев можно рассматривать как площадной источник.

Важнейшим фактором, определяющим рассеяние примеси, является степень устойчивости атмосферы. Примесь, выброшенная в атмосферу, переносится ветровым потоком и турбулентными вихрями. Интенсивность турбулентного переноса существенно зависит от температуры поверхности земли и распределения температуры воздуха в приземном слое атмосферы.

В случае если вблизи земли температура воздуха выше, чем в более высоких областях приземного слоя, состояние атмосферы будет неустойчивым. И наоборот, устойчивому состоянию атмосферы соответствует более высокая температура на некоторой высоте над землей, чем у ее поверхности.

Степень устойчивости атмосферы характеризуют так называемыми классами устойчивости. Наиболее распространенная шкала классов устойчивости введена Паскуиллом и Гиффордом. Всего ими вводятся шесть классов устойчивости атмосферы, обозначаемых латинскими буквами: А, В, С, D, E, F. Наиболее неустойчивому состоянию атмосферы соответствует класс А, наиболее устойчивому – класс F.

Класс устойчивости атмосферы определяется на метеостанциях на основании данных о распределении температуры воздуха в приземном слое по высоте (вертикальному температурному градиенту). Его также можно определить по среднеквадратичному отклонению колебаний стрелки флюгера от среднего значения, по солнечной радиации (инсоляции).

Для тех случаев, когда данные с метеостанций получить нельзя, Паскуилл предложил таблицу определения класса устойчивости в зависимости от сезона, времени суток, облачности и скорости ветра. Для известного класса устойчивости можно определить коэффициент турбулентной диффузии либо дисперсии координат частиц примеси относительно оси факела выбрасываемых газов.

Основой большинства расчетных методик является уравнение турбулентного переноса примеси в приземном слое атмосферы, которое в простейшем случае имеет вид

$$U \frac{\partial C}{\partial x} = K \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right), \quad (5.2)$$

где  $U$  – составляющая скорости в направлении оси  $X$ , м/с;  $K$  – коэффициент турбулентной диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $C$  – концентрация примеси, кг/м<sup>3</sup>;  $x, y, z$  – декартовы координаты, м (рис. 5.1).

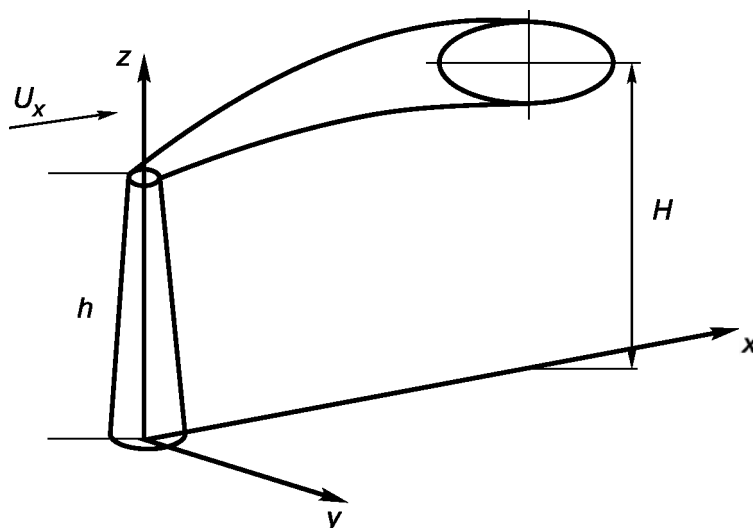


Рис. 5.1. Схема движения примеси в атмосфере

При записи этого уравнения считается, что поле концентрации не зависит от времени, а скорость ветра и коэффициент турбулентной диффузии постоянны по величине и по направлению.

Если пренебречь продольной диффузией и считать, что концентрация примеси распределена относительно оси струи по нормальному закону, то решение уравнения (5.2) будет иметь вид

$$C = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y(x, \theta) \sigma_z(x, \theta)} \exp \left\{ -0,5 \left[ \frac{y}{\sigma_y(x, \theta)} \right]^2 \right\} \times \\ \times \left\{ \exp \left\{ -0,5 \left[ \frac{z-H}{\sigma_z(x, \theta)} \right]^2 \right\} + \exp \left\{ -0,5 \left[ \frac{z+H}{\sigma_z(x, \theta)} \right]^2 \right\} \right\}. \quad (5.3)$$

Здесь  $C$  – концентрация примеси, г/м<sup>3</sup>;  $Q$  – мощность источника, г/с;  $U$  – скорость ветра, м/с;  $\sigma_y(x, \theta), \sigma_z(x, \theta)$  – дисперсии координат частиц примеси вдоль осей  $y$  и  $z$ , м;  $x, y, z$  – координаты точки, в которой определяется концентрация;  $H$  – высота оси струи над поверхностью земли, м;  $\theta$  – класс устойчивости атмосферы.

Величины  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  различны для разных классов устойчивости атмосферы и, кроме того, изменяются вдоль оси  $X$ . Для их определения в США проведены достаточно точные эксперименты. Аналитические зависимости, обобщающие зависимости  $\sigma_y(x)$  и  $\sigma_z(x)$  для различных классов устойчивости атмосферы, приведены на рис. 5.2 и используются для расчета поля концентрации примеси по формуле (5.3) в программе «Гаусс».

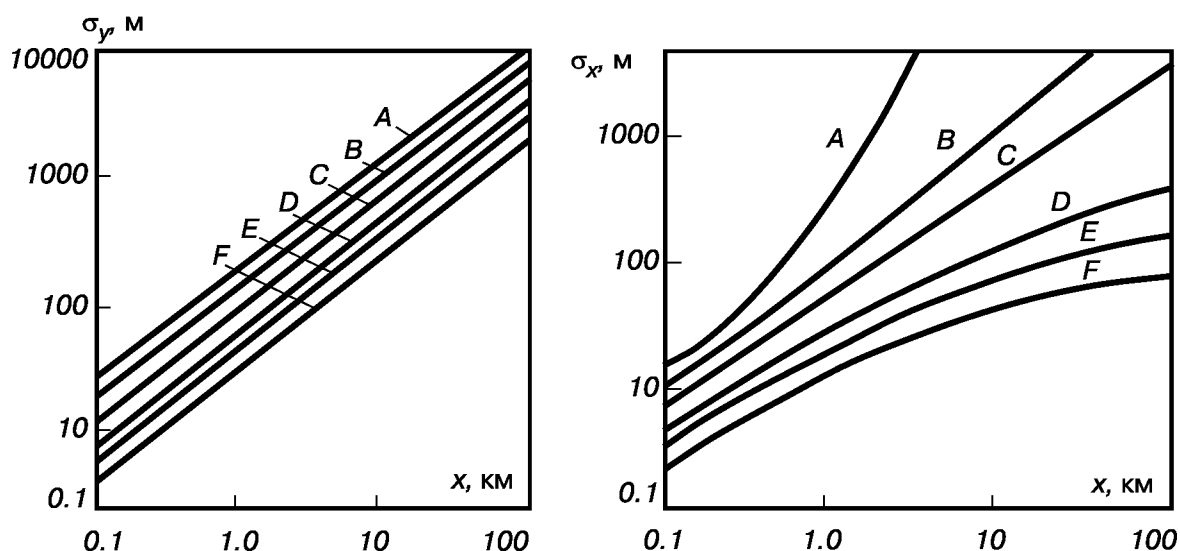


Рис. 5.2. Горизонтальные и вертикальные дисперсии как функции расстояния от источника по направлению ветра

Эффективная высота подъема струи зависит от высоты источника  $h$ , температуры и скорости газов, выходящих из устья струи. Если примесь холодная и скорость ее выхода невелика, то  $H = h$ . В методике Паскуилла – Гиффорда эффективная высота подъема струи определяется по формуле Бриггса (5.1).

Математическая модель, на основе которой построена рассматриваемая методика, содержит ряд допущений и поэтому может применяться не во всех случаях распространения примеси.

Модель справедлива для описания поля примеси от непрерывно действующих высоких точечных источников. Это означает, что расстояние, на которое распространяется примесь, во много раз больше размеров источника, а время действия источника достаточно для установления стационарного поля концентрации (на практике – не менее нескольких десятков минут или даже нескольких часов). Примером таких источников могут служить дымовые трубы и вентиляционные выбросы промышленных предприятий.

Исходное уравнение модели (5.2) содержит только одну составляющую скорости, т. е. считается, что ветер не меняется по высоте и направлению. На самом деле это не так, и чем больше расстояние от источника, тем больше вероятность изменения направления ветра. Можно рассчитывать на удовлетворительные результаты на расстояниях не более 5000 м.

В модели не учитывается влияние на распространение примеси рельефа местности, а также высоких препятствий (постройки, лес). Для того чтобы применение модели было оправдано, необходимо, чтобы высота источника существенно превышала неровности рельефа и высоту препятствий.

Методика не может применяться в тех случаях, когда происходит интенсивное осаждение твердых частиц, содержащихся в выбрасываемых газах, например золы, образующейся при сгорании твердого топлива. Нельзя применять методику для расчета выбросов так называемых «тяжелых газов», молекулярная масса которых сильно превышает молекулярную массу воздуха (пропан, пентан, бутан, фреоны) и на рассеяние которых существенно влияют силы тяжести.

В модели не учитывается ряд других процессов, таких как вымывание примеси дождем, химические реакции между примесью и воздухом атмосферы и т. д.

Для учета указанных случаев в модель либо вносятся поправки, либо используются более сложные модели.

Несмотря на вышеперечисленные ограничения, модель широко используется за рубежом и рекомендована к применению Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ).

## **5.2. Методика Института экспериментальной метеорологии (ИЭМ)**

Отличительной особенностью методики ИЭМ является ее комбинированный характер: рассеяние по горизонтали рассчитывается с помощью гауссовской модели, а по вертикали – с помощью К-теории при задании зависимости  $u(z)$  и  $K(z)$  в виде степенной функции  $z$ . Для этого случая было получено аналитическое решение, имеющее простой вид. Зависимости коэффициентов в аппроксимирующих выражениях от метеорологических данных были выбраны с помощью многочисленных экспериментов, проведенных на полигонах института и на высотной метеомачте. В качестве параметра, характеризующего устойчивость атмосферы, используется аналог числа Ричардсона (параметр Будыко), требующий для своего определения градиентных измерений температуры.

Посредством этой методики могут быть рассчитаны стационарные выбросы как в варианте «сценария», так и в варианте оперативного прогноза. Определить концентрации для наихудших погодных условий с помощью этой модели (а также для гауссовских моделей) можно в результате сравнения нескольких вариантов расчета. Объем входной метеоинформации для этой модели больше, чем для гауссовских моделей. Класс устойчивости может быть определен по градиентным измерениям температуры в приземном слое атмосферы либо с помощью градиентных измерений температуры и скорости ветра на нескольких высотах, в том числе на высоте выброса. В этом случае выявляется и учитывается существование инверсии температуры, различаются приземная и приподнятая инверсии. Приводятся некоторые рекомендации для учета особых условий: штиля и слабого ветра, переходного времени суток. Скорость ветра также рекомендуется измерять в нескольких точках на одной высоте. Эта модель может применяться для расчета на ПЭВМ оперативного прогноза рассеяния примеси. В то же время для ее использования требуется достаточно большой объем метеоинформации. Для расчетов рассеяния облака модель не предназначена.

### 5.3. Методика Главной геофизической обсерватории

Методика ГГО (ОНД-86) базируется на численных и аналитических решениях основного уравнения турбулентной диффузии примеси. Формулы методики ОНД-86 получены с использованием логарифмической аппроксимации скорости  $U(z)$  ветра по вертикали:

$$U = \frac{U_1 \lg(z/z_0)}{\lg(z_1/z_0)},$$
$$k_z = \frac{k_1 z}{z_1} \quad \text{при} \quad z \leq h;$$
$$k_z = \frac{k_1 h}{z_1} \quad \text{при} \quad z > h;$$
$$k_y = k_0 U,$$

где  $h$  – высота приземного слоя. Константы, входящие в эти формулы, зависят от состояния атмосферы, устойчивость которой определяется параметром Будыко  $B = \delta T / U_1^2$ . При этом используется дополнительное осреднение, учитывающее изменение направления ветра. Так получено аналитическое решение основного уравнения переноса, которое было дополнено численными расчетами и затем аппроксимировано простыми формулами и таблицами, представленными в виде методики.

Расчет концентрации вредных выбросов предлагается проводить не для любых, а для наиболее опасных (неблагоприятных) метеорологических условий. По этой методике может быть определена опасная скорость ветра, при которой наземная концентрация оказывается максимальной. При заданной скорости ветра также рассчитывается максимальная для всех состояний атмосферы концентрация. Методика является нормативным документом и предназначена для расчета рассеяния примеси от стационарных источников выбросов промышленных предприятий.

Посредством этой методики определяются разовые концентрации, относящиеся к 20–30-минутному интервалу осреднения. В качестве критериев допустимости параметров выброса используют значения ориентировочно безопасных уровней загрязнения воздуха (ОБУВ) в порядке, установленном Минздравом России.

Были проведены многочисленные сравнения результатов, полученных с помощью методики ОНД-86, с экспериментальными дан-

ными при наблюдениях распространения  $\text{SO}_2$ , золы и других вредных веществ из труб электростанций (ТЭС) и других производств. Обработка данных велась путем построения графиков зависимостей концентрации от скорости ветра и проведения на них огибающих кривых, соответствующих величинам наибольших концентраций. Методика ОНД-86 достаточно корректна при расчете рассеивания ЗВ от высотных источников выбросов и дает завышенные уровни приземной концентрации при расчетах от низких источников.

Например, в случае выбросов загрязнений компрессорными станциями (КС) магистральных газопроводов значения опасной скорости ветра получаются высокими – от 10 до 15 м/с, – тогда как обычно они меняются от 2 до 5 м/с для дымовых труб. На уровне флюгера значения скоростей ветра 10–15 м/с наблюдаются достаточно редко, поэтому фактическая концентрация загрязнений в 80–95 % случаев будет существенно меньше расчетной.

На основе базы данных по экспериментальным исследованиям уровня загрязнения атмосферы в районе многоточных КС специалистами ВНИИгаза совместно с ГГО им. А. И. Воейкова разработано дополнение к методике, ориентированное на выбросы КС: уточнена расчетная схема основного документа для характерных условий выхода газовоздушной смеси из труб КС, для чего были модифицированы (с учетом экспериментальных данных ВНИИгаза) зависимости безразмерных коэффициентов  $r$  и  $p$  от отношения  $t_1$  расчетной скорости ветра  $U$  к опасной скорости ветра  $U_m$  ( $t_1 = U/U_m$ ).

К соотношениям  $r(t_1)$  для интервала  $t_1 > 0,3$  были добавлены еще две зависимости  $r$  от  $t_1$  (при  $t_1 \leq 0,3$ ), характерные для условий эксплуатации КС:

$$r = (5t_1 - 0,5)(0,67t_1 + 1,67t_1^2 - 1,34t_1^3) \text{ при } 0,15 \leq t_1 \leq 0,3;$$

$$r = 19,6t_1^{2,3}(0,67t_1 + 1,67t_1^2 - 1,34t_1^3) \text{ при } t_1 < 0,15.$$

Зависимости параметра  $p$  от  $t_1$ , справедливые при  $t_1 \geq 0,25$ , дополнены новой аппроксимацией в интервале  $t_1 < 0,3$ :

$$p = 0,79t_1^{-1,43} \left[ 1 + 8,43(1 - t_1)^5 \right] \text{ при } t_1 < 0,3.$$

Графическое представление результатов дано на рис. 5.3, из которого видно, что усовершенствованная расчетная схема, учитывающая



характерные условия выхода газовой смеси из труб, существенно уменьшает значения концентраций загрязнителя по сравнению с ОНД-86 и согласуется с экспериментальными данными. Так, для скорости  $V = 4$  м/с кривая, рассчитанная по дополнению к ОНД-86 (тестовый пример), идет ниже, чем кривая, рассчитанная по основному документу (кривые 3 и 4). При низких скоростях ветра (0,5–1,0 м/с) наиболее близкие к натурным замерам результаты дает методика ОНД-86.

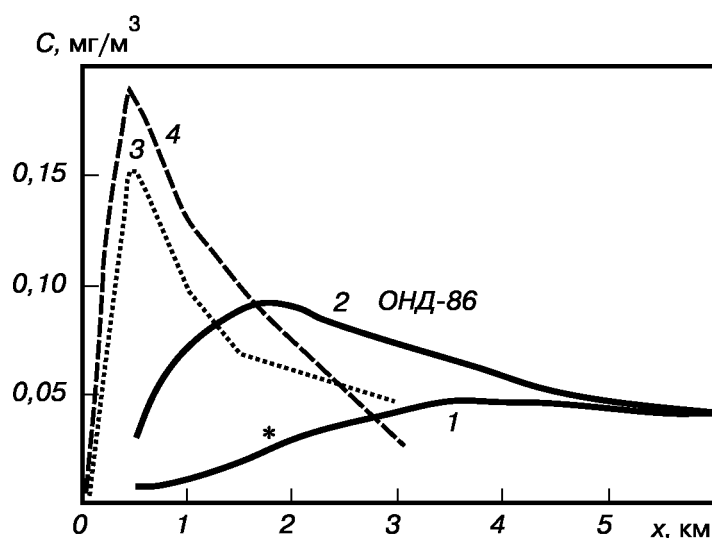


Рис. 5.3. Сравнение расчетов концентрации по методике ОНД-86 и дополнению к ней

По этой методике не могут быть рассчитаны интенсивные нестационарные выбросы, сопровождающие аварии на газотранспортных системах. Ее нельзя использовать для «сценарных» и прогнозных расчетов (заблаговременных и оперативных прогнозов для заданных метеоусловий). При сравнении рассчитанных результатов с измерениями необходимо учитывать, что методика ориентирована на наиболее неблагоприятные погодные условия. При этом неблагоприятные условия вовсе не тождественны наиболее опасным метеоусловиям, которые возникают в процессах конвекции и инверсии при слабом ветре. Такие ситуации не описываются данной методикой.

## 5.4. Расчет рассеивания вредных веществ

Регламентирование выбросов вредных веществ в атмосферу через те или иные источники осуществляется на основе установления предельно допустимых выбросов (ПДВ). Для того чтобы регламентировать

ровать выбросы, следует сначала определить максимально возможную концентрацию вредных веществ ( $C_m$ ) и расстояние ( $x_m$ ) от источника выброса, где эта концентрация возникает.

Величина максимально приземной концентрации загрязняющих веществ  $C_m$  (мг/м<sup>3</sup>) от одиночного (точечного) источника с круглым устьем для выбросов нагретой газовой смеси при неблагоприятных метеорологических условиях рассчитывается по формуле

$$C_m = \frac{AFMnm\mu}{H^2 \sqrt[3]{V\Delta T}},$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы и определяющий условия горизонтального и вертикального рассеивания примесей в атмосфере (с<sup>2/3</sup>·мг·°С<sup>1/3</sup>);  $F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания загрязняющих веществ в атмосфере;  $M$  – массовый расход загрязняющих веществ, г/с;  $n$  и  $m$  – безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника;  $\mu$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности;  $H$  – высота трубы, м;  $V$  – объёмный расход газовой смеси, м<sup>3</sup>/с;  $\Delta T$  – разность между температурой газовой смеси  $T_r$  и температурой окружающего воздуха  $T_b$ , °С.

Коэффициент  $A$  принимают в зависимости от географического расположения источника загрязнения атмосферы от 240 до 120.

Значения  $M$ ,  $H$ ,  $V$ ,  $T_r$  определяют из данных инвентаризации выбросов, а при их отсутствии – расчётом.

При определении  $\Delta T$  температуру окружающего воздуха  $T_b$  принимают равной среднему значению на 13 ч для наиболее жаркого месяца года. Для котельных, работающих по отопительному графику, значения  $T_b$  принимают равными средней температуре воздуха самого холодного месяца.

Значения  $F$  принимают равными: 1 – для газообразных загрязняющих веществ и мелкодисперсных аэрозолей, скорость оседания наиболее крупных фракций которых не превышает 0,03–0,05 м/с; 2 – для крупнодисперсной пыли и золы (взвешенных веществ при средней эксплуатационной степени очистки  $\eta$  не менее 90 %); 2,5 – при  $\eta = 75$ –80 %; 3 – при  $\eta < 75$  % или при отсутствии очистки.

Безразмерный коэффициент  $m$  определяют расчётом в зависимости от параметра  $f$  (мс<sup>-2</sup> · °С<sup>-1</sup>), который вычисляют по формуле

$$f = 10^3 \frac{\omega_0^2 D}{H^2 \Delta T}, \quad (5.4)$$

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f}},$$

где  $\omega_0$  – скорость выхода газовой смеси из устья трубы, м/с;  
 $D$  – диаметр устья источника выброса;

$$\omega_0 = \frac{V}{0,785D}.$$

Значение коэффициента  $n$  определяют в зависимости от параметра  $V_m$ , рассчитываемого по формуле

$$V_m = 0,65\sqrt[3]{\frac{V\Delta T}{H}},$$

где  $V = \frac{\pi D^2}{4} \omega_0$ .

При этом:  $n = 3$ , если  $V_m \leq 0,3$ ;

$n = 1$ , если  $V_m > 2$ ;

$n = 3\sqrt{(V_m - 0,3)(4,36 - V_m)}$ , когда  $2 < V_m \leq 0,3$ .

Коэффициент  $\mu = 1$ , если в радиусе  $50H$  и более от источника перепад отметок местности не превышает  $50H$  на 1 км. Если в рассматриваемом районе имеются препятствия для распространения ветра (гряды, гребни, ложбины, уступы), то  $\mu$  принимают больше 1.

Расстояние  $X_m$  от источника, на котором создаётся концентрация  $C_m$ :

$$X_m = Hd,$$

а при  $F > 2$

$$X_m = \left[ \frac{(5-F)}{4} \right] Hd.$$

Здесь  $d = 10-20$  – безразмерный коэффициент, определяемый расчётным путём. Максимальную концентрацию  $C_m$  устанавливают при опасной скорости ветра  $U_m$  (м/с) на уровне флюгера (обычно 10 м от уровня земли) и принимают по соотношениям:

$$\begin{aligned} &\text{при } V_M \leq 0,5 \quad U_M = 0,5; \\ &\text{при } 0,5 < V_M \leq 2 \quad U_M = V_M; \\ &\text{при } V_M > 2 \quad U_M = (1 + 0,12\sqrt{f}). \end{aligned}$$

При оценке загрязнения атмосферы и установлении ПДВ расчётные значения скорости ветра  $U$  следует варьировать, задавая несколько значений безразмерных скоростей ветра:

$$U_{\text{мс}} = \frac{U_{M_1} C_{M_1} + U_{M_2} C_{M_2} + \dots + U_{M_N} C_{M_N}}{C_{M_1} + C_{M_2} + \dots + C_{M_N}},$$

где  $C_{M_1}, C_{M_2}, \dots, C_{M_N}$  – максимальные концентрации от 1, 2, ...,  $N$  источников в данной точке местности;  $U_{M_1}, U_{M_2}, \dots, U_{M_N}$  – опасные скорости ветра для источников 1, 2, ...,  $N$ . Обычно для расчёта задают значение  $U_{\text{мс}}$ :  $0,5U_{\text{мс}}$  и  $1,5U_{\text{мс}}$ .

Максимальную приземную концентрацию загрязняющих веществ для выброса холодной газовойоздушной смеси (т. е. у которой  $\Delta T \approx 0$  или при расчёте по формуле (5.4)  $f > 100$  и прочих одинаковых условиях) определяют по выражению

$$C_M = \frac{AMF\eta n}{H^{4/3}} \frac{D}{8V}.$$

Коэффициент  $n$  в данном случае зависит от параметра  $V_M$ , рассчитываемого по формуле

$$V_M = \frac{1,3D\omega_0}{H}.$$

С целью уменьшения трудоёмкости расчётов целесообразно производить объединение источников в отдельные условные источники выбросов. Это относится в первую очередь к мелким источникам, для каждого из которых выполняется хотя бы одно из следующих условий:

$$\frac{C_M}{\text{ПДК}} \leq 0,2 \quad \text{или} \quad \frac{C_M x_M}{\text{ПДК}} \leq 120.$$

В соответствии с ОНД-86 источник выброса в зависимости от высоты его устья над уровнем земли относится к одному из следующих классов:

высокие источники,  $H > 50$  м;  
средней высоты,  $H = 10\text{--}50$  м;  
низкие,  $H = 2\text{--}10$  м;  
наземные источники,  $H < 2$  м.

Эта классификация имеет значение при расчёте загрязнения воздуха на промышленной площадке и в прилегающей к ней местности, когда возникает необходимость учета влияния зданий и сооружений на рассеивание выбросов.

## 6. РАЗБАВЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ГИДРОСФЕРЕ

### 6.1. Общие понятия и закономерности

Комплексное использование водных ресурсов для всех отраслей народного хозяйства зависит от качества воды в водоёмах. Поэтому большое внимание необходимо уделять прежде всего очистке сточных вод перед выпуском их в гидросферу.

Разбавление сточных вод – процесс снижения концентрации веществ в водотоках и водоемах. Интенсивность процесса разбавления количественно характеризуется кратностью разбавления и определяется по формуле

$$n = \frac{Q + Q_0}{Q_0}, \quad (6.1)$$

где  $Q$  – расход водного потока среды,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q_0$  – расход сточных вод, сбрасываемых в водоем или водоток,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Интенсивность процесса разбавления может быть выражена и через отношение избыточных концентраций загрязнения в месте выпуска к концентрациям в рассматриваемом сечении:

$$n = \frac{C_0 - C_B}{C - C_B},$$

где  $C_0$ ,  $C_B$ ,  $C$  – концентрации загрязняющих веществ соответственно в сточных водах, водоеме и водотоке до выпуска сточных вод в рассматриваемом сечении.

Для водотоков формула (6.1) может быть представлена в виде

$$n = \frac{\gamma Q_B + Q_0}{Q_0}, \quad (6.2)$$

где  $\gamma$  – безразмерный коэффициент, показывающий, какая часть расчетного расхода водотока участвует в смешении ( $\gamma \leq 1$ );  $Q_B$  – расчетный расход водотока,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Участок водоема или водотока от места выпуска сточных вод до створа, в котором произойдет их полное разбавление, условно разделяют на три зоны (рис. 6.1). Первая зона – начальное разбавление, в котором процесс разбавления происходит вследствие эжекции окружающей воды турбулентным струйным потоком, образующимся при истечении сточных вод из выпуска. В результате этого наблюдается значительное снижение начальных концентраций загрязнения, которое происходит до сечения, где разность скоростей струйного потока и окружающей фоновой среды становится незначительной. Во второй зоне происходит разбавление и дальнейшее снижение концентрации стоков, а степень перемешивания определяется интенсивностью турбулентного обмена водотока или водоема. За створом полного перемешивания и разбавления располагается третья зона, снижение концентраций загрязнения в которой определяется процессами самоочищения.

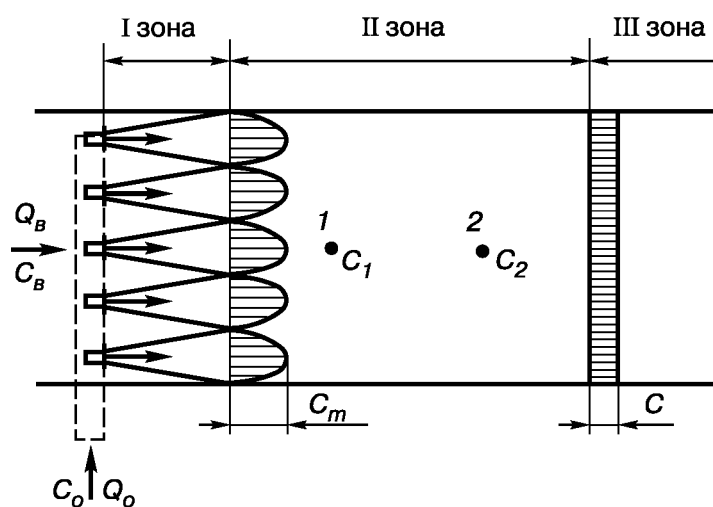


Рис. 6.1. Схема распространения сточных вод в водотоке

Зная кратность разбавления на каждом из рассматриваемых участков, можно получить общую кратность разбавления. Концентрация загрязняющего вещества, согласно рис. 6.1, в первой точке равна  $C_1$ , во второй –  $C_2$ , при этом  $C_1 > C_2$ . Тогда разбавление составит:

от места выпуска до первой точки

$$n_H = \frac{C_0 - C_B}{C_1 - C_B}; \quad (6.3)$$

от первой точки до второй

$$n_0 = \frac{C_1 - C_B}{C_2 - C_B}; \quad (6.4)$$

общее на рассматриваемом участке водотока

$$n = \frac{C_0 - C_B}{C_2 - C_B}. \quad (6.5)$$

Решив уравнение (6.3) относительно  $(C_0 - C_B)$ , а уравнение (6.4) относительно  $(C_2 - C_B)$  и подставив результаты в формулу (6.5), получим

$$n = n_H n_0.$$

Таким образом, решить задачу о разбавлении сточных вод в водотоке или водоеме означает определить концентрацию одного или нескольких загрязняющих компонентов в любой точке локальной зоны этого объекта, подверженной влиянию сточных вод. В конечном итоге это является научным обоснованием возможности использования водотока или водоема.

Разбавление сточных вод в водоемах и водотоках определяют в результате комплекса мероприятий:

распределением сточных вод в начальном сечении водоема или водотока (место сброса), которое зависит от концентрации на выпуске;

начальным разбавлением сточных вод, происходящим под действием турбулентных струй;

основным разбавлением сточных вод, обусловленным гидродинамическими процессами водоемов и водотоков.

Условия, определяющие процесс разбавления, необходимо разделить на две группы. Первая группа (конструктивные и технологические особенности выпуска сточных вод) включает такие факторы, как конструкция выпускного сооружения, число, форма и размеры выпускного отверстия, расход и относительная скорость выпускаемых сточных вод. Ко второй группе следует отнести характер движения водных масс, причины, вызывающие эти движения (ветер, стратификация температур и плотностей), морфологические характеристики русла водотока или ложа водоема, степень проточности (водообмена), состав и свойства водной среды.

В начальной стадии процесс разбавления во многом определяется конструктивными особенностями выпуска. В выходящих из вы-



пуска сточных водах, как правило, начальная скорость истечения превышает скорость движения воды водоема. Влияние этой разности находит отражение в возникновении турбулентности струйного потока, которая приводит к значительному снижению концентрации в струйном потоке и называется *начальным разбавлением*.

Расчет исходной концентрации после полного перемешивания сточных вод в водоеме (водохранилище) с учетом четырехкратного периода обмена воды выполняется по формуле

$$C = \frac{(C_0 Q_0 + \sum C_B Q_B) \beta_6}{W}, \quad (6.6)$$

где  $W$  – объем водоема и водотока;  $\beta_6$  – период полного обмена воды;

$$\beta_6 = \frac{W}{(Q_0 + \sum Q_B - Q_H)}.$$

## 6.2. Методы расчёта разбавления для водотоков

**Метод И. Д. Родзиллера** основан на решении дифференциального уравнения турбулентной диффузии

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V_x \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \frac{\partial C}{\partial y} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (6.7)$$

при следующих условиях: область речного потока рассматривается безграничной, начальное разбавление отсутствует, выпуск сосредоточенный.

Этот метод наиболее распространен в проектной практике. Его рекомендуется применять для больших и средних рек при оценочных расчетах, т. е. когда решается вопрос о возможности сброса сточных вод в реку.

Уравнение (6.7) в условиях стационарной линейной задачи для определения концентрации максимально загрязненной струи имеет вид

$$C_{\max} = C + (C_0 - C) \exp(-\alpha \sqrt[3]{L}),$$

где  $C$  – концентрация в створе полного перемешивания, которая определяется по формуле (6.6);  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от гидравлических условий смешения:

$$\alpha = \zeta \varphi \sqrt[3]{D/Q_0},$$

где  $\zeta$  – коэффициент, учитывающий место расположения выпуска (для берегового  $\zeta = 1$ , для руслового  $\zeta = 1,5$ );  $\varphi$  – коэффициент извилистости, определяемый как отношение полной длины русла от выпуска до расчетного створа  $L$  к расстоянию между этими сечениями по прямой  $L_{\text{п}}$ ;  $D$  – коэффициент турбулентной диффузии.

Для расчета кратности разбавления на заданном расстоянии используют формулу (6.2), коэффициент смешения  $\gamma$  вычисляют по следующей формуле:

$$\gamma = \frac{1 - \exp(-\alpha \sqrt[3]{L})}{1 + (Q_{\text{в}}/Q_0) \exp(-\alpha \sqrt[3]{L})}.$$

Коэффициент турбулентной диффузии определяют по формуле А. В. Караушева:

$$D = \frac{gHV_x}{(MC_{\text{Ш}})},$$

или по формуле В. М. Маккавеева:

$$D = \frac{gHV_{\text{н}}}{(2m_{\text{Б}}C_{\text{Ш}})},$$

где  $H$  – средняя глубина;  $V_x$  – средняя скорость;  $C_{\text{Ш}}$  – коэффициент Шези;  $M$  – функция коэффициента Шези;  $m_{\text{Б}}$  – коэффициент Буссинеска (для воды  $m_{\text{Б}} = 22,3$ ).

Коэффициент турбулентной диффузии для равнинных рек может быть определен по формуле М. В. Потапова:

$$D = \frac{V_{\text{ср}} H_{\text{ср}}}{200}.$$

**Метод А. В. Караушева** основан на решении уравнения турбулентной диффузии (6.7) методом конечных разностей для плоской задачи. Для установившегося потока уравнение (6.7) в форме конечных разностей будет иметь вид

$$\frac{\Delta_x C}{\Delta x} = \frac{gH}{MC_{\text{Ш}}} \cdot \frac{\Delta_y^2 C}{\Delta y^2}.$$

Согласно схеме (рис. 6.2) это уравнение представляют в виде

$$C_{k,m} - C_{k,m-1} = \frac{gH\Delta x}{MC_{\text{III}}\Delta y^2} \cdot (C_{k+1,m-1} + C_{k-1,m-1} + 2C_{k,m-1}),$$

где

$$\frac{gH\Delta x}{MC_{\text{III}}\Delta y^2} = \frac{1}{2}.$$

Получим концентрацию вещества в клетке  $(k, m)$ , равную среднему арифметическому из концентрации вещества в соприкасающихся с ней клетках, расположенных в предыдущем сечении:

$$C_{k,m} = (C_{k+1,m-1} + C_{k-1,m-1}) \cdot \frac{1}{2}.$$

Указанная зависимость требует, чтобы область потока была разбита на сетку из равных клеток размером каждая  $\Delta x \Delta y$ , а размеры клеток связаны между собой зависимостью

$$\Delta x = \frac{MC_{\text{III}}\Delta y^2}{2gH}.$$

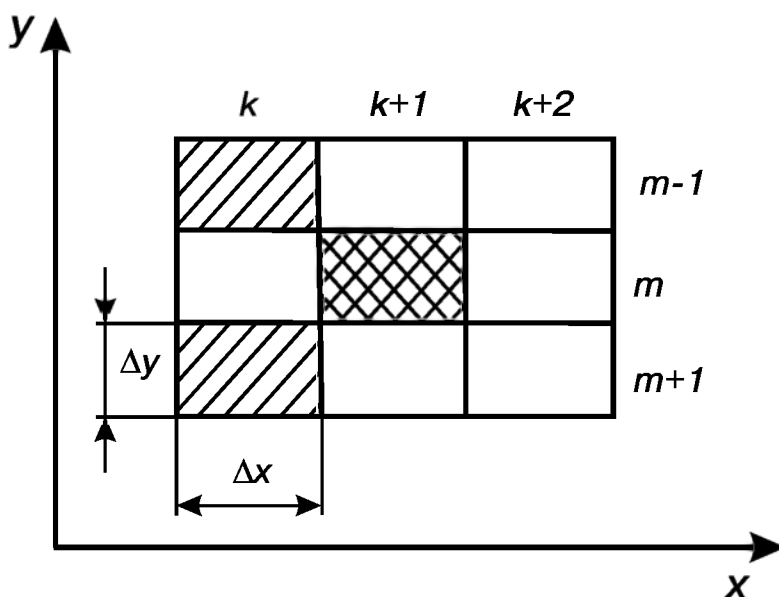


Рис. 6.2. Схема расчётных клеток к методу А. В. Караушева

В условиях рассматриваемой задачи размер начальной клетки связан с начальными условиями выпуска сточных вод:

выпуск у берега

$$\Delta y = \frac{Q_0}{V_{\Pi} H},$$

выпуск русловый

$$\Delta y = \frac{Q_0}{2V_{\Pi} H}.$$

### 6.3. Методы расчёта разбавления для водоёмов

**Метод М. А. Руффеля** основан на решении дифференциального уравнения турбулентной диффузии (6.7) для условий разбавления сточных вод в водоемах, когда основное течение вызывается ветром. Решение находилось способом конечных разностей согласно рекомендациям А. В. Караушева. Расчеты соответствуют максимальному загрязнению при ветре вдоль берега и постоянной его скорости, равной 5,5 м/с.

Начальное разбавление при выпуске в мелководной прибрежной зоне определялось по формулам:

в верхней трети глубины

$$n_{\Pi} = \frac{Q_0 + 0,0118H^2}{Q_0 + 0,00118H^2}; \quad (6.8)$$

в нижней трети глубины

$$n_{\Pi} = \frac{Q_0 + 0,0087 H^2}{Q_0 + 0,000435 H^2}. \quad (6.9)$$

Основное разбавление рассчитывают по формулам:

для выпуска у берега

$$n_0 = 1 + 0,412 \left( \frac{L}{\Delta x} \right)^{0,627 + 0,0002L/\Delta x},$$

для выпуска вдали от берега

$$n_0 = 1,85 + 2,32 \left( \frac{L}{\Delta x} \right)^{0,41 + 0,0064L/\Delta x},$$

где  $L$  – расстояние от выпуска до расчетного створа;  $\Delta x$  – расстояние между расчетными сечениями: для выпуска у берега  $\Delta x = 6,53H^{1,167}$ , для выпуска вдали от берега  $\Delta x = 4,41H^{1,167}$ .

Основное разбавление  $n_0$  и полное  $n$  можно определить по специальным номограммам при известных  $L$ ,  $H$  и рассчитанному  $n_n$  по формулам (6.8), (6.9).

**Метод Н. Н. Лапшева**, предложенный в расчете разбавления, автором применен для рассеивающих и сосредоточенных выпусков при скорости истечения сточных вод  $V_0 = 2$  м/с, расположении выпуска от берега и относительной глубине в месте выпуска  $H/d_0 > 30$  ( $d_0$  – диаметр выпуска).

Наименьшее разбавление, наблюдающееся на расстоянии  $L$  от места выпуска с учетом начального разбавления, находят по формуле

$$n = A \left( \frac{0,2L}{d_0} \right) PS,$$

где  $A$  – параметр, определяющий изменение разбавления;  $P$  – параметр, учитывающий проточность водоема и нагрузку сточных вод для него;  $S$  – параметр, определяемый относительной глубиной водоема.

При сосредоточенном выпуске  $A = 1$ , при рассеивающем

$$A = 0,74 \left( \frac{L}{l_1} + 2,1 \right)^{-0,4},$$

где  $l_1$  – расстояние между выпусками. Параметр  $P$  для случая, когда движение воды в водоеме определяется стоком, находят по формуле

$$P = \frac{L_b W_0}{1,5 \cdot 10^{-5} \beta_6 \omega_0 + L W_0},$$

где  $L_b$  – длина водоема от места выпуска в направлении стокового течения;  $\beta_6$  – период обмена воды в водоеме;  $\omega_0$  – суммарная площадь выпускных отверстий;  $W_0$  – годовой объем сбрасываемых вод.

В водоемах, когда течение определяется ветром или известны скорости стоковых течений,

$$P = \frac{V_{\Pi}}{1,5 \cdot 10^{-5} V_0 + V_{\Pi}},$$

где  $V_{\Pi}$  – скорость течения;  $V_0$  – скорость на выпуске.

Параметр  $S$  в зависимости от глубины в районе выпуска рассчитывают по формуле

$$S = 0,875 + \frac{0,325H}{360 + (V_{\text{п}}/V_0) \cdot 10^5}.$$

Параметр  $S$  всегда меньше или равен единице. Если же по расчету его значение получается большим, то величину  $S$  принимают равной единице.

#### **6.4. Условия сброса сточных вод**

Условия выпуска коммунальных и промышленных сточных вод для рек, озёр и водохранилищ регламентированы и должны удовлетворять следующим требованиям:

промышленные и бытовые стоки не должны увеличивать концентрацию взвешенных веществ в воде более чем на 0,25 мг/л для водных объектов 1-й и 3-й категорий и на 0,75 мг/л для 2-й и 4-й категорий. Запрещаются к спуску взвеси со скоростью выпадения в осадок более 0,2 мм/с для водохранилищ и более 0,4 мм/с для проточных водоёмов. На их поверхности не должны обнаруживаться плёнки нефтепродуктов и других примесей;

вода не должна приобретать от стоков запахи, привкусы и окраску сверх допустимой интенсивности и передавать их мясу рыб;

в результате спуска горячих стоков температура воды не должна превышать естественную температуру воды самого жаркого месяца года более чем на 3 °С;

содержание растворённого кислорода в водоёмах 1-й и 2-й категорий должно быть не ниже 4 мг/л, для водоёмов 3-й и 4-й категорий – не ниже 6 мг/л. Биохимическая потребность в кислороде как показатель загрязнения органическими загрязнителями не должна превышать 3 мг/л для водоёмов 1, 3 и 4-й категорий и 6 мг/л для водоёмов 2-й категории;

показатель pH воды для водоёмов всех категорий должен находиться в пределах 6,5–8,5;

для водоёмов 1-й категории содержание минеральных солей не должно превышать 1000 мг/л, в том числе 350 мг/л для хлоридов и 500 мг/л для сульфатов;

в водоёмах 1-й и 2-й категорий не должно содержаться болезнетворных микроорганизмов;

содержание токсичных веществ определяют предельно допустимыми концентрациями (ПДК) отдельно для водоёмов санитарно-бытового назначения (1-й и 2-й категорий) и для рыбохозяйственных водоёмов (3-й и 4-й категорий). Правилами установлены нормы ПДК приблизительно для 500 вредных веществ.

Состав воды в водоёмах санитарно-бытового назначения должен удовлетворять этим требованиям на расстоянии не менее 1 км от пунктов водопользования, а для рыбохозяйственных водоёмов – не далее чем в 500 м от места выпуска сточных вод.

Если сточные воды содержат несколько загрязняющих веществ, нормирование их содержания производится в соответствии с соотношением

$$\frac{C_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{C_2}{\text{ПДК}_2} + \dots + \frac{C_n}{\text{ПДК}_n} \leq 1,$$

где  $C_1, C_2, \dots, C_n$  – концентрации вредных веществ в одном и том же месте;  $\text{ПДК}_1, \text{ПДК}_2, \dots, \text{ПДК}_n$  – максимальные разовые предельно допустимые концентрации вредных веществ.

Запрещается сбрасывать в водоёмы сточные воды, если можно использовать более рациональную технологию повторного и оборотного водоснабжения; нельзя сбрасывать сточные воды с содержанием ценных отходов, которые можно утилизировать, и с содержанием веществ, на которые не установлены ПДК.

Контроль за состоянием сточных вод на разных ступенях очистки и перед их выпуском обязателен и должен производиться путём лабораторного исследования проб воды.

## 6.5. Расчёт ПДС для проточных водоёмов

*Предельно допустимый сброс (ПДС)* – такое максимальное количество загрязняющего вещества, которое можно сбросить в водоем, не превышая ПДК загрязняющего вещества в месте водопользования с учетом разбавления.

Величины ПДС определяют для всех категорий водопользователей как произведение максимального часового расхода сточных вод  $q$  ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) на допустимую концентрацию загрязняющего вещества  $C_{\text{ПДС}}$  ( $\text{г}/\text{м}^3$ ). Максимальный часовой расход определяется по специальным методикам.

При расчете условий сброса сточных вод сначала определяют значение  $C_{\text{ПДС}}$ , обеспечивающее нормативное качество воды в контрольных сбросах, а затем находят ПДС согласно уравнению

$$\text{ПДС} = qC_{\text{ПДС}}.$$

Следует иметь в виду, что сброс массы вещества, соответствующей ПДС, должен быть увязан с расходом сточной воды, так как уменьшение расхода при сохранении величины ПДС приводит к концентрации вещества в водном объекте, превышающей ПДК.

Если фоновая концентрация загрязняющего вещества в водном объекте превышает ПДК, то  $C_{\text{ПДС}}$  согласовывается в каждом конкретном случае с инспекционными органами.

Основное расчетное уравнение для определения  $C_{\text{ПДС}}$  без учета неконсервативности вещества имеет вид

$$C_{\text{ПДС}} = n(C_{\text{ПДК}} - C_{\text{Ф}}) + C_{\text{Ф}},$$

где  $C_{\text{ПДС}}$  – предельно допустимая концентрация загрязняющего вещества в воде водотока, г/м<sup>3</sup>;  $C_{\text{Ф}}$  – фоновая концентрация загрязняющего вещества, определяемая выше водозабора предприятия, г/м<sup>3</sup>;  $n$  – кратность общего разбавления сточных вод в водотоке, равная произведению кратности начального разбавления  $n_{\text{н}}$  на кратность основного разбавления  $n_0$ , т. е.

$$n = n_{\text{н}}n_0.$$

С учетом неконсервативности загрязняющего вещества уравнение имеет вид

$$C_{\text{ПДС}} = n(C_{\text{ПДК}}e^{kt} - C_{\text{Ф}}) + C_{\text{Ф}}, \quad (6.10)$$

где  $k$  – коэффициент неконсервативности, 1/сут;  $t$  – время пробегания от места выпуска сточных вод до расчетного сбора, сут.

Значения коэффициента неконсервативности принимаются по натурным наблюдениям или по справочным данным и пересчитываются в зависимости от температуры и скорости истечения реки. При установлении ПДС по параметру биохимического поглощения кислорода (БПК) расчетное уравнение имеет вид

$$C_{\text{ПДС}} = n[(C_{\text{ПДК}} - C_{\text{СМ}}) \cdot \exp(k_0 t) - C_{\text{Ф}}] + C_{\text{Ф}},$$



где  $k_0$  – усредненное значение коэффициента неконсервативности органических веществ, обуславливающих БПК<sub>полн</sub> фона и сточных вод;  $C_{см}$  – полное биохимическое поглощение кислорода (БПК<sub>полн</sub>), обусловленное метаболитами и органическими веществами, смываемыми в водосток атмосферными осадками с площади водосбора на последнем участке пути перед контрольным створом длиной 0,5 суточного пробега. Величину  $C_{см}$  принимают для горных рек равной 0,6–0,8 г/м<sup>3</sup>, для равнинных рек, протекающих по территории, почва которой не слишком богата органическими веществами, – 1,7–2 г/м<sup>3</sup>; для рек болотного питания или протекающих по территории, с которой смывается повышенное количество органических веществ, – 2,3–2,5 г/м<sup>3</sup>. Если расстояние от выпуска сточных вод до контрольного створа меньше 0,5 суточного пробега, то величину  $C_{см}$  принимают примерно равной нулю.

Кратность начального разбавления  $n_n$  учитывают при выпуске сточных вод в водостоки для напорных сосредоточенных и рассеивающих выпусков в водоток при соотношении скоростей реки  $V_p$  и выпуска  $V_{ст}$

$$V_{ст} \geq 4V_p$$

при абсолютных скоростях истечения струи из выпуска, больших 2 м/с. При меньших скоростях расчет начального разбавления не производится.

Кратность основного разбавления  $n$  определяют по методу Фролова – Родзиллера (см. параграф 6.2).

## 6.6. Расчёт ПДС для водохранилищ и озёр

Величины ПДС для выпусков сточных вод в водохранилища и озера определяют в соответствии с приведенными выше расчетными уравнениями параграфа 6.2, с учётом специфики гидродинамического и биохимического состояния данных водоемов.

Если расстояние от выпуска сточных вод до контрольного створа меньше 0,5 суточного пробега, то  $C_{см}$  принимают равным нулю. При наличии в водоеме устойчивых ветровых течений для расчета общего разбавления может быть использован метод Руффеля. В расчетах по этому методу используются два случая:

выпуск в мелководную часть или в верхнюю треть глубины водоема, где загрязненная струя распространяется вдоль берега под дей-

ствием прямого поверхностного течения, имеющего одинаковое с ветром направление;

выпуск в нижнюю треть глубины водоема (загрязненная струя распространяется к береговой полосе против выпуска под воздействием данного компенсационного течения, обратного направлению ветра).

Этот метод имеет следующие ограничения: глубина зоны смешения не должна превышать 10 м; расстояние от выпуска до контрольного створа вдоль берега в первом случае не превышает 20 км; расстояние от выхода сточных вод до берега против выпуска во втором случае не превышает 0,5 км.

Кратность общего разбавления определяют из уравнения (6.10). Кратность начального разбавления рассчитывают следующим образом: для мелководья

$$n_n = \frac{q + 2,15 \cdot 10^{-3} V H_{\text{ср}}^2}{q + 2,15 \cdot 10^{-4} V H_{\text{ср}}^2},$$

где  $q$  – расход сточных вод выпуска, м<sup>3</sup>/с;  $V$  – скорость ветра над водой в месте выпуска, м/с;  $H_{\text{ср}}$  – средняя глубина водоема вблизи выпуска, которую принимают 3–4 м на участке 100 м, 5–6 м – на участке 150 м, 7–8 м – на участке 200 м, 9–10 м – на участке 250 м;

при выпуске в нижнюю треть глубины

$$n_n = \frac{q + 1,58 \cdot 10^{-3} V H_{1\text{ср}}^2}{q + 7,3 \cdot 10^{-4} V H_{2\text{ср}}^2}.$$

Кратность основного разбавления рассчитывают при выпуске в мелководье или в верхнюю часть глубины по методу М. А. Руффеля (см. параграф 6.3).

Необходимую степень очистки сточных вод по каждому загрязняющему веществу производят по лимитирующему признаку вредности с учетом условия

$$\frac{C_1}{C_{\text{ПДС}_1}} + \frac{C_2}{C_{\text{ПДС}_2}} + \dots + \frac{C_i}{C_{\text{ПДС}_i}} \leq 1 \quad (6.11)$$

и определяют как

$$\eta = \frac{q C_i - \text{ПДС}}{q C_i}.$$

В процессе расчетов по каждому лимитирующему признаку вредности при превышении соотношения (6.11) необходимо решать, какое из превышающих загрязнений нужно удалять в первую очередь.

## **7. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ УЩЕРБА ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ВРЕДНЫМИ ВЫБРОСАМИ**

### **7.1. Выбор критерия экологической эффективности**

Комплекс природоохранных мероприятий должен обеспечить соблюдение нормативных требований к качеству окружающей среды, отвечающих интересам охраны здоровья людей и окружающей природы, с учетом перспективных изменений, обусловленных развитием производства, а также получение максимального народнохозяйственного экономического эффекта от улучшения состояния окружающей среды, сбережения и оптимального использования природных ресурсов.

Достижение указанных целей оценивается с помощью показателей социальных и экономических результатов природоохранных мероприятий на экологическом, социально-экономическом, медико-социальном и экономическом уровнях. Эффективность природоохранных мероприятий на экономическом уровне заключается в экономии или предотвращении потерь природных ресурсов, общественного труда в производственной и непроизводственной сферах народного хозяйства, а также в сфере личного потребления, что достигается благодаря осуществлению природоохранных мероприятий.

Экономическое обеспечение природоохранных мероприятий производится путем сопоставления экономических результатов с затратами, необходимыми для их осуществления, с помощью показателей общей и сравнительной эффективности природоохранных затрат и чистого экономического эффекта природоохранных мероприятий.

Существуют различные методики и подходы к определению экономического обеспечения природоохранных мероприятий: эконо-

мическая оценка природных ресурсов, экономическая эффективность природопользования, оценка экологического воздействия и ущерба, оценка эффективности природоохранных мероприятий и т. д.

Рассмотрим общий подход к оценке природных благ и экономической оценке природопользования. Для определения ценности природы важной является концепция «готовность платить», что иллюстрирует рис. 7.1. В точке  $P_1$  пересекаются кривые  $DD_1$  и  $SS_1$ , что соответствует покупке товара  $P$  в количестве  $Q$ . Потребитель платит за товар стоимость  $P \cdot Q$ . Для оценки природных благ важен показатель  $\Delta DP_1P$ , отражающий дополнительную величину, называемую *излишком потребителя*. Таким образом, стоимость определенного экологического блага определяется путем сложения рыночной стоимости (область  $OPP_1Q$ ) и дополнительной выгоды (область  $DP_1P$ ).

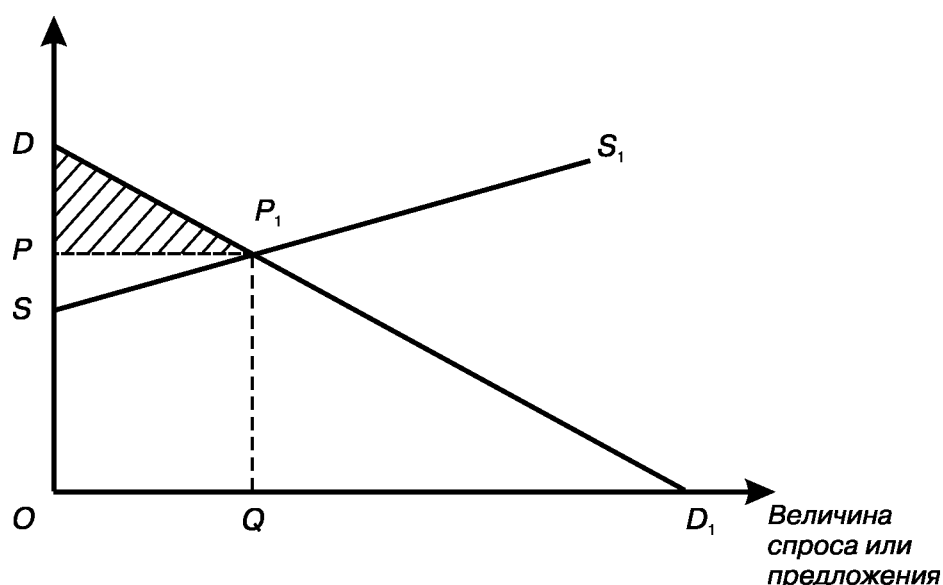


Рис. 7.1. Спрос, предложение и цена:  
 $DD_1$  — линия спроса;  $SS_1$  — линия предложения

Перспективной с точки зрения комплексности подхода к оценке природы и попытке учесть не только ее прямые ресурсные функции, природные услуги является концепция общей экономической ценности (стоимости) (ОЭЦ), которая представлена суммой четырех показателей:

$$\begin{aligned} \text{ОЭЦ} &= \text{стоимость использования} + \text{стоимость неиспользования} = \\ &= \text{стоимость использования прямая} + \text{стоимость использования косвенная} + \\ &\quad + \text{возможная стоимость} + \text{стоимость существования}. \end{aligned}$$

На рис. 7.2 показана общая структура агрегированного показателя ОЭЦ для лесных ресурсов.

При решении экономических задач общим правилом является превышение потенциальной выгоды ( $B$ ) над затратами ( $C$ ):

$$B - C > 0.$$

С учетом дисконтирования при соизмерении затрат и выгод во времени современная стоимость

$$PV = \frac{B_t}{(1+r)^t},$$

где  $P$  – стоимость единицы товара;  $V$  – количество конечной продукции;  $B_t$  – современная выгода;  $r$  – коэффициент дисконтирования;  $t$  – время.

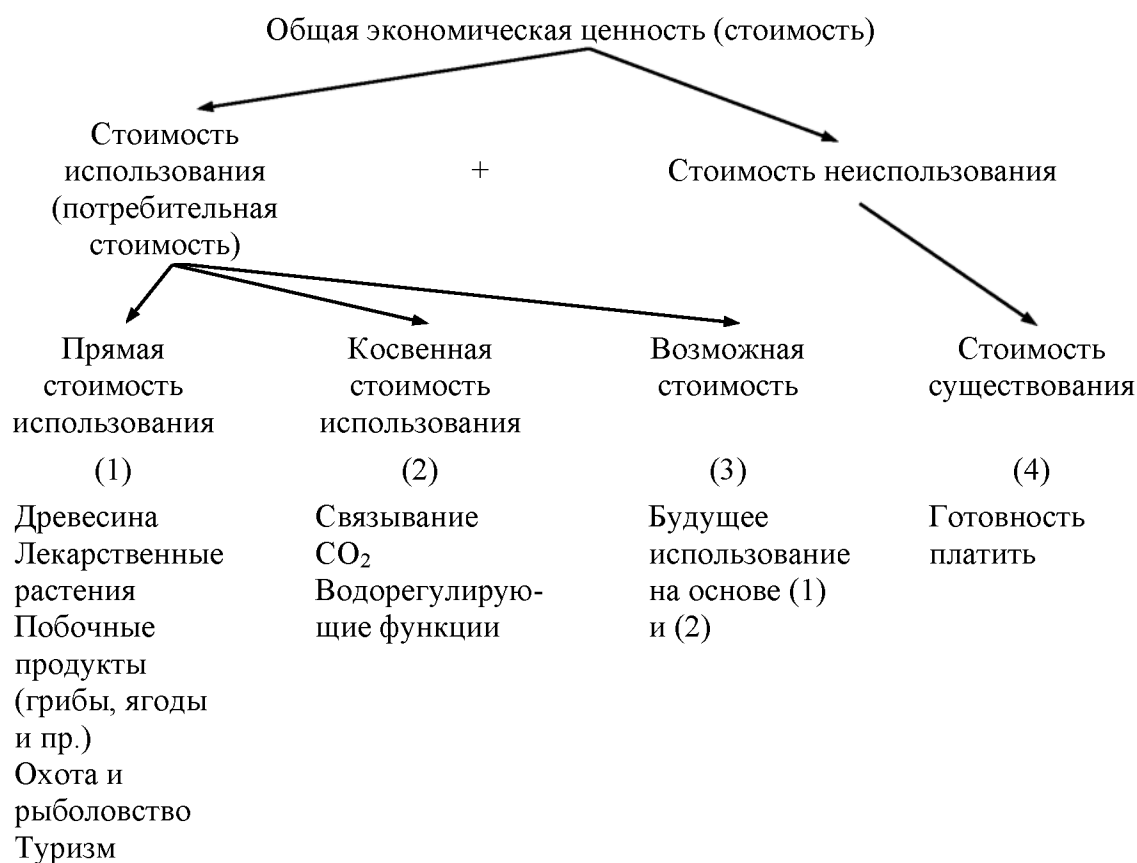


Рис. 7.2. Структура показателя ОЭЦ для лесных ресурсов

Тогда чистая (приведенная) текущая стоимость ( $NPV$ ), часто используемая для измерения эффективности проектов и программ, может быть определена как

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t}, \quad (7.1)$$

где  $C_t$  – современные затраты.

При выделении отдельной экологической составляющей в виде суммы экологических издержек и экологических выгод ( $E_t$ ), которая может быть положительной (большой природоохранной эффект) или отрицательной (значительный экологический ущерб), формула (7.1) преобразуется:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t \pm E_t}{(1+r)^t}.$$

Для определения приемлемости проекта или программы используют два других критерия: внутреннюю норму окупаемости ( $IRR$ ), величина которой эквивалентна дисконтной ставке ( $r$ ), при которой текущее значение выгод будет равно величине затрат по формуле (7.1)

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} = 0,$$

и соотношение выгоды/затраты ( $BCR$ ) – производная от формулы (7.1):

$$NPV = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}.$$

При  $BCR > 1$  дисконтированные выгоды больше дисконтированных затрат, что говорит о выгодности предполагаемого проекта.

В экономической литературе имеет место смешение понятий затрат, выгод, прибыли, эффекта, эффективности, их неправильные расчеты, недоучет фактора времени, что зачастую приводит к принятию неверных экономических решений.

Не являясь непосредственным источником средств материального производства, издержки предотвращения загрязнения окружающей среды отвлекают значительную часть трудовых и финансовых ресур-

сов, снижают темпы экономического роста, увеличивают себестоимость продукции. Это вызывает необходимость поиска разумных пропорций при определении затрат на природоохранные мероприятия. Некоторые исследователи считают, что с экономической точки зрения оптимальным соотношением между издержками предотвращения и загрязнения является минимум их суммы (рис. 7.3). Однако экономический оптимум на современном этапе развития экологических знаний не является свидетельством нецелесообразности снижения уровня загрязнения ниже точки  $K$ . Как уже отмечалось выше, необходимо руководствоваться также нормативными требованиями.

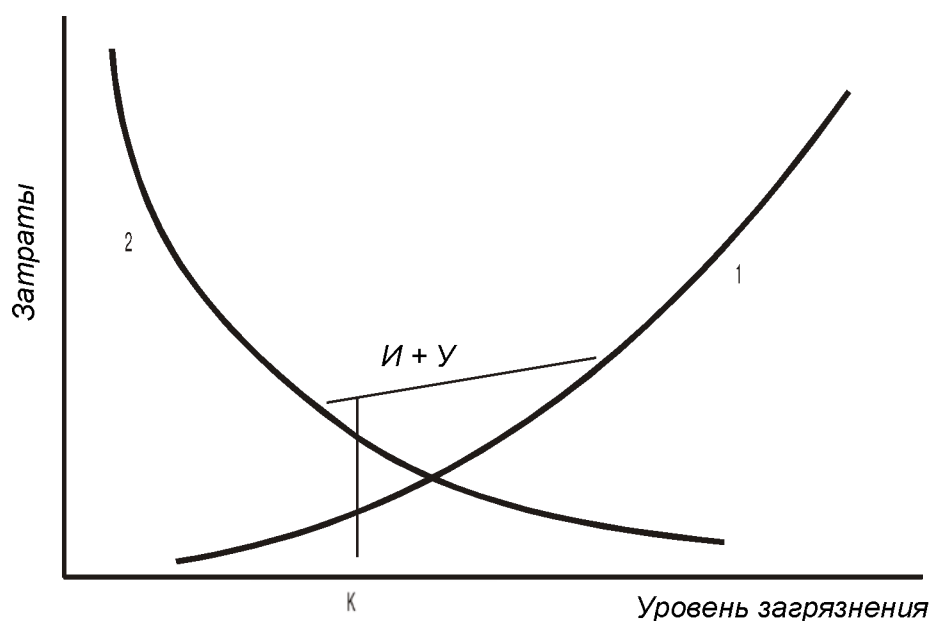


Рис. 7.3. К поиску оптимального соотношения между издержками загрязнения и их предотвращения: 1 – кривая экономического ущерба; 2 – изменение издержек предотвращения ущерба; И – издержки; У – ущерб; К – уровень загрязнения, соответствующий  $(И + У)_{\min}$

Иногда предлагается рассчитывать экономический ущерб от загрязнения атмосферы на основе данных о локальных ущербах в зоне загрязнения, под которой понимают часть территории с определенным уровнем загрязнения, по формуле

$$Y = \sum_{i=1}^4 Y_{zi} R_i + \sum_{i=1}^4 Y_{ki} R_i + \sum_{i=1}^4 Y_{ci} S_i + \sum_{i=1}^4 Y_{\text{ш}} \Phi_i ,$$

где  $Y_{zi}$  – удельный ущерб здравоохранению в каждой зоне;  $R_i$  – численность населения;  $Y_{ki}$  – удельный ущерб коммунальному хозяйству;  $Y_{ci}$  – удельный ущерб сельскому и лесному хозяйству;  $S_i$  – площадь



сельскохозяйственных и лесных угодий;  $Y_{\text{пи}}$  – удельный ущерб промышленности;  $\Phi_i$  – стоимость основных фондов.

Некоторые авторы считают, что единой мерой при оценке экономического ущерба должно выступить количество рабочего времени или качество труда, что является не очень внятным определением по отношению к загрязнению окружающей среды. Естественно, экономическая оценка экологических функций, природных объектов – дело чрезвычайно сложное и порой невозможное в сложившейся в современной России ситуации. Однако экономический, социологический, статистический аппараты применения методов оценки экологических факторов постоянно совершенствуются, позволяют оценить стоимость таких товаров, которые раньше вообще не имели цены (или она была занижена). Средства (любого рода затраты, инвестиции) всегда и при любой экономической системе дефицитны, и поэтому необходимо делать выбор между различными вариантами решений. В экономике механизмом такого выбора выступает сопоставление затрат и выгод (результатов) в денежном выражении при определении экономической эффективности проекта.

Оценка эффективности природоохранных мероприятий должна способствовать уточнению состава и объема природоохранных мероприятий до достижения ими степени достаточности и оптимальности по экологическим и экономическим параметрам. Природоохранные мероприятия могут уменьшить ожидаемый экологический ущерб до необходимого и достаточного уровня, что выразится в стабилизации природно-техногенной системы (ПТС) «объект – окружающая среда» и сохранении ресурсного потенциала территории.

Под эффективностью природоохранных мероприятий понимают эколого-социально-экономическую прибыль (в экономических и внешнеэкономических показателях), получаемую в результате сохранения и рационального использования природных ресурсов и естественных условий.

Соответственно коэффициент эффективности природоохранных мероприятий рассчитывается по формуле

$$K_w = W_{\text{ф}} / W_{\text{п}},$$

где  $W_{\text{ф}}$  – объемы природных следствий (критериев) фактически произведенных природовосстановительных работ (численно равные объемам работ);  $W_{\text{п}}$  – объемы природных показателей (критериев), достаточных для обеспечения стабильности ПТС и сохранения ресурсного потенциала

(численно равные объемам работ). Достаточное условие эффективности природоохранных мероприятий выполняется при  $K_w > 1$ .

На рис. 7.4 показана примерная структура экономических ущербов окружающей природной среды.

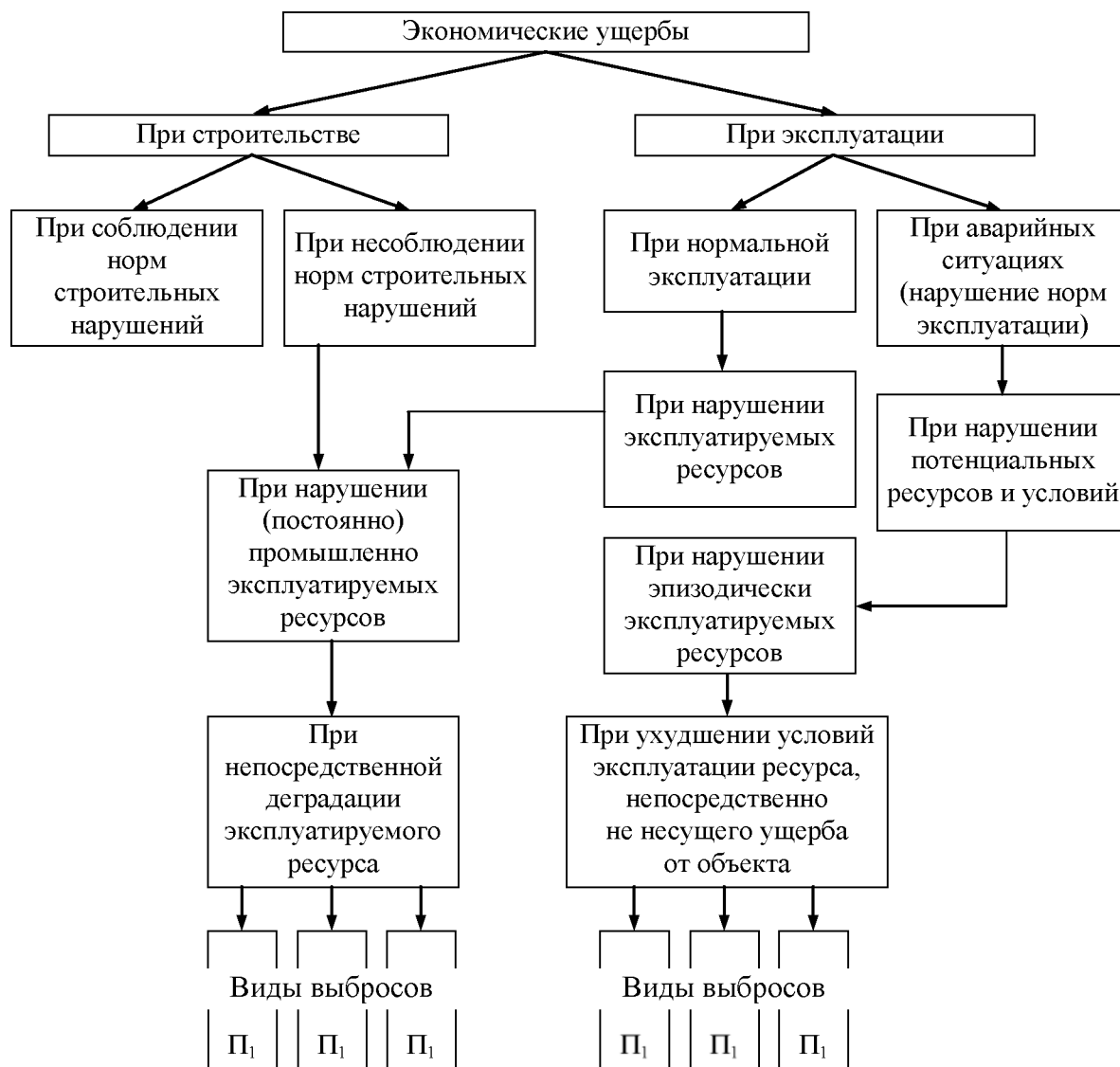


Рис. 7.4. Структура экономических ущербов окружающей природной среды

Экономический ущерб от загрязнения среды здесь определяется как комплексная величина суммы локальных ущербов, наносимых отдельным видам реципиентов в пределах загрязненной зоны:

$$Y_a = \sum Y_i.$$

Минимальное значение суммарных издержек загрязнения

$$H = Y + K \rightarrow \min$$

называют *экономическим оптимумом*. Для атмосферы условие экономического оптимума принимается, когда

$$H_{\min} < \text{ПДК}.$$

В другом случае оценка загрязнения атмосферного воздуха производится методом укрупненного счета удельного ущерба  $Y_{\text{атм}}$  (руб/год), причиняемого выбросом всякого источника, по формуле

$$Y_{\text{атм}} = \gamma \sigma f M. \quad (7.2)$$

Здесь  $\gamma$  – константа, численно равная 2,4 руб/т усл. т. после 1985 года (ее значение изменяется в зависимости от роста цен; ее величина была вычислена из предположения, что все виды атмосферных выбросов тем или иным путем попадут в воду, а стоимость чистой воды фиксирована);  $\sigma$  – показатель территории (или коэффициент относительной опасности), на которой расположен источник загрязнений, различающий зоны отдыха, больших городов или садовых участков:

$$\sigma = \frac{1}{S_{\text{ЗАЗ}}} \sum_{j=1}^k S_j \sigma_j, \quad (7.3)$$

где  $S_{\text{ЗАЗ}}$  – площадь зоны активного загрязнения (ЗАЗ)  $j$ -го типа, определяемая по специальной методике;  $k$  – общее число типов территорий, попавших в ЗАЗ;  $S_j$  – площадь  $j$ -й части ЗАЗ;  $\sigma_j$  – значение  $\sigma$  для  $j$ -го типа территории;  $f$  – коэффициент, учитывающий характер рассеивания примесей в атмосфере (связан с физическими свойствами выброса, например с дисперсностью пыли, высотой дымовой трубы и т. п.);  $M$  – приведенная масса годового выброса загрязнений из источника в атмосферу, т усл. т/г.:

$$M = \sum_{i=1}^N A_i m_i, \quad (7.4)$$

где  $N$  – общее число загрязнителей;  $A_i$  – показатель относительной активности примеси  $i$ -го вида, т/год;  $m_i$  – масса газового выброса примеси  $i$ -го вида в атмосферу, т/год.

При определении экономического ущерба ( $Y$ ) окружающей среде в денежном выражении в общепринятом определении приведенных затрат (З) на единицу продукции

$$З = C + E_n K, \quad (7.5)$$

вводя  $У$  в качестве самостоятельной составляющей, получаем

$$З = C + У + E_n K,$$

где  $C$  – себестоимость единицы продукции без учета ущерба;  $E_n$  – нормативный коэффициент эффективности;  $K$  – удельные капитальные вложения. В общем случае  $У$  включает ущерб вследствие загрязнения атмосферы, воды и почвы.

Существуют различные виды нагрузок на природную и окружающую человека среду: антропогенная, рекреационная, тепловая.

Нагрузка на природу представляет собой соотношение силы антропогенных воздействий и степени восстановительных способностей природы. Ее определяют по реакции отдельных экологических компонентов нообиогеоценозов: изменение водности, видового состава растений, животных и т. д. При определенных значениях нагрузки на природную среду изменяется характер экологического равновесия: сначала локально, затем регионально и, в конечном счете, глобально.

Одним из важнейших параметров, определяющих степень глобальности изменений (например, климата), является энергопотребление. Обычно оценку будущего энергопотребления производят по уравнению

$$E = P(GNP/P)(E/GNP),$$

где  $P$  – численность населения;  $GNP$  – валовой национальный продукт; величина  $E/GNP$  представляет собой так называемую энергоинтенсивность валового национального продукта.

Потребление первичной энергии может быть найдено по формуле

$$E(\tau) = \sum_{i=1}^5 I_i(\tau) P_i(\tau). \quad (7.6)$$

Выражение (7.6) представляет собой сумму  $I_i(\tau)$  – удельного энергопотребления на единицу населения, дающего одновременно представление о степени экономического развития общества и динамике изменения численности населения (годового естественного прироста,  $AGR$ ) для пяти характерных регионов земного шара, отличающихся по политическим, экономическим и географическим признакам (см. табл. 7.1).

Таблица 7.1

**Классификация стран по энергогеографическому признаку**

Классификационная группа (краткая характеристика)	Удельное энерго- потребление на душу населения, $I_i$ , т усл. т/(чел. год)	Годовой естественный прирост $AGR$ , % в год
1. Развитая экономика, высокое потребление энергии	8–14	<1,0
2. Европейские страны с переходной экономикой	2–8	<1,0
3. Новые развитые страны	>1,35	>1,0
4. Азиатские страны с переходной экономикой	0,25–3	1,3
5. Страны с развивающейся экономикой	<1,35	>1,5

В теории и практике инженерной экологии целесообразным является сопоставление капитальных и эксплуатационных затрат на их проведение с превентивным эффектом устранения прямых и косвенных ущербов природной и окружающей человека среде, называемых также *предотвращенным совокупным ущербом*. Поэтому

$$\sum_{i=1}^n (Z_k + Z_{эк})_i \leq \sum_{i=1}^n Y_{пр.с} ,$$

где  $Z_k$  и  $Z_{эк}$  – соответственно капитальные и эксплуатационные затраты на природоохранные мероприятия для снижения выбросов в нообиогеоценозы вредных веществ;  $Y_{пр.с}$  – предотвращенный совокупный ущерб, который обуславливает целесообразность того или иного  $i$ -го мероприятия или  $n$  их комбинаций в сопоставлении с достигаемыми или предотвращаемыми совокупными ущербами природной и окружающей человека среде в анализируемом нообиогеоценозе.

В качестве интегральной оценки последствий каждого вида воздействий производства на природу и окружающую человека среду предлагается сумма

$$Y_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Y_{экон} + \sum_{j=1}^m Y_{соц} + \sum_{k=1}^I Y_{инж} ,$$

определяющая ущерб нообиогеоценозу от нарушений и загрязнений, где  $n$ ,  $m$ ,  $I$  – числа последствий изменения компонентов в нообиогеоценозе одного вида.

Отмечается также, что стоимостное выражение ущерба в виде дополнительных затрат в народном хозяйстве в целом или на отдельном предприятии возможно только в случае, когда удастся количественно оценить последствия вредных воздействий хозяйственной деятельности человека и выразить их через стоимость работ по их предотвращению или ликвидации.

Таким образом, краткий обзор методов оценки предотвращенного ущерба показывает, что экономика экологических мероприятий в них рассматривается в общих чертах и в лучшем случае приводится методология расчета. Идеи, заложенные в этих методах, нашли свое развитие в конкретном направлении – оценке экологической эффективности пылеулавливающих систем.

За отправную точку берут уравнения (7.2)–(7.4), затем вычисляют ущерб от загрязнений атмосферы, приходящийся на единицу массы уловленной пыли:

$$y_m = \frac{y}{G_{\text{ТВ}}}, \quad (7.7)$$

где  $G_{\text{ТВ}}$  – масса уловленной пыли, т/г.

Количество отсепарированной твердой фазы  $G_{\text{ТВ}}$  определяют как разность между исходным содержанием пыли  $m_{0i}$   $i$ -го компонента и его выбросом  $m_i$ . Суммарную массу выброса вычисляют в виде равенства

$$G_{\text{ТВ}} = \sum_{i=1}^N (m_{0i} - m_i).$$

В итоге соотношение (7.7) предстает функцией

$$y_m = \frac{c \sum_{i=1}^N A_i m_i}{\sum_{i=1}^N (m_{0i} - m_i)}.$$

Экологический вред от атмосферных выбросов пропорционален проскоку. Если степень отделения  $i$ -го компонента в системе пылеулавливания оценена величиной  $\eta_i$ , то его проскок вычисляют из очевидного равенства

$$m_i = (1 - \eta_i)m_{0i}.$$

В результате оценка ущерба, причиненного вследствие вредных выбросов в атмосферу, может быть произведена с помощью выражения

$$Y_m = \frac{c \sum_{i=1}^N A_i (1 - \eta_i) m_{0i}}{\sum_{i=1}^N m_{0i} - \sum_{i=1}^N (1 - \eta_i) m_{0i}}. \quad (7.8)$$

В производственной практике следует стремиться к минимизации ущерба от загрязнения атмосферы:  $Y_m \rightarrow \min$ .

Обычно известна весовая доля  $c_i$   $i$ -го компонента в исходном потоке газа. Очевидно, что  $\sum_{i=1}^N c_i = 1$ . Если общая исходная запыленность газового потока оценена величиной  $K_0$ , то  $m_{0i} = K_0 c_i$  и функция (7.8) может быть выражена через начальные параметры очищаемого потока:

$$Y_m = \frac{c \sum_{i=1}^N A_i (1 - \eta_i) c_i}{\sum_{i=1}^N c_i - \sum_{i=1}^N (1 - \eta_i) c_i}.$$

Введем понятие среднего приведенного показателя агрессивности примеси в виде соотношения

$$A_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i c_i.$$

Принимая, что все компоненты газового потока улавливаются в одинаковой степени ( $\eta_i = \eta_{cp}$ ), получаем

$$Y_m = \frac{c(1 - \eta_{cp}) A_{cp}}{\eta_{cp}}. \quad (7.9)$$

Как следует из полученного соотношения (7.9), в принятой постановке ущерб от атмосферных выбросов определяется в основном проскоком и показателем агрессивности примеси.

Заметим, что причиненный ущерб уменьшается пропорционально росту величины

$$E_{\text{э}} = \frac{\eta_{\text{ср}}}{(1 - \eta_{\text{ср}}) A_{\text{ср}} c}, \quad (7.10)$$

которую считают критерием экологической эффективности системы газоочистки.

Критерии относительной экологической эффективности системы газоочистки записывают в виде отношения функций (7.10), сформированных для конкурирующих вариантов, один из которых принят в качестве базового  $E_{\text{э}0}$ :

$$\theta_{\text{э}} = \frac{E_{\text{э}1}}{E_{\text{э}0}}. \quad (7.11)$$

При сопоставлении систем пылеулавливания, предназначенных для размещения на одном и том же предприятии, исходные параметры одинаковы, что позволяет представить критерий относительной экологической эффективности системы газоочистки в упрощенном виде:

$$\theta_{\text{э}} = \frac{\eta_{\text{ср}1}}{\eta_{\text{ср}0}} \cdot \frac{1 - \eta_{\text{ср}0}}{1 - \eta_{\text{ср}1}}. \quad (7.12)$$

Такой подход позволяет свести соотношение (7.11) к технологическому критерию (7.12), представляющему собой отношение сепарирующих способностей сопоставляемых вариантов систем пылеулавливания и проскоков твердой фазы.

Сходные рассуждения справедливы и для других систем газоочистки, например «мокрой». Критерии (7.10)–(7.11) при моделировании различных экологических ситуаций при этом не изменятся по существу.

Представляют также большой интерес работы, в которых на основе системного анализа рассмотрены общие вопросы математического моделирования, приведены примеры расчетов простых приближенных моделей (в одно- и двумерном приближениях) переноса и диффузии. Предприняты также попытки создания программных средств для расчета экономических показателей в экологии нефтегазовой отрасли промышленности.

В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы:



1. Для разработки экономической политики, принятия оптимальных экономических решений важно знать экономическую ценность благ и услуг.

2. В настоящее время большинство природных факторов или вообще не имеет цены, или имеет заниженную оценку, что часто приводит к принятию природоёмких антиэкологических решений.

3. Недоучет экологических параметров приводит к искажению анализа экономического развития через традиционные показатели валового национального продукта и т. п., за ростом которых может скрываться деградация окружающей среды.

4. Наиболее целесообразным в оценке экономических показателей природы и природоохранных мероприятий является комплексный подход на основе общей экономической ценности (стоимости), который наряду со стоимостью использования пытается учесть стоимость существования, базирующуюся на экономической оценке сложных природных явлений.

5. Для оценки экономической эффективности предлагаемого проекта, определения степени его приемлемости на основе механизма сопоставления затрат и выгод можно применить два подхода: использование рыночных цен для оценки воздействия на товары и услуги (изменение продуктивности, ухудшение качества жизни, альтернативная стоимость и т. д.) и оценку, основанную на использовании величины непосредственных затрат, расходов. Введение фактора дисконтирования позволяет сравнить современные стоимости с будущими.

6. Принятые методы оценки экологического ущерба и экологической эффективности носят глобальный характер и не учитывают конструктивных особенностей газоочистных систем (в частности газоочистки асфальтосмесительных установок), что не позволяет проводить экспертную оценку экологического совершенства устройств и аппаратов уже на стадии проектирования или на этапе технико-экономического и экологического обоснования предлагаемых конструктивных решений.

## **7.2. Методика оценки экоэффективности системы очистки атмосферных выбросов**

В современной социально-экономической ситуации уже невозможен устаревший подход к определению экономической эффективности. В связи с развитием рыночных отношений появились такие понятия, как «инвестиции» и «инвестиционные проекты» (в отличие

от традиционных технико-экономических обоснований, на основе которых определялись капитальные вложения, экономический эффект и т. п.), «прибыль», «инфляция», «дисконт» и т. д.

Обоснование экономической эффективности локальных объектов на основе действовавшей в нашей стране типовой методики определения эффективности капитальных вложений вызывало существенные затруднения. Использование рекомендованных типовой методикой показателей общей (абсолютной) эффективности капитальных вложений, рассчитываемых как отношение экономического эффекта к капиталовложениям в данное мероприятие, не учитывалось смысла, так как система цен в условиях командной экономики не отражала подлинную стоимость продукции. В частности, искусственно занижались цены на сырьевые и энергетические виды продукции.

При сравнении вариантов развития объектов по минимуму приведенных затрат удавалось в некоторой степени избегать недостатков, связанных с несовершенством ценообразования, поскольку цена продукции в явном виде в расчетах не учитывалась. Но компоненты приведенных затрат (капитальные вложения и текущие издержки) также рассчитывались в принятой системе цен, что не оправданно различало эффективность вложений в объекты, неодинаковые по структуре основных и оборотных фондов.

Переход к рыночной экономике потребовал новых подходов к обоснованию инвестиционных решений. В первую очередь это вызвано резким сокращением централизованных вложений и необходимостью решения проблем финансирования инвестиционных проектов. В этих условиях необходимо учитывать особенности функционирования рыночного механизма и корректировать принимаемые решения с учетом инфляции и изменения нормативно-правовой базы.

По-новому встает проблема критерия оценки экономической эффективности. В условиях создания независимых хозяйственных структур и наделения аналогичными правами государственных предприятий оценка экономической эффективности деятельности перестает быть только народнохозяйственной. В инвестиционном процессе могут принимать участие различные субъекты: граждане, юридические лица, организации и даже государства. Вполне понятно, что мотивы их участия в инвестиционной деятельности, интересы, которые они отстаивают, цели, которых они хотят достичь, весьма разнообразны. Их стремления могут не только совпадать, но и существенно отличаться, быть противоречивыми или конфликтными.

В утвержденных в 1994 году Правительством РФ «Методических рекомендациях по оценке инвестиционных проектов и их отбору для финансирования» сделана попытка учесть мировой опыт оценки эффективности хозяйственных решений с поправкой на реалии современной экономики России. В этих рекомендациях различаются следующие показатели эффективности инвестиционных проектов:

- показатели коммерческой (финансовой) эффективности, учитывающие финансовые последствия реализации проекта для его непосредственных участников;
- показатели бюджетной эффективности, отражающие финансовые последствия осуществления проекта для федерального, регионального или местного бюджета;
- показатели экономической эффективности (следует отличать от экоэффективности – экологической эффективности), учитывающие затраты и результаты, связанные с реализацией проекта, выходящие за пределы прямых финансовых интересов участников инвестиционного проекта и допускающие стоимостное измерение.

Здесь следует иметь в виду, что мероприятия, связанные с защитой окружающей среды, как правило, требующие больших затрат, могут и не давать экономического эффекта в традиционном понимании этого термина.

### **7.2.1. Оценка эффективности природоохранных мероприятий на основе эксплуатационных показателей газоочистной установки**

В соответствии с типовой методикой и разработанными на ее основе или близкими по качеству получаемых результатов отраслевыми методиками экономическую целесообразность осуществляемых природоохранных мероприятий применительно к пылеочистным сооружениям определяют годовым экономическим эффектом Э, рассчитанным на основе формулы (7.5).

Затраты представляют в виде суммы эксплуатационных расходов С и капитальных вложений К на природоохранные мероприятия:

$$З = С + E_n K, \quad (7.13)$$

где  $E_n$  – нормативный коэффициент;  $E_n = 0,15$ .

Функция цели как минимум приведенных затрат была сформулирована при разработке технико-экономической оценки тепломассообменной аппаратуры. При этом предотвращенный ущерб  $У_{пр}$  вычислен

в предположении, что все компоненты в технологических выбросах улавливаются в одинаковой степени. Это позволяет свести задачу к технологическим критериям при сокращении области применения результатов для сухих пылеулавливающих систем. Тем не менее развитые подходы позволяют на базе соотношений (7.2) и (7.5) предложить критерии технико-экономической оценки природоохранных мероприятий.

Прежде чем приступить к выработке критериев технико-экономической эффективности газоочистных сооружений, заметим, что величины в выражениях (7.5) и (7.13) представлены в абсолютном виде, что делает их в некоторых случаях противоречивыми. Действительно, годовой экономический эффект  $\mathcal{E}$  зависит от объема производства. Поэтому ущерб окружающей среде от высокотехнологичного многотоннажного производства может оказаться в абсолютных цифрах больше, чем от малого предприятия. Указанное противоречие снимается при переходе к относительным величинам, например вычисленным на единицу массы уловленного продукта.

Представим отдельные составляющие в выражении (7.5) через конструктивные и режимные параметры системы газоочистки. Тогда, согласно укрупненной методике оценки приведенного ущерба загрязнения атмосферы, вычисляем

$$Y_m = \frac{\gamma \sigma f \sum_{i=1}^N A_i m_i}{\sum_{i=1}^N (m_{0i} - m_i)},$$

где  $\gamma, \sigma, f$  – коэффициенты, вычисляемые по определенным правилам;  $A_i$  – показатель агрессивности;  $m_i$  – масса годового выброса  $i$ -го компонента в атмосферу с показателем агрессивности  $A_i$ , т/год;  $m_{0i}$  – масса  $i$ -го продукта, поступающего на улавливающую систему, т/год.

Выразим начальную массу  $i$ -го продукта как

$$m_{0i} = C_{0i} Q \tau. \quad (7.14)$$

Здесь  $C_{0i}$  – начальная концентрация  $i$ -го компонента в долях единицы;  $Q$  – массовая производительность установки по газу, т/ч;  $\tau$  – время работы улавливающей системы, ч/год.

Годовую массу выброса  $i$ -го компонента определяют проскоком через улавливающую систему. Пусть степень улавливания  $i$ -го компонента  $\eta$ , тогда

$$m_i = m_{0i}(1 - \eta_i), \quad (7.15)$$

следовательно, разность в формуле

$$m_{0i} - m_i = m_{0i}\eta_i \quad (7.16)$$

есть количество уловленного продукта, т/год. Поэтому с учетом (7.14)–(7.16)

$$y_m = \frac{\gamma \sigma f \sum_{i=1}^N A_i C_{0i} Q \tau (1 - \eta_i)}{\sum_{i=1}^N C_{0i} Q \tau \eta_i}.$$

После вынесения постоянных за знаки суммирования имеем

$$y_m = \frac{\gamma \sigma f \sum_{i=1}^N A_i C_{0i} (1 - \eta_i)}{\sum_{i=1}^N C_{0i} \eta_i}. \quad (7.17)$$

Таким образом, приведенный ущерб от загрязнений атмосферы оказывается пропорционален проскоку, показателю относительной агрессивности  $A_i$  и обратно пропорционален степени улавливания.

Вычислим затраты на проведение природоохранных мероприятий по зависимости (7.13) и отнесем их к единице массы уловленных продуктов. Эксплуатационные затраты  $C$  определим как сумму энергозатрат (ЭЛ), амортизационных отчислений (АМ) и стоимости потерь (ПТ). Последние пропорциональны капитальным вложениям и могут быть найдены вместе с ними путем введения корректирующего коэффициента. С учетом того что  $АМ = K \cdot НА$ ,

$$З = ЭЛ + K \cdot НА + ПТ + E_n K,$$

где НА – норма амортизационных отчислений (10 %), или

$$З = ЭЛ + ПТ + EK, \quad (7.18)$$

где  $E = E_n + НА$ .

Поскольку рассматривается оборудование, не производящее конечный продукт, ПТ могут быть исключены из анализа. Для дейст-

вующих производств показатель ПТ в этом случае должен быть заменен удельными затратами на штрафы.

$$\text{ЭЛ} = \text{Ц}_\text{э} \Delta H \cdot 10^3,$$

где  $\Delta H$  – удельный расход энергии на единицу массы газа, Дж/кг;  $\text{Ц}_\text{э}$  – цена электроэнергии, руб/Дж;  $10^3$  – коэффициент пересчета, руб/т.

Удельный расход энергии  $\Delta H$  вычислим из уравнения Бернулли, записанного для входного и выходного сечений газохода, диаметры которых полагаются одинаковыми. Пренебрегая разностью уровней сечений из-за малой плотности газа, в итоге получим

$$\Delta H = \Delta p / \rho_\text{г},$$

где  $\Delta p$  – гидравлическое сопротивление газоочистного сооружения;  $\rho_\text{г}$  – плотность газового потока, кг/м<sup>3</sup>.

Годовую массовую производительность установки по газу находят как

$$G_\text{г} = \rho_\text{г} Q \tau \cdot 10^3,$$

тогда годовое потребление энергии составит

$$\text{ЭЛ} = \text{Ц}_\text{э} \Delta p Q \tau \cdot 10^3. \quad (7.19)$$

С учетом стоимости электроэнергии затраты на единицу массы уловленного материала  $C_\text{эп}$  при использовании соотношений (7.14), (7.16), (7.19) составляют

$$C_\text{эп} = \text{Ц}_\text{э} \frac{\Delta p \cdot 10^3}{\sum_{i=1}^N C_{0i} \eta_i}. \quad (7.20)$$

После подстановки (7.20) в (7.13) с учетом (7.18) имеем

$$З = \text{Ц}_\text{э} \frac{\Delta p \cdot 10^3}{\sum_{i=1}^N C_{0i} \eta_i} + EK. \quad (7.21)$$

Капитальные вложения вычисляют калькулированием расходов на строительство газоочистных сооружений как

$$K = \frac{\Pi_{уст}}{\sum_{i=1}^N C_{0i} Q \tau \eta_i} = \frac{\Pi_{уст}}{G_{TB}}, \quad (7.22)$$

где  $\Pi_{уст}$  – цена улавливающей установки, руб.

После подстановки (7.22) в (7.21) имеем

$$3 = \Pi_{\circ} \frac{\Delta p}{\sum_{i=1}^N C_{0i} \eta_i} + \frac{E \Pi_{уст}}{\sum_{i=1}^N C_{0i} Q \tau \eta_i},$$

или

$$3 = \frac{1}{\sum_{i=1}^N C_{0i} \eta_i} \left( \Pi_{\circ} \Delta p + \frac{E \Pi_{уст}}{Q \tau} \right).$$

Тогда

$$\Xi = Y_m - 3 = \frac{1}{\sum_{i=1}^N C_{0i} \eta_i} \left( \gamma \sigma f \sum_{i=1}^N A_i C_{0i} (1 - \eta_i) - \Pi_{\circ} \Delta p - \frac{E \Pi_{уст}}{Q \tau} \right). \quad (7.23)$$

### 7.2.2. Критерий экоэффективности систем очистки атмосферных выбросов

Об одном и том же явлении (процессе, технологии) можно судить, опираясь на оценку различных параметров (конструктивных размеров, режимных характеристик и т. п.). Наиболее наглядной является критериальная оценка рассматриваемого объекта. Здесь мы основываемся на предположении, состоящем в том, что каждую отдельно взятую альтернативу можно оценить конкретным числом (значением критерия), и сравнение альтернатив сводится к сравнению соответствующих им чисел. Под критерием будем понимать значение числа, необходимое для сопоставления двух и более различных вариантов технических решений.

Предотвращенный ущерб есть разность между ущербом базового варианта (индекс 0) и нового (индекс 1). Таким образом, функция цели может быть представлена как предотвращенный ущерб, отнесенный к единице массы уловленного продукта, из соотношения (7.17) в виде

$$Y_{\text{пр}} = \gamma \sigma f \left[ \frac{\sum_{i=1}^N A_i C_{0i} (1 - \eta_{i0})}{\sum_{i=1}^N C_{0i} \eta_{i0}} - \frac{\sum_{i=1}^N A_i C_{0i} (1 - \eta_{i1})}{\sum_{i=1}^N C_{0i} \eta_{i1}} \right].$$

В производственной практике следует стремиться к увеличению значения  $Y_{\text{пр}}$  ( $Y_{\text{пр}} \rightarrow \max$ ).

При введении средних показателей  $A_{\text{ср}}$  и  $\eta_{\text{ср}}$  выражение (7.17) трансформируется в полученное ранее для пылеуловителей.

Оценка экономической эффективности природоохранных мероприятий по приведенным выше зависимостям не вызывает никаких сложностей при оценке действующих систем газоочистки. Если речь идет о модернизации установок на одной и той же территории, задача упрощается: сокращаются многие коэффициенты. Если сопоставление производится для устройств в разных районах – имеется отличие в коэффициентах  $\sigma$  и  $f$ .

Предотвращенный ущерб вычисляют вычитанием ущерба (меньшего) после усовершенствования из бывшего ранее, а затраты определяют стоимостью модернизации. Ситуация усложняется в случае сравнения разных систем газоочистки.

В понятие предотвращенного ущерба  $Y_{\text{пр}}$  уже заложены показатели установок, в частности степень сепарирования примесей. В такой постановке становится не совсем ясно, что понимать под затратами  $Z$ . Вероятно, в этом случае можно рассматривать разность затрат на сопоставляемые системы газоочистки. Затруднения, на наш взгляд, ликвидируются при переходе к относительным величинам (например, вычисление  $Y_{\text{пр}}$  на рубль затрат). Заметим, что в затраты модернизации действующих установок следует вводить штрафы за загрязнение окружающей среды.

Экономическая эффективность природоохранных мероприятий, оцениваемая соотношением (7.23), должна соответствовать условию  $\Theta \rightarrow \max$ , руб/т. Более удобным в данном случае будет предлагаемый критерий оценки эффективности природоохранных мероприятий  $\theta$ , удовлетворяющий условиям

$$\theta = \frac{\Theta}{\Theta_0} \rightarrow \max > 1, \quad (7.24)$$

где  $\Theta_0$  – экономическая эффективность базового варианта оборудования. Соотношением (7.24) удобно пользоваться в одной и той же кли-



матической зоне, где продолжительность работы оборудования существенно не отличается. Для оценки работы очистного оборудования в различных климатических зонах предлагается дополнительно учитывать фактор времени работы, используя дополнительный множитель  $\bar{\tau}$  в выражении (7.24), записывая его как

$$\theta\bar{\tau} = \theta \frac{\tau}{\tau_0} \rightarrow \max \geq 1,$$

где  $\tau_0$  – время работы базового варианта оборудования.

С учетом вышеизложенного, используя предлагаемую методику, представляется возможным уже на стадии проектирования оценить предполагаемый ущерб окружающей среде, экономическую эффективность разрабатываемого проекта, подобрать наиболее выгодный район размещения пылеочистного оборудования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ахмедов, Р. Б. Технология сжигания горючих газов и жидких топлив / Р. Б. Ахмедов, Л. М. Цирульников. Л.: Недра, 1984. 238 с.
2. Берлянд, М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 250 с.
3. Бызова, Н. Л. Экспериментальное исследование атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси / Н. Л. Бызова, Е. К. Гаргер, В. Н. Иванов. Л.: Гидрометеиздат, 1991.
4. Везеришвили, О. Ш. Энергосберегающие теплонасосные системы тепло- и хладоснабжения / О. Ш. Везеришвили, Н. В. Меладзе. М.: Изд-во МЭИ, 1994. 160 с.
5. Воликов, А. Н. Сжигание газового и жидких топлив в котлах малой мощности / А. Н. Воликов. Л.: Недра, 1989. 160 с.
6. Гладков, Н. А. Охрана природы / Н. А. Гладков, А. В. Михеев, В. М. Галушин. М.: Просвещение, 1975. 299 с.
7. Гриценко, А. И. Экология. Нефть и газ / А. И. Гриценко, Г. С. Аكوпова, В. М. Максимов. М.: Наука, 1997. 598 с.
8. Громогласов, А. А. Водоподготовка: Процессы и аппараты: учеб. пособие / А. А. Громогласов, А. С. Копылов, А. П. Пильщиков. М.: Энергоатомиздат, 1990. 272 с.
9. Зарубаев, Н. В. Охрана водных ресурсов / Н. В. Зарубаев. М.: Колос, 1979. 205 с.
10. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: справ.: в 2 ч. / под ред. С. Калверта и Г. Инглумда. М.: Металлургия, 1988. 1442 с.
11. Ивченко, В. М. Кавитационная технология / В. М. Ивченко, В. А. Кулагин, А. Ф. Немчин. Красноярск: Изд-во КГУ, 1990. 200 с.
12. Илясов, Г. А. Водоснабжение и водоотведение: учеб. пособие / Г. А. Илясов. Саратов: СГТУ, 1994.
13. Калыгин, В. Г. Промышленная экология: курс лекций / В. Г. Калыгин. М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. 240 с.

14. Караушев, А. В. Речная гидравлика / А. В. Караушев. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1969. 416 с.
15. Карташева, Н. Н. Вопросы инженерной экологии при производстве и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры / Н. Н. Карташева. М.: Изд-во МЭИ, 1993. 88 с.
16. Кормилицын, В. И. Основы экологии / В. И. Кормилицын. М.: Изд-во МЭИ, 1993. 183 с.
17. Кулагин, В. А. Методы и средства технологической обработки многокомпонентных сред с использованием эффектов кавитации: дис. ... д-ра техн. наук / В. А. Кулагин. Красноярск, 2004.
18. Кулагин, В. А. Моделирование двухфазных суперкавитационных потоков: монография / В. А. Кулагин, А. П. Вильченко, Т. А. Кулагина; под ред. В. И. Быкова. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2001. 187 с.
19. Кулагина, Т. А. Крупномасштабные гравитационные гидродинамические трубы: монография / Т. А. Кулагина. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. С. 176–193.
20. Кулагина, Т. А. Теоретические основы защиты окружающей среды: учеб. пособие / Т. А. Кулагина. 2-е изд., перераб. и доп. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003. 332 с.
21. Кулагина, Т. А. Теоретические основы защиты окружающей среды: учеб. пособие / Т. А. Кулагина, Е. П. Грищенко. Красноярск: Изд-во КГТУ, 1996. 140 с.
22. Кулагина, Т. А. Техносферная безопасность в ядерной энергетике: учеб. пособие / Т. А. Кулагина, В. А. Кулагин, А. И. Матюшенко. Красноярск: Изд-во «Гротеск», СФУ, 2014. 286 с.
23. Кулагина, Т. А. Экологическая безопасность техносферных объектов: монография / Т. А. Кулагина, О. А. Козин, А. И. Матюшенко. Красноярск: Изд-во «Гротеск», 2015. 328 с.
24. Лавров, Н. В. Процессы горения топлива и защита окружающей среды / Н. В. Лавров, Э. И. Розенфельд, Г. П. Хаустович. М.: Металлургия, 1981. 240 с.
25. Лапшев, Н. Н. Расчеты выпусков сточных вод / Н. Н. Лапшев. М.: Стройиздат, 1977.
26. Методы анализа загрязнений воздуха / Е. С. Другов, А. Б. Беликов, Г. А. Дьякова и др. М.: Химия, 1984. 384 с.
27. Назаров, Б. Г. Санитарная охрана водных объектов: учеб. пособие / Б. Г. Назаров, А. Ф. Монахов. М.: Изд-во МЭИ, 1999. 16 с.
28. Никитин, Д. П. Окружающая среда и человек / Д. П. Никитин, Ю. В. Новиков. М.: Высш. шк., 1980. 424 с.

29. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 94 с.

30. Отходы производства и потребления: энциклопедический словарь-справочник: в 2-х т. Т. 1 / Т. А. Кулагина, Г. П. Крючков, А. И. Матюшенко и др.; ред. О. Н. Русак и Т. А. Кулагина. М.: Изд-во «Маджента», 2007. 426 с.

31. Отходы производства и потребления: энциклопедический словарь-справочник: в 2-х т. Т. 2 / Т. А. Кулагина, Г. П. Крючков, А. И. Матюшенко и др.; ред. О. Н. Русак и Т. А. Кулагина. М.: Изд-во «Маджента», 2007. 466 с.

32. Очистка и рекуперация промышленных выбросов / В. Ф. Максимов, И. В. Вольф, Т. А. Винокурова и др. М.: Лесная промышленность, 1989. 416 с.

33. Пааль, Л. Л. Справочник по очистке природных и сточных вод / Л. Л. Пааль. М.: Высш. шк., 1994. 336 с.

34. Пепенко, В. В. Модели и методы для задач охраны окружающей среды / В. В. Пепенко, А. Е. Алюк. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.

35. Правила охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами. М.: Стройиздат, 1992. 130 с.

36. Прандтль, Л. Гидроаэродинамика / Л. Прандтль. М.: Изд-во иностр. лит., 1949. 520 с.

37. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: Гигиенические нормативы. М.: Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ Минздрава России, 1998. 126 с.

38. Проблемы развития безотходных производств / Б. Н. Ласкорин, Б. В. Громов, А. П. Цыганков и др. М.: Стройиздат, 1981. 207 с.

39. Промышленная экология. Техника эксплуатации очистных сооружений: метод. указания / сост. Т. А. Кулагина. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2007. 66 с.

40. СанПиН 2.1.4.559-96. Питьевая вода и водоснабжение населенных мест.

41. Скалкин, Ф. В. Энергетика и окружающая среда / Ф. В. Скалкин, А. А. Канаев, И. З. Копп. Л.: Энергоиздат, 1981. 280 с.

42. Скорер, Р. Аэродинамика окружающей среды / Р. Скорер. М.: Мир, 1980. 550 с.

43. Смирнов, В. И. Охрана окружающей среды при проектировании городов / В. И. Смирнов, В. С. Кожевников, Г. М. Гаврилов. М.: Стройиздат, 1981. 168 с.

44. Справочник по котельным установкам: Топливо. Топливо-приготовление. Топки и топочные процессы / А. Н. Алехнович, В. И. Антоновский, Д. Б. Ахмедов и др.; под общ. ред. М. И. Неуймина, Т. С. Добрякова. М.: Машиностроение, 1993. 392 с.

45. Стадницкий, Г. В. Экология: учеб. пособие для химикотехнологических вузов / Г. В. Стадницкий, А. И. Родионов. М.: Высш. шк., 1988. 272 с.

46. Техника защиты окружающей среды / Н. С. Торочешников, А. И. Родионов, Н. В. Кельцев, В. Н. Клушин. М.: Химия, 1981. 368 с.

47. Управление промышленными и особо опасными отходами: монография / Т. А. Кулагина, А. И. Матюшенко, С. В. Комонов и др.; ред. Б. Ф. Турутин. Москва – Смоленск: Изд-во «Маджента», 2010. 567 с.

48. Физика атмосферы и гидрофизика: учеб. пособие / В. А. Кулагин, Т. А. Кулагина, Б. Ф. Турутин, А. И. Матюшенко; ред. В. А. Кулагин. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. 499 с.

49. Черкинский, С. Н. Санитарные условия спуска сточных вод в водоёмы / С. Н. Черкинский. М.: Стройиздат, 1977. 188 с.

50. Шитов, Н. Ф. Определение поля концентраций примеси от промышленных источников при изменяющихся метеоусловиях: учеб. пособие / Н. Ф. Шитов, А. Б. Гарлев. М.: Изд-во МЭИ, 1999. 12 с.

51. Экология техносферы: учеб. пособие / В. В. Гутенев, Т. А. Кулагина, О. Н. Русак и др.; ред. Т. А. Кулагина. М.: Изд-во «Маджента», 2008. 468 с.

52. Энциклопедия обращения с отходами: справ. изд. / А. И. Матюшенко, Т. А. Кулагина, Г. П. Крючков, Л. Н. Горбунова; ред. А. И. Матюшенко. М.: Изд-во «Маджента», 2007. 472 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Физико-химические основы очистки газовых потоков .....</b>	<b>7</b>
1.1. Аэрозольные загрязнения.....	7
1.1.1. Движение частиц в потоке.....	13
1.1.2. Теория улавливания частиц.....	14
1.1.3. Очистка потока газа от аэрозольных частиц .....	22
1.2. Газообразные загрязняющие вещества.....	60
1.2.1. Методы очистки.....	65
1.2.2. Очистка отходящих газов от загрязняющих атмосферу газообразных компонентов и паров.....	88
<b>2. Физико-химические основы процессов очистки сточных вод .....</b>	<b>95</b>
2.1. Нормирование и контроль качества воды в водоемах .....	95
2.2. Примесные выбросы от энергетических объектов на поверхность лито- и гидросферы.....	97
2.3. Характеристика загрязнителей и физико-химические показатели качества воды.....	100
2.4. Коагуляция коллоидных примесей воды.....	106
2.5. Известкование воды.....	109
2.6. Теория осаждения взвешенных частиц.....	110
2.7. Механизм задержания взвесей слоем зернистого материала.....	113
2.8. Принципы очистки сточных вод .....	115
2.9. Механическая очистка.....	116
2.9.1. Процеживание.....	116
2.9.2. Отстаивание.....	118
2.9.3. Фильтрование.....	122
2.9.4. Центрифугирование.....	124
2.10. Физико-химические методы очистки вод.....	125
2.10.1. Флотация.....	125
2.10.2. Адсорбционная очистка .....	131
2.10.3. Ионообменная очистка.....	137
2.10.4. Экстракция.....	140
2.10.5. Обратный осмос и ультрафильтрация .....	141
2.10.6. Десорбция летучих примесей.....	143
2.10.7. Методы дезодорации .....	144
2.11. Химические и электрохимические методы очистки вод .....	145
2.11.1. Нейтрализация сточных вод.....	146
2.11.2. Очистка вод коагуляцией и флокуляцией.....	147
2.11.3. Очистка вод окислителями и восстановителями.....	151
2.11.4. Анодное окисление и катодное восстановление .....	155

2.11.5. Электрокоагуляция .....	156
2.11.6. Электрофлотация .....	157
2.11.7. Электродиализ.....	158
2.12. Термические методы очистки сточных вод .....	159
2.12.1. Концентрирование сточных вод.....	159
2.12.2. Термоокислительные методы обезвреживания жидких отходов.....	163
2.13. Биохимические методы очистки сточных вод .....	166
2.14. Проблема безотходного водопользования на ТЭС и пути ее решения .....	167

### **3. Теоретические основы защиты окружающей среды от вредных выбросов объектов энергетики и энергетических воздействий..... 171**

3.1. Взаимодействие энергоустановок с компонентами окружающей среды .....	171
3.2. Преобразование материальных ресурсов на предприятиях топливно-энергетического комплекса .....	175
3.2.1. Классификация и характеристики топлив.....	175
3.2.2. Топочные процессы и устройства.....	178
3.2.3. Продукты сгорания топлив.....	180
3.2.4. Теория образования сажи при сжигании мазута .....	190
3.2.5. Особенности горения водотопливных эмульсий .....	205
3.2.6. Технология приготовления водомазутных эмульсий .....	212
3.2.7. Основные пути снижения выбросов загрязнителей с продуктами сгорания.....	218
3.2.8. Оптимизация работы котельной .....	220
3.2.9. Снижение эмиссии загрязнителей за счет внедрения современных горелочных устройств .....	227
3.2.10. Влияние вида, качества и подготовки топлива на загрязнение воздушного бассейна .....	229
3.2.11. Очистка уходящих газов .....	234
3.2.12. Выбросы малых элементов .....	236
3.2.13. Возможности пылеулавливающего оборудования .....	240
3.3. Защита окружающей среды от энергетических воздействий.....	261

### **4. Диффузионные процессы в атмосфере и гидросфере ..... 275**

4.1. Основные понятия турбулентности .....	275
4.2. Напряжения Рейнольдса. Путь смешения. Вырождение вихрей .....	277
4.3. Приложение теории турбулентности к атмосферным процессам ..	281
4.4. Частично турбулентные движения.....	283
4.4.1. Движение воздушного пузыря в воде.....	283
4.4.2. Понятие термика.....	284

4.4.3.	Клубы дыма.....	287
4.4.4.	Напорные струи .....	288
4.4.5.	Факелы .....	291
4.5.	Атмосферная конвекция.....	292
4.6.	Общие принципы рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере .....	294
4.7.	Распространение растворов и тепла в вязких потоках.....	302
4.7.1.	Неустановившаяся диффузия .....	305
4.7.2.	Турбулентная теплопроводность .....	306
<b>5.</b>	<b>Расчет рассеивания примесей в атмосфере .....</b>	<b>307</b>
5.1.	Модель Паскуилла – Гиффорда.....	307
5.2.	Методика Института экспериментальной метеорологии (ИЭМ) ....	312
5.3.	Методика Главной геофизической обсерватории .....	313
5.4.	Расчет рассеивания вредных веществ.....	315
<b>6.</b>	<b>Разбавление примесей в гидросфере .....</b>	<b>320</b>
6.1.	Общие понятия и закономерности .....	320
6.2.	Методы расчёта разбавления для водотоков.....	323
6.3.	Методы расчёта разбавления для водоёмов .....	326
6.4.	Условия сброса сточных вод.....	328
6.5.	Расчёт ПДС для проточных водоёмов .....	329
6.6.	Расчёт ПДС для водохранилищ и озёр .....	331
<b>7.</b>	<b>Методы оценки ущерба от загрязнения атмосферы вредными выбросами.....</b>	<b>334</b>
7.1.	Выбор критерия экологической эффективности .....	334
7.2.	Методика оценки экоэффективности системы очистки атмосферных выбросов .....	347
7.2.1.	Оценка эффективности природоохранных мероприятий на основе эксплуатационных показателей газоочистной установки .....	349
7.2.2.	Критерий экоэффективности систем очистки атмосферных выбросов .....	353
	<b>Библиографический список .....</b>	<b>356</b>



Учебное издание

**Кулагина Татьяна Анатольевна**  
**Кулагина Людмила Владимировна**

# **Теоретические основы защиты окружающей среды**

Учебное пособие

Редактор Я. Н. Лысь  
Корректор В. Р. Наумова  
Компьютерная верстка И. В. Гревцовой

Подписано в печать 20.12.2017. Печать плоская  
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 22,75  
Тираж 100 экз. Заказ № 1343

Библиотечно-издательский комплекс  
Сибирского федерального университета  
660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а  
Тел. (391) 206-26-67; <http://bik.sfu-kras.ru>  
E-mail: [publishing\\_house@sfu-kras.ru](mailto:publishing_house@sfu-kras.ru)