

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Ульяновский государственный технический университет

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Курс лекций по дисциплине
«Процессы и аппараты защиты окружающей среды»

Часть 1. ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ

Составители: **И. Г. Кобзарь, В. В. Козлова**

Ульяновск
2007

УДК 504(076)

ББК 51.26

А 64

Рецензенты: заведующий кафедрой «Химия» Ульяновского государственного технического университета, доктор химических наук, профессор Е.С. Климов.

Заместитель председателя комитета по лесным ресурсам, недро- и водопользованию, кандидат биологических наук Д.В. Федоров

A64

Процессы и аппараты защиты окружающей среды: Курс лекций по дисциплине «Процессы и аппараты защиты окружающей среды»: Часть 1 / сост. И. Г. Кобзарь, В. В. Козлова. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 68 с.

Составлены в соответствии с программой дисциплины «Процессы и аппараты защиты окружающей среды»

В курсе лекций рассмотрены существующие технологии защиты атмосферы от загрязнений и показана основная экобиозащитная техника.

Курс лекций по дисциплине «Процессы и аппараты защиты окружающей среды» предназначен для студентов специальности 28020265 «Инженерная защита окружающей среды»

Курс лекций подготовлен на кафедре «Безопасность жизнедеятельности и промышленная экология».

УДК 504(076)

ББК 51.26я7

Учебное издание

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Учебное пособие

Составители: КОБЗАРЬ Иван Григорьевич

КОЗЛОВА Вита Вячеславовна,

Редактор *О. С. Якушкина*

Подписано в печать 25.12.2005. Формат 60×84/16.

Бумага типографская № 1. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 3,02.

Уч.-изд. л. 2,77. Тираж 50 экз. Заказ .

Ульяновский государственный технический университет

432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32.

Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32.

© С. И., Кобзарь И. Г., Козлова В. В., составление, 2007

© Оформление. УлГТУ, 2007

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ. Общая схема загрязнения и проблемы защиты окружающей среды.....	8
Лекция 1. Источники, виды и нормирование загрязнения атмосферы.....	8
1.1. Источники загрязнения атмосферы	8
1.2. Нормирование примесей в атмосферном воздухе.....	10
Лекция 2. Основные физико-химические свойства пылей, параметры очищаемых газов и оценка эффективности систем пылеочистки.....	13
2.1. Плотность и дисперсный состав пылей и аэрозолей.....	13
2.2. Адгезионные свойства частиц.....	15
2.3. Абразивность частиц.....	15
2.4. Смачиваемость частиц.....	16
2.5. Гигроскопичность частиц.....	16
2.6. Электрическая проводимость слоя пыли.....	16
2.7. Электрическая заряженность частиц.....	17
2.8. Способность пыли к самовозгоранию и образованию взрывоопасных смесей с воздухом.....	17
2.9. Эффективность пылеулавливания.....	17
Лекция 3. Методы и средства сухой очистки газоздушных выбросов.....	19
3.1. Классификация пылеулавливающего оборудования.....	19
3.2. Сухие механические пылеуловители.....	24
3.2.1. Гравитационные пылеуловители.....	24
3.2.2. Инерционные пылеуловители.....	26
3.2.3. Центробежные пылеуловители.....	26
3.3. Очистка газоздушных сред на фильтрах.....	30
3.3.1. Тканевые фильтры.....	31
3.3.2. Волокнистые фильтры.....	32
3.3.3. Зернистые фильтры.....	34
3.3.4. Испытание фильтров.....	35
3.4. Очистка газов на электрофильтрах.....	36
Лекция 4. Аппараты мокрой очистки газов.....	40
4.1. Полые газопромыватели.....	40
4.2. Насадочные газопромыватели.....	42
4.3. Барботажные и пенные аппараты.....	43
4.4. Газопромыватели ударно-инерционного действия.....	44
4.5. Ротоклон.....	45
4.6. Газопромыватели центробежного действия.....	46
4.7. Скоростные газопромыватели (скрубберы Вентури).....	47
4.8. Туманоуловители.....	49

Лекция 5. Мокрые методы пылеочистки с использованием	
явлений абсорбции и хемосорбции.....	52
5.1. Метод абсорбции.....	52
5.2. Метод хемосорбции.....	54
5.3. Очистка газов от продуктов окисления щелочных металлов.....	56
Лекция 6. Методы адсорбционной очистки, каталитического	
и термического обезвреживания отходящих газов.....	59
6.1. Адсорбционный метод очистки газов.....	59
6.2. Каталитический метод очистки газов.....	62
6.3. Термический метод обезвреживания газов.....	64
Список литературы.....	67

ВВЕДЕНИЕ

Общая схема загрязнения и проблемы защиты окружающей среды

Антропогенное загрязнение окружающей среды (загрязнение, обусловленное жизнедеятельностью человека) до определенного периода времени достаточно хорошо сглаживалось (компенсировалось) процессами, происходящими в биосфере. Однако в результате интенсивной деятельности человека биосфера стала постоянно изменяться (деградировать): ухудшается качество атмосферы, водоемов и почв, уничтожается фауна и флора. В результате научно-технической революции происходит значительное загрязнение окружающей среды, с которым она зачастую уже не в состоянии сама справиться. Выбросы и сбросы промышленных предприятий, энергетических систем и транспорта в атмосферу, водоемы и почву достигли таких масштабов, что в некоторых регионах земного шара, особенно в крупных промышленных центрах, уровни загрязнений окружающей среды значительно превышают допустимые санитарные нормы. Поэтому *проблема защиты окружающей среды* является одной из важных задач человечества.

На рис.1. показана общая схема загрязнения окружающей среды при эксплуатации любого промышленного предприятия.



Рис. 1. Общая схема загрязнения окружающей среды

В целях защиты окружающей среды (ЗОО) работа промышленности должна быть организована так, чтобы образующиеся отходы превращались в новые продукты. Охрана природы требует, чтобы производство совершенствовалось, а отходы утилизировались; все процессы создавались на основе малоотходной и безотходной технологии. Применение малоотходной и безотходной техноло-

гии позволит не только решить проблему ЗОС, но одновременно обеспечит высокую экономическую эффективность производства.

Безотходная технология является наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредного воздействия предприятий. Под понятием «безотходная технология» следует понимать комплекс мероприятий в технологических процессах, который на данном этапе развития общества должен включать:

1) совершенствование технологических процессов и разработку нового оборудования с меньшим уровнем выбросов и сбросов вредных веществ (ВВ) и отходов в окружающую среду;

2) замена токсичных отходов на нетоксичные;

3) обеззараживание отходов;

4) замена не утилизируемых отходов на утилизируемые;

5) применение пассивных методов защиты окружающей среды.

Пассивные методы защиты окружающей среды включают комплекс мероприятий по *ограничению* выбросов/сбросов с последующей утилизацией или захоронением отходов. К их числу относятся:

– очистка сточных вод и газовых выбросов от вредных примесей;

– захоронение токсичных и радиоактивных отходов;

– рассеивание ВВ в атмосфере;

– снижение уровней энергетического загрязнения среды обитания человека.

Важная роль в ЗОС отводится мероприятиям по *рациональному размещению* источников загрязнения, а именно:

– вынесение предприятий из крупных городов и сооружение новых в малонаселенных районах;

– расположение их с учетом топографии местности и розы ветров;

– установление зон санитарной охраны (ЗСО), санитарно-защитных зон (СЗЗ), зон наблюдения (ЗН);

– рациональная застройка городов, обеспечивающая оптимальные экологические условия для человека и зеленых насаждений.

Многолетний опыт эксплуатации различного назначения предприятий позволил выработать следующую схему экологизации «старого типа технологий» и решения проблем защиты окружающей среды:

а) для действующих предприятий:

– проводится инвентаризация источников загрязнения и анализ качества внутрипроизводственной и внешней среды;

– на основании сравнения полученных результатов анализа с нормативами делается вывод о технической и экологической безопасности предприятия для персонала и окружающей среды;

– в случае обнаружения признаков сверхнормативного воздействия производственных процессов и предприятия в целом на человека и окружающую среду разрабатывают и реализуют более эффективные мероприятия по их модернизации;

б) для проектируемых предприятий, производств:

- проводится изучение и анализ закладываемых в проект технологических режимов и особенностей производственных процессов, источников всевозможных выделений загрязняющих веществ в окружающую среду и оценка их качественных и количественных характеристик;
- разрабатывается проектная документация с оценкой воздействия отдельных процессов и предприятия в целом на окружающую среду, делается вывод о достаточности или необходимости совершенствования проектных решений по защите человека и окружающей среды от возможных негативных воздействий эксплуатации предприятия;
- по результатам этих исследований производится корректировка проектных решений;
- после пуска производства в эксплуатацию проводится проверка его экологической безопасности по схеме действующего предприятия.

Контрольные вопросы

1. Почему необходима защита окружающей среды от антропогенных загрязнений?
2. Дайте общую схему загрязнения окружающей среды.
3. Что такое малоотходная и безотходная технология?
4. Что включает в себя понятие «пассивные методы защиты окружающей среды»?

Лекция 1. Источники, виды и нормирование загрязнения атмосферы

1.1. Источники загрязнения атмосферы

Загрязнение атмосферы происходит от двух видов источников: естественных и антропогенных. Классификация источников загрязнения атмосферного воздуха показана на рис. 2.

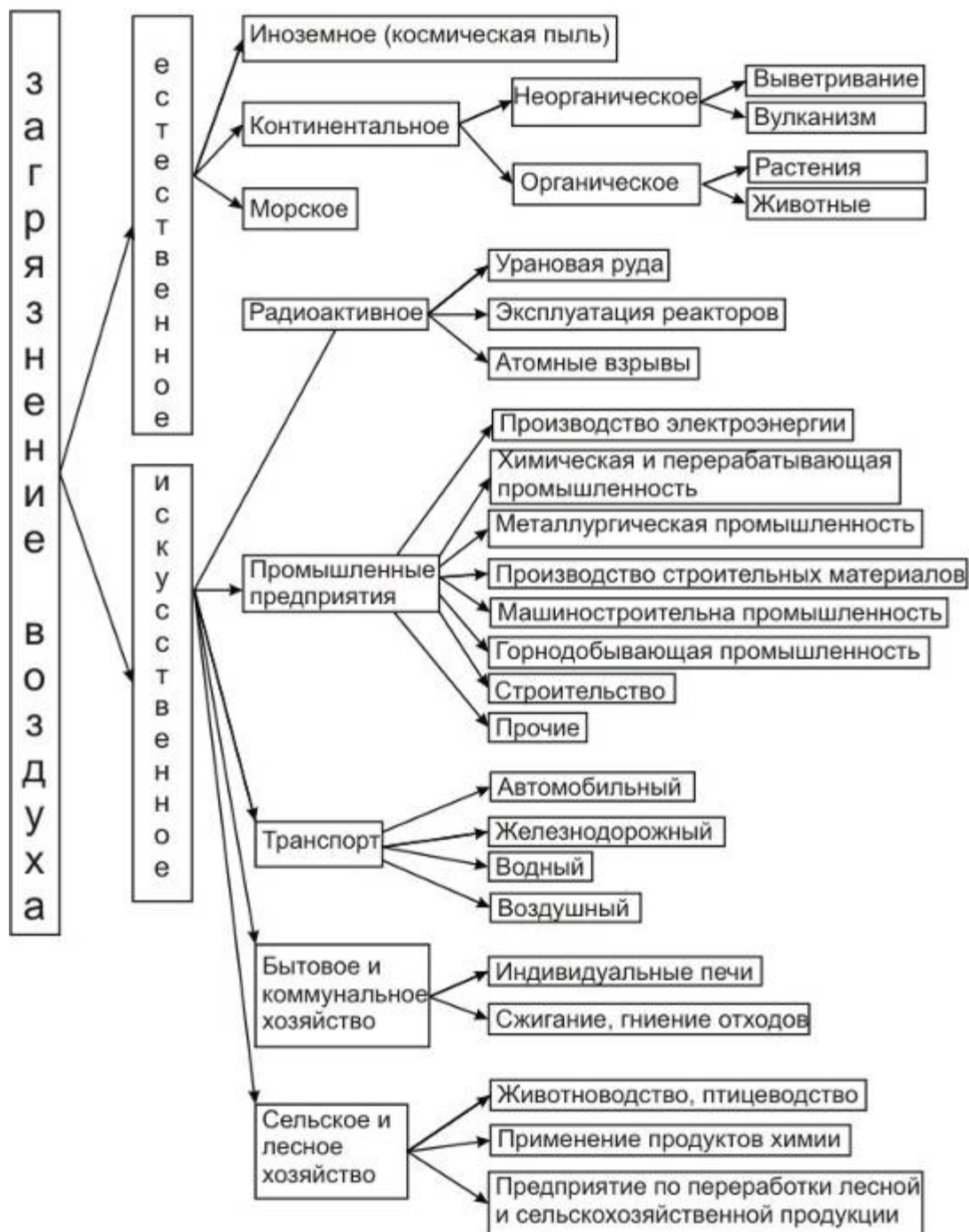


Рис. 2. Классификация источников загрязнения воздуха

К *естественным загрязнениям* относятся: пыль растительного, вулканического и космического происхождения; пыль от эрозии почвы; туман, дымы и газы от лесных и степных пожаров; испарения различных биологических сред и т. п. Уровень загрязнения атмосферы от естественных источников является *природным фоном загрязнения* и незначительно изменяется со временем.

Антропогенные загрязнения отличаются большим многообразием видов и количеством источников. Самыми распространенными источниками загрязнения атмосферы являются машиностроительные предприятия (литейные, термические, прокатные, кузнечно-прессовые, сварочные, гальванические и лакокрасочные цехи), энергетические установки, автотранспорт, ракетные двигатели, топки, котельные, сельское хозяйство, добывающие отрасли и др. Самыми распространенными веществами, загрязняющими атмосферу, являются: оксид углерода CO, двуокись углерода CO₂ и серы SO₂, оксиды азота NO_x, летучие углеводороды, пыль; различные заводы выбрасывают пары кислот, щелочей, органических растворителей, ртути и т. п.

Литейные цехи содержат в основном электродуговые и индукционные печи и другое оборудование. Это наиболее крупные источники пылегазовыделения. Например, при производстве одной тонны чугуновых отливок образуются: до 300 кг CO, 1–2 кг SO₂, до 50 кг пыли, оксиды азота, аммиак, фенолы и другие вредные химические вещества (ВХВ).

Термические цехи оборудованы нагревательными печами на жидком и газообразном топливе. Вентиляционный воздух из этих цехов содержит: пары масла, аммиака, цианистого водорода и других вредных веществ. Из дробеструйных камер после очистки металла от окалины с отходящим газом выбрасывается до 10 г/м³ твердых частиц.

Сварочные, прокатные и кузнечно-прессовые цехи при обработке металла выделяют много пыли, тумана кислот и масел, токсичные газы. При сварке образуется мелкодисперсная пыль, до 99 % состоящая из субмикронных частиц. Для удаления окалины с поверхности горячекатанной полосы применяют травление в серной и соляной кислотах. При этом среднее содержание кислоты в удаляемом воздухе достигает 3 г/м³. Газовая и плазменная резка металлов сопровождается выделением мелкодисперсной пыли, CO, NO_x.

Гальванические цехи и цехи механической обработки металлов используют при травлении растворы серной, соляной, азотной и плавиковой (HF) кислот. При воронении в воздух выделяются особо токсичные пары цианистых солей, хромовой и азотной кислот и др.

Лакокрасочные цехи и цехи по производству неметаллических изделий из стеклопластика, пластмасс, полимеров и при нанесении краски на поверхности изделий значительно загрязняют окружающую среду. В этом случае в атмосферу с выбрасываемым воздухом поступают пары растворителей, красок, SO₂, CO, H₂S, пары бензина, толуола, ксилола, пыль и др. Особенно много вредных веществ выделяется при производстве пластмасс, синтетических волокон и т.п.

Выбросы энергетических установок ТЭЦ, котельных, автотранспорта и других транспортных средств определяются видом используемого топлива и режимами работы агрегатов. При сжигании органического топлива образуется

CO₂ и водяной пар. Но в атмосферу с ними поступают и примеси топлива, продукты неполного сгорания топлива: оксид углерода, сажа, углеводороды, бенз(а)пирен C₂₀H₁₂, зола, оксиды серы, азота, свинца PbO, а также урана и тория. Например, ТЭЦ мощностью 2,5 млн. кВт за сутки расходует около 20 тыс. т угля и выбрасывает в атмосферу до 700 т SO₂ и SO₃, 200 т оксидов азота, около 200 т твердых частиц (зола, сажа, пыль).

Автотранспорт выбрасывает нетоксичные (N₂, O₂, H₂O (пары), CO₂, H₂) и токсичные вредные вещества (NO_x, C_nH_m, альдегиды, сажа, бенз(а)пирен, свинец при использовании этилированного бензина).

Вредные вещества, выделяемые в атмосферу, можно разделить на следующие группы:

- твердые частицы (пыль) и аэрозоли;
- кислые компоненты H₂S, SO₂, SO₃, CO₂, оксиды азота, галогены и их соединения;
- фосфор и его соединения;
- аммиак и другие азотные соединения;
- ртуть, другие металлы и их соединения;
- летучие растворители.

В атомной и некоторых других отраслях промышленности имеют место выбросы радиоактивных веществ.

1.2. Нормирование примесей в атмосферном воздухе

Примеси, поступающие в атмосферу, оказывают различное токсическое воздействие на организм человека (канцерогенное, мутагенное, в виде запаха и др.) Эти обстоятельства вызвали необходимость устанавливать для загрязняющих веществ санитарно-гигиенические нормативы, основной характеристикой которых является допустимая концентрация веществ.

Санитарно-гигиенические нормативы устанавливаются в интересах охраны здоровья человека и сохранения генетического фонда некоторых популяций растительного и животного мира. Гигиеническое нормирование охватывает также производственную и жилищно-бытовую сферу жизни человека.

Для каждого вредного вещества в воздухе устанавливают два нормативных значения: предельно допустимую концентрацию в воздухе рабочей зоны (ПДК_{р.з.}) и предельно допустимую концентрацию в атмосферном воздухе ближайшего населенного пункта (ПДК_{а.в.})

ПДК_{р.з.} – это концентрация вредных химических веществ(в воздухе на уровне двух метров от пола), которая при работе не более 41 часа в неделю в течение всего рабочего стажа не может вызвать заболеваний у работающих и их детей.

ПДК_{а.в.} – это предельная концентрация вредных химических веществ, которая на протяжении всей жизни человека не должна оказывать на него

вредного воздействия, включая отдаленные последствия на окружающую среду в целом.

Обычно $ПДК_{p.з.} > ПДК_{a.в.}$. На территории предприятия содержание примесей принимают равным $0,3ПДК_{p.з.}$. Трехкратное снижение нормы содержания примесей в воздухе на территории предприятия по сравнению с $ПДК_{p.з.}$ вызвано тем, что этот воздух используется для вентиляции производственных помещений (приточная вентиляция). Поэтому он должен быть более чистым.

Для воздуха населенных пунктов установлены два вида ПДК:

– максимально разовая ПДК ($ПДК_{м.р.}$) – с целью предупреждения негативных рефлекторных реакций (ощущение запаха, световой чувствительности глаз и т.п.) при кратковременном воздействии примесей;

– среднесуточная ПДК ($ПДК_{с.с.}$) – для предупреждения общетоксического, канцерогенного, мутагенного и других видов воздействия примеси на организм человека; в этом случае концентрация вредных веществ определяется в пробах, отобранных в течение 20–30 минут.

В воздухе населенных пунктов с населением более 200 тыс. человек и в курортных зонах концентрация вредных веществ с учетом рассеивания не должна превышать 80 % от $ПДК_{м.р.}$.

На практике имеет место следующее неравенство (см. табл.1):

$$ПДК_{p.з.} > ПДК_{м.р.} > ПДК_{с.с.} \quad (1)$$

Таблица 1

Вредное вещество	Рабочая зона	Атмосферный воздух	
	$ПДК_{p.з.}$	$ПДК_{м.р.}$	$ПДК_{с.с.}$
СО	20 мг/м^3	5	3
NO ₂	2	0.085	0.04

Наибольшая концентрация C любого вредного вещества в приземном слое воздуха за пределами санитарно-защитной зоны СЗЗ предприятия не должна превышать максимальной разовой предельно допустимой концентрации:

$$C \leq ПДК_{м.р.} \quad (2)$$

При одновременном присутствии в атмосфере нескольких вредных веществ, обладающих однонаправленным действием, их безразмерная суммарная концентрация должна удовлетворять условию:

$$C_1 / ПДК_1 + C_2 / ПДК_2 + \dots + C_n / ПДК_n \leq 1, \quad (3)$$

где C_1, C_2, \dots, C_n – концентрация вредных веществ в атмосфере в одной и той же точке местности, мг/м^3 ; $ПДК_1, ПДК_2, \dots, ПДК_n$ – максимальные разовые предельно допустимые концентрации вредных веществ в атмосфере, мг/м^3

Эффектом однонаправленного действия (суммации) обладает ряд вредных веществ: SO₂ и NO₂, SO₂ и H₂S, сильные минеральные кислоты (серная, соляная, азотная), озон, формальдегид и другие (более 30 наименований веществ в различной их комбинации друг с другом).

Для вредных веществ, ПДК которых не утверждены Министерством здравоохранения, определены (обычно на 3 года) *ориентировочные безопасные уровни воздействия* (ОБУВ). Таких веществ в настоящее время более 1300 наименований.

При проектировании предприятий в районах, где атмосферный воздух уже загрязнен выбросами от других, ранее построенных и действующих предприятий, необходимо нормировать их выбросы с учетом уже присутствующих в воздухе примесей. Их содержание рассматривается в качестве *фоновой концентрации* C_{ϕ} . Если имеется несколько источников выбросов вредных веществ, то требования к качеству воздуха определяются следующим образом:

- на территории предприятия

$$\sum_{i=1}^N C_i \leq 0,3 \text{ПДК}_{\text{р.з.}} - C_{\phi}. \quad (4)$$

- для воздуха населенного пункта

$$\sum_{i=1}^N C_{mi} \leq \text{ПДК}_{\text{а.в.}} - C_{\phi}, \quad (5)$$

где C_i – концентрация вредного вещества, поступающего от i -го источника; C_{mi} – наибольшая концентрация вредного вещества в атмосферном воздухе населенного пункта от i -го источника; N – число источников, через которые данное вредное вещество поступает в воздушный бассейн.

Если в атмосферном воздухе присутствуют выбросы нескольких веществ, обладающих эффектом суммации, то необходимо переходить к безразмерным концентрациям. Условия санитарных норм будут выполнены, если:

$$\sum_{i=1}^K q_i \leq 1 \quad \text{при} \quad q_i = C_i / (\text{ПДК}_i - C_{\phi i}). \quad (6)$$

Контрольные вопросы

1. Общая схема загрязнения атмосферы.
2. Охарактеризуйте основные источники загрязнения атмосферы.
3. Основы санитарно-гигиенического нормирования вредных веществ в воздухе.
4. Нормирование загрязнения воздуха рабочей зоны и населенных пунктов.
5. Учет фоновой концентрации при проектировании промышленных и гражданских объектов.

Лекция 2. Основные физико-химические свойства пылей, параметры очищаемых газов и оценка эффективности систем пылеочистки

2.1. Плотность и дисперсный состав пылей и аэрозолей

Надежность и эффективность систем газоочистки во многом зависит от физико-химических свойств пыли и от основных параметров газовых потоков, которые должны быть хорошо изучены и учтены при проектировании и эксплуатации систем газоочистки.

Важнейшей характеристикой золы и пылей является их *плотность*, кг/м³ или г/см³. Принято рассматривать *истинную*, *насыпную* и *кажущуюся плотность*.

Истинная плотность частицы представляет собой отношение массы гладкой монолитной частицы к занимаемому ею объему.

Кажущаяся плотность частиц представляет собой отношение массы частиц к занимаемому ими объему, включая поры, пустоты, неровности и т.п.

Насыпная плотность пыли, в отличие от истинной, учитывает наличие воздушных зазоров между частицами свеженасыпанной пыли. Насыпной плотностью пользуются для определения объема, который занимает пыль в бункерах в первое время до начала ее слеживания. Насыпная плотность слежавшейся пыли обычно в 1,2–1,5 раза больше, чем у свеженасыпанной.

На величину насыпной и кажущейся плотности пыли существенное влияние оказывают различные физико-химические процессы (вибрация, коагуляция, спекание, смачивание, окисление и т.д.).

Для правильного выбора пылеулавливающего аппарата необходимы, прежде всего, сведения о *дисперсном составе* пылей.

Дисперсный состав пылей определяют экспериментально. Для этого чаще всего используют приборы, называемые *импакторами*. Работа импактора основана на избирательной сепарации частиц по размерам при пропускании газа через ряд последовательно установленных сопел уменьшающегося сечения, под которыми находятся плоские осадительные пластины (подложки). Проба газа изокинетично прокачивается через прибор с постоянным расходом. На подложках импактора происходит инерционное осаждение частиц, причем средний размер их на каждой последующей подложке (ступени импактора) получается меньше, чем на предыдущей. Самые мелкие частицы (не осевшие на подложках предыдущих ступеней импактора) задерживаются абсолютным фильтром. Таким образом, анализируемые частицы оказываются рассортированными на фракции, число которых равно числу ступеней (каскадов) импактора, включая ступень абсолютного фильтра. Используют пяти-, шести- и семикаскадные импакторы.

Результаты определения дисперсного состава пыли обычно представляют в виде зависимости массовых (иногда счетных) фракций частиц от их размера. Под фракцией понимают массовые (счетные) доли частиц, содержащихся в определенном интервале размеров частиц. Распределение частиц пылей по разме-

рам могут быть различными, однако на практике они часто согласуются с *логарифмическим нормальным законом распределения Гаусса* (ЛНР). В интегральной форме это распределение описывается формулой:

$$M(d_a) = \frac{100}{\lg \sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\lg d_a} e^{-\frac{\lg^2(d_a/d_m)}{2\lg^2 \sigma}} \cdot d(\lg d_a), \quad (7)$$

где $M(d_a)$ – относительная доля частиц размером менее d_a ; d_m – медианный размер частиц, при котором доли частиц размером более и менее d_m равны; $\lg \sigma$ – среднеквадратичное отклонение в функции ЛНР.

Графики ЛНР частиц обычно строят в вероятностно-логарифмической системе координат, текущий размер частиц откладывают на оси абсцисс, а на оси ординат – относительную долю частиц с размерами меньше d_a . Шкала оси абсцисс представляет собой логарифм диаметра частиц, а шкала оси ординат строится путем вычисления каждого из значений шкалы по уравнению:

$$100 - M(d_a) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-y^2/2} dy, \quad (8)$$

где $y = \lg(d_a/d_m) / \lg \sigma$.

Цифровые значения этой функции табулированы и приводятся в сокращенном виде:

$M(d_a), \%$	y	$M(d_a), \%$	y
1	-2,326	50	0,0
5	-1,645	55	0,126
10	-1,282	60	0,253
15	-1,036	65	0,385
15,9	-1,00	70	0,524
20	-0,842	75	0,675
25	-0,675	80	0,824
30	-0,524	84,1	1,00
35	-0,384	85	1,036
40	-0,253	90	1,282
45	-0,126	95	1,645
		99	2,326

Если в этой системе координат интегральное распределение частиц по размерам описывается прямой линией, то данное распределение подчиняется ЛНР. В этом случае d_m находят как абсциссу точки графика, ордината которой равна 50 %, а $\lg \sigma = \lg d_{84,1} - \lg d_m$. Для характеристики пылей и сравнения их между собой достаточно иметь два параметра: d_m и $\lg \sigma$. Значение d_m дает средний размер частиц, а $\lg \sigma$ – степень полидисперсности пыли. В табл. 2 приведены значения d_m и $\lg \sigma$ для некоторых пылей.

Таблица 2

Технологический процесс	Вид пыли	d_m , мкм	$lg\sigma$
Заточка инструмента	Металл, абразив	38	0,214
Размол в шаровой мельнице	Цемент	20	0,468
Сушка угля в барабане	Каменный уголь	15	0,334
Экспериментальные исследования	Кварцевая пыль	3,7	0,405

По дисперсности пыли классифицированы на 5 групп:

I – очень крупнодисперсная пыль, $d_m > 140$ мкм;

II – крупнодисперсная пыль, $d_m = 40 \div 140$ мкм;

III – среднедисперсная пыль, $d_m = 10 \div 40$ мкм;

IV – мелкодисперсная пыль, $d_m = 1 \div 10$ мкм;

V – очень мелкодисперсная пыль, $d_m < 1$ мкм.

2.2. Адгезионные свойства частиц

Эти свойства частиц определяют их склонность к *слипаемости*. Повышенная слипаемость частиц может привести к частичному или полному забиванию аппаратов.

Чем меньше размер частиц пыли, тем легче они прилипают к поверхности аппарата. Пыли, у которых 60–70 % частиц имеют диаметр меньше 10 мкм, ведут себя как слипающиеся, хотя те же пыли с размером частиц более 10 мкм обладают хорошей сыпучестью.

По слипаемости пыли делятся на 4 группы:

1. Неслипающаяся (сухая шлаковая, кварцевая; сухая глина);

2. Слабослипающаяся (коксовая; магнезитовая сухая; апатитовая сухая; доменная; колошниковая летучая зола, содержащая много несгоревших продуктов; сланцевая зола);

3. Среднеслипающаяся (торфяная, влажная магнезитовая; металлическая, содержащая колчедан, оксиды свинца, цинка и олова, сухой цемент; летучая зола без недожиг; торфяная зола; сажа, сухое молоко; мука, опилки);

4. Сильнослипающаяся (цементная; выделенная из влажного воздуха; гипсовая и алебастровая; содержащая нитрофоску, двойной суперфосфат, клинкер, соли натрия; волокнистая (асбест, хлопок, шерсть)).

2.3. Абразивность частиц

Абразивность пыли характеризует интенсивность износа металла газохода и очистных устройств. Она зависит от твердости, формы, размера и плотности частиц. Абразивность учитывают при расчетах аппаратуры (выбор скорости газа, толщины стенок аппаратуры и облицовочных материалов).

2.4. Смачиваемость частиц

Смачиваемость частиц водой оказывает влияние на эффективность мокрых пылеуловителей, особенно при работе с рециркуляцией. Гладкие частицы смачиваются лучше, чем частицы с неровной поверхностью, так как последние в большей степени оказываются покрытыми абсорбированной газовой оболочкой, затрудняющей смачивание.

По характеру смачивания все частицы из твердых материалов можно разделить на три основные группы:

- 1) *гидрофильные материалы* – хорошо смачиваемые (кальций, кварц, большинство силикатов и окисленных минералов, галогениды щелочных металлов);
- 2) *гидрофобные материалы* – плохо смачиваемые (графит, уголь, сера);
- 3) *абсолютно гидрофобные* – парафин, тефлон, битумы.

2.5. Гигроскопичность частиц

Способность пыли впитывать влагу зависит от химического состава, размера, формы и степени шероховатости поверхности частиц. *Гигроскопичность* способствует их улавливанию в аппаратах мокрого типа.

2.6. Электрическая проводимость слоя пыли

Этот показатель оценивается по удельному электрическому сопротивлению слоя пыли $\rho_{\text{сл}}$, которое зависит от свойств отдельных частиц (от поверхностной и внутренней электропроводности, формы и размеров частиц), а также от структуры слоя и параметров газового потока. Оно оказывает существенное влияние на работу электрофильтров.

В зависимости от удельного электрического сопротивления пыли делятся на три группы:

- 1) *низкоомные пыли* $\rho_{\text{сл}} < 10^4$ Ом·см (при осаждении на электроде частицы пыли мгновенно разряжаются, что может привести к вторичному уносу);
- 2) *пыли с* $\rho_{\text{сл}} = 10^4 - 10^{10}$ Ом·см (эти пыли хорошо улавливаются в электрофильтре, так как разряд частиц происходит не сразу, а в течение времени, необходимого для накопления слоя);
- 3) *пыли с* $\rho_{\text{сл}} = 10^{10} - 10^{13}$ Ом·см (улавливание пылей этой группы в электрофильтрах вызывает большие трудности; частицы пыли этой группы образуют на электроде пористый изолирующий слой).

2.7. Электрическая заряженность частиц

Знак заряда частиц зависит от способа их образования, химического состава, а также от свойств веществ, с которыми они соприкасаются. Этот показатель оказывает влияние на эффективность улавливания в газоочистных аппаратах (мокрых пылеуловителях, фильтрах и др.), на взрывоопасность и адгезионные свойства частиц.

2.8. Способность пыли к самовозгоранию и образованию взрывоопасных смесей с воздухом

Горючая пыль вследствие сильноразвитой поверхности контакта частиц (порядка $1\text{ м}^2/\text{г}$) с кислородом воздуха способна к самовозгоранию и образованию взрывоопасных смесей с воздухом. Интенсивность взрыва пыли зависит от ее химических и термических свойств, от размеров и формы частиц, их концентрации в воздухе, от влагосодержания и состава газов, размеров и температуры источника воспламенения и относительного содержания инертной пыли. Способностью к воспламенению обладают некоторые пыли органических веществ, образующиеся при переработке красителей, пластмасс, волокон, а также пыли металлов: магния, алюминия и цинка.

Минимальные взрывоопасные концентрации взвешенной в воздухе пыли составляет примерно $20\text{--}500\text{ г/м}^3$, максимальные – $700\text{--}800\text{ г/м}^3$. Чем больше содержание кислорода в газовой смеси, тем вероятнее взрыв и больше его сила. При содержании кислорода менее 16 % пылевое облако не взрывается.

2.9. Эффективность пылеулавливания

Степень очистки (коэффициент полезного действия) выражается отношением количества уловленного материала к количеству материала, поступившего в газоочистительный аппарат с газовым потоком за определенный период времени. *Эффективность очистки* η определяют по формуле:

$$\eta = \frac{G'_a - G''_a}{G'_a} = \frac{V'_g c' - V''_g c''}{V'_g c'} = 1 - \frac{V''_g c''}{V'_g c'} = \frac{G'''_a}{V'_g c'}, \quad (9)$$

где G'_a , G''_a – массовый расход частиц пыли, содержащейся в газах, соответственно поступающих и выходящих из аппаратов, кг/с; V'_g , V''_g – объемный расход газов (при $0\text{ }^\circ\text{C}$ и $101,3\text{ кПа}$), соответственно, поступающих в аппарат и выходящих из аппаратов, $\text{м}^3/\text{с}$; c' , c'' – концентрация частиц в газах, соответственно, поступающих в аппарат и выходящих из аппарата, кг/м^3 ; G'''_a – количество уловленной пыли, кг/с.

Если объем в процессе очистки изменяется, например, за счет подсоса, то эффективность:

$$\eta = 1 - K_{\text{п}} c'' / c', \quad (10)$$

где $K_{\text{п}}$ – коэффициент подсоса.

Известно, что эффективность очистки для частиц пыли разных размеров неодинакова. Так как лучше улавливается крупная пыль, то коэффициент очистки газов часто определяют по *фракционной эффективности* – степени очистки газов от частиц определенного размера:

$$\eta_{\text{ф}} = [\Phi' - \Phi''(1 - \eta)] / \Phi', \quad (11)$$

где Φ' , Φ'' – содержание фракций в газах соответственно на входе и выходе аппарата, %.

Зная фракционную степень очистки газов, можно определить общую эффективность аппарата:

$$\eta = \frac{\eta_{\text{ф}_1} \Phi_1}{100} + \frac{\eta_{\text{ф}_2} \Phi_2}{100} + \dots + \frac{\eta_{\text{ф}_n} \Phi_n}{100}. \quad (12)$$

Эффективность улавливания пыли может быть выражена в виде *коэффициента проскока* частиц (степени неполноты улавливания), который представляет собой отношение концентрации частиц за аппаратом к их концентрации перед ним. Его используют, когда надо оценить конечную запыленность или сравнить относительную запыленность газов на выходе из различных аппаратов. *Коэффициент проскока* $K_{\text{пр}}$ рассчитывают по формуле:

$$K_{\text{пр}} = 1 - \eta. \quad (13)$$

Суммарную степень очистки газов η , достигаемую в нескольких последовательно установленных аппаратах, рассчитывают по формуле:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1) \cdot (1 - \eta_2) \cdot \dots \cdot (1 - \eta_n), \quad (13)$$

где η_1 , η_2 , ..., η_n – степень очистки газов от пыли соответственно в первом, втором и n-ом аппарате.

Контрольные вопросы

1. Дайте характеристику плотности и дисперсности пылей и аэрозолей.
2. Дайте характеристику явлений: адгезия, абразивность, смачиваемость и гигроскопичность частиц.
3. Характеристика явлений электрической проводимости слоя пыли и электрической заряженности частиц.
4. Эффективность улавливания пыли системами пылеочистки.

Лекция 3. Методы и средства сухой очистки газоздушных выбросов

3.1. Классификация пылеулавливающего оборудования

На рис. 3 приведена классификация основных методов и аппаратов, применяемых на практике для обезвреживания газовых выбросов и очистки различных парогазовых сред от ненужных примесей.

Классификация пылеулавливающего оборудования основана на принципиальных особенностях процесса отделения твердых частиц от газовой фазы, это:

- оборудование для улавливания пыли сухим способом, к которому относятся пылесадительные камеры, циклоны, вихревые циклоны, жалюзийные и ротационные пылеуловители, фильтры, электрофильтры;

- оборудование для улавливания пыли мокрым способом, к которому относятся скрубберы Вентури, форсуночные скрубберы, пенные аппараты и др.

Для очистки воздуха, удаляемого вентиляционными аспирационными системами от твердых и жидких примесей, применяют пылеуловители пяти классов, краткая характеристика которых приведена в табл 3.

Таблица 3

Класс пылеуловителя	Размеры улавливаемых пылевых частиц, мкм	Группа пыли по дисперсности	Эффективность пылеуловителя
I	более 0,3	V	0,8
II	более 2	IV	0,8–0,999
III	более 4	IV	0,45–0,92
IV	более 8	III	0,92–0,999
V	более 20	III	0,8–0,99
		II	0,99–0,999
		II	0,95–0,999
		I	0,999
		I	0,99

Примечание: границы эффективности пылеуловителей указаны с учетом дисперсности пыли. Первое значение эффективности относится к меньшему значению d_m ; второе – к большему.



Рис. 3. Классификация методов и аппаратов для обезвреживания газовых выбросов

3.2. Сухие механические пылеуловители

К сухим механическим пылеуловителям (рис. 4–11) относятся аппараты, в которых использованы различные механизмы осаждения: гравитационный (пылеосадительные камеры), инерционный (камеры, осаждение пыли в которых происходит в результате изменения направления движения газового потока или установления на его пути препятствия) и центробежный (одиночные, групповые и батарейные циклоны, вихревые и динамические пылеуловители). Эти аппараты отличаются простотой изготовления и эксплуатации, их достаточно широко используют в промышленности. Однако эффективность улавливания в них пыли не всегда оказывается достаточной, в связи с чем, они часто выполняют роль аппаратов предварительной очистки газов.

3.2.1. Гравитационные пылеуловители

В *пылеосадительных камерах* (рис. 4, 5) используется механизм гравитационного осаждения частиц из горизонтально направленного потока газов. Пылеосадительные камеры предназначены для улавливания крупнодисперсных частиц размером 50 мкм и больше. Для получения высокой эффективности очистки необходимо, чтобы частицы находились в пылеосадительной камере как можно больше времени. Хорошую эффективность очистки имеют камеры Говарда (рис. 5), в которых поток газа разбивается на несколько параллельных секций очистки воздуха. Однако они не получили широкого распространения из-за громоздкости и трудности их очистки. Пылеосадительные камеры обычно сооружают из кирпича, сборного железобетона и др.

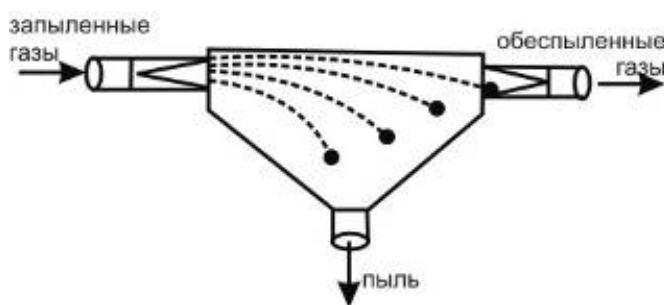


Рис. 4. Пылеосадительная камера

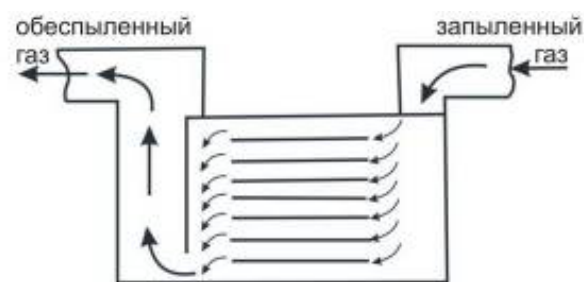


Рис. 5. Осадительная камера Говарда

В общем виде скорость осаждения шарообразных частиц под действием силы тяжести может быть определена по формуле:

$$v_a = \sqrt{4d_a(\rho_a - \rho_r)g/3\rho_r\xi_a} \quad (15)$$

где v_a – скорость осаждения частиц, м/с; d_a – диаметр частиц, м; ρ_a – плотность частиц, кг/м³; ρ_r – плотность газа, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; ξ_a – коэффициент сопротивления частиц.

При применимости закона Стокса (когда отсутствуют эффекты инерции, связанные с вытеснением воздуха движущейся сферической частицей, т.е. чис-

ло Рейнольдса $Re_p = d_a \cdot (v_a - v_g) \cdot \rho_g / \mu_g$ меньше 0,05) минимальный размер частиц d_{\min} (м), которые будут полностью осаждаться в многополочной камере, может быть определен по формуле:

$$d_{\min} = \sqrt{18 V_g \mu_g / [(\rho_a - \rho_g) g B L]}, \quad (16)$$

где V_g – объемный расход газов, $\text{м}^3/\text{с}$; μ_g – динамический коэффициент вязкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$; B и L – ширина и длина камеры, м ; v_g – скорость потока газа, $\text{м}/\text{с}$.

Жалюзийные аппараты обычно применяют для улавливания пыли с размером частиц более 20 $\mu\text{м}$. Они имеют жалюзийную решетку, состоящую из рядов пластин или колец. Очищаемый газ, проходя через решетку, делает резкие повороты. Пылевые частицы вследствие инерции стремятся сохранить первоначальное направление, что приводит к отделению крупных частиц из газового потока, которые, сталкиваясь с наклонными решетками, отражаются и отскакивают в сторону от щелей между лопастями жалюзи (рис. 6). В результате газ делится на два потока. Пыль в основном содержится в потоке, который отсасывают и направляют в циклон, где его очищают от пыли и вновь сливают с основной частью потока, прошедшего через решетку. Скорость газа перед жалюзийной решеткой должна быть достаточно высокой (до 15 $\text{м}/\text{с}$), чтобы достигнуть эффекта инерционного отделения пыли. На степень очистки влияет также скорость движения газов, отсасываемых в циклон. Гидравлическое сопротивление решетки составляет 100–500 Па .

Основным недостатком этих аппаратов является износ пластин при высокой концентрации пыли.

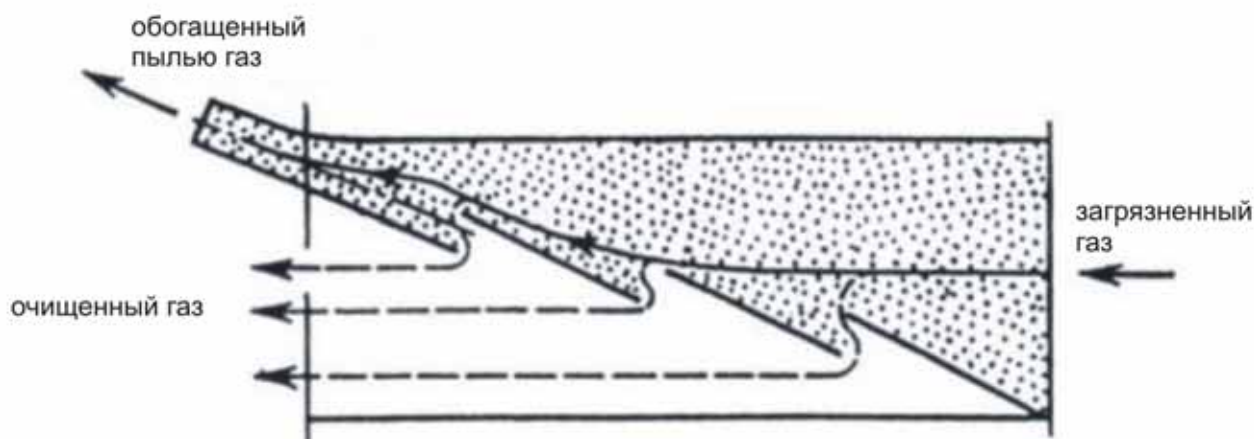


Рис. 6. Жалюзийный пылеотделитель

Эффективность улавливания частиц этой системой очистки зависит от эффективности самой решетки и эффективности циклона, а также от доли отсасываемого в нем газа. Если ϕ – относительная доля газа, направляемого с пылевым концентратом, то степень очистки газа в жалюзийном пылеуловителе равна:

$$\eta = \eta_{\text{ц}} [1 - (1 - \phi) \cdot (1 - \eta_p)], \quad (17)$$

где $\eta_{\text{ц}}$ – степень очистки газов в основном циклоне; $\eta_{\text{р}}$ – степень очистки в решетке (формула справедлива при φ не менее 0,1–0,2).

3.2.2. Инерционные пылеуловители

В этих аппаратах при резком изменении направления движения газового потока частицы пыли под воздействием инерционной силы продолжают двигаться в прежнем направлении и после поворота потока газов выпадают в бункер. Наиболее простые из этого типа аппаратов являются так называемые *пылевые мешки* (рис. 7). Эффективность этих аппаратов низкая, а задерживают они только крупные фракции пыли.

Пылеуловители с плавным поворотом газового потока имеют меньшее гидравлическое сопротивление, чем другие аппараты. Скорость газа в сечении таких аппаратов принимают 1,0 м/с. Для частиц пыли размером 25–30 мкм достигается степень улавливания 65–80 %. Такие пылеуловители применяют на заводах черной и цветной металлургии. Гидравлическое сопротивление их равно 150–390 Па. Пылеуловители этого типа обычно встраивают в газоходы.

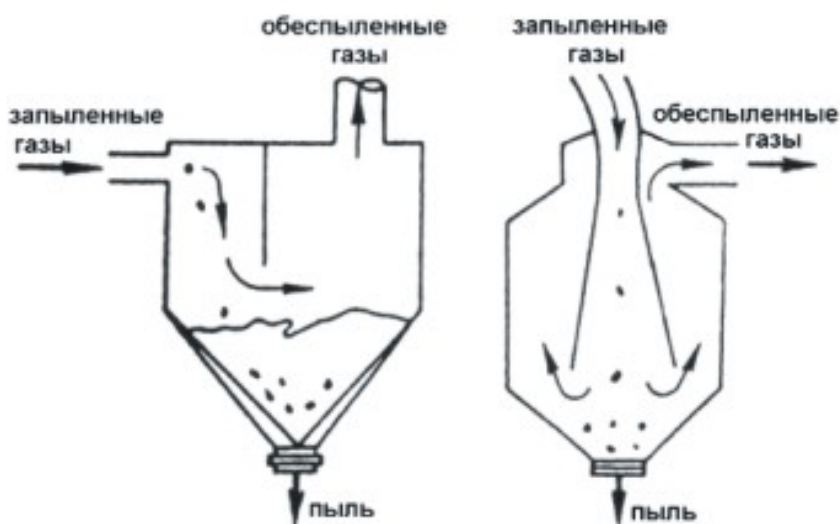


Рис. 7. Инерционные пылеуловители

3.2.3. Центробежные пылеуловители

Циклонные аппараты (*циклоны*) наиболее распространены в промышленности. Они имеют следующие *достоинства*: 1) отсутствие движущихся частей в аппарате; 2) надежность работы при температурах газов вплоть до 500 °С (для работы при более высоких температурах циклоны изготавливают из специальных материалов); 3) возможность улавливания абразивных материалов при защите внутренних поверхностей циклонов специальными покрытиями; 4) улавливание пыли в сухом виде; 5) почти постоянное гидравлическое сопротивление аппарата; 6) успешная работа при высоких давлениях газов; 7) простота изготовления; 8) сохранение высокой фракционной эффективности очистки при увеличении запыленности газов. *Недостатки*: 1) высокое гидравлическое со-

противление – 1250–1500 Па; 2) плохое улавливание частиц размером менее 5 мкм; 3) невозможность использования для очистки газов от липких загрязнений.

Принцип работы циклона показан на рис. 8. Газ вращается внутри циклона, двигаясь сверху вниз, а затем движется вверх. Частицы пыли отбрасываются центробежной силой к стенке. Обычно в циклонах центробежное ускорение в 100–1000 раз больше ускорения силы тяжести, поэтому даже весьма маленькие частицы пыли не в состоянии следовать за газом и под влиянием центробежной силы движутся к стенке.

В промышленности принято разделять циклоны на *высокоэффективные и высокопроизводительные*. Первые эффективны, но требуют больших затрат на осуществление процесса очистки; циклоны второго типа имеют небольшое гидравлическое сопротивление, но хуже улавливают мелкие частицы.

На практике широко используют циклоны НИИОГАЗа (рис. 9) – цилиндрические (с удлиненной цилиндрической частью) и конические (с удлиненной конической частью). Цилиндрические циклоны относятся к высокопроизводительным аппаратам, а конические – к высокоэффективным. Диаметр цилиндрических циклонов не более 2000 мм, а конических – не более 3000 мм.

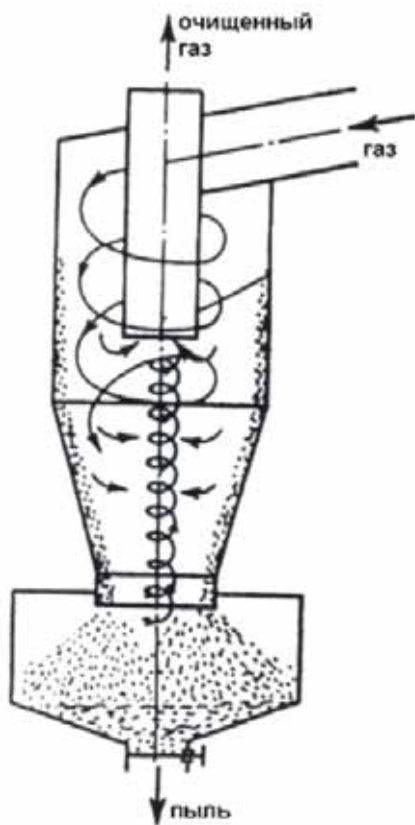


Рис. 8. Циклон

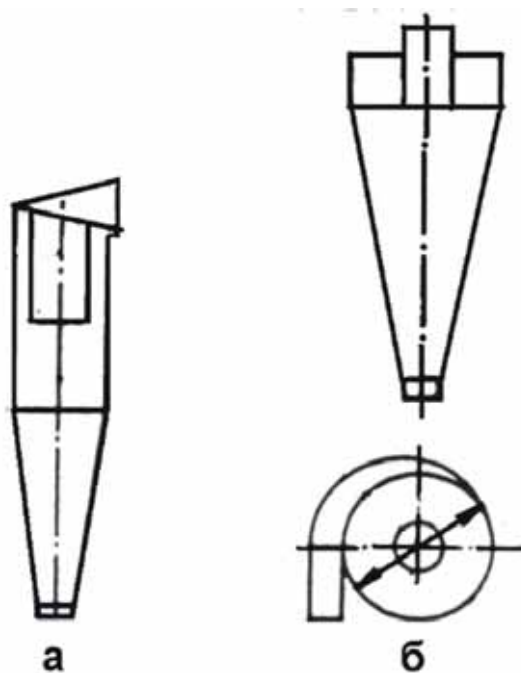


Рис. 9. Цилиндрический (а) и конический (б) циклоны

Гидравлическое сопротивление циклонов определяют по формуле:

$$\Delta P_{\text{ц}} = \xi_{\text{ц}} v_{\text{г}}^2 \rho_{\text{г}} / 2, \quad (18)$$

где v_r – скорость газов в произвольном сечении аппарата, относительно которого рассчитана величина коэффициента сопротивления $\xi_{ц}$, м/с.

Коэффициент сопротивления:

$$\xi_{ц} = 0,00513 \cdot K_1 \cdot h_1 \cdot b / D_{тр}^2, \quad (19)$$

где K_1 – коэффициент, соответственно равный 16 для циклонов с тангенциальным входом газа и 7,5 – для циклонов с розеточным входом; h_1 и b – размеры входного патрубка; $D_{тр}$ – диаметр выхлопной трубы.

При больших расходах очищаемых газов применяют групповую компоновку аппаратов – *групповые циклоны*. Это позволяет не увеличивать диаметр циклона, что положительно сказывается на эффективности очистки. В этих аппаратах запыленный газ входит через общий коллектор, а затем распределяется между циклонными элементами.

Коэффициент гидравлического сопротивления группы циклонов определяют по формуле:

$$\xi_{гц} = \xi_{ц} + K_2, \quad (20)$$

где $\xi_{ц}$ – коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона; K_2 – коэффициент, учитывающий дополнительные потери давления, связанные с компоновкой циклонов в группу (определяют опытным путем).

Иногда большое число малых циклонов (мультициклонов) объединяют в группу (*батареи циклоны*). Они используются для очистки больших масс (расходов) газов. Однако, из-за перетока газов между элементами циклонов, эффективность очистки батарейных циклонов ниже одиночных.

Ротационные пылеуловители относят к аппаратам центробежного действия, которые одновременно с перемещением воздуха очищают его от фракции пыли крупнее 5 мкм. Они обладают большой компактностью, так как вентилятор и пылеуловитель обычно совмещены в одном агрегате.

Схемы пылеуловителей ротационного типа представлены на рис. 10 и 11. При работе вентиляторного колеса частицы пыли за счет центробежных сил отбрасываются к стенке спиралеобразного кожуха и движутся по ней в направлении выхлопного отверстия (рис. 10). Газ, обогащенный пылью, через специальное пылеприемное отверстие отводится в пылевой бункер, а очищенный газ поступает в выхлопную трубу.

В противоточном центробежном ротационном пылеуловителе (рис. 11) ротор и колесо вентилятора насажены на общий вал. При работе пылеотделителя запыленный воздух поступает внутрь кожуха, где закручивается вокруг ротора. В результате вращения пылевого потока возникают центробежные силы, под действием которых взвешенные в воздухе частицы пыли стремятся выделяться из него в радиальном направлении. Одновременно на эти частицы в противоположном направлении действуют силы аэродинамического сопротивления. Частицы, центробежная сила которых больше силы аэродинамического сопротивления, отбрасываются к стенкам кожуха и поступают в бункер. Очи-

щенный воздух через перфорацию ротора всасывается в вентилятор и затем выводится наружу.

Эффективность очистки этих аппаратов зависит от выбранного соотношения центробежной и аэродинамической сил и теоретически может достигать 100 %. Величина центробежной силы является функцией числа оборотов и диаметра ротора. Величина аэродинамической силы является функцией скорости просасывания воздуха через перфорацию ротора, т.е. производительности вентилятора.

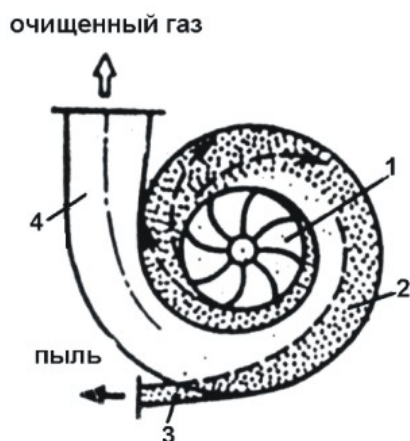


Рис. 10. Пылеуловитель ротационного типа:

1 – вентиляторное колесо; 2 – кожух;
3 – пылеприемное отверстие; 4 – выхлопная труба

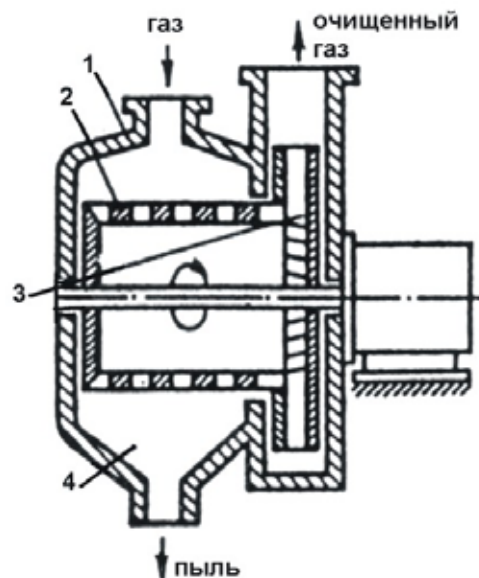


Рис. 11. Противоточный ротационный пылеуловитель:

1 – кожух; 2 – ротор; 3 – колесо вентилятора; 4 – бункер

Диаметр минимальной улавливаемой частицы пыли противоточным ротационным пылеотделителем определяется по формуле:

$$d_{\min} = \frac{1}{20w} \sqrt{\frac{\rho_v \cdot v \cdot Q_v}{\rho_{\pi} \cdot \pi b}}, \quad (21)$$

где ρ_{π} и ρ_v – плотность пыли и воздуха, кг/м³; w – окружная скорость, м/с; Q_v – производительность противоточного ротационного пылеуловителя, м³/ч, ($Q_v = 400 \cdot \pi \cdot b \cdot w^2 \cdot \rho_{\pi} \cdot d_a^2 / \rho_v \cdot v$); d_a – диаметр частицы; $b = i \cdot d_0^2 / 8 \cdot R$ – приведенная ширина всасывающего отверстия ротора пылеуловителя, м; R – радиус окружности ротора, м; i – количество отверстий, шт; d_0 – диаметр отверстий, м; v – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

3.3. Очистка газовоздушных сред на фильтрах

Процесс очистки газов от твердых или жидких частиц с помощью пористых сред (перегородок) называется *фильтрацией*. При фильтрации (рис. 12) взвешенные в газовом потоке частицы осаждаются на поверхности или в объеме пористых сред (перегородок) за счет броуновской диффузии, эффекта касания (зацепления), инерционных, электростатических и гравитационных сил.



Рис. 12. Схема процесса фильтрования

Фильтрующие перегородки весьма разнообразны по своей структуре, но в основном они состоят из волокнистых или зернистых элементов и условно подразделяются на следующие типы:

- *гибкие пористые перегородки* – тканевые материалы из природных, синтетических или минеральных волокон; нетканевые волокнистые материалы (войлоки, клееные и иглопробивные материалы, бумага, картон, волокнистые маты); ячеистые листы (губчатая резина, пенополиуретан, мембранные фильтры);

- *полужесткие пористые перегородки* – слои волокон, стружка, вязанные сетки, расположенные на опорных устройствах или зажатые между ними;

- *жесткие пористые перегородки* – зернистые материалы (пористая керамика и пластмасса, спеченные или спрессованные порошки металлов, пористые стекла, углеграфитовые материалы и др.); волокнистые материалы (сформированные слои из стеклянных и металлических волокон); металлические сетки и перфорированные листы.

В процессе очистки запыленного газа частицы приближаются к волокнам или к поверхности зерен материала, сталкиваются с ними и осаждаются главным образом в результате действия сил диффузии, инерции и электростатического притяжения.

В фильтрах уловленные частицы накапливаются в порах или образуют пылевой слой на поверхности перегородки, и, таким образом, сами становятся для вновь поступающих частиц частью фильтрующей среды. По мере накопления пыли пористость перегородки уменьшается, а сопротивление возрастает. Поэтому возникает необходимость удаления пыли и регенерации фильтра.

В зависимости от назначения и величины входной и выходной концентрации фильтры условно разделяются на три класса:

- *фильтры тонкой очистки* (высокоэффективные или абсолютные фильтры) – предназначены для улавливания с очень высокой эффективностью (более 99 %) в основном субмикронных частиц из промышленных газов с низкой

входной концентрацией (менее 1 мг/м^3) и скоростью фильтрования менее 10 см/с . Фильтры применяют для улавливания особо токсичных частиц, а также для ультратонкой очистки воздуха при проведении некоторых технологических процессов. Они не подвергаются регенерации;

– *воздушные фильтры* – используют в системах приточной вентиляции и кондиционирования воздуха; работают при концентрации пыли менее 50 мг/м^3 , при высокой скорости фильтрации – до $(2,5\text{--}3) \text{ м/с}$. Фильтры могут быть нерегенерируемые и регенерируемые;

– *промышленные фильтры* (тканевые, зернистые, грубоволокнистые) – применяются для очистки промышленных газов с концентрацией пыли до 60 г/м^3 . Фильтры регенерируются.

3.3.1. Тканевые фильтры

Эти фильтры имеют наибольшее распространение. Возможности их использования расширяются в связи с созданием новых температуростойких и устойчивых к воздействию агрессивных газов тканей. Наибольшее распространение получили рулонные (рис. 13) и рукавные (рис. 14) фильтры.

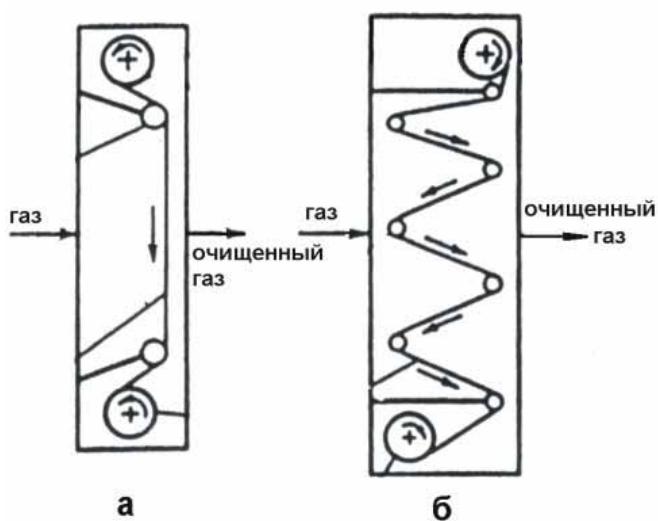


Рис. 13. Рулонные фильтры
обычного типа (а) и компактные (б)

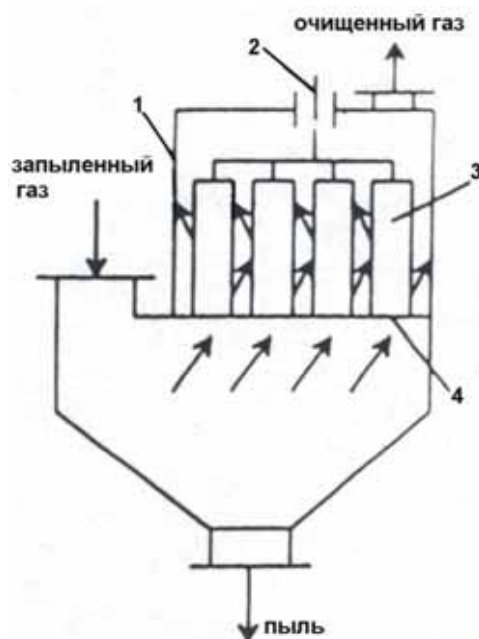


Рис. 14. Рукавный фильтр:
1 – корпус; 2 – встряхивающее устройство;
3 – рукав; 4 – распределительная решетка

Корпус фильтра представляет собой металлический шкаф, разделенный вертикальными перегородками на секции, в каждой из которых размещена группа фильтрующих рукавов. Верхние концы рукавов заглушены и подвешены к раме, соединенной с встряхивающим механизмом. Внизу имеется бункер со шнеком для выгрузки пыли. Встряхивание рукавов в каждой из секций производится поочередно.

В тканевых фильтрах применяют фильтрующие материалы двух типов: обычные ткани, изготавливаемые на ткацких станках, и войлоки, получаемые путем свойлачивания или механического перепутывания волокон иглопробивным методом. В типичных фильтровальных тканях размер сквозных пор между нитями достигает 100–200 мкм.

К тканям предъявляются следующие требования: 1) высокая пылеемкость при фильтрации и способность удерживать после регенерации такое количество пыли, которое достаточно для обеспечения высокой эффективности очистки газов от тонкодисперсных твердых частиц; 2) сохранение оптимально высокой воздухопроницаемости в равновесно запыленном состоянии; 3) высокая механическая прочность и стойкость к истиранию при многократных изгибах, стабильность размеров и свойств при повышенной температуре и агрессивном воздействии химических примесей; 4) способность к легкому удалению накопленной пыли; 5) низкая стоимость.

Существующие материалы обладают не всеми указанными свойствами и их выбирают в зависимости от конкретных условий очистки. Например, хлопчатобумажные ткани обладают хорошими фильтрующими свойствами и низкой стоимостью, но недостаточная химической и термической стойкостью, высокой горючестью и влагоемкостью.

Синтетические ткани вытесняют материалы из хлопка и шерсти благодаря более высокой прочности, стойкости к повышенным температурам и агрессивным воздействиям, более низкой стоимости. Среди них нитроновые ткани, которые используют при температуре 120–130 °С в химической промышленности и цветной металлургии. Стекланные ткани стойки при 150–350 °С. Их изготавливают из алюмоборосиликатного бесщелочного или магнезиального стекла.

3.3.2. Волокнистые фильтры

Фильтрующий элемент этих фильтров состоит из одного или нескольких слоев, в которых однородно распределены волокна. Это фильтры объемного действия, так как они рассчитаны на улавливание и накопление частиц преимущественно по всей глубине слоя. Сплошной слой пыли образуется на поверхности наиболее плотных материалов. Для фильтров используют естественные или специально получаемые волокна толщиной 0,01–100 мкм. Толщина фильтрующих сред составляет от десятых долей миллиметра (бумага) до 2 м (многослойные глубокие насадочные фильтры долговременного использования). Такие фильтры используют при концентрации дисперсной твердой фазы 0,5–5 мг/м³ и только некоторые грубоволокнистые фильтры применяют при концентрации 5–50 мг/м³. При таких концентрациях основная доля частиц имеет размеры менее 5–10 мкм.

Различают следующие виды промышленных волокнистых фильтров: 1) *сухие* – тонковолокнистые, электростатические, глубокие, фильтры предварительной очистки (предфильтры), 2) *мокрые* – сеточные, самоочищающиеся, с периодическим или непрерывным орошением.

Процесс фильтрации в волокнистых фильтрах состоит из двух стадий. На первой стадии (стационарная фильтрация) уловленные частицы практически не изменяют структуры фильтра во времени, на второй стадии процесса (нестационарная фильтрация) в фильтре происходят непрерывные структурные изменения вследствие накопления уловленных частиц в значительных количествах. В соответствии с этим все время изменяются эффективность очистки и сопротивление фильтра. Теория фильтрования в таких фильтрах еще недостаточно разработана.

Волокнистые фильтры тонкой очистки (рис. 15). Используются в атомной энергетике, радиоэлектронике, точном приборостроении, промышленной микробиологии, в химико-фармацевтической и др. Фильтры позволяют очищать большие объемы газов от твердых частиц всех размеров, включая субмикронные. Их широко применяют для очистки радиоактивных аэрозолей. Для очистки до 99 % (для частиц 0,05–0,5 мкм) применяют материалы в виде тонких листов или объемных слоев из тонких или ультратонких волокон (диаметр менее 2 мкм). Скорость фильтрации составляет 0,01–0,15 м/с, сопротивление чистых фильтров не превышает 200–300 Па, а забитых пылью фильтров 700–1500 Па. Улавливание частиц в фильтрах тонкой очистки происходит за счет броуновской диффузии и эффекта касания.

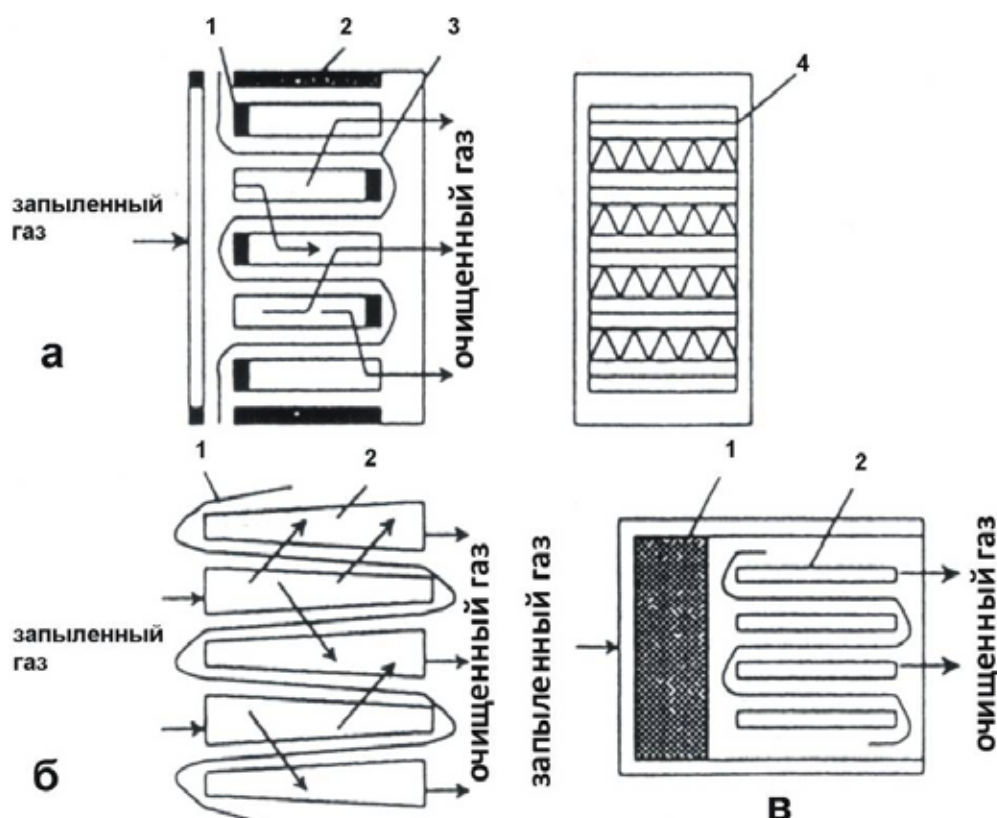


Рис. 15. Фильтры тонкой очистки:

а – рамный: 1 – П-образная планка; 2 – боковая стенка; 3 – фильтрующий материал; 4 – разделитель; **б – с сепараторами клиновидной формы типа Д-КЛ:** 1 – фильтрующий материал; 2 – рамка-сепаратор клиновидной формы; **в – комбинированный:** 1 – секция с набивным слоем из волокон; 2 – секция тонкой очистки

3.3.3. Зернистые фильтры

Зернистые фильтры применяют для очистки газов реже, чем волокнистые фильтры. *Достоинства* зернистых фильтров: доступность материала, возможность работать при высоких температурах и в условиях агрессивной среды, выдерживать большие механические нагрузки и перепады давлений, а также резкие изменения температуры. Различают насадочные и жесткие зернистые фильтры.

В *насадочных (насыпных) фильтрах* улавливающие элементы (гранулы, куски и т.д.) не связаны друг с другом. К ним относятся: статические (неподвижные) слоевые фильтры; динамические (подвижные) слоевые фильтры с гравитационным перемещением сыпучей среды (рис. 16). В насыпных фильтрах в качестве насадки используется песок, галька, шлак, дробленные горные породы, древесные опилки, кокс, крошка резины, пластмассы, графит и др. Выбор материала зависит от требуемой термической и химической стойкости, механической прочности и доступности.

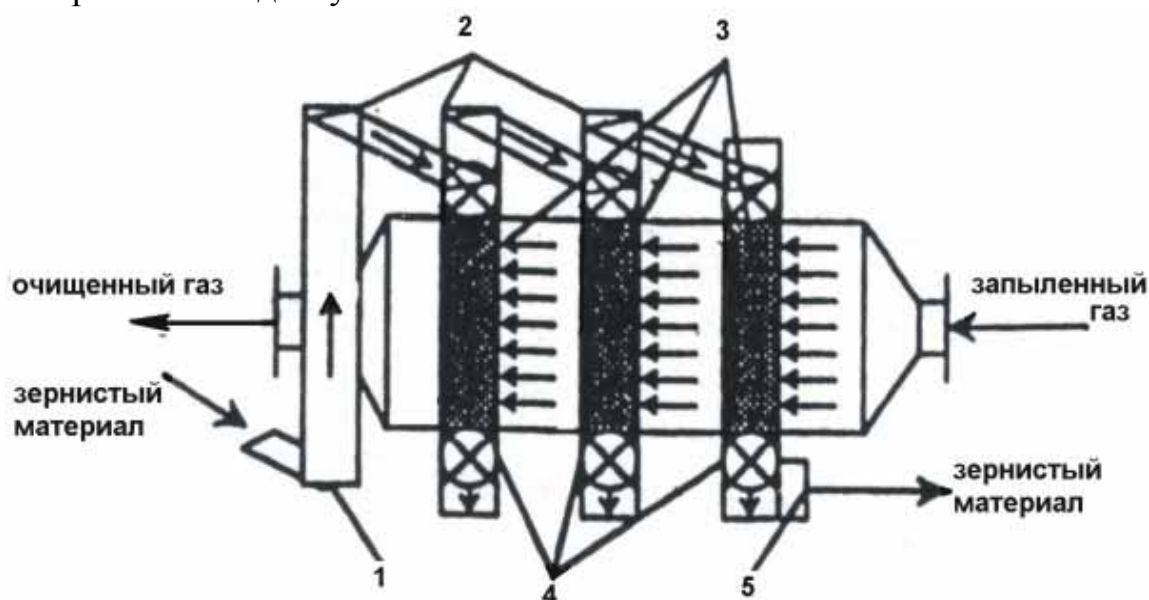


Рис. 16. Фильтр с движущимися слоями зернистого материала:

1 – короб для подачи свежего зернистого материала; 2 – питание; 3 – фильтрующие слои; 4 – затворы; 5 – короб для вывода зернистого материала

По мере накопления пыли в порах насадки эффективность улавливания возрастает. При увеличении сопротивления до предела производят рыхление слоя. После нескольких циклов рыхления насадку промывают или заменяют.

В *зернистых жестких фильтрах* зерна прочно связаны друг с другом в результате спекания, прессования или склеивания и образуют прочную неподвижную систему. К ним относятся: пористая керамика, пористые металлы, пористые пластмассы. Фильтры устойчивы к высокой температуре, коррозии и механическим нагрузкам и применяются для фильтрования сжатых газов. *Недостатки* таких фильтров: высокая стоимость, большое гидравлическое сопротивление и трудности регенерации. Регенерацию можно проводить четырьмя

способами: 1) продуванием воздухом в обратном направлении; 2) пропусканием жидких растворов в обратном направлении; 3) пропусканием горячего пара; 4) простукиванием или вибрацией трубной решетки с элементами.

3.3.4. Испытание фильтров

Испытание фильтров и оценку их эффективности проводят по следующей методике.

Концентрация пыли C (мг/м³) в воздухе по массе частиц подсчитывается по формуле:

$$C = \frac{g}{Qt\varphi}, \quad (22)$$

где g – привес аналитического фильтра в пылезаборной трубке, мг; Q – расход воздуха через трубку, м³/ч; t – длительность пропускания воздуха через фильтр, ч; φ – поправочный коэффициент на изменение объема отсасываемого воздуха за счет изменения давления:

$$\varphi = \frac{P_1}{P_2}, \quad (23)$$

где P_1 – абсолютное давление в воздуховоде стенда в месте отбора пробы, кгс/м²; P_2 – абсолютное давление в шланге перед измерительным устройством, кгс/м²

Количество воздуха, отсасываемого через пылезаборную трубу, определяется по формуле (м³/ч):

$$Q = 3600 \cdot f \cdot w, \quad (24)$$

где f – площадь отверстия насадки в пылезаборной трубке перед фильтром, м²; w – скорость в точке отбора пробы, м/с.

Эффективность η фильтров определяется по формуле:

$$\eta = \frac{C_n - C_k}{C_n} \cdot 100\%, \quad (25)$$

где C_n – средняя концентрация пыли в воздухе до фильтра, мг/м³; C_k – средняя концентрация пыли в воздухе после фильтра, мг/м³.

Удельная пылеемкость G_y фильтра определяется (г/м²):

$$G_y = \frac{(C_n - C_k) \cdot t \cdot F}{1000 \cdot S}, \quad (26)$$

где F – расход воздуха через фильтр, м³/ч; S – площадь входного сечения фильтра или поверхность фильтрующего материала, м².

Класс эффективности фильтров определяется на основании показателей эффективности фильтров, полученных при стендовых исследовательских испытаниях.

К I классу относятся фильтры, эффективность которых не ниже $(99 \pm 0,1) \%$, II – $(85 \pm 3) \%$, III – $(60 \pm 5) \%$.

Степень регенерации фильтра R определяется:

$$R = \frac{\Delta P_k - \Delta P_p}{\Delta P_k - \Delta P_n} \cdot 100 \%, \quad (27)$$

где ΔP_n – начальное сопротивление фильтра, кгс/м²; ΔP_k – конечное сопротивление фильтра, кгс/м²; ΔP_p – сопротивление фильтра после регенерации, кгс/м².

После окончания испытаний должны быть представлены в виде графиков следующие характеристики фильтров:

а) *аэродинамическая* – зависимость сопротивления от удельной воздушной нагрузки или расхода воздуха через испытанный фильтр;

б) *пылевая* – зависимость от количества пыли, накапливающейся в фильтре, его эффективности и сопротивления.

Результаты испытаний фильтра оформляются в виде технического отчета. Его содержание: 1) схема и краткое описание стенда и условий испытаний; 2) схематический чертеж испытательного фильтра; 3) соответствие конструкции фильтра рабочим чертежам; 4) полученные результаты испытаний; 5) заключение об оценке фильтра. К отчету прилагаются протоколы испытания.

3.4. Очистка газов на электрофильтрах

Электрическая очистка – один из наиболее совершенных видов очистки газов от взвешенных в них частиц пыли и тумана. Этот процесс (рис. 17–19) основан на ударной ионизации газа в зоне коронирующего разряда, передаче заряда ионов частицам примесей и осаждении последних на осадительных и коронирующих электродах.

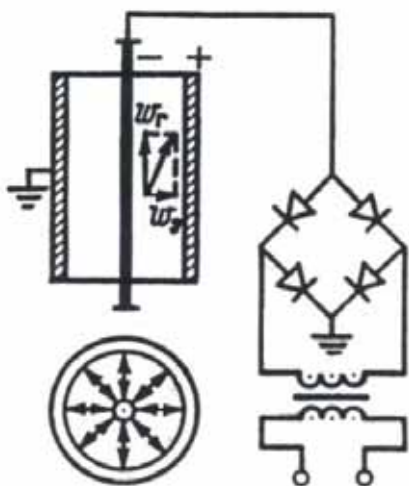


Рис. 17. Схема расположения электродов в электрофильтре



Рис. 18. Зависимость силы тока от напряжения между электродами

Загрязненные газы, поступающие в электрофильтр, всегда частично ионизированы за счет различных внешних воздействий (рентгеновских лучей, радиоактивных излучений, космических лучей, нагрева газа и др.), поэтому, попадая в пространство между электродами, они способны проводить ток. При увеличении напряжения между электродами вовлекается все большее число ионов и величина тока растет до тех пор, пока в движении не окажутся все ионы, имеющиеся в газе. При этом величина силы тока становится постоянной (*ток насыщения*), несмотря на дальнейший рост напряжения. При некотором достаточно большом напряжении движущиеся ионы и электроны настолько ускоряются, что, сталкиваясь с молекулами газа, ионизируют их, превращая нейтральные молекулы в положительные ионы и электроны. Образовавшиеся новые ионы и электроны ускоряются электрическим полем и ионизируют новые молекулы газа. Этот процесс называется *ударной ионизацией газа*.

Ударная ионизация газа протекает устойчиво лишь в неоднородном электрическом поле, характерном для цилиндрического конденсатора. В зазоре между коронирующим и осадительным электродами создается электрическое поле убывающей напряженности с силовыми линиями, направленными от осадительного к коронирующему электроду или наоборот.

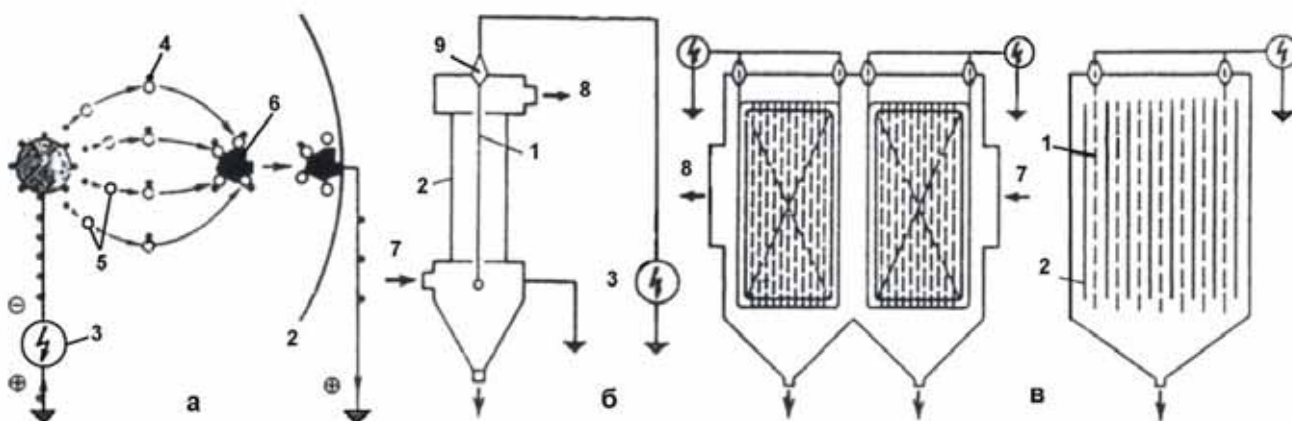


Рис. 19. Принципиальная схема работы электрофильтра:

- а — процесс электрического осаждения частиц; б — электрофильтр с трубчатым электродом;
 в — электрофильтр с пластинчатым электродом; 1 — коронирующий электрод;
 2 — осадительный электрод; 3 — агрегат электропитания; 4 — электрон; 5 — молекула газа;
 6 — осаждаемая частица; 7 — очищаемый газ; 8 — очищенный газ; 9 — изолятор

Аэрозольные частицы, поступающие в зону между коронирующим и осадительным электродами, адсорбируют на своей поверхности ионы, приобретая электрический заряд, и получают тем самым ускорение, направленное в сторону электрода с зарядом противоположного знака.

Движение заряженных частиц к осадительному электроду происходит под действием аэродинамических сил, силы взаимодействия электрического поля и заряда частицы, силы тяжести и силы давления электрического ветра.

Основной силой, вызывающей движение частицы к осадительному электроду, является сила взаимодействия между электрическим полем и зарядом частицы.

Таким образом, отрицательно заряженные аэрозольные частицы движутся к осадительному электроду под действием аэродинамических сил и электрических сил, а положительно заряженные частицы оседают на отрицательном коронирующем электроде. Ввиду того, что объем внешней зоны коронного разряда во много раз больше объема внутренней, большинство частиц пыли получает заряд отрицательного знака. Поэтому основная масса пыли осаждается на положительном осадительном электроде и лишь относительно небольшая – на отрицательном коронирующем электроде.

Важное значение на процесс осаждения пыли на электродах имеет электрическое сопротивление слоев пыли. По величине электрического сопротивления пыль делят на:

1) пыли с малым удельным электрическим сопротивлением (менее 10^4 Ом·см), которые при соприкосновении с электродом мгновенно теряют свой заряд и приобретают заряд, соответствующий знаку электрода, после чего между электродом и частицей возникает сила отталкивания, стремящаяся вернуть частицу в газовый поток. Противодействует этой силе только сила адгезии и, если она оказывается недостаточной, то резко снижается эффективность процесса очистки;

2) пыли с удельным электрическим сопротивлением от 10^4 до 10^{10} Ом·см хорошо осаждаются на электродах и легко удаляются с него при встряхивании;

3) пыли с удельным электрическим сопротивлением более 10^{10} Ом·см труднее всего улавливаются в электрофильтрах, так как на электродах частицы разряжаются медленно, что в значительной степени препятствует осаждению новых частиц.

В реальных условиях снижение удельного электрического сопротивления пыли можно осуществить увлажнением запыленного газа.

Теоретическое определение эффективности очистки запыленного газа в электрофильтрах обычно производится по формуле Дейча:

$$\eta = 1 - e^{-w_3 F_{уд}}, \quad (28)$$

где $F_{уд}$ – удельная поверхность осадительных электродов, равная отношению поверхности осадительных элементов к расходу очищаемых газов в $\text{м}^2 \cdot \text{с} / \text{м}^3$. Эффективность очистки газа в электрофильтрах возрастает с ростом значения показателя степени ($w_3 F_{уд}$):

$w_3 F_{уд}$	3,0	3,7	3,9	4,6
η	0,95	0,975	0,98	0,99

Электрофильтры используют также для глубокой очистки газа от масляных туманов, смолы и пыли в различных отраслях промышленности. При использовании электрофильтров для очистки воздуха от аэрозолей горючих веществ необходимо, чтобы максимальная температура аэрозольной среды была

на 20–25 °С ниже температуры вспышки улавливаемой жидкости, а максимальная концентрация горючей компоненты – не менее чем на порядок меньше нижнего концентрационного предела воспламенения данной смеси.

Контрольные вопросы

Классификация основных методов и аппаратов очистки газовых сред.

1. Назначение, принцип действия и устройство гравитационных пылеуловителей.
2. Назначение, принцип действия инерционных пылеуловителей.
3. Назначение, принцип действия, устройство и основные схемы использования центробежных пылеуловителей.
4. Назовите основные характеристики тканевых и волокнистых фильтров.
5. Назначение и устройство зернистых фильтров.
6. Методика испытания работоспособности фильтров.
7. Назначение, принцип действия и основные характеристики электрофильтров.

Лекция 4. Аппараты мокрой очистки газов

Аппараты мокрой очистки газов используются для одновременного решения целого комплекса задач:

- пылеулавливание;
- абсорбция;
- охлаждение газов.

Конденсация паров жидкости, содержащихся в газах, при их охлаждении способствует росту эффективности мокрых пылеуловителей. В качестве орошающей жидкости в них чаще всего используется обычная вода или вода с примесями для абсорбции. Обычно для экономии жидкости применяют замкнутую систему орошения.

Мокрые пылеуловители имеют ряд достоинств и недостатков в сравнении с аппаратами других типов.

Достоинства: 1) небольшая стоимость и более высокая эффективность улавливания взвешенных частиц; 2) возможность использования для очистки газов от частиц размером до 0,1 мкм; 3) возможность очистки газа при высокой температуре и повышенной влажности, а также при опасности возгорания и взрывов очищаемых газов и уловленной пыли; 4) возможность наряду с пылями одновременно улавливать парообразные и газообразные компоненты.

Недостатки: 1) выделение уловленной пыли в виде шлама, что связано с необходимостью обработки сточных вод, т.е. с удорожанием процесса; 2) возможность уноса капель жидкости и осаждения их с пылью в газоходах и дымо-сосах; 3) в случае очистки агрессивных газов необходимость защищать аппаратуру и коммуникации антикоррозийными материалами.

По способу действия мокрые аппараты разделяют на:

- 1) полые газопромыватели;
- 2) насадочные газопромыватели;
- 3) барботажные и пенные аппараты;
- 4) мокрые аппараты ударно-инерционного типа;
- 5) мокрые аппараты центробежного действия;
- 6) механические скрубберы (динамические газопромыватели);
- 7) скоростные газопромыватели.

Рассмотрим работу каждого из этих типов газопромывателей.

4.1. Полые газопромыватели

У этого типа аппаратов загрязненные газы пропускают через завесу распыленной жидкости. При этом частицы пыли захватываются каплями жидкости и осаждаются, а очищенные газы удаляются из аппарата.

Самым простым полым газопромывателем является *орошаемый газоход*, в котором ряд форсунок создают на пути газа водяную завесу (рис. 20–21). Для

снижения уноса воды (брызг) скорость в газоходе не должна превышать 3 м/с. Расход воды принимают обычно 0,1–0,3 г/м³.

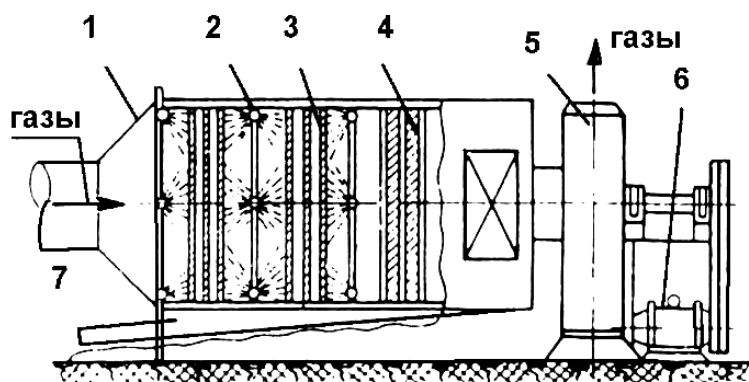


Рис. 20. Промывная камера:

1 – камера; 2 – форсунки; 3 – перфорированные перегородки; 4 – брызгоуловитель;
5 – вентилятор; 6 – электродвигатель; 7 – шламовая труба

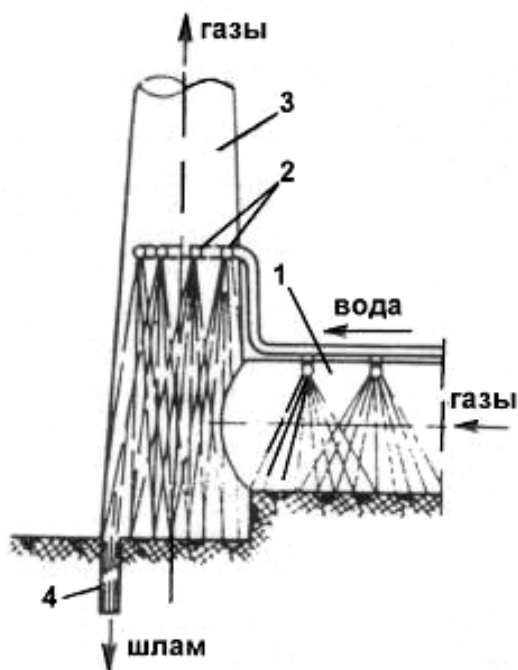


Рис. 21. Оросительное устройство:

1 – газоход; 2 – форсунки; 3 – дымовая труба;
4 – шламовая труба

При несколько больших скоростях газа применяют *промывные камеры* (металлические, бетонные или из кирпича). Внутри камеры в несколько рядов размещаются распылительные форсунки для создания водяных завес на пути газа. Для повышения эффективности промывки газа в камере устанавливают отбойные пластины, перфорированные листы, сетки. Камеры применяют для очистки от пыли и увлажнения воздуха в вентустановках и установках кондиционирования воздуха.

Полые форсуночные скрубберы (рис. 22) представляют собой колонну круглого или прямоугольного сечения с форсунками. Они обычно работают в

противопоточном режиме. Скорость потока газа обычно 0,6–1,2 м/с. Иногда форсунки устанавливают в несколько рядов. Высокая степень очистки в полых скрубберах достигается при улавливании частиц с $d_p > 10$ мкм.

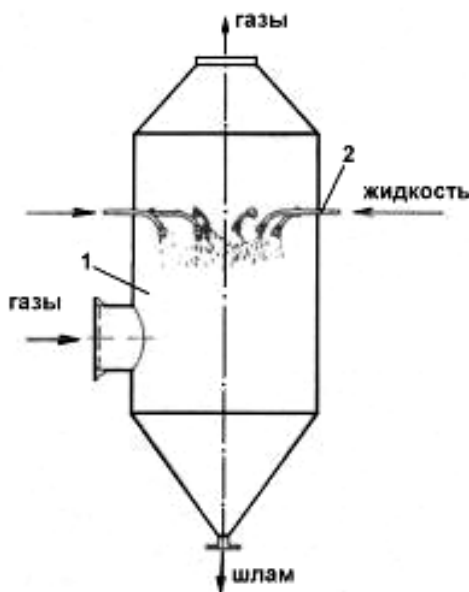


Рис. 22. Полый скруббер:
1 – корпус; 2 – форсунки

4.2. Насадочные газопромыватели

Насадочные скрубберы – это колонны, заполненные различной формы насадками (в виде колец Рашига и других форм), которые насыпают на опорную решетку. На практике применяют два типа аппаратов: газопромыватели в виде противопоточных колонн и насадочные скрубберы с поперечным орошением (рис. 23). Их целесообразно применять, когда пыль (аэрозоли) является хорошо смачиваемой, растворимой в воде или процесс улавливания пыли сопровождается охлаждением или абсорбцией. Расход жидкости, например, в скруббере с поперечным орошением составляет 0,15–0,5 л/м³, а эффективность улавливания частиц размером более 2 мкм превышает 90 %.

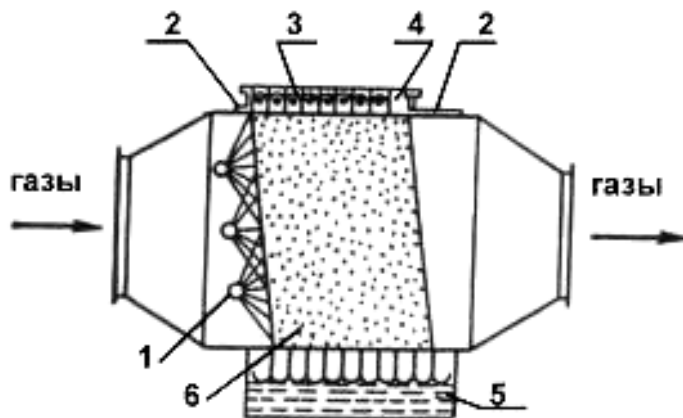


Рис. 23. Насадочные скрубберы с поперечным орошением:
1 – форсунки; 2 – опорные решетки; 3 – оросительное устройство; 4 – неорошаемый слой насадки (брызгоуловитель); 5 – шламоборник; 6 – насадка

4.3. Барботажные и пенные аппараты

В *барботажных аппаратах (барботерах)* газ проходит через слой жидкости в виде пузырьков, на поверхности которых происходит осаждение частиц. При этом скорость подъема пузырьков газа должна быть не намного большей, чем скорость свободного всплытия ($\sim 0,35$ м/с). Эффективность высока при очистке от частиц $d_{\text{ч}} > 5$ мкм. Их недостаток – невысокая производительность.

Пенный способ очистки реализуется с помощью *пенных аппаратов* со свободным сливом воды (переливная тарелка) или с подпором (провальная тарелка). Эти типы аппаратов показаны на рис. 24. Размер отверстий в тарелках этих аппаратов составляет 3–8 мм. В настоящее время аппараты с провальными тарелками вытеснили переливные аппараты. Аппараты с провальными тарелками в зависимости от скорости газа могут работать в трех режимах: барботажном, в котором газовые пузырьки с невысокой скоростью барботируют через слой жидкости на тарелке; пенном, при котором за счет роста скорости газов жидкость на тарелке переходит в состояние турбулизованной пены; волновом, характеризующимся образованием газовых струй, колебанием слоя жидкости на тарелке, значительном ростом гидравлического сопротивления и интенсивным брызгоуносом.

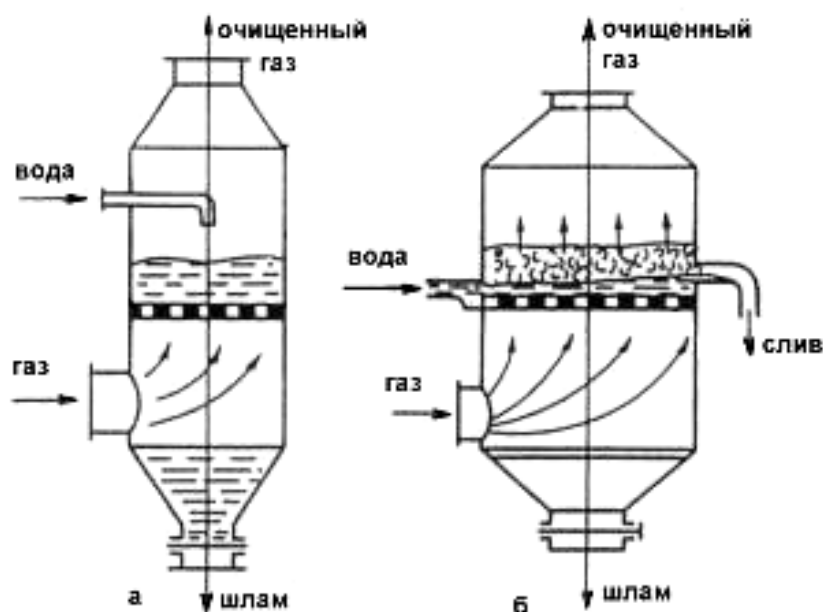


Рис. 24. Барботажно-пенный пылеуловитель с провальной (а) и переливной (б) решетками

Наибольший интерес для процесса пылеулавливания представляет пенный режим, обеспечивающий наилучшие условия для подвода частиц пыли к постоянно обновляющимся, сильно турбулизированным поверхностям (пленкам) жидкости.

Работа в волновом режиме возможна при больших плотностях орошения (исключается возможность оголения отдельных частей тарелки и прорыва газовых струй) и при наличии эффективного каплеуловителя, встроенного непосредственно в аппарат или установленного на выходе газов из аппарата. По-

добное решение особенно целесообразно, когда в тарельчатом аппарате осуществляется подготовка газов (предварительная очистка и охлаждение) и вслед за ним устанавливается мокрый аппарат тонкой очистки газов (например, скруббер Вентури, мокрый электрофильтр или самоочищающийся волокнистый фильтр).

Выделяют следующие стадии процесса улавливания пыли в пенных аппаратах:

- инерционное осаждение частиц пыли в подрешеточном пространстве;
- первую стадию улавливания частиц пыли в пенном слое (механизм удара);
- вторую стадию улавливания частиц пыли в пенном слое (инерционно турбулентное осаждение частиц на поверхности пены).

Эффективность улавливания пыли в подрешеточном пространстве значительна (более 50 %) при улавливании пыли размером частиц более 10 мкм. Преобладающим в работе пенных аппаратов для пылеулавливания является «механизм удара». Эффективность этого механизма намного больше эффективности других механизмов.

4.4. Газопромыватели ударно-инерционного действия

В этих аппаратах контакт газов с жидкостью осуществляется за счет удара газового потока о поверхность жидкости с последующим пропусканием газожидкостной смеси через отверстия различной конфигурации или непосредственным отводом газожидкостной смеси в сепаратор жидкой фазы. В результате такого взаимодействия образуются капли диаметром 300–400 мкм.

Наиболее простым по конструкции является аппарат, показанный на рис. 25. Газ с большой скоростью входит в колонну. При повороте на 180° происходит инерционное осаждение частиц пыли на каплях жидкости. В основе процесса осаждения лежит «механизм удара». Имеются и другие конструкции аппаратов этого типа (например, скруббер Дойля).



Рис. 25. Пылеуловитель ударно-инерционного действия:
1 – входной патрубок; 2 – резервуар с жидкостью; 3 – сопло

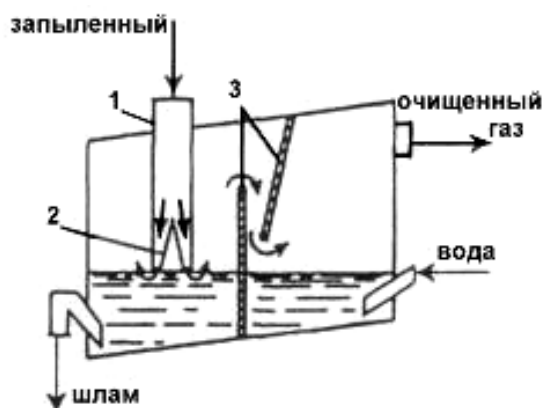


Рис. 26. Скруббер Дойля:
1 – труба; 2 – конус; 3 – перегородки

Схема скруббера Дойля приведена на рис. 26. В нижней части трубы установлены конусы для увеличения скорости выхода газа. В щели она равна 35–55 м/с. Газ ударяется о поверхность жидкости, создавая завесу из капель. Гидравлическое сопротивление газопромывателя от 500 до 4000 Па, удельный расход жидкости составляет $0,13 \text{ л/м}^3$.

4.5. Ротоклон

Типичная конструкция *ротоклона* показана на рис. 27. В аппарате установлены один или несколько изогнутых щелевых каналов (импеллеров), нижняя часть которых затоплена жидкостью. Ударяясь о поверхность жидкости, газовый поток захватывает часть жидкости и заставляет ее двигаться вдоль нижней направляющей канала. Затем жидкость отбрасывается к верхней направляющей и при выходе из щели падает в виде сплошной водяной завесы. Для предотвращения уноса капель газы после канала проходят через систему каплеотбойных устройств.

Скорость газов в канале обычно не превышает 15 м/с. Важное значение для нормальной эксплуатации ротоклона играет поддержание постоянного уровня жидкости в аппарате. Даже незначительное изменение уровня жидкости может привести к резкому снижению эффективности или значительному увеличению гидравлического сопротивления. Удаление шлама из отстойника осуществляется периодически (вручную) или непрерывно с помощью скребкового конвейера. Расход воды в ротоклонах значительно ниже, чем в других мокрых пылеуловителях. Вода в количестве, не превышающем $0,03 \text{ л/м}^3$, подается в основном для компенсации ее потерь за счет испарения и уноса со шламом.

Производительность промышленных ротоклонов, применяемых на зарубежных заводах, колеблется от 2500 до $90000 \text{ м}^3/\text{ч}$.

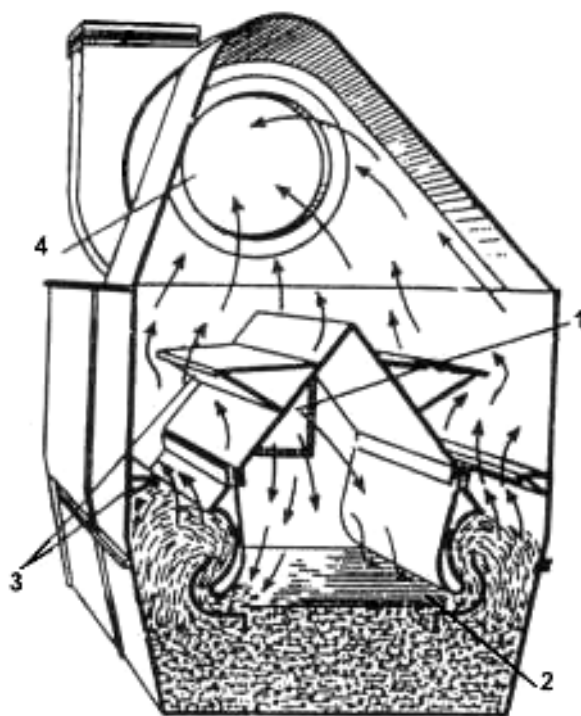


Рис. 27. Ротоклон:

1 – устройство для подвода газов; 2 – направляющие лопатки;
3 – каплеотбойник; 4 – устройство для вывода газов

4.6. Газопромыватели центробежного действия

Наиболее распространены *центробежные скрубберы*, которые по конструктивному признаку можно разделить на два вида:

1) аппараты, в которых закрутка газового потока осуществляется при помощи центрального лопастного закручивающего устройства;

2) аппараты с боковым тангенциальным или улиточным подводом газа. Последние орошают через форсунки, установленные в центральной части аппарата, кроме того, жидкость, стекающая по внутренней поверхности стенки аппарата, образует пленку.

Большинство отечественных центробежных скрубберов имеют тангенциальный подвод газов и пленочное орошение. Схема аппарата с боковым расположением форсунок представлена на рис. 28. Такие аппараты используют для очистки любых видов нецементирующейся пыли.

При содержании пыли, превышающем 2 г/м^3 , до очистки в циклоне с водяной пленкой рекомендуется предварительная очистка газов в аппарате другого типа. Для улавливания смачиваемой пыли (за исключением волокнистой и цементирующейся) при начальной концентрации до 5 г/м^3 используют скоростные промыватели.

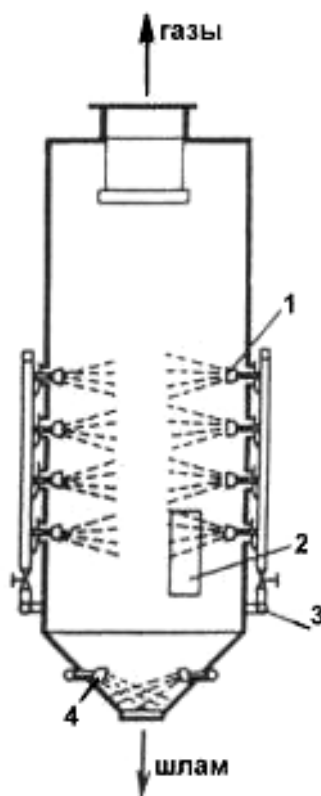


Рис. 28. Центробежный скруббер с боковым расположением форсунок:
1 – форсунка; 2 – устройство для ввода газов; 3 – водяной коллектор; 4 – форсунка для орошения стенок бункера

4.7. Скоростные газопромыватели (скрубберы Вентури)

Скрубберы Вентури – наиболее эффективные из аппаратов мокрой очистки газов. В связи с непрерывно возрастающими требованиями к глубине очистки газоздушных выбросов промышленных предприятий скрубберы Вентури постепенно становятся доминирующим видом мокрых пылеуловителей. Скруббер Вентури представляет собой трубу Вентури, в которую подводится орошающая жидкость, и установленный за ней каплеуловитель. Оба основных элемента скруббера могут монтироваться как отдельно (рис. 29, а), так и в одном корпусе (рис. 29, б).

Принцип действия скруббера Вентури основан на интенсивном дроблении газовым потоком, движущимся с высокой скоростью (порядка 40–150 м/с), орошающей его жидкости и осаждению частиц на образующихся каплях жидкости.

По конфигурации поперечного сечения трубы Вентури рассматриваемые скрубберы подразделяются на круглые и щелевые. Для малых расходов газов применяются главным образом круглые, для больших – щелевые, так как при диаметре горловины больше 0,25–0,35 м, первые не позволяют обеспечить равномерное распределение плотности орошения в ее поперечном сечении.

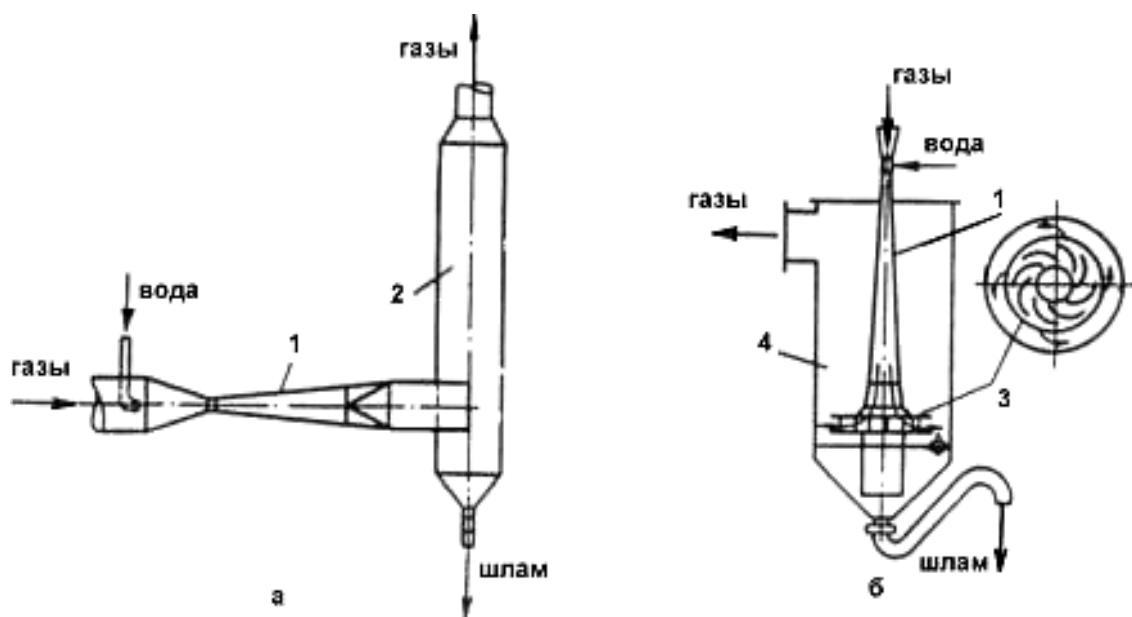


Рис. 29. Скрубберы Вентури:

а – с выносным каплеуловителем; **б** – с встроенным каплеуловителем; 1 – труба Вентури; 2 – циклон каплеуловитель; 3 – розеточное устройство; 4 – каплеосадительная камера

При больших расходах газов на очистку применяют групповые компоновки нескольких труб Вентури с небольшим круглым сечением или так называемые *батарейные скрубберы Вентури* (рис. 30), иногда скрубберы Вентури с предварительным дроблением орошающей жидкости и *эжекторные скрубберы Вентури* (рис. 31) со скоростью истечения жидкости в форсунке 15–30 м/с.

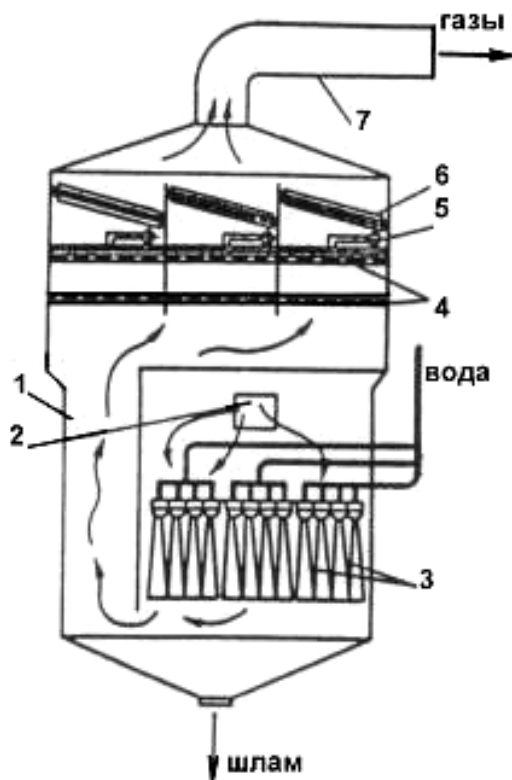


Рис. 30. Батарейный скруббер Вентури:

1 – корпус; 2 – ввод газов; 3 – трубы Вентури; 4 – провальные тарелки; 5 – оросительное устройство; 6 – каплеотбойник; 7 – отвод газов

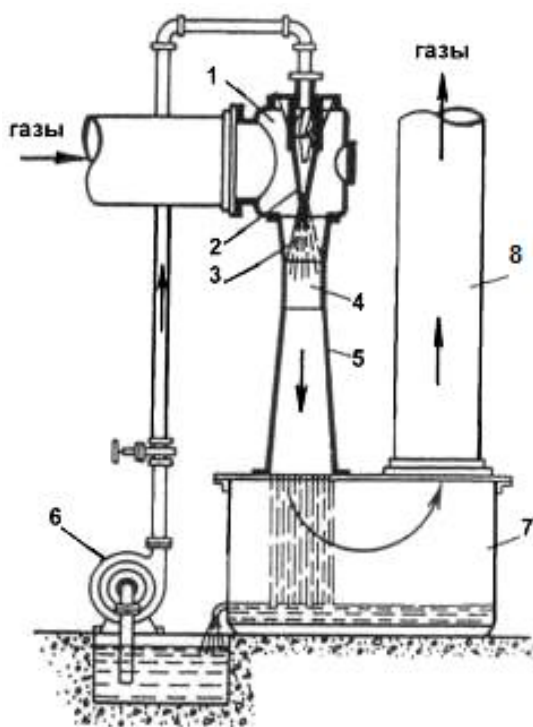


Рис. 31. Принципиальная схема эжекторного скруббера:

1 – приемная камера; 2 – форсунка;
3 – онфузор; 4 – камера смешения;
5 – диффузор; 6 – насос; 7 – резервуар-отстойник; 8 – выхлопной патрбок

4.8. Туманоуловители

Для очистки воздуха от туманов кислот, щелочей, масел и других жидкостей используют волокнистые фильтры, принцип действия которых основан на осаждении капель на поверхности волокон и пор с последующим стеканием жидкости под действием сил тяжести. Осаждение капель жидкости на поверхности волокон и пор происходит под действием всех ранее рассмотренных механизмов отделения частиц загрязнителя от газовой фазы на фильтроэлементах.

Туманоуловители делят на *низкоскоростные* ($v_r \leq 0,15$ м/с), в которых преобладает механизм диффузионного осаждения капель, и *высокоскоростные* ($v_r = 2-2,5$ м/с), где осаждение происходит главным образом под воздействием инерционных сил.

Фильтрующий элемент низкоскоростного туманоуловителя показан на рис. 32. В пространство между двумя цилиндрами **3**, изготовленными из сеток, помещается волокнистый фильтроэлемент **4**, который крепится через фланец **2** к корпусу туманоуловителя **1**. Жидкость, осевшая на фильтроэлементе, стекает на нижний фланец **5** и затем через трубку гидрозатвора **6** и стакана **7** сливается из фильтра. Волокнистые низкоскоростные туманоуловители обеспечивают очень высокую эффективность очистки (до 0,999) газа от частиц размером менее 3 мкм и полностью улавливают частицы большего размера. Волокнистые слои формируются набивкой стекловолна диаметром от 7 до 30 мкм или полимерных волокон (лавсана, ПВХ, полипропилен) диаметром от 12 до 40 мкм. Толщина слоя составляет 5–15 см. Гидравлическое сопротивление сухих фильтроэлементов равно 200–1000 Па, а в режиме очистки без образования твердого осадка – 1200–2500 Па.

Высокоскоростные туманоуловители имеют меньшие габаритные размеры и обеспечивают эффективность очистки газа от тумана с частицами менее 3 мкм, равную 0,90–0,98 при $\Delta p=1500\text{--}2000$ Па. В качестве фильтрующей набивки в таких туманоуловителях используются войлоки из полипропиленовых волокон, которые успешно работают в среде разбавленных и концентрированных кислот (H_2SO_4 , HCl , HF , H_3PO_4 , HNO_3) и сильных щелочей.

В тех случаях, когда диаметр капель тумана составляет 0,6–0,7 мкм и менее, для достижения приемлемой эффективности очистки приходится увеличивать скорость фильтрации до 4,5–5 м/с. Рост скорости фильтрации приводит к заметному брызгоуносу с выходной стороны фильтроэлемента (брызгоунос обычно возникает уже при скоростях 1,7–2,5 м/с). Значительно уменьшить брызгоунос можно применением брызгоуловителей в конструкции туманоуловителя.

Для улавливания жидких частиц размером более 5 мкм применяют брызгоуловители из пакетов сеток. Захват частиц жидкости в таких брызгоуловителях (рис. 33) происходит за счет эффекта касания и инерционных сил. Скорость фильтрации в брызгоуловителях не должна превышать 6 м/с.

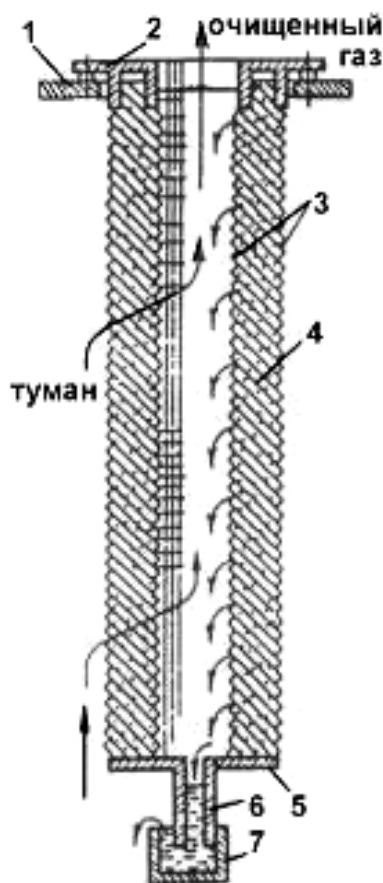


Рис. 32. Фильтрующий элемент низкоскоростного туманоуловителя

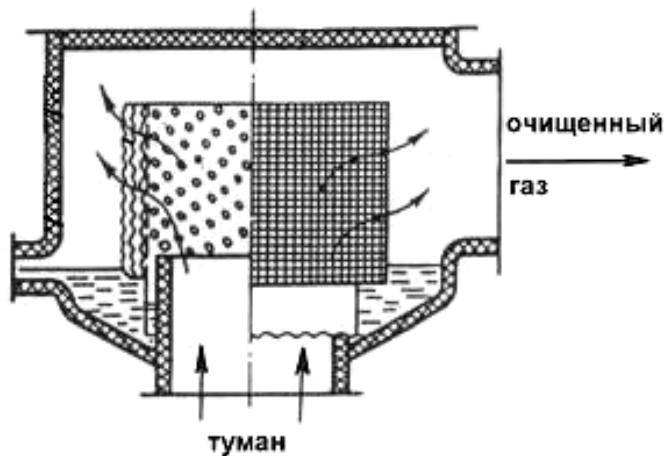


Рис. 33. Высокоскоростной фильтр

Контрольные вопросы

1. Объясните назначение, принцип работы и устройство полых газопромывателей.
2. Принцип работы и устройство насадочного газопромывателя.
3. Принцип работы и устройство барботажных и пенных аппаратов.
4. Принцип действия и устройство газопромывателей ударноинерционного действия.
5. Устройство и принцип работы газопромывателей центробежного действия.
6. Принцип действия скоростных газопромывателей.
7. Назначение, конструкционные особенности низкоскоростных и высокоскоростных туманоуловителей.

Лекция 5. Мокрые методы пылеочистки с использованием явлений абсорбции и хемосорбции

Процессы очистки технологических и вентиляционных выбросов машиностроительных предприятий от газо- и парообразных примесей характеризуются рядом особенностей: во-первых, газы, выбрасываемые в атмосферу, имеют достаточно высокую температуру и содержат большое количество пыли, что существенно затрудняет процесс газоочистки и требует предварительной подготовки отходящих газов; во-вторых, концентрация газообразных и парообразных примесей (чаще в вентиляционных и реже в технологических выбросах) обычно переменна и очень низка.

Методы очистки промышленных выбросов от газообразных примесей по характеру протекания физико-химических процессов делятся на две группы:

- промывка выбросов растворителями примеси (метод абсорбции);
- промывка выбросов растворами реагентов, связывающих примеси химически (метод хемосорбции);

5.1. Метод абсорбции

Этот метод заключается в разделении газовой смеси на составные части путем поглощения одного или нескольких газовых компонентов этой смеси поглотителем (называемым *абсорбентом*) с образованием раствора. Физическая сущность процесса абсорбции объясняется так называемой *пленочной теорией*, согласно которой при соприкосновении жидких и газообразных веществ на границе раздела фаз газ–жидкость образуется жидкостная и газовая пленки. Растворимый в жидкости компонент газовой смеси проникает путем диффузии сначала через газовую пленку, а затем, сквозь жидкостную пленку, и поступает во внутренние слои абсорбента. Для осуществления диффузии необходимо, чтобы концентрация растворяемого компонента в газовой смеси превосходила его равновесную концентрацию над жидкостью. Чем менее насыщен раствор, тем больше он поглощает газа.

Поглощающую жидкость (абсорбент) выбирают из условия растворимости в ней поглощаемого газа, температуры и парциального давления газа над жидкостью. Решающим условием при выборе абсорбента является растворимость в нем извлекаемого компонента и ее зависимость от температуры и давления. Если растворимость газов при 0 °С и парциальном давлении 101,3 кПа составляет сотни граммов на 1 кг растворителя, то такие газы хорошо растворимы.

Для удаления из технологических выбросов таких газов, как аммиак, хлористый или фтористый водород, целесообразно применять в качестве поглотительной жидкости воду, так как растворимость их в воде составляет сотни граммов на 1 кг H₂O. При поглощении же из газов сернистого ангидрида или хлора расход воды будет значительным, так как растворимость их составляет сотые доли грамма на 1 кг воды. В некоторых специальных случаях вместо воды применяют водные растворы таких химических веществ, как серная кислота

(для улавливания водяных паров), вязкие масла (для улавливания ароматических углеводородов из коксового газа) и др.

Применение абсорбционных методов очистки, как правило, связано с использованием схем, включающих узлы абсорбции и десорбции. Десорбция растворенного газа (или регенерация растворителя) проводится либо снижением общего давления (или парциального давления) примеси, либо повышением температуры, либо использованием обоих приемов одновременно.

В зависимости от конкретных задач применяются абсорберы различных конструкций: пленочные, насадочные, трубчатые и др. Наибольшее распространение получили скрубберы, представляющие собой химически инертную насадку, размещенную в полости вертикальной колонны (рис. 34). В качестве насадки 1, обеспечивающей большую поверхность контакта газа с жидкостью, обычно используются кольца Рашига (рис. 35), кольца с перфорированными стенками и др. Материалы для изготовления насадки (керамика, фарфор, уголь, пластмассы, металлы) выбираются исходя из соображений антикоррозионной устойчивости. Орошение колонн абсорбентом осуществляется при помощи одного или нескольких разбрызгивателей.

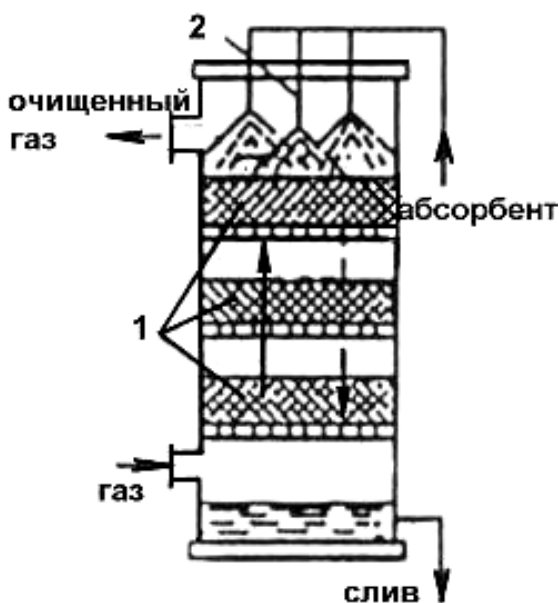


Рис. 34. Орошаемая противопоточная насадочная башня:

- 1 – химически инертная насадка;
- 2 – разбрызгиватели

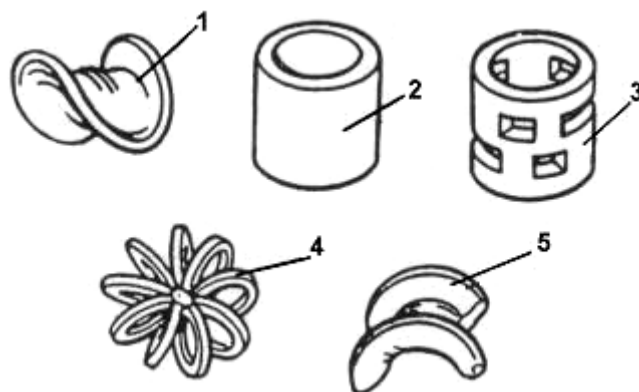


Рис. 35. Формы стандартных элементов насадки:

- 1 – седло Берля; 2 – кольцо Рашига;
- 3 – кольцо Паля; 4 – розетка Теллера;
- 5 – седло «Инталокс»

Большое распространение получили башни с колпачковыми тарелками. На рис. 36 изображена схема устройства тарельчатого абсорбера, в котором вместо насадки установлено несколько тарелок 1. Каждая тарелка снабжена колпачками 2 с зубчатыми краями, патрубками 3 и переливными трубками 4. Абсорбент в этих аппаратах стекает от тарелки к тарелке по переливным трубкам. Очищаемый газ движется снизу вверх в направлении, указанном стрелками, барботируя через слой жидкости. При прохождении между зубцами колпачков газ

разбивается на множество струек и пузырьков, в результате чего образуется большая поверхность соприкосновения взаимодействующих веществ.

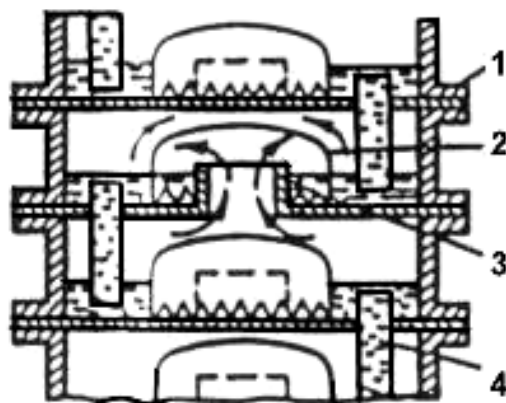


Рис. 36. Схема колпачково-тарельчатого абсорбера:

1 – тарелки; 2 – колпачки с зубчатыми краями; 3 – патрубки; 4 – переливные трубки

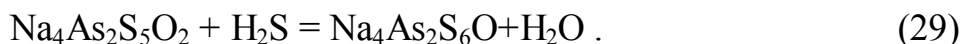
В качестве абсорберов могут использоваться и такие устройства, как мокрые скрубберы Вентури и центробежные скрубберы (рис. 28 и 29) и др.

5.2. Метод хемосорбции

Этот метод основан на поглощении газов и паров твердыми или жидкими поглотителями с образованием малолетучих или малорастворимых химических соединений. Большинство реакций, протекающих в процессе хемосорбции, являются экзотермическими и обратимыми, поэтому при повышении температуры раствора образующееся химическое соединение разлагается с выделением исходных элементов.

Поглотительная способность хемосорбента почти не зависит от давления, поэтому хемосорбция более выгодна при небольшой концентрации вредных примесей в отходящих газах.

Примером хемосорбции может служить очистка газовой смеси от сероводорода путем применения мышьяковощелочного, этаноламинового и других растворов. При мышьяковощелочном методе извлекаемый из отходящего газа сероводород связывается оксисульфомышьяковой солью, находящейся в водном растворе по реакции:



Регенерация раствора производится окислением образовавшегося продукта кислородом, содержащимся в очищаемом воздухе:



В этом случае в качестве побочного продукта получается сера.

Основным видом аппаратуры для реализации процессов хемосорбции служат насадочные башни, пенные и барботажные скрубберы, распылительные аппараты типа труб Вентури и аппараты с различными механическими распылителями. В промышленности распространены аппараты с подвижной насадкой, к достоинствам которых относятся высокая эффективность разделения при умеренном гидравлическом сопротивлении, а также большая пропускная способность по газу.

На рис. 37 показана принципиальная схема скруббера с подвижной насадкой. В верхней части аппарата установлен ороситель **1**, а под ним размещены верхняя **2** и нижняя опорная **5** ограничительные решетки, между которыми находится подвижная насадка. К опорной решетке меньшим основанием прикреплен расширяющийся усеченный кольцевой элемент **4**, делящий пространство опорной решетки на кольцевую **3** и центральную **6** зоны. В качестве насадочных тел используют полые, сплошные и перфорированные шары, а также кольца, полукольца, кубики, скрещенные сплошные и перфорированные диски.

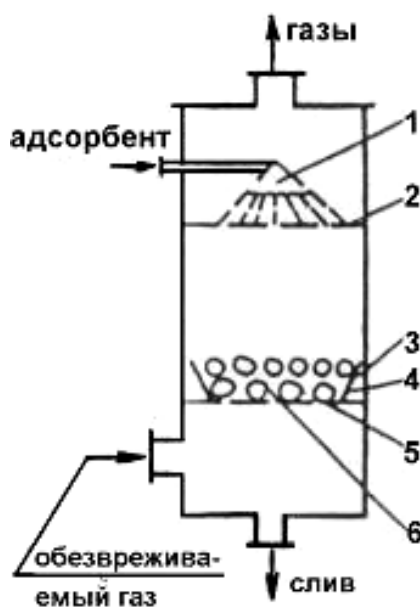


Рис. 37. Скруббер с подвижной насадкой

Обрабатываемый газ подается в аппарат под опорную решетку и делится на два потока: центральный и кольцевой. При прохождении кольцевой зоны поток газа сужается, увеличивает скорость движения, вступает в контакт с прижимаемыми к стенке элементами подвижной насадки и перемещает их от стенки в центральный поток. Насадка совершает пульсационное движение в центральном и прилегающем к стенке аппарата потоках, турбулизирует взаимодействующие фазы и обеспечивает высокую эффективность обработки газа жидкостью. В тех случаях, когда в результате процесса выпадает осадок, подвижная насадка удаляет его со стенок корпуса аппарата или опорной решетки.

Преимущество абсорбционных методов заключается в экономичности очистки большого количества газов и осуществлении непрерывных технологи-

ческих процессов. Эффективность мокрой очистки газов, отходящих, например, от гальванических ванн с помощью скруббера при обезвреживании их 2–3 %-ным водным раствором едкой щелочи, составляет по хлороводороду 0,85–0,92 и по оксидам азота (NO_2) – 0,65. При использовании в качестве поглотительной жидкости воды эффективность очистки по HCl снижается до 0,75.

Основной недостаток мокрых методов состоит в том, что перед очисткой и после ее осуществления сильно понижается температура газов, что приводит в конечном итоге к снижению эффективности рассеивания остаточных газов в атмосфере. Кроме того, оборудование мокрых методов очистки громоздко и требует создания системы жидкостного орошения. В процессе работы абсорбционных аппаратов образуется большое количество отходов, представляющих смесь пыли, растворителя и продуктов поглощения. В связи с этим возникают проблемы обезжиривания, транспортировки или утилизации шлама, что удорожает и осложняет эксплуатацию.

5.3. Очистка газов от продуктов окисления щелочных металлов

Натрий и другие щелочные металлы (K, Li и эвтектика), используемые в качестве теплоносителя различных энергетических установок, обычно имеют температуру, превышающую температуру их воспламенения на воздухе. Поэтому при протечке в помещение с обычной атмосферой они загораются. При горении образуется большое количество аэрозольных продуктов сгорания металла. Так как натриевый дым очень вреден для здоровья человека (при контакте окислов натрия с парами воды образуется гидроокись натрия – щелочь), необходимо разрабатывать эффективные средства локализации аэрозолей с целью их улавливания раньше, чем они поступят в смежные помещения или систему вентиляции и далее в окружающую среду.

Обычно при горении натрия на воздухе образуются «сухие» аэрозоли продуктов его сгорания: в основном окислы и карбонаты натрия. Но при возникновении аварии, например, на парогенераторе возможно образование как «сухих» аэрозолей при горении натрия, так и «мокрых» аэрозолей при взаимодействии натрия с водой. «Мокрые» аэрозоли образуются также при проведении работ по очистке технологического оборудования от остатков натрия и уничтожению отходов его взаимодействия с компонентами атмосферы.

Таким образом, система локализации натриевых аэрозолей должна обеспечивать:

- высокую эффективность очистки от дисперсной фазы дыма (не менее 99,9 % по массе);
- очистку сухого и влажного воздуха от продуктов горения натрия и взаимодействия его с водой.

При создании такой системы можно использовать известные способы сухого и мокрого пылеулавливания.

Применение сухого пылеулавливания связано с рядом существенных недостатков, а именно:

- перед очисткой газ необходимо охладить или использовать термостойкие фильтрующие материалы;
- из-за малой пылеемкости простого фильтра требуется использовать комбинированный или многослойный фильтр, имеются определенные трудности при удалении такого фильтра (особенно радиоактивного);
- малый ресурс фильтра при очистке воздуха от «мокрых» аэрозолей.

Для этой цели способы мокрого пылеулавливания по сравнению с сухими являются более технологичными, так как процесс отвода тепла от очищаемого газа совмещается с процессом его очистки, а переработка жидких щелочных отходов может быть проведена известными методами и совмещена с обычной для всей установки системой очистки оборудования от натрия.

В ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР» предложен способ мокрого пылеулавливания аэрозолей натрия и его примесей. Показана принципиальная возможность создания системы локализации аэрозолей натрия (СЛА) с использованием этого способа. Конструктивно (рис. 38, 39) установка состоит из оросительной колонны (распыление или разбрызгивание воды), пенного скруббера с брызгоуловителем в виде насыпки из колец Рашига, слоя мокрых фильтров из материала ФРНК-1 и абсолютного фильтра из материала ФПП или другого типа. Установка автономна, проста в изготовлении и эксплуатации. Технически выгодно использование замкнутого водяного контура и периодической промывки мокрого фильтра. В этом случае ресурс работы установки СЛА ограничен только требованиями радиационной безопасности в случае очистки воздуха от продуктов горения радиоактивного натрия.

Установка очищает воздух как от «сухих» так и «мокрых» аэрозолей продуктов горения натрия и взаимодействия его с другими веществами, например, водой. Эффективность очистки воздуха от аэрозолей натрия, радионуклидов йода и цезия достигает 99,95 %, проскок их – не более 0,1 %.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия аппаратов мокрой пылеочистки, использующих метод абсорбции.
2. Особенности мокрой очистки газовой смеси методом хемосорбции.
3. Дайте характеристику аэрозольных продуктов, образующихся при взаимодействии щелочных металлов с компонентами атмосферы (кислородом и водой). Почему требуется очищать газовую среду от этих примесей?
4. Объясните принцип действия и устройство системы очистки газовой среды от продуктов окисления щелочных металлов.

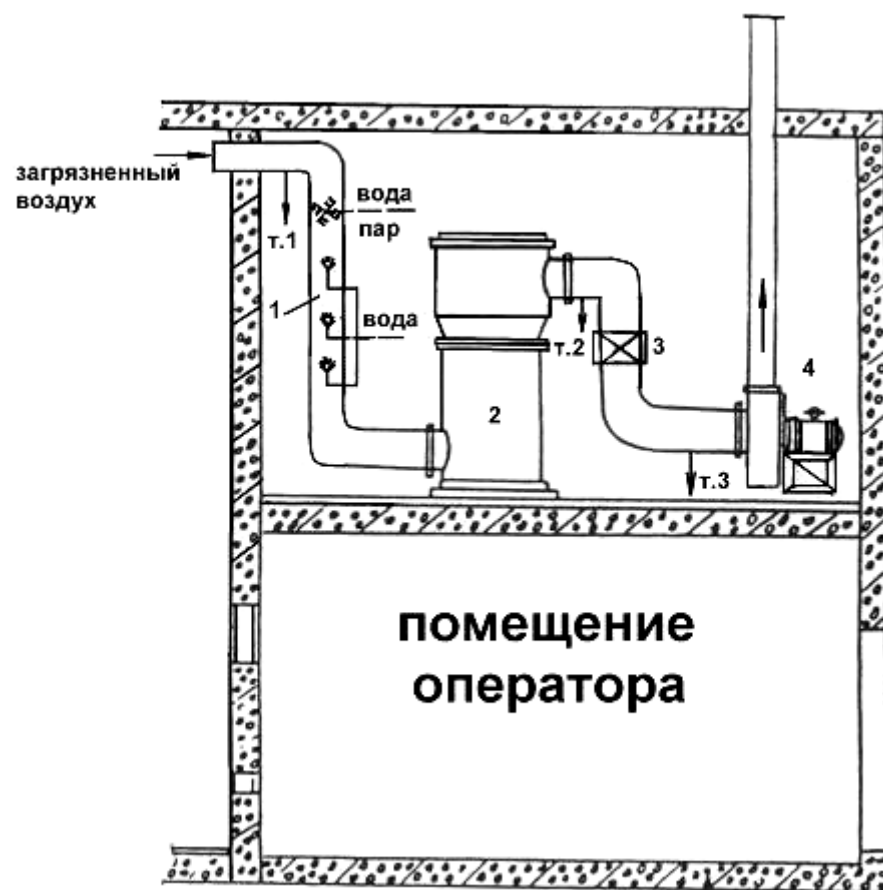


Рис. 38. Блок-схема установки по очистке воздуха от аэрозольных продуктов горения щелочных металлов:
1 – оросительная колонна; 2 – двухполочный пенный скруббер;
3 – абсолютный фильтр из материала ФПП; 4 – побудитель расхода; т.1–т.3 – точки отбора проб газоаэрозольной среды

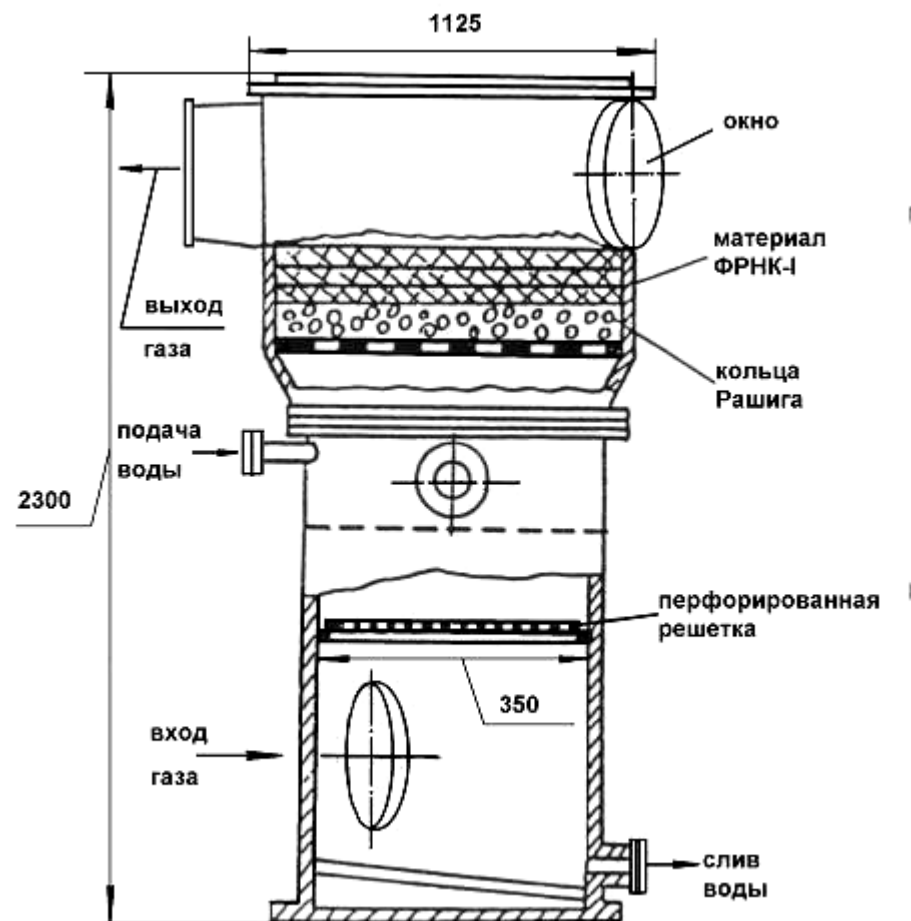


Рис. 39. Двухполочный пенный скруббер с насадкой из колец Рашига и мокрого фильтра из материала ФРНК-I (3 слоя), рассчитанный на оптимальный расход газа на очистку равный $3000 \text{ м}^3/\text{ч}$

Лекция 6. Методы адсорбционной очистки, каталитического и термического обезвреживания отходящих газов

6.1. Адсорбционный метод очистки газов

Метод основан на физических свойствах некоторых твердых тел с ультрамикроскопической структурой селективно извлекать и контролировать на своей поверхности отдельные компоненты из газовой смеси. В пористых телах с капиллярной структурой поверхностное поглощение дополняется капиллярной конденсацией.

Адсорбция подразделяется на *физическую адсорбцию* и *хемосорбцию*. При *физической адсорбции* молекулы газа прилипают к поверхности твердого тела под действием межмолекулярных сил притяжения (силы Ван-дер-Ваальса). Высвобождающаяся при этом теплота зависит от силы притяжения и по порядку значения совпадает с теплотой конденсации паров. Преимущество физической адсорбции – обратимость процесса. При уменьшении давления адсорбата в потоке газа либо при увеличении температуры поглощенный газ легко десорбируется без изменения химического состава. Обратимость данного процесса исключительно важна, если экономически выгодно рекуперировать адсорбируемый газ или адсорбент.

В основе *хемосорбции* лежит химическое взаимодействие между адсорбатом (поглощаемым газом) и адсорбируемым веществом. Действующие при этом силы сцепления значительно больше, чем при физической адсорбции соответственно и высвобождающаяся при хемосорбции теплота существенно больше и по порядку значения (от 20 до 400 кДж/моль) совпадает с теплотой реакции. Ввиду большой теплоты адсорбции энергия, необходимая для взаимодействия хемосорбированной молекулы с молекулой другого сорта, может быть существенно меньше энергии, необходимой для реакции молекул двух различных видов непосредственно в газовой фазе, т. е. поверхность твердого вещества может оказаться катализатором, увеличивающим скорость некоторых химических реакций. Процесс хемосорбции, как правило, необратим: при десорбции меняется химический состав адсорбата. Поэтому, если желательна регенерация адсорбента или рекуперация адсорбата, то адсорбирующую среду следует выбирать таким образом, чтобы преобладали процессы физической адсорбции.

В качестве адсорбентов или поглотителей применяют вещества, имеющие большую площадь поверхности на единицу массы. Удельная поверхность активированных углей, например, достигает 10^5 – 10^6 м²/кг. Их применяют для очистки газов от органических паров, удаления неприятных запахов и газообразных примесей, содержащихся в незначительных количествах в промышленных выбросах, а также летучих растворителей и др. В качестве адсорбентов применяют также простые и комплексные оксиды (активированный глинозем, силикагель, активированный оксид алюминия, синтетические цеолиты или молекулярные сита), которые обладают большей селективной способностью, чем активированные угли. Однако их нельзя использовать для очистки очень влажных

газов. Некоторые адсорбенты иногда пропитывают реактивами, повышающими эффективность адсорбции, так как на поверхности адсорбента происходит хемосорбция.

В последнее время метод адсорбции на угле используется для очистки газовых отходов от газообразных радиоактивных веществ.

В промышленных установках очистки технологических газов АЭС применяют два основных метода дезактивации радиоактивных газообразных отходов. Первый включает задержку радиоактивных газов в камерах выдержки, второй – адсорбцию их на угольных сорбентах. В обоих случаях используют естественный распад радионуклидов в процессе выдержки перед выбросом в атмосферу. Второй метод использует процессы, которые происходят только при низких температурах. К таковым можно отнести криогенную дистилляцию и абсорбцию фреонами.

В составе газовых сдувок реакторов типа ВВЭР, РБМК и ВК содержатся атомарный кислород и водород – продукты радиолитического разложения воды в реакторе. Для обеспечения безопасности АЭС необходимо снизить содержание водорода в технологических газах до взрывобезопасных концентраций либо разбавлением инертным газом, либо сжиганием. Однако разбавление водорода, например, азотом, существенно увеличивает объем газов, подлежащих дальнейшей дезактивации. Поэтому в установках очистки технологических газов АЭС широкое распространение получило каталитическое сжигание водорода в специальных контактных аппаратах.

Инертные радиоактивные газы не вступают в химические реакции с другими газообразными и твердыми веществами. Поэтому их удаляют из технологических газов АЭС физическими способами. При этом для получения наибольшего эффекта необходимо предварительно очистить эти газы от ряда примесей. Для реакторов с водяным теплоносителем такой примесью является вода, с натриевым теплоносителем – натрий и его окислы.

Для реакторов типа ВВЭР, РБМК и ВК осушку газовой смеси после узла сжигания проводят с помощью цеолитов либо вымораживанием. Применяют и комбинированные системы осушки: вначале осушают в цеолитовых адсорберах, затем влагу вымораживают.

Наибольшее распространение для очистки технологических газов АЭС получил способ очистки с помощью сорбции радиоактивных Хе и Кг на активированном угле.

Принцип работы адсорбционной системы очистки состоит в следующем (рис. 40). На вход системы очистки поступает парогазовая смесь газовых сдувок. Смесь состоит из атмосферного воздуха, присасываемого в вакуумную часть турбины через неплотности, гремучего газа, образующегося в результате радиолиза воды в реакторе, и водяного пара. Газовые и негазовые радиоактивные и нерадиоактивные продукты присутствуют в очищаемой среде как примеси. Водяной пар добавляется для поддержания взрывобезопасной концентрации водорода. После сжигания гремучего газа и конденсации пара смесь проходит глубокую осушку. В систему могут входить узлы охлаждения газа, удаления

отравляющих уголь примесей и др. Задерживаясь в узле адсорбции – угольной колонне – радиоактивные продукты распадаются. На выходе угольной колонны остаются только долгоживущие радиоактивные нуклиды криптона, ксенона и тритий.

Некоторые примеси при повышении концентрации их в газовой смеси могут снижать коэффициенты адсорбции Кг и Хе на угле. К их числу относится прежде всего вода.

Кроме того, в газовых отходах кипящих реакторов могут присутствовать углекислый газ, аммиак, двуокись азота, пары масел (органические примеси). Влияние их на адсорбционные свойства угля проявляется при более высоких концентрациях в сравнении с водой.

На основе подробного рассмотрения динамики сорбционного процесса в угольной колонне установлено, что для любого режима концентрацию газового компонента (С) в любой точке по длине колонны можно найти из соотношения:

$$C = C_0 \cdot \exp \left[-\frac{x}{u} \cdot \Gamma \cdot \lambda \right], \quad (31)$$

где С – концентрация компонента между зернами на расстоянии х от начала слоя сорбента; u – скорость газовой воздушного потока; λ – постоянная распада; Γ – коэффициент адсорбции; $\tau' = x/u$ – условное время движения газа в слое угля; $\tau_i = \Gamma_i \cdot x/u$ – реальное время задержки газа колонной активированного угля в режиме постоянной продувки.

Для промышленных адсорберов, длина которых не менее нескольких десятков сантиметров и скорость газа невелика ($< 0,1$ м/с), необходимую массу сорбента можно вычислять из соотношения:

$$m = G\tau\rho/\Gamma, \quad (32)$$

где m – масса сорбента; G – расход очищаемого газа; τ – время «защитного» действия сорбента; ρ – насыпная плотность сорбента.

Коэффициент очистки определяется из соотношения

$$C_{i0}/C_i = \exp [-\lambda \Gamma_i \cdot x/u]. \quad (33)$$

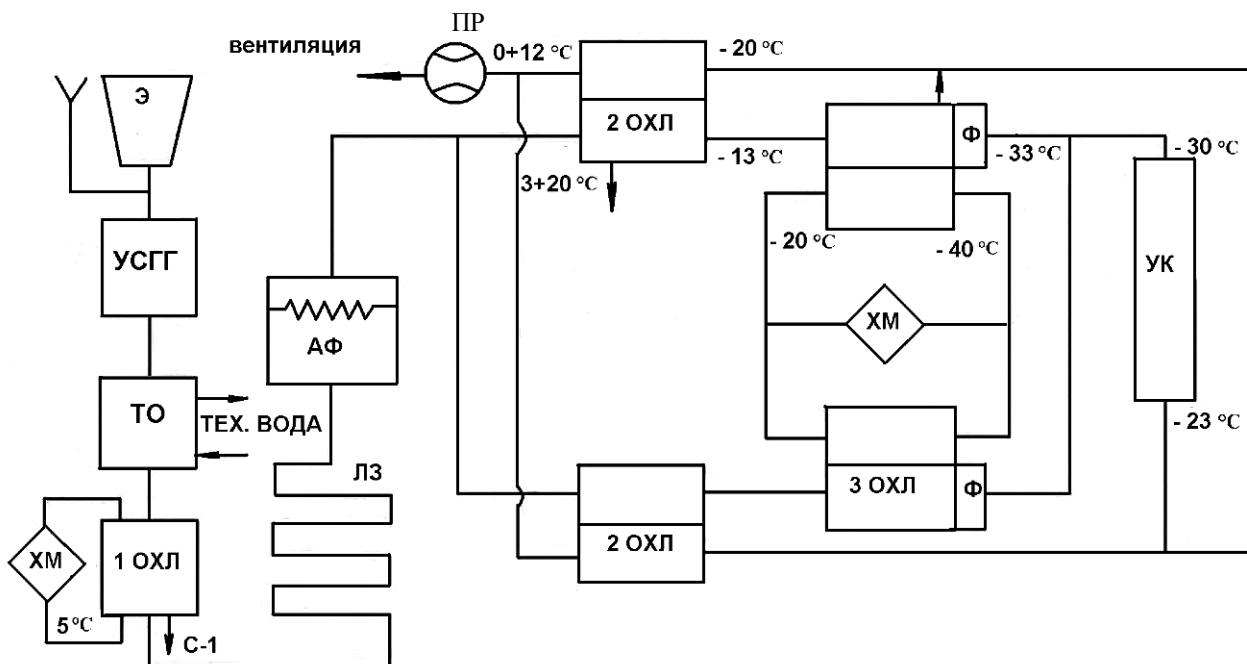


Рис. 40. Блок-схема очистки с вымораживанием влаги:

Э – эжектор; УСГГ – узел сжигания гремучего газа; ТО – теплообменник; 1 ОХЛ – охладитель; ХМ – холодильная машина; С1 – спецканализация; ЛЗ – линия задержки; АФ – аэрозольный фильтр; 2, 3 ОХЛ – охладитель-вымораживатель; Ф – фильтр от кристаллического льда; УК – угольная колонна; ПР – побудитель расхода

6.2. Каталитический метод очистки газов

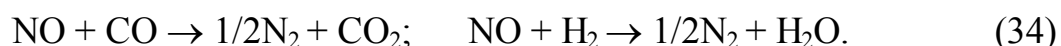
Этим методом превращают токсичные компоненты выбросов в вещества безвредные или менее вредные для окружающей среды путем введения в систему дополнительных веществ, называемых *катализаторами*. Каталитические методы основаны на взаимодействии удаляемых веществ с одним из компонентов, присутствующих в очищаемом газе, или со специально добавляемым в смесь веществом на твердых катализаторах. Действие катализаторов проявляется в промежуточном (поверхностном) химическом взаимодействии с реагирующими соединениями, в результате которого образуются промежуточные вещества и регенерированный катализатор.

В большинстве случаев катализаторами могут быть металлы или их соединения (платина и металлы платинового ряда, оксиды меди и марганца и т.д.). Для осуществления каталитического процесса необходимы незначительные количества катализатора, расположенного таким образом, чтобы обеспечить максимальную поверхность контакта с газовым потоком. Катализаторы обычно выполняются в виде шаров, колец или проволоки, свитой в спираль. Катализатор может состоять из смеси неблагородных металлов с добавкой платины и палладия (сотые доли % к массе катализатора), нанесенных в виде активной пленки на нихромовую проволоку, свитую в спираль.

Существенное влияние на скорость и эффективность каталитического процесса оказывает температура газа. Для каждой реакции, протекающей в потоке газа, характерна *минимальная температура начала реакции*, ниже которой катализатор не проявляет активности.

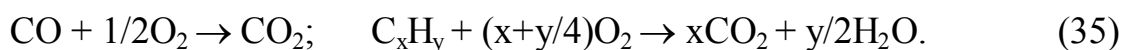
Для поддержания необходимой температуры газа иногда к нему подмешивают (особенно в пусковой период) продукты сгорания от вспомогательной горелки, работающей на высококалорийном топливе. На рис. 41. представлен каталитический реактор, предназначенный для окисления толуола, содержащегося в газоздушных выбросах цехов окраски. Воздух, содержащий примеси толуола, подогревается в межтрубном пространстве теплообменника – рекуператора **1**, откуда по переходным каналам он поступает в подогреватель **4**. Продукты сгорания природного газа, сжигаемого в горелках **5**, смешиваются с воздухом, повышая его температуру до 250–350 °С, т. е. до уровня, обеспечивающего оптимальную скорость окисления толуола на поверхности катализатора. Процесс химического превращения происходит на поверхности катализатора **3**, размещенного в контактном устройстве **2**. В качестве катализатора применена природная марганцевая руда (пиролизит) в виде гранул размером 2–5 мм, промотированных азотнокислым палладием. В результате окисления толуола образуются нетоксичные продукты: оксид углерода и водяные пары ($C_7H_8 + 9O_2 \rightarrow 7CO_2 + 4H_2O$). Смесь воздуха и продуктов реакции при температуре 350–450 °С направляется в рекуператор **1**, где отдает тепло газоздушному потоку, идущему на очистку, и, через выходной патрубок выводится в атмосферу. Эффективность очистки такого реактора составляет 95–98 % при расходе вспомогательного топлива (природного газа) 3,5–4,0 м³ на 1000 м³ очищаемого газа.

В последние годы каталитический метод очистки нашел свое применение в процессах нейтрализации выхлопных газов автомобилей. Для комплексной очистки выхлопных газов – окисления продуктов неполного сгорания и восстановления оксида азота – применяют двухступенчатый каталитический нейтрализатор (рис. 42). Установка состоит из последовательно соединенных восстановительного **2** и окислительного **4** катализатора. Отработавшие газы через патрубок **1** поступают к восстановительному катализатору **2**, на котором происходит нейтрализация оксидов азота по следующим реакциям:



В качестве восстановительного катализатора применяют монельметалл (медноникелевый сплав) или катализатор из благородных металлов (например, платина на глиноземе). Эффективность очистки по NO достигает 90 % и выше.

После восстановительного катализатора к отработавшим газам для создания окислительной среды через патрубок **3** подводится вторичный воздух. На окислительном катализаторе происходит нейтрализация продуктов неполного сгорания – оксида углерода и углеводородов:



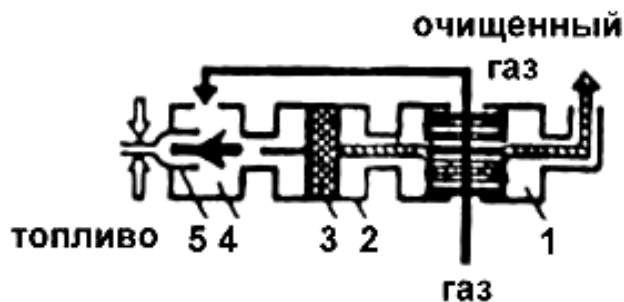


Рис. 41. Каталитический реактор:
1 – теплообменник-рекуператор; 2 – контактное устройство; 3 – катализатор;
4 – подогреватель; 5 – горелки

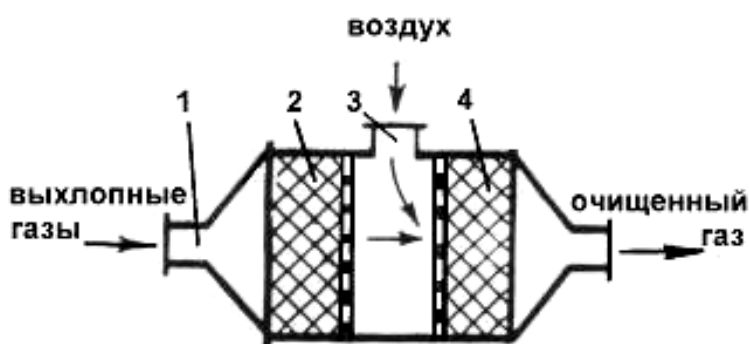


Рис. 42. Двухступенчатый каталитический нейтрализатор:
1 – входной патрубок; 2 – восстановительный катализатор; 3 – патрубок вторичного воздуха;
4 – окислительный катализатор

Для окислительных процессов применяют катализатор из благородных металлов или оксидов переходных металлов (медь, никель, хром и др.). Содержание оксида углерода в выхлопных газах автомобиля с нейтрализатором снижается почти в 10 раз, а углеводородов – примерно в 8 раз.

6.3. Термический метод обезвреживания газов

Достаточно большое развитие в отечественной практике нейтрализации вредных примесей, содержащихся в вентиляционных и других выбросах, получило *высокотемпературное дожигание (термическая нейтрализация)*. Для осуществления дожигания (реакций окисления) необходимо поддержание высоких температур очищаемого газа и наличие достаточного количества кислорода. Выбор схемы дожигания зависит от температуры и количества выбросов, а также от содержания в них вредных примесей, кислорода и других компонентов. Если выбрасываемые газы имеют высокую температуру, процесс дожигания происходит в камере с подмешиванием свежего воздуха. Так происходит дожигание оксида углерода в газах, удаляемых системой вентиляции от элек-

тродуговых плавительных печей, дожигание продуктов неполного сгорания (CO и C_xH_y) автомобильного двигателя непосредственно на выходе из цилиндров в условиях добавки избыточного воздуха. Если температура выбросов недостаточна для протекания окислительных процессов, то в потоке отходящих газов сжигают природный или другой высококалорийный газ.

Одним из простейших устройств, используемых для огневого обезвреживания технологических и вентиляционных выбросов, является горелка, предназначенная для сжигания природного газа (рис. 43.). Обезвреживаемые выбросы в этом случае подаются в канал 1, где они омывают горелку 2. Из коллектора 3 газ, служащий топливом, поступает в сопла, при истечении из которых инжектируется первичный воздух из окружающей среды. Горение смеси газа с первичным воздухом осуществляется в V-образной полости коллектора. Процесс догорания происходит на выходе из полости, где хвостовая часть факела контактирует с обезвреживаемыми выбросами при их истечении из кольцевой щели между корпусом горелки и коллектора.

Разработана и успешно прошла испытания установка очистки газоздушных выбросов лакокрасочного производства. Она представляет собой циклонную топку (рис. 44), скомпонованную с газовой горелкой и камерой разбавления газов после их очистки. Воздух, загрязненный вредными органическими веществами (толуол, ксилол и др.), поступает в вихревую двухзонную полость печи 4 по тангенциальным каналам 5. Природный газ подается в горелку 2 по трубе 3. Время пребывания в полости (не менее 0,5 с) и контакт с раскаленными стенками камеры обеспечивают полноту их сгорания. Атмосферный воздух подается по центральной трубе 1 горелки 2 только при обезвреживании выбросов, содержащих менее 15 % кислорода.

Системы огневого обезвреживания обеспечивают эффективность очистки 90–99 %, если время пребывания газа в высокотемпературной зоне не менее 0,5 с и температура не менее 500–650 °С, а содержащих оксид углерода – 600–750 °С.

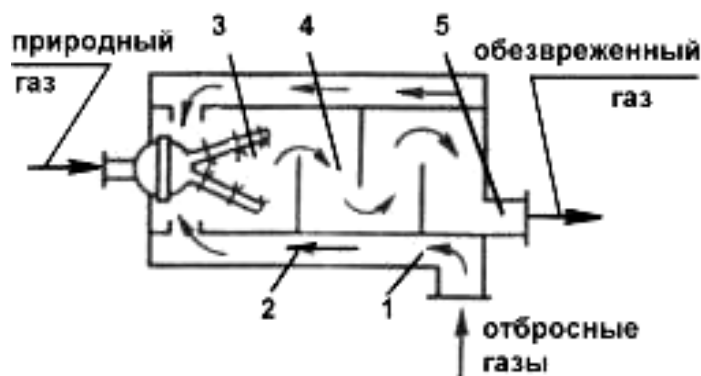


Рис. 43. Установка огневого обезвреживания:

1 – входной патрубок; 2 – теплообменник-подогреватель; 3 – V-образная полость коллектора горелки; 4 – камера смешения; 5 – выходной патрубок

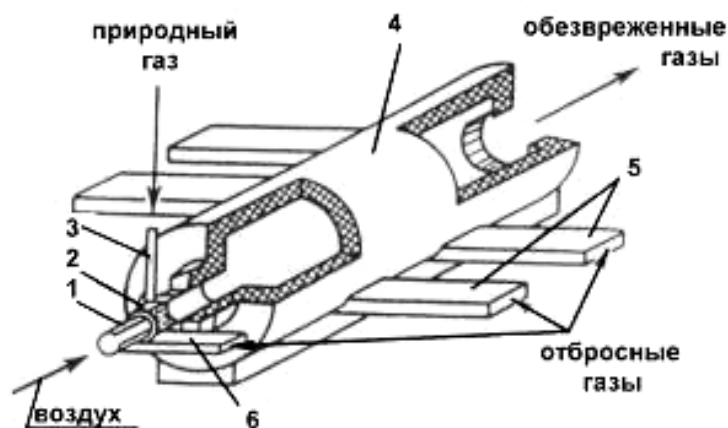


Рис. 44. Установка очистки выбросов лакокрасочного производства:
 1 – входная труба атмосферного воздуха; 2 – вихревая двухзонная горелка; 4 – входная труба природного газа; 5 – входные тангенциальные каналы грязного газа

Контрольные вопросы

1. Сущность физической адсорбции. Практическое применение метода физической адсорбции с использованием угольного сорбента.
2. Сущность явления хемосорбции; необратимость процесса хемосорбции.
3. Сущность каталитического метода очистки газов, практическое его применение.
4. Практическое применение термического метода обезвреживания газов.

Список литературы

1. Бертокс П. Стратегия защиты окружающей среды от загрязнений / П. Бертокс, Д. Радд. – М., изд. «Мир», 1980.
2. Воронцов А.А. Охрана природы / А.А. Воронцов, Е.А. Щетинский, И.Д. Никодимов. – М., ВО «Агропромиздат», 1989.
3. Киреев В.А. Краткий курс физической химии. – М., Госнаучтехиздат химической литературы, 1962.
4. Кобзарь И.Г.. Очистка воздуха от продуктов горения натрия // Совещание специалистов МАГАТЭ «Натриевые пожары», Обнинск, 1988.
5. Логинов Н.Я. Аналитическая химия: Учебное пособие для студентов химико-биологической и биолого-химической специальностей пед. институтов / Н.Я. Логинов, А.Г. Воскресенский, И.С. Солодкин. – М., «Просвещение», 1975.
6. Мазур И.И. Инженерная экология: Общий курс в 2-х томах. Справочное пособие /И.И. Мазур, О.И. Молдованов, В.Н. Шишов. Под ред. И.И. Мазура. – Москва, Высшая школа, 1986.
7. Неницеску К. Общая химия. М., «Мир», 1968.
8. Охрана окружающей среды / Под ред. проф. С.В. Белова. – М., «Высшая школа», 1991.
9. А.И. Родионов, В.Н. Клушин, В.Г. Систер. Технологические процессы экологической безопасности. Калуга, 2000.
10. Руководство по испытанию и оценке воздушных фильтров для систем приточной вентиляции и кондиционирования воздуха. М., Стройиздат, 1979.
11. Стырикович М.А. Процессы генерации пара на электростанциях / М.А. Стырикович, О.И. Мартынова, З.Л. Миропольский, под общ. ред. акад. М.А. Стыриковича. – М., «Энергия», 1969.
12. Торочешников Н.С. Техника защиты окружающей среды / Н.С. Торочешников, А.И. Родионов, Н.В. Кельцев, В.Н. Клушин. – М., «Химия», 1981.
13. Фриш С.Э. Курс общей физики. Том 1. Физические основы механики, молекулярная физика, колебания и волны / С.Э. Фриш, А.В. Тиморева. – М., 1962.
14. Цветкова Л.И. Экология: Учебник для технических вузов / Л.И. Цветкова, М.И. Алексеев, Б.П. Усанов и др. – Изд. АСВ; Спб; Химиздат, 1999 г.
15. Чечеткин Ю.В. Обращение с радиоактивными отходами / Ю.В. Чечеткин, А.Ф. Грачев. – Самара, 2000.