

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Экология»

Н. Г. Малькевич  
Г. И. Морзак

ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОХРАНЫ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Курс лекций  
для студентов дневной и заочной форм обучения  
специальности 1-57 01 02 «Экологический менеджмент  
и аудит в промышленности»

В 4 частях

Часть 2

ОХРАНА АТМОСФЕРЫ

Минск  
БНТУ  
2014

УДК 504.06 (075.8)  
ББК 20.18 я 7  
М21

Рецензенты:

*А. А. Кологривко, В. И. Глуховский*

**Малькевич, Н. Г.**

М21 Технические основы охраны окружающей среды : курс лекций для студентов дневной и заочной форм обучения специальности 1-57 01 02 «Экологический менеджмент и аудит в промышленности» : в 4 ч. / Н. Г. Малькевич, Г. И. Морзак. – Минск : БНТУ, 2012– . – Ч. 2 : Охрана атмосферы. – 2014. – 53 с.  
ISBN 978-985-550-057-6 (Ч. 2).

Изложены современные методы снижения загрязнения атмосферы. Рассмотрены конструкции, принципы действия, методы подбора аппаратов и оборудования для очистки газовых выбросов.

Издание предназначено для студентов машиностроительных, металлургических и приборостроительных специальностей вузов, а также может быть использовано в практической деятельности специалистов промышленных предприятий для комплексного решения экологических вопросов.

Часть 1 «Контроль качества окружающей природной среды» вышла в 2012 г.

**УДК 504.06 (075.8)**  
**ББК 20.18 я 7**

**ISBN 978-985-550-057-6 (Ч. 2)**  
**ISBN 978-985-525-562-9**

© Малькевич Н. Г., Морзак Г. И., 2014  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2014

## Оглавление

Тема 9. ПРОМЫШЛЕННАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА .....	6
9.1. Промышленная вентиляция и ее классификация по способу создания воздухообмена .....	6
9.2. Естественная вентиляция.....	7
9.3. Искусственная (механическая) вентиляция .....	7
Тема 10. ПРОМЫШЛЕННАЯ И САНИТАРНАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВОЗДУШНЫХ ВЫБРОСОВ .....	8
10.1. Общие сведения об очистке газоздушных выбросов.....	9
10.2. Основные показатели, характеризующие работу газоочистного оборудования.....	10
Тема 11. ОБЕСПЫЛИВАНИЕ ГАЗОВ В СУХИХ АППАРАТАХ .....	10
11.1. Классификация и основные характеристики сухих механических пылеуловителей .....	11
11.2. Пылеосадительные камеры .....	11
11.3. Инерционные пылеуловители .....	12
11.4. Центробежные пылеуловители .....	12
11.5. Конструкции циклонов .....	13
11.6. Батарейные циклоны (мультициклоны) .....	14
11.7. Вихревые пылеуловители .....	14
11.8. Пылеуловители ротационного действия .....	15
Тема 12. МОКРАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВОЗДУШНЫХ ВЫБРОСОВ .....	16
12.1. Общие понятия и классификация аппаратов мокрой очистки газов .....	17
12.2. Подвод орошающей жидкости в мокрые газоочистные аппараты.....	17
12.3. Полые форсуночные скрубберы .....	18
12.4. Насадочные скрубберы.....	19
12.5. Тарельчатые (пенные) скрубберы.....	19
12.6. Скрубберы с подвижной насадкой .....	19
12.7. Газопромыватели ударно-инерционного действия .....	20
12.8. Центробежные скрубберы .....	20

12.9. Динамические скрубберы .....	21
12.10. Скоростные газопромыватели (скрубберы Вентури) .....	21
<b>Тема 13. ОЧИСТКА ГАЗОВОЗДУШНЫХ ВЫБРОСОВ</b>	
<b>ФИЛЬТРАМИ .....</b>	<b>22</b>
13.1. Общие сведения о процессе фильтрования и видах фильтров .....	22
13.2. Волокнистые фильтры .....	23
13.3. Воздушные фильтры .....	23
13.4. Тканевые фильтры .....	24
13.4.1. Классификация тканевых фильтров .....	24
13.4.2. Основные типы фильтров .....	24
13.5. Зернистые фильтры .....	25
<b>Тема 14. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ .....</b>	<b>25</b>
14.1. Общие положения .....	26
14.2. Устройство и принцип действия электрофильтров .....	26
14.3. Классификация электрофильтров .....	27
14.4. Конструктивные особенности и типы промышленных электрофильтров .....	28
14.5. Электрическое оборудование электрофильтров .....	29
14.6. Выбор и эксплуатация электрофильтров .....	29
<b>Тема 15. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ</b>	
<b>ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ .....</b>	<b>30</b>
15.1. Основы разработки технологической схемы газоочистки .....	30
15.2. Стадии технологического процесса очистки выбросов газов .....	31
15.3. Основы проектирования систем очистки выбросов газов .....	31
15.4. Комбинированные схемы для очистки выбросов газа .....	32
15.5. Способы интенсификации работы аппаратов для очистки выбросов газа .....	32
<b>Тема 16. Наладка, испытание и эксплуатация газоочистного</b>	
<b>оборудования .....</b>	<b>33</b>
16.1. Наладка и испытание газоочистного оборудования .....	33
16.2. Рекомендации по эксплуатации газоочистных установок .....	33
16.3. Организация обслуживания газоочистных сооружений и подготовка персонала .....	34

Тема 17. АБСОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ.....	34
17.1. Общие сведения об абсорбционной очистке газов .....	34
17.2. Конструкции и принцип действия абсорберов.....	35
17.3. Регенерация абсорбентов.....	39
Тема 18. АДСОРБЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ГАЗОВОЗДУШНЫХ ВЫБРОСОВ .....	40
18.1. Теоретические основы процесса адсорбции .....	40
18.2. Промышленные адсорбенты .....	40
18.3. Устройство и принцип действия адсорберов.....	42
Тема 19. ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ ГАЗОВОЗДУШНЫХ ВЫБРОСОВ .....	45
19.1. Методы термической нейтрализации газовых выбросов .....	45
19.2. Каталитическое обезвреживание газов .....	45
19.3. Термическое обезвреживание газов .....	47
19.4. Дезодорация и обеззараживание газозвдушных выбросов.....	47
Тема 20. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ПЫЛЕГАЗОВЫХ ПОТОКОВ .....	49
20.1. Преимущества предварительной подготовки пылегазовых потоков к очистке .....	49
20.2. Акустическая обработка пылегазовых потоков .....	50
20.3. Искусственная ионизация запыленного воздуха.....	50
20.4. Методы охлаждения запыленных газов .....	50
20.5. Охлаждение газа в поверхностных теплообменниках.....	51
20.6. Охлаждение газа разбавлением атмосферным воздухом.....	51
20.7. Охлаждение газа в мокрых контактных теплообменниках .....	51
Список литературы.....	52

## Тема 9. ПРОМЫШЛЕННАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА

9.1. Промышленная вентиляция и ее классификация по способу создания воздухообмена.

9.2. Естественная вентиляция.

9.3. Искусственная (механическая) вентиляция.

### 9.1. Промышленная вентиляция и ее классификация по способу создания воздухообмена

*Вентиляцией* называется организованный и регулируемый воздухообмен, обеспечивающий удаление из помещения загрязненного воздуха и подачу на его место свежего наружного (или очищенного) воздуха.

*Вентиляционной системой* называют совокупность устройств для обработки, транспортирования, подачи или удаления воздуха.

*Воздухообменом* принято называть количество воздуха, которое необходимо подавать в помещение и удалять из него, измеряемое в кубических метрах в час. Основным показателем, определяющим воздухообмен в помещении, является кратность обмена (коэффициент вентиляции  $K$ ), которая показывает, сколько раз весь воздух помещения заменяется наружным воздухом в течение часа, и рассчитывается по формуле

$$K = \frac{W}{V}, \text{ 1/ч,}$$

где  $W$  – объем воздуха в помещении;

$V$  – объем наружного воздуха.

Кратность воздухообмена должна быть значительно больше единицы.

*По способу перемещения воздуха* вентиляцию разделяют на естественную и механическую.

## 9.2. Естественная вентиляция

Воздухообмен при *естественной вентиляции* происходит вследствие разности температур воздуха помещения и наружного воздуха, создающей тепловой напор, а также в результате сил ветра, создающих ветровой напор.

*Организационная (поддается регулировке) естественная вентиляция* производственных помещений осуществляется *аэрацией* или *дефлекторами*. При *неорганизованной вентиляции* поступление и удаление воздуха происходят через плотности и поры наружных ограждений (*инфильтрация*), через окна, форточки, специальные проемы (*проветривание*).

*Аэрацией* называют организованный естественный воздухообмен в помещении, осуществляемый через специальные аэрационные проемы под действием естественных побудителей движения воздуха – гравитационных сил и ветра.

***Вентиляция с помощью дефлекторов.*** Для увеличения располагаемого давления в системах естественной вентиляции и использования ветрового напора, а также удаления небольших объемов воздуха используют дефлекторы – специальные насадки, устанавливаемые на устье вытяжных воздуховодов или шахт.

***Инфильтрация.*** Неорганизованная естественная вентиляция (неорганизованный воздухообмен) – *инфильтрация* или *естественное проветривание* – осуществляется сменой воздуха в помещениях через неплотности в ограждениях и элементах строительных конструкций (окна, двери, поры стен) благодаря разности давления снаружи и внутри помещения.

## 9.3. Искусственная (механическая) вентиляция

Вентиляция, с помощью которой воздух подается в производственные помещения или удаляется из них по системам вентиляционных каналов с использованием для этого специальных механических побудителей, называется *механической вентиляцией (искусственной)*.

*По способу организации воздухообмена (по назначению) механическая вентиляция подразделяется на общеобменную, местную, смешанную, аварийную и кондиционирование.*

**Общеобменная вентиляция** обеспечивает обмен воздуха (всего помещения) во всем объеме рабочей зоны помещений. Она применяется в том случае, если вредные выделения поступают непосредственно в воздух помещения, рабочие места не фиксированы, а располагаются по всему помещению.

**Местная вентиляция.** С помощью местной вентиляции необходимые метеорологические параметры создаются на отдельных рабочих местах.

**Смешанная система вентиляции** является сочетанием элементов местной и общеобменной вентиляции.

**Аварийную вентиляцию** предусматривают в тех производственных помещениях, в которых возможно внезапное поступление в воздух большого количества загрязняющих или взрывоопасных веществ. Система аварийной вентиляции должна включаться автоматически при достижении ПДК вредных выделений или при остановке одной из систем общеобменной или местной вентиляции.

**Кондиционирование воздуха** – это создание и автоматическое поддержание в помещениях независимо от наружных условий постоянных или изменяющихся по определенной программе температуры, влажности, чистоты и скорости движения воздуха, наиболее благоприятных для нормального протекания технологического процесса.

## **Тема 10. ПРОМЫШЛЕННАЯ И САНИТАРНАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВОЗДУШНЫХ ВЫБРОСОВ**

10.1. Общие сведения об очистке газоздушных выбросов.

10.2. Основные показатели, характеризующие работу газоочистного оборудования.



## 10.1. Общие сведения об очистке газовоздушных выбросов

На современном этапе для большинства промышленных предприятий очистка газовоздушных выбросов от загрязняющих веществ является одним из основных мероприятий по защите воздушного бассейна.

Производственная деятельность неизбежно приводит к образованию различных видов отходов, оказывающих то или иное воздействие на окружающую среду. Одна из важнейших задач промышленных предприятий – сделать так, чтобы это воздействие было по возможности умеренным и не вызвало бы необратимых пагубных изменений в природе.

На современном этапе для большинства промышленных предприятий очистка газовоздушных выбросов от загрязняющих веществ является одним из основных мероприятий по защите воздушного бассейна. Очистка выбросов перед их поступлением в атмосферу имеет важнейшее санитарно-гигиеническое, экологическое и экономическое значение.

Таким образом, при организации любого производства необходимой стадией является промышленная и санитарная очистка газовоздушных выбросов.

*Промышленная очистка* – это очистка газа с целью последующей утилизации или возврата в производство отделенного от газа или превращенного в безвредное состояние продукта. Этот вид очистки является необходимой стадией технологического процесса.

*Санитарная очистка* – это очистка газа от остаточного содержания в нем загрязняющего вещества, при которой обеспечивается соблюдение установленных для последнего ПДК в воздухе населенных мест или производственных помещений. Санитарная очистка газовоздушных выбросов производится перед поступлением отходящих газов в атмосферный воздух.

Среди технических данных для выбора методов, способов, технических средств и параметров пылеулавливания наиболее важными являются технологические и пылеаэродинамические.

## **10.2. Основные показатели, характеризующие работу газоочистного оборудования**

К основным характеристикам газоочистного оборудования относятся эффективность (степень) очистки газа от пыли, которую также иногда называют коэффициентом полезного действия аппарата; гидравлическое сопротивление; стоимость очистки. К общим параметрам пылеуловителей относят их производительность по очищаемому газу и энергоемкость.

**Эффективность (степень) очистки** газов от пыли – это отношение массы пыли, уловленной в аппарате, к массе пыли, поступившей в него за определенный период времени, выражаемое в процентах, иногда в долях единицы.

**Гидравлическое сопротивление аппарата** очистки  $\Delta p$  определяют как разность давлений газового потока на входе аппарата  $p_{\text{вх}}$  и выходе  $p_{\text{вых}}$  из него:

$$\Delta p = p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}}.$$

**Стоимость очистки** является важным показателем, так как характеризует экономичность очистки. Она зависит от многих факторов: капитальных затрат на оборудование, эксплуатационных расходов и др. Стоимость очистки воздуха в различных аппаратах значительно отличается (более эффективная очистка обходится значительно дороже).

## **Тема 11. ОБЕСПЫЛИВАНИЕ ГАЗОВ В СУХИХ АППАРАТАХ**

11.1. Классификация и основные характеристики сухих механических пылеуловителей.

11.2. Пылеосадительные камеры.

- 11.3. Инерционные пылеуловители.
- 11.4. Центробежные пылеуловители.
- 11.5. Конструкции циклонов.
- 11.6. Батарейные циклоны (мультициклоны).
- 11.7. Вихревые пылеуловители.
- 11.8. Пылеуловители ротационного действия.

### 11.1. Классификация и основные характеристики сухих механических пылеуловителей

Сухие механические пылеуловители – это аппараты, в которых использованы различные механизмы осаждения: гравитационный (пылеосадительные камеры); инерционный (инерционные пылеуловители); центробежный (одионочные, групповые и батарейные циклоны, вихревые и динамические пылеуловители).

#### 11.2. Пылеосадительные камеры

Пылеосадительные камеры представляют собой пустотелый (рис. 11.1) или с горизонтальными полками во внутренней полости прямоугольный короб, в нижней части которого расположен бункер для сбора пыли. Камеры изготавливают из кирпича, железобетона или стали.

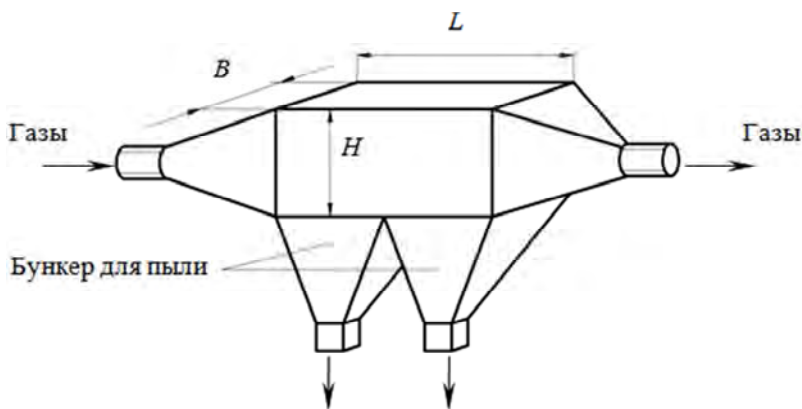


Рис. 11.1. Схема пылеосадительной камеры

### 11.3. Инерционные пылеуловители

Действие *инерционных пылеуловителей* основано на резком изменении направления движения газопылевого потока (на 90 или 180°). Для изменения движения газов устанавливают перегородки, в результате чего наряду с силой тяжести действуют и силы инерции. Пылевые частицы, стремясь сохранить направление своего движения после изменения направления движения потока газов, осаждаются в бункере.

*Инерционный пылеуловитель ИП* (рис. 11.2) представляет собой конус, образованный коническими кольцами с постепенно уменьшающимся диаметром.

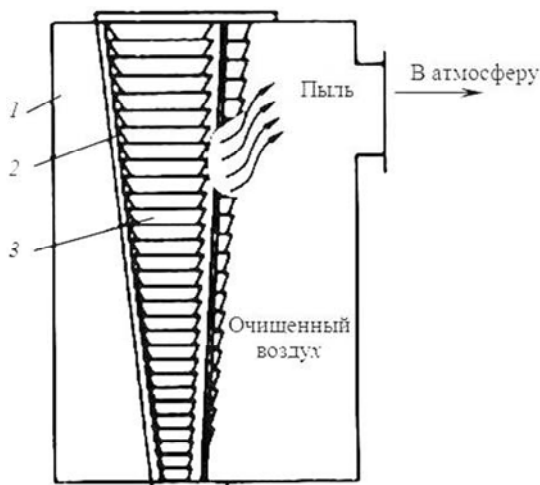


Рис. 11.2. Инерционный пылеуловитель ИП:  
1 – корпус; 2 – ребра; 3 – кольца

### 11.4. Центробежные пылеуловители

Циклоны являются наиболее распространенным типом сухого механического пылеуловителя, в которых основным механизмом осаждения является центробежный механизм. Принцип действия циклона представлен на рис. 11.3.

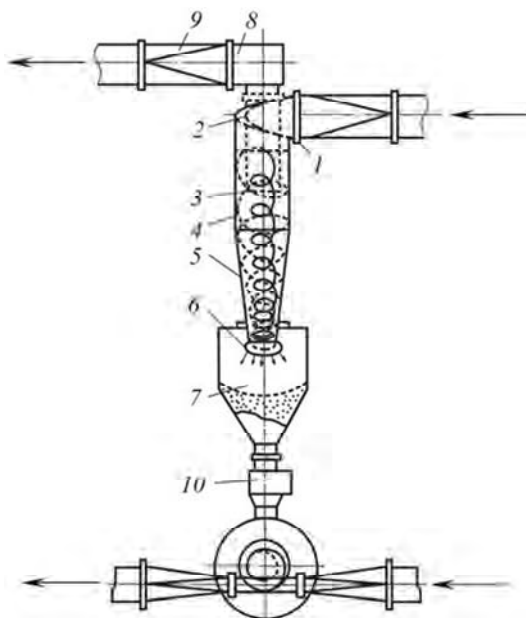


Рис. 11.3. Циклон НИИОгаза (общий вид и схема движения газа):  
 1 – входной патрубкок; 2 – винтообразная крышка; 3 – выхлопная труба;  
 4 – корпус (цилиндрическая часть циклона); 5 – корпус (коническая часть  
 циклона); 6 – пылевывпускное отверстие; 7 – бункер; 8 – улитка для вывода  
 газа; 9 – газоход очищенных газов; 10 – пылевой затвор

## 11.5. Конструкции циклонов

*Цилиндрические циклоны конструкции НИИОгаза.* К ним относятся циклоны типа ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У и ЦН-24 (ЦН – циклон НИИОгаз). Отличительными особенностями аппаратов данной группы являются наличие удлиненной цилиндрической части, угол наклона крышки и входного патрубка, равный соответственно 11, 15 и 24°, и одинаковое отношение диаметра выхлопной трубы к диаметру циклона, равное 0,59. Циклоны ЦН предназначены для очистки воздуха от сухой, неслипающейся, неволокнистой пыли, образующейся в различных помольных и дробильных установках и при транспортировании сыпучих материалов.

*Конические циклоны конструкции НИИОгаза.* К ним относятся циклоны типа СК-ЦН-22 (СК-ЦН-34М), СДК-ЦН-33 и СК-ЦН-34 (СК – спирально-конический; СДК – спирально-длинноконический). Особенность конических циклонов – удлиненная коническая форма и малое отношение диаметра выхлопной трубы к диаметру цилиндрической части циклона (соответственно 0,22, 0,33 и 0,34) и спиральный подвод газа. Конические циклоны используют для очистки газа от угольной пыли, золы, сажи, слипающей пыли.

*Циклоны конструкции ВЦНИИОТа* с расширяющимся конусом применяются для улавливания сухой, неслипающей, неволокнистой и абразивной, а также слабослипающей (сажа, тальк) пыли. Характерной особенностью этого циклона является способ транспортировки отсепарированной пыли из корпуса в сборный бункер.

Кроме описанных циклонов конструкции НИИОгаза эксплуатируют также циклоны конструкции СИОТа, ЛИОТа, Гипродрева и др.

*Групповые циклоны.* Групповую компоновку аппаратов применяют при расходах очищаемого газа более 4000 м<sup>3</sup>/ч. Это позволяет не увеличивать диаметр циклона, что положительно сказывается на эффективности очистки.

## **11.6. Батарейные циклоны (мультициклоны)**

Батарейные циклоны представляют собой пылеулавливающие аппараты, составленные из большого количества параллельно установленных циклонных элементов (мультициклонов), объединенных в одном корпусе и имеющих общий подвод и отвод газов, а также сборный бункер.

## **11.7. Вихревые пылеуловители**

В вихревом пылеуловителе (рис. 11.4), как и в циклоне, выделение пыли из очищаемого пылегазового потока происходит под действием центробежных сил, возникающих при враще-

нии потока в корпусе. Основная особенность вихревых аппаратов – дополнительное закручивание очищаемого газа с помощью вторичного газового потока.

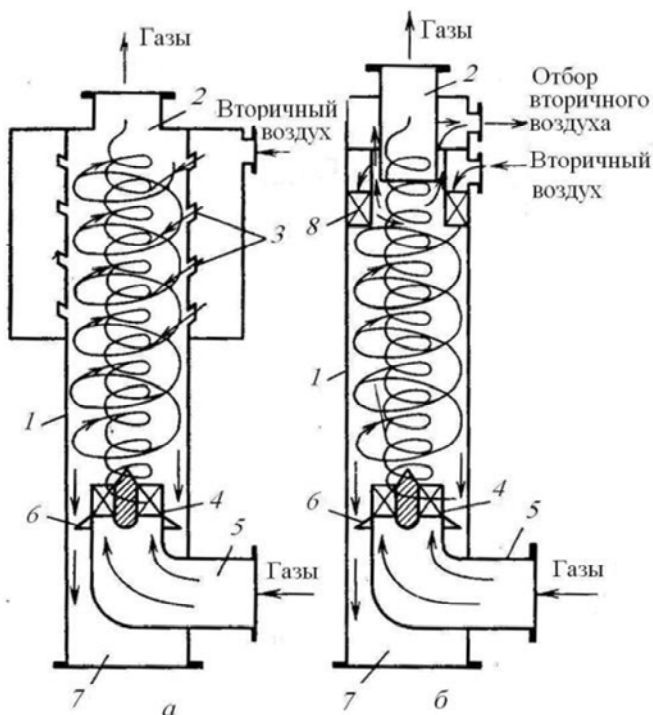


Рис. 11.4. Вихревые пылеуловители:

*а* – соплового типа; *б* – лопаточного типа:

- 1 – камера; 2 – выходной патрубков; 3 – сопла; 4 – лопаточный завихритель типа «розетка»;
- 5 – входной патрубков; 6 – подпорная шайба; 7 – пылевой бункер; 8 – кольцевой лопаточный завихритель

### 11.8. Пылеуловители ротационного действия

Принципиальная конструкция *простейшего ротационного пылеуловителя* представлена на рис. 11.5. Пылеуловители ротационного действия представляют собой механизм, состоящий из рабочего колеса 1 и спирального кожуха 2. Пылегазовый по-

ток приводится во вращательное движение рабочим колесом, при этом под действием развивающихся сил (центробежной силы Кориолиса) из очищенного газа выделяется пыль. Причем частицы пыли, обладающие большей массой, под действием центробежных сил отбрасываются к стенке спиралеобразного кожуха и движутся вдоль нее в направлении пылеприемного отверстия 3, через которое они отводятся в пылевой бункер, а очищенный газ поступает в отводящий патрубок 4.

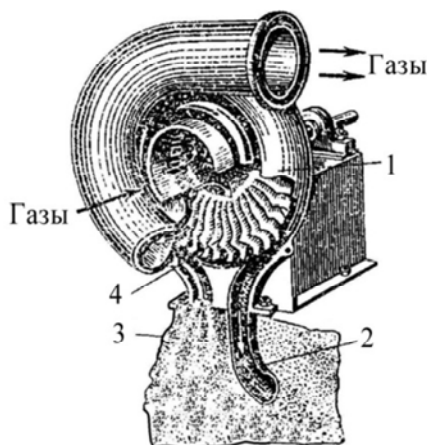


Рис. 11.5. Ротационный пылеуловитель

## Тема 12. МОКРАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВОЗДУШНЫХ ВЫБРОСОВ

12.1. Общие понятия и классификация аппаратов мокрой очистки газов.

12.2. Подвод орошающей жидкости в мокрые газоочистные аппараты.

12.3. Полые форсуночные скрубберы.

12.4. Насадочные скрубберы.

12.5. Тарельчатые (пенные) скрубберы

12.6. Скрубберы с подвижной насадкой.

12.7. Газопромыватели ударно-инерционного действия.



- 12.8. Центробежные газопромыватели.
- 12.9. Динамические скрубберы.
- 12.10. Скоростные газопромыватели (скрубберы Вентури).

### **12.1. Общие понятия и классификация аппаратов мокрой очистки газов**

Процесс мокрого пылеулавливания основан на контакте запыленного газового потока с жидкостью (чаще всего с водой).

Мокрые аппараты классифицируются на следующие группы: *в зависимости от поверхности контакта:*

- полые скрубберы;
- насадочные скрубберы;
- тарельчатые скрубберы;
- газопромыватели с подвижным слоем насадки;
- скрубберы ударно-инерционного действия;
- центробежные скрубберы;
- динамические скрубберы;
- скоростные скрубберы;

*по механизму улавливания частиц пыли:*

- аппараты с осаждением частиц на каплях жидкости;
- аппараты с осаждением частиц на пленку жидкости;

*в соответствии со способом захвата:*

- с промывкой газа жидкостью;
- осаждением пыли на пленку жидкости.

### **12.2. Подвод орошающей жидкости в мокрые газоочистные аппараты**

Способ подачи жидкости в значительной степени влияет на распределение энергии, затрачиваемой на осуществление процесса улавливания. Для подвода жидкости используют форсунки (высоко- и низконапорные) и оросители.

**Форсунки.** Характеристики форсунок зависят от ряда факторов: физических свойств газа и жидкости, класса и геометрии форсунки, скорости истечения и др.

По принципу действия форсунки разделяются на три основные группы: механического, пневматического и электрического действия.

В *центробежных форсунках* жидкость приобретает вращательное движение за счет тангенциального подвода или проходя через завихрительную спираль. *Форсунки Григорьева–Поляка* применяются для небольших расходов жидкости. *Форсунки Кертинга* применяют для небольших расходов жидкости. Для получения сплошного конуса распыла используют центробежно-струйные форсунки, в которых помимо вращающейся струи создается и осевая. *Плоскофакельная форсунка* широко применяется в газоочистных аппаратах (мокрые пластинчатые электрофильтры, щелевые трубы Вентури и др.). Ее достоинство – отсутствие каналов и вставок, что уменьшает возможность зарастания форсунки взвесями, содержащимися в орошающей жидкости. *Форсунка с регулируемым расходом жидкости* применяется для обеспечения постоянства качества распыла при изменении производительности.

**Оросители.** По режиму истечения жидкости оросительные устройства делятся на *струйные разбрызгивающие* и *струйные неразбрызгивающие*.

**Каплеулавливающие устройства.** В качестве *инерционных каплеуловителей* могут быть использованы различные насадки: дробленая порода, стружка, галька, шлак, стандартная насадка (кольца Рашига, седла Берля, сферы), вязаная сетка (демистеры), пластины волнообразного и уголкового профилей (жалюзи), прутки, уголки и т. д.

Основным недостатком инерционных каплеуловителей является возможность образования отложений.

### 12.3. Полые форсуночные скрубберы

В полых скрубберах газопылевой поток пропускают через завесу распыляемой жидкости. По направлению движения га-

зов и жидкости полые скрубберы делятся на *противоточные, прямоточные* и *с поперечным подводом жидкости*.

В зависимости от количества воды, подаваемой на орошение, полые скрубберы подразделяются на *охлаждаемые* и *испарительные*.

#### **12.4. Насадочные скрубберы**

*Насадочные газопромыватели (скрубберы)* представляют собой колонны, заполненные телами различной формы – *насадками*. Количество жидкости, которое следует подавать на 1 м<sup>2</sup> сечения насадки скруббера, называют *плотностью орошения*. Оно зависит от типа насадки и назначения скруббера и определяется расчетом.

#### **12.5. Тарельчатые (пенные) скрубберы**

В основе работы *тарельчатых газопромывателей* лежит взаимодействие газов с жидкостью на тарелках различной конструкции. Пенные аппараты относятся к низконапорным скрубберам; эффективны и надежны при очистке газов от пыли, фтора, серы, аммиака и др., в производстве минеральных удобрений, желтого фосфора, в алюминиевой и металлообрабатывающей промышленности.

*Пенные скрубберы* представляют собой аппараты, корпус которых разделен горизонтальной тарелкой с равномерно расположенными мелкими отверстиями.

По способу отвода жидкости с тарелок пенные аппараты подразделяют на аппараты *с провальными* и *с переливными тарелками*. В аппарате с провальными тарелками применяют два вида тарелок: *дырчатые* и *щелевые*.

#### **12.6. Скрубберы с подвижной насадкой**

В качестве скрубберов с подвижной насадкой применяют аппараты, улавливание пыли в которых происходит в слое по-

движной насадки. В качестве насадки используют полые или сплошные шары из полимерных материалов, стекло или пористую резину. Также используют кольцевые насадки с гладкой поверхностью и перфорированными поверхностями. Получили распространение сложные конструкции элементов насадки, выполненные в виде взаимопересекающихся дисков, полос, шипов, колец и двойной спирали. Предпочтение отдается более практичной шаровой насадке из-за ее большой подвижности и лучшей обтекаемости. Для обеспечения свободного перемещения насадки в газожидкостной смеси плотность шаров насадки не должна превышать плотности жидкости.

### **12.7. Газопромыватели ударно-инерционного действия**

Особенность газопромывателей заключается в отсутствии средств перемещения жидкости. Наиболее простой – *импакторный скруббер* – вертикальная колонна, в нижней части которой находится слой жидкости.

*Скруббер Доуля* способен улавливать частицы пыли субмикронных размеров, но требует значительной энергии для создания достаточного перепада давлений в потоке очищаемых газов.

### **12.8. Центробежные скрубберы**

В центробежном скруббере осаждение частиц пыли происходит за счет суммарного действия двух механизмов: *центробежного*, перемещающего частицы к стенкам аппарата, и *инерционного*, способствующего осаждению частиц на каплях орошающей жидкости.

В аппаратах центробежного типа частицы пыли отбрасываются на стенку центробежными силами, возникающими при вращении газового потока в аппарате за счет тангенциального подвода газа. Непрерывно стекающая вниз пленка на стенке аппарата создается за счет подачи воды специальными соплами, расположенными в верхней части аппарата.

Центробежные скрубберы, применяющиеся на практике, конструктивно можно разделить на два вида: аппараты, в которых вращение газового потока осуществляется с помощью специальных направляющих лопаток, и аппараты с тангенциальным или улиточным подводом газа.

### **12.9. Динамические скрубберы**

Характерной особенностью динамических скрубберов является наличие вращающего устройства, которое обеспечивает разбрызгивание и перемешивание жидкости или вращение газового потока.

В центробежных механических газопромывателях дополнительно подводимая механическая энергия служит для вращения газового потока.

Динамические газопромыватели отличаются от сухих ротационных пылеуловителей только подводом орошающей жидкости, которая способствует росту их эффективности. Один из представителей газопромывателей этого типа – циклонно-ротационный пылеуловитель.

### **12.10. Скоростные газопромыватели (скруббер Вентури)**

*Скрубберы Вентури – представители скоростных газопромывателей и наиболее эффективные из аппаратов мокрой очистки газов.* Эти аппараты применяют для очистки технологических и вентиляционных газов от мелкодисперсной пыли, для улавливания пыли и возгонов черной и цветной металлургии, пылей пищевых производств, не изменяющих своих свойств при контакте с водой, а также для охлаждения и очистки газа от газообразных примесей.

Общей конструктивной особенностью скрубберов Вентури является наличие *трубы распылителя*, в которой непосредственно происходит контакт воздушного (газового) потока, со-

держашего во взвешенном состоянии пылевые частицы, с тонкораспыленной водой и установленного за ней *каплеуловителя*.

Работа скрубберов Вентури основана на дроблении воды турбулентным газовым потоком, захвате каплями жидкости частиц пыли, последующей их коагуляции и осаждении в каплеуловителе.

В скруббере Вентури при улавливании пыли размером 1 мкм и более решающее значение имеют инерционные силы. Диффузионные силы приобретают решающее значение при осаждении частиц размером менее 0,1 мкм.

## **Тема 13. ОЧИСТКА ГАЗОВОЗДУШНЫХ ВЫБРОСОВ ФИЛЬТРАМИ**

13.1. Общие сведения о процессе фильтрования и видах фильтров.

13.2. Волокнистые фильтры.

13.3. Воздушные фильтры.

13.4. Тканевые фильтры.

13.4.1. Классификация тканевых фильтров.

13.4.2. Основные типы фильтров.

13.5. Зернистые фильтры.

### **13.1. Общие сведения о процессе фильтрования и видах фильтров**

*Фильтрованием* называется процесс разделения запыленных газов при их движении через пористые перегородки, при котором взвешенные частицы пыли задерживаются пористыми перегородками, а очищенные газы полностью проходят через них.

В пористом фильтре между входным и выходным газопроводами создается перепад давления, под действием которого через пористый фильтр проходит небольшое количество газа. Содержащиеся в газе частицы пыли или жидкости, столк-

нувшись с твердыми элементами фильтровального материала, остаются на них.

По мере накопления частиц размер пор и общая пористость перегородки уменьшаются, а сопротивление движению газов возрастает, поэтому возникает необходимость разрушения и удаления пылевого слоя.

*Фильтрами* называются устройства, в которых запыленный воздух пропускается через пористые материалы, способные задерживать или осаждать пыль. Фильтр состоит из корпуса, разделенного пористой перегородкой на две полости – запыленного и очищенного газа.

### **13.2. Волокнистые фильтры**

*Волокнистые фильтры* представляют собой пористые перегородки, составленные из беспорядочно расположенных, однако более или менее равномерно распределенных по объему волокон. В связи с высокой пористостью аэрозольные частицы проникают в глубину пористой перегородки, вследствие чего волокнистые фильтры применяют для фильтрации слабозапыленных потоков с концентрацией пыли не более  $5 \text{ мг/м}^3$ .

### **13.3. Воздушные фильтры**

*Воздушные фильтры* служат для обеспыливания воздуха, забираемого из атмосферы в различных системах: приточной вентиляции, кондиционирования и воздушного отопления производственных, служебных и общественных зданий; подачи воздуха на технологические нужды.

*Воздушные фильтры III класса (для очистки воздуха от грубой пыли)*. Улавливание частиц в большинстве воздушных фильтров, относящихся к III классу, почти полностью происходит в результате инерционного эффекта осаждения. Эффективность очистки 60 %.

*Воздушные фильтры II класса (электрические воздушные фильтры)* предназначены для улавливания частиц разме-

ром 1 мкм и более высокой по сравнению с фильтрами III класса степени улавливания (85 %) атмосферной пыли.

**Воздушные фильтры I класса** применяются в помещениях, где требуется поддерживать стерильные условия.

### **13.4. Тканевые фильтры**

Фильтрация запыленных промышленных газов и аспирационного воздуха в тканевых фильтрах является радикальным техническим решением для достижения эффективного пылеулавливания при относительно умеренных капитальных и эксплуатационных затратах.

#### ***13.4.1. Классификация тканевых фильтров***

Тканевые фильтры различаются по следующим признакам:

– по форме фильтровальных элементов (рукавные, плоские, клиновые и др.) и наличию в них опорных устройств (каркасные, рамные);

– типу фильтровальной ткани: из натуральных и синтетических тканей;

– способу регенерации ткани: встряхиванием, обратной продувкой, продувкой сжатым воздухом, импульсной продувкой, звуковой регенерацией;

– наличию и форме корпуса для размещения ткани – прямоугольные, цилиндрические, открытые (бескамерные);

– числу секций в установке (однокамерные и многосекционные);

– месту расположения вентилятора относительно фильтра (всасывающие, работающие под разрежением, и нагнетательные, работающие под давлением).

#### ***13.4.2. Основные типы фильтров***

В зависимости от способа регенерации различают следующие типы фильтров:



- с посекционной регенерацией;
- обратной продувкой;
- обратной продувкой и отряхиванием (комбинированная регенерация);
- поэлементной регенерацией;
- импульсной регенерацией;
- обратной струйной продувкой;
- обратной продувкой через подвижное сопло.

**Классификация по типу фильтрующих элементов.** В промышленных фильтрах (из тканевых и нетканых материалов) применяют два основных типа фильтрующих элементов: бескаркасные (рукава), в основном цилиндрические, и жесткокаркасные, состоящие из каркаса, обтянутого тканью или нетканым материалом.

### **13.5. Зернистые фильтры**

В зернистых фильтрах в качестве фильтрующего слоя используют насыпные материалы, в которых отдельные элементы не связаны между собой. К ним относятся крупнозернистый песок, галька, шлак, дробленые горные породы, древесные опилки, кокс, крошка резины, пластмассы, графит и другие материалы. Зернистые фильтры можно использовать при работе в условиях высоких температур, агрессивной среды и при больших механических нагрузках и перепадах давления.

## **Тема 14. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ**

14.1. Общие положения.

14.2. Устройство и принцип действия электрогазоочистной установки.

14.3. Классификация электрофильтров.

14.4. Конструктивные особенности и типы промышленных электрофильтров.

14.5. Электрическое оборудование электрофильтров.

14.6. Выбор и эксплуатация электрофильтров.

## 14.1. Общие положения

Электрическая очистка газа от взвешенных в нем частиц пыли и жидкости основана на использовании явления ионизации газовых молекул в электрическом поле высокого напряжения. Электрофильтры, как сложное и дорогостоящее оборудование, обычно komponуют с другими пылеулавливающими устройствами, устанавливаемыми на начальных ступенях очистки. В результате повышается экономичность использования электрофильтров и обеспечивается более полная очистка.

## 14.2. Устройство и принцип действия электрофильтров

Установка электрической очистки газов включает электрофильтр, агрегаты питания и системы транспортировки уловленной пыли (рис. 14.1).

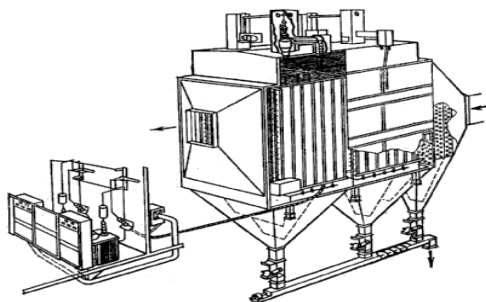


Рис. 14.1. Электрогазоочистная установка

Электрофильтр представляет собой аппарат, в котором основными элементами являются коронирующий и осадительный электроды, находящиеся под напряжением. Коронирующий электрод представляет собой проволоку, натянутую в трубке или между пластинами, осадительный электрод представляет собой поверхность трубки или пластины, окружающих коронирующий электрод.

Сущность процесса электрической фильтрации газа заключается в следующем. Газ, содержащий взвешенные частицы, после распределительных устройств попадает в проходы, образованные коронирующими и осадительными электродами, называемые межэлектродными промежутками.

Процесс электрической фильтрации газов можно разделить на следующие стадии:

- зарядка взвешенных частиц в поле коронного разряда;
- движение заряженных частиц к электродам;
- осаждение частиц на электродах;
- удаление осажденных частиц с поверхности электродов.

### 14.3. Классификация электрофильтров

Электрофильтры разделяют на однозонные и двухзонные аппараты в зависимости от числа активных зон. В *однозонных электрофильтрах* зарядка и осаждение пыли производятся в одной зоне, а в *двухзонных* – в двух последовательных зонах.

Двухзонные электрофильтры применяются в основном для очистки от мелкодисперсной пыли, бактерий и других микроорганизмов в системах приточной вентиляции, а однозонные применяются для очистки дымовых и технологических газов.

По форме осадительных электродов различают пластинчатые и трубчатые электрофильтры (рис. 14.2). Трубчатые электрофильтры применяются для улавливания жидких компонентов. Пластинчатые электрофильтры применяют для очистки газа от жидких и твердых частиц.

Верхняя рама 4 соединена с опорно-проходным изолятором 5. Во избежание раскачивания, для облегчения центровки электродов и для их натяжения к коронирующим электродам снизу подвешивают грузы, которые фиксируют в горизонтальной плоскости рамной конструкцией. Для равномерного распределения газа по сечению электрофильтра под системой электродов расположена газораспределительная решетка 6. Очищаемый газ вводится в трубчатый электрофильтр в нижней его

части, равномерно распределяется по сечению аппарата и направляется в трубы, в которых подвергается очистке.

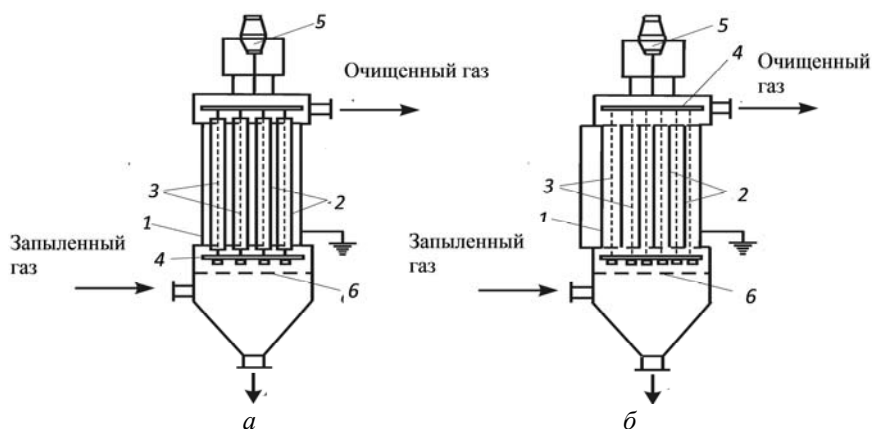


Рис. 14.2. Схема электрофильтров:

- а* – электрофильтр с трубчатыми электродами; *б* – электрофильтр с пластинчатыми электродами; 1 – коронирующие электроды; 2 – осадительные электроды; 3 – пластинчатые электроды; 4 – верхняя рама; 5 – изолятор; 6 – распределительная решетка

#### 14.4. Конструктивные особенности и типы промышленных электрофильтров

Основными конструктивными элементами электрофильтров являются:

- корпус электрофильтра, где размещается механическое оборудование;
- узлы подвода, распределения и отвода очищаемых газов;
- система осадительных и коронирующих электродов;
- устройства для удаления уловленной пыли с электродов;
- изоляторные коробки – узлы для подачи на электроды тока высокого напряжения;
- устройства для сбора и вывода уловленной пыли из аппарата.

## **14.5. Электрическое оборудование электрофильтров**

Питание электрофильтров осуществляется выпрямленным током высокого напряжения. Для преобразования переменного тока обычной частоты (50 Гц) и низкого напряжения (380 В) используют электрические агрегаты небольшой мощности (20–150 кВт). Оптимальный режим в электрофильтре достигается при питании каждого электрического поля от отдельного электроагрегата. Система «электрический фильтр–агрегат питания» работает в режиме обратной связи.

Электроагрегат состоит из повышающего трансформатора, выпрямителя для преобразования переменного тока в постоянный, регулятора напряжения и пульта управления.

В настоящее время используют агрегаты питания типов АФАС, АРС, АИФ, АУФ, АТФ с автоматическим регулированием напряжения.

Агрегаты питания электрофильтров устанавливают в отдельном помещении – подстанции. В помещении подстанции может быть установлено до 20 электроагрегатов. Если основной агрегат неисправен, то к электрическому полю подключают резервный электроагрегат. Кроме агрегатов питания в подстанции установлены системы управления и сигнализации аппаратов и механизмов установки электрической очистки газов.

## **14.6. Выбор и эксплуатация электрофильтров**

Тип электрофильтра выбирают в соответствии с предъявляемыми к нему требованиями с учетом свойств и особенностей пыли и газа, подлежащего очистке. На основании заданного расхода газа и рекомендуемой его скорости в активном сечении подбирают наиболее подходящий типоразмер фильтра.

Степень очистки газа в электрофильтре зависит от многих факторов:

– свойств очищаемого газа (его химического состава, температуры, влажности, давления, скорости движения газа);

- свойств улавливаемой пыли (ее химического состава, электрических свойств, дисперсности) и величины ее слоя на осадительных электродах;
- концентрации пыли в газе (начальной запыленности газа);
- загрязнения улавливаемой пылью осадительных и коронирующих электродов;
- электрических параметров электрофильтра – приложенного напряжения, напряженности поля, величины силы тока и равномерного распределения газового потока в электрическом поле.

## **Тема 15. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ**

- 15.1. Основы разработки технологической схемы газоочистки.
- 15.2. Стадии технологического процесса очистки выбросов газов.
- 15.3. Основы проектирования систем очистки выбросов газов.
- 15.4. Комбинированные схемы для очистки выбросов газа.
- 15.5. Способы интенсификации работы аппаратов для очистки выбросов газа.

### **15.1. Основы разработки технологической схемы газоочистки**

*Технологическая схема* отражает взаимосвязь и характер отдельных технологических процессов и оборудования. Она представляет собой графическое изображение совокупности операций, составляющих законченный технологический процесс, и разрабатывается для непрерывного и периодического процесса. Технический уровень и качество технологической схемы определяются детальной проработкой отдельных технологических узлов.

*Технологическим узлом* называют аппарат или их группу, в которых начинается и полностью заканчивается один из этапов процессов, необходимых для достижения заданной степени переработки исходного материала, в том числе для очистки выбросов.

## **15.2. Стадии технологического процесса очистки выбросов газов**

Технологический процесс очистки промышленных выбросов включает следующие стадии: отбор газов или воздуха от источников выделения загрязняющих веществ, подготовку промышленных выбросов к очистке, газоочистку, выгрузку пыли, удаление и транспортирование уловленного продукта, утилизацию уловленного продукта.

## **15.3. Основы проектирования систем очистки выбросов газов**

При проектировании систем очистки выбросов газов следует соблюдать ряд требований:

- пылеуловители могут устанавливаться как на всасывание, так и на нагнетание;
- выброс очищенного воздуха следует предусматривать на высоте не менее 1 м над высшей точкой кровли здания;
- выбросы в атмосферу воздуха, содержащего вредные вещества I и II класса опасности, горючие жидкие аэрозоли, а также неприятно пахнущие вредные вещества следует предусматривать выше уровня циркуляционных зон;
- пыль, осажденная в сухих пылеуловителях, должна собираться в бункерах;
- эффективность очистки оборотной воды, подаваемой в пылеуловители, должна быть достаточно высокой.

#### **15.4. Комбинированные схемы для очистки выбросов газа**

В настоящее время широко применяется многоступенчатая очистка выбросов, так как промышленная пыль обычно состоит из различных компонентов. Применение на первой ступени более простых аппаратов, не требующих квалифицированного обслуживания, очистка в которых обходится значительно дешевле, позволяет «разгрузить» высокоэффективный аппарат от грубой очистки, используя его на последней ступени – для тонкой очистки.

Усложнение схемы очистки, установка дополнительного оборудования оправдывают себя не только с экологической (санитарно-гигиенической), но и с экономической точки зрения, поскольку увеличивается срок службы дорогостоящего оборудования и повышается надежность его работы.

#### **15.5. Способы интенсификации работы аппаратов для очистки газа**

Интенсификация процесса газоочистки возможна при подготовке газа перед очисткой и непосредственно в газоочистном аппарате. Различают режимную и конструктивно-технологическую интенсификацию. Способ *режимной интенсификации* заключается в том, что работа газоочистительного аппарата доводится до возможно более напряженных режимов исходя из свойств очищаемого газа и улавливаемого продукта. При *конструктивно-технологическом* способе интенсификации в конструкцию газоочистительного аппарата вносят усовершенствования (выбирают оптимальное соотношение частей пылеуловителей, вводят новые элементы), способствующие интенсификации происходящих в нем процессов.



## **Тема 16. НАЛАДКА, ИСПЫТАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ГАЗООЧИСТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

16.1. Наладка и испытание газоочистного оборудования.

16.2. Рекомендации по эксплуатации газоочистных установок.

16.3. Организация обслуживания газоочистных сооружений и подготовка персонала.

### **16.1. Наладка и испытание газоочистного оборудования**

Наладку газоочистного оборудования следует производить не реже одного раза в год после монтажа, реконструкции или ремонта, при изменении технологического режима работы основного технологического агрегата.

Целью наладочных работ является обеспечение проектных параметров и необходимой эффективности работы оборудования.

Перед наладкой следует провести тщательный наружный осмотр смонтированной установки. При осмотре обеспыливающей установки проверяют соответствие установленного оборудования проекту, правильность его установки, наличие всех элементов, обеспечивающих работу оборудования.

Испытание газоочистного оборудования проводят в два этапа. Испытание его основных видов выполняется в соответствии с различными требованиями.

Главным показателем нормальной эксплуатации газоочистного оборудования является эффективность очистки воздуха от пыли.

### **16.2. Рекомендации по эксплуатации газоочистных установок**

Основные требования к эксплуатации газоочистного оборудования заключаются в следующем:

– надежная, бесперебойная работа с показателями, соответствующими проектным;

– все установки очистки газа должны быть зарегистрированы в органах Министерства природных ресурсов и экологии Беларуси, иметь паспорт, журнал учета работы и неисправностей;

– периодически (не реже одного раза в год) установки должны подвергаться проверке на эффективность с оформлением соответствующего акта;

– эксплуатация технологического оборудования при отключенных установках очистки газа запрещается.

### **16.3. Организация обслуживания газоочистных сооружений и подготовка персонала**

Эксплуатация газоочистных сооружений должна осуществляться в соответствии с действующими Правилами технической эксплуатации газоочистных и пылеулавливающих установок.

Основными задачами персонала по эксплуатации газоочистных сооружений предприятий являются:

обеспечение бесперебойной и эффективной работы газоочистных сооружений;

повышение надежности, безопасности и экономичности работы всех систем газоочистных сооружений;

организация эксплуатации всего оборудования и систем газоочистки в соответствии с Правилами технической эксплуатации газоочистных и пылеулавливающих установок.

## **Тема 17. АБСОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ**

17.1. Общие сведения об абсорбционной очистке газов.

17.2. Конструкции и принцип действия абсорберов.

17.3. Регенерация абсорбентов.

### **17.1. Общие сведения об абсорбционной очистке газов**

*Абсорбция* – избирательное поглощение газов или паров жидкими поглотителями.

Абсорбционную очистку выбросов в атмосферу применяют как для извлечения ценного компонента из газа, который может быть использован для получения в промышленных условиях кислот, серы, удобрений и т. д., так и для санитарной очистки газа.

Процесс абсорбции используют для очистки выбросов от сероводорода, других сернистых соединений, паров соляной и серной кислоты, цианистых соединений, органических веществ (фенола, формальдегида и др.), если концентрация данного компонента в газовом потоке выше 1 %.

Абсорбционная очистка основана на способности жидкостей растворять газы (*физическая абсорбция*) или химически взаимодействовать с ними (*химическая абсорбция* или *хемосорбция*).

При абсорбции происходит переход вещества из газовой фазы в жидкую. Вещество, которое содержится в газовой фазе и при абсорбции переходит в жидкую, называют *абсорбционным компонентом* или *абсорбтивом*. Вещество, которое содержится в газовой фазе и при абсорбции не переходит в жидкую фазу, называют *газом-носителем*. Вещество (жидкость), в котором происходит растворение абсорбируемых компонентов, называют *абсорбентом*. В отличие от абсорбируемых компонентов остальную часть газового потока называют *инертным газом*.

## **17.2. Конструкции и принцип действия абсорберов**

Процессы абсорбции осуществляются в специальных аппаратах – абсорберах.

По способу образования поверхности соприкосновения между жидкостью и газом абсорберы можно условно разделить на поверхностные (пленочные), насадочные, барботажные (тарельчатые), распыливающие (брызгальные).

*Поверхностные абсорберы (пленочные)* поглощают газ пленкой жидкости, образующейся на поверхностях, смачиваемых жидкостью и омываемых газом.

В пленочных абсорберах поверхностью контакта фаз является поверхность жидкости, текущей по твердой, обычно вертикальной стенке. Примером пленочного абсорбера может служить трубчатый абсорбер (рис. 17.1), в котором жидкость на верхнюю трубную решетку 1 распределяется по трубам 2 и стекает по внутренней поверхности труб, омываемых поднимающимся снизу вверх газом.

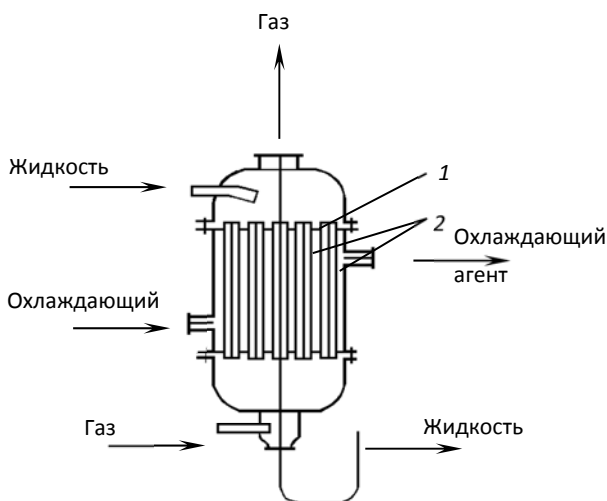


Рис. 17.1. Трубчатый абсорбер:  
1 – трубная решетка; 2 – орошаемые трубы

Насадочные абсорберы (рис. 17.2), наиболее распространенные из применяемых в промышленности, представляют собой вертикальные колонны цилиндрической формы с расположенными по их высоте решетками 2 с уложенными на них слоями насадки 1 (твердые тела различной формы), сквозь которые снизу вверх проходит газ. Орошающая жидкость подается на насадку при помощи распределительного устройства 3 и стекает вниз. Соприкосновение газа с жидкостью происходит в основном на смоченной поверхности насадки, по которой стекает орошающая жидкость. Равномерное распределение жид-

кости по всей высоте слоя насадки обычно не достигается, что объясняется пристеночным эффектом – большей плотностью укладки насадки в центральной части колонны, чем у ее стенок, вследствие чего жидкость имеет тенденцию растекаться. В некоторых случаях при послойной укладке насадки между слоями устанавливают устройства для перераспределения жидкости 4, что обеспечивает равномерное распределение жидкости по сечению колонны.

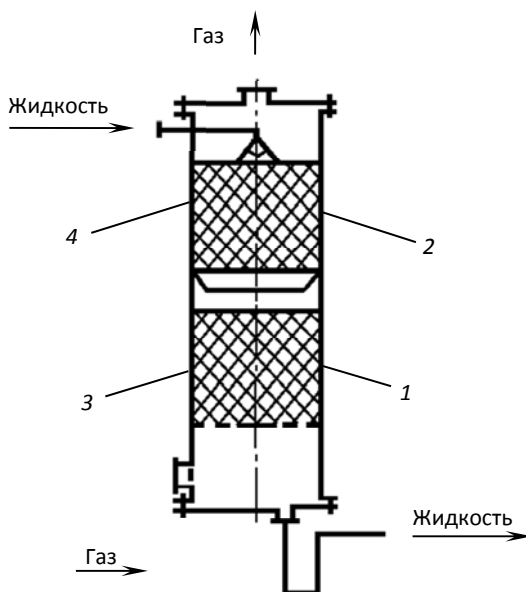


Рис. 17.2. Насадочный абсорбер:  
 1 – насадка; 2 – опорная решетка; 3 – распределитель жидкости;  
 4 – перераспределитель жидкости

В насадочных абсорберах пленочное течение жидкости происходит по высоте элемента насадки. При перетекании жидкости с одного элемента насадки на другой пленка жидкости разрушается и на нижележащем элементе образуется новая пленка. Некоторая часть жидкости при этом проваливается в виде капель через расположенные ниже слои насадки.

Движение газа и жидкости в насадочных абсорберах обычно осуществляется противотоком. Прямоток (нисходящий) применяют довольно редко. Однако прямоточные насадочные абсорберы, работающие с большими скоростями газа (до 10 м/с), позволяют интенсифицировать процесс абсорбции и снизить гидравлическое сопротивление аппарата.

**Барботажные (тарельчатые) абсорберы.** Барботажные (тарельчатые) абсорберы представляют собой вертикальные цилиндры:

– колонны, внутри которых на определенном расстоянии друг от друга по высоте колонны размещены горизонтальные перегородки;

– тарелки, служащие для развития поверхности контакта фаз при направленном движении этих фаз (жидкость течет сверху вниз, а газ проходит снизу вверх) и многократного взаимодействия жидкости и газа.

В результате взаимодействия фаз (жидкость является сплошной фазой, а газ – дисперсной) на тарелках образуется газожидкостный слой, состоящий из относительно чистой жидкости и вспененной жидкости.

В **распыливающих абсорберах** контакт между фазами достигается распыливанием или разбрызгиванием жидкости в газовом потоке.

На рис. 17.3, а показаны некоторые типы распыливающих абсорберов, выполненных в виде полых колонн. Газ в них обычно движется снизу вверх, а жидкость подается через расположенные в верхней части колонны распылители с направлением факела распыла сверху вниз или под некоторым углом к горизонтальной плоскости.

Применяют также комбинированную установку распылителей: часть – факелом вверх, а часть – факелом вниз.

Полые распыливающие абсорберы отличаются простотой устройства, низкой стоимостью, малым гидравлическим сопро-

тивлением, их можно применять для обработки сильно загрязненных газов и для улавливания хорошо растворимых газов.

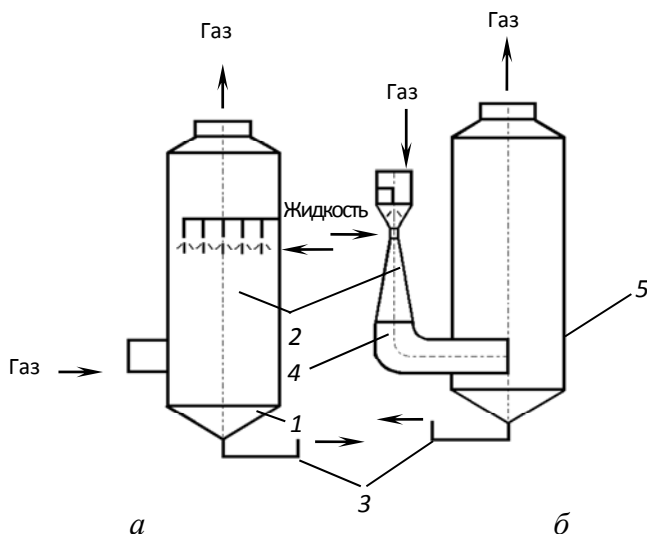


Рис. 17.3. Схемы распыляющих абсорберов:  
 а – полный абсорбер; б – абсорбер Вентури;  
 1 – корпус; 2 – форсунки; 3 – гидрозатвор; 4 – труба Вентури;  
 5 – каплеуловитель

К недостаткам полых абсорберов помимо их низкой эффективности относятся низкие скорости газа (до 1 м/с) и достаточно высокий расход энергии на распыление жидкости.

Распыляющие абсорберы применяются для поглощения хорошо растворимых газов.

### 17.3. Регенерация абсорбентов

*Регенерация абсорбентов* – восстановление сорбционных свойств – осуществляется с целью повторного использования его в циркуляционных (круговых) процессах. При регенерации абсорбента из него выделяется целевой компонент, т. е. происходит обратный процесс – процесс десорбции.

Десорбцию можно проводить путем пропускания десорбирующего агента (инертного газа или водяного пара) через слой отработанного абсорбента.

## **Тема 18. АДСОРБЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ГАЗОВОЗДУШНЫХ ВЫБРОСОВ**

18.1. Теоретические основы процесса адсорбции.

18.2. Промышленные адсорбенты.

18.3. Устройство и принцип действия адсорберов.

### **18.1. Теоретические основы процесса адсорбции**

*Адсорбция* – процесс избирательного поглощения паров, газов или растворенных в жидкости веществ *адсорбентом* – твердым поглотителем.

Процесс адсорбции происходит на поверхности твердого пористого материала – *адсорбента*, поглощаемое вещество называется *адсорбтивом*, а поглощенное вещество – *адсорбатом*.

Различают *физическую* и *химическую адсорбцию* (хемосорбцию).

Адсорбционный процесс складывается из последовательно протекающих стадий:

– *внешняя диффузия*, т. е. диффузия молекул поглощаемого компонента из потока газа к внешней поверхности адсорбента;

– *внутренняя диффузия*, т. е. переход поглощаемого компонента от внешней поверхности внутрь пор адсорбента;

– *сорбция* (конденсация) молекул поглощаемого компонента внутри пор адсорбента.

В качестве адсорбентов или поглотителей используют пористые материалы с высокоразвитой внутренней поверхностью.

### **18.2. Промышленные адсорбенты**

Адсорбенты, применяемые для очистки промышленных выбросов, должны удовлетворять следующим требованиям:



– иметь большую адсорбционную способность – поглощать большие количества адсорбтива при малой его концентрации в газовой фазе;

– обладать высокой селективностью, т. е. выборочностью по отношению к поглощаемому веществу;

– быть химически инертными по отношению к компонентам разделяемой смеси;

– иметь высокую механическую прочность (это требование приобретает особое значение при использовании адсорбентов в аппаратах непрерывного действия);

– обладать способностью к регенерации (восстановлению);

– иметь низкую стоимость.

В плане этих требований наиболее широкое применение в промышленности нашли *активные* (или *активированные*) *угли* (являются наиболее популярными адсорбентами), *силикагели*, *алюмогели* и *цеолиты*.

*Активные угли* – пористые углеродные адсорбенты, содержащие все разновидности пор.

*Молекулярно-ситовые угли* (MSC) отличаются высокой однородностью микропористой структуры и обладают микропорами более узких размеров  $((0,4-0,7) \cdot 10^{-9} \text{ м})$ , имеющих тот же порядок, что и размеры молекул. В силу своих сорбционных свойств молекулярно-ситовые угли используют в очистке влажных газов.

*Активированные углеродные волокна* имеют преимущества перед активными зернистыми углями, заключающиеся в следующем:

– они сочетают хорошие фильтрующие и адсорбционные свойства;

– в отличие от обычных зернистых адсорбентов они обладают хорошими кинетическими параметрами;

– волокнистая форма позволяет создавать адсорбенты в виде тканей, лент, нетканого материала, войлока и т. д.;

– высокая химическая, термическая и радиационная стойкость открывают возможности их использования в значительно более жестких эксплуатационных условиях.

*Силикагели* по своей химической природе представляют собой гидратированные аморфные кремнеземы ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ).

*Алюмогели* (активный оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), как и силикагели, являются гидрофильными адсорбентами с сильно развитой пористой структурой.

*Цеолиты* – алюмосиликаты ( $\text{MeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ ), содержащие в своем составе оксиды щелочных и щелочно-земельных металлов, отличающиеся строго регулярной структурой пор, размеры которых соизмеримы с размерами молекул. Цеолиты подразделяются на природные и синтетические. Уникальные свойства природных цеолитов – высокая селективность поглощения и способность молекулярно-ситового разделения смесей.

*Регенерацию адсорбентов* проводят термическим методом или десорбцией насыщенным, а также перегретым водяным паром или инертным газом. При термической регенерации теряется 5–10 % адсорбента и происходит деструкция адсорбируемого вещества.

### 18.3. Устройство и принцип действия адсорберов

Для очистки газов используют адсорберы *периодического* (аппараты с неподвижным слоем адсорбента) и *непрерывного действия* (аппараты с движущимся или кипящим (псевдооживленным) слоем адсорбента, а также аппараты с неподвижным слоем – установка из двух или большего числа адсорберов, в которых отдельные стадии процесса протекают не одновременно).

*Адсорберы периодического действия.* Процесс очистки в таких аппаратах имеет периодический характер, т. е. отработанный, потерявший активность адсорбент время от времени заменяют либо регенерируют.

*Адсорберы периодического действия с неподвижным слоем адсорбента* используют в случаях, когда обрабатывают большое количество газа или если газ содержит значительные

концентрации адсорбтива, что делает выгодным регенерацию адсорбента.

*Адсорберы кольцевого типа.* Для очистки газов от примесей, присутствующих в небольших концентрациях, можно применять кольцевые адсорберы.

*Вертикальный кольцевой адсорбер.* Эти адсорберы конструктивно сложнее горизонтальных адсорберов, но благодаря большому поперечному сечению шихты более компактны и имеют большую производительность при относительно невысоком гидравлическом сопротивлении.

В ином виде выполнена конструкция *колонного адсорбера*. В колонне адсорбент содержится в сменных корзинах, транспортируемых с помощью раздвижных блоков с ребрами жесткости и снабженных вращающимся устройством, зацепляющим корзины.

*Адсорберы непрерывного действия.* Преимущества непрерывных адсорбционных процессов с движущимся плотным слоем адсорбента следующие:

- высокая скорость парогазового потока в шихте (по сравнению со скоростями в стационарном слое);
- высокий коэффициент использования адсорбента;
- отсутствие энергозатрат на периодическое нагревание и охлаждение в одном и том же аппарате;
- возможность полной автоматизации и простота обслуживания.

*Недостатки непрерывных процессов:*

- высокие требования к прочности зернистого адсорбента (необходимо использовать высокопрочные адсорбенты сферической формы);
- необходимость применения дорогостоящего теплоносителя;
- эрозия аппаратуры;
- низкий коэффициент теплопередачи, что требует больших площадей теплообменных поверхностей в колонне (холодильник, десорбер).

Имеются конструкции адсорберов, в которых стадии адсорбции и десорбции совмещены в одном корпусе. Более интенсивны аппараты *непрерывного действия с движущимся слоем адсорбента и псевдооживленным слоем адсорбента*.

Адсорберы с кипящим слоем поглотителя обычно выполняют многоступенчатыми, так как при одной ступени газ на выходе соприкасается с зернами, насыщенными поглощаемым компонентом, в результате чего происходит частичная десорбция, снижающая эффективность работы аппарата. В корпусе многоступенчатого адсорбера слои адсорбента, расположенные на решетке, приводятся во взвешенное состояние исходной газовой смесью, подаваемой снизу. Удаление газа из аппарата происходит через циклон, служащий для выделения захваченных частиц адсорбента. Адсорбент подается в аппарат сверху, перемещается со ступени на ступень по переточным трубам (рис. 18.1) и удаляется из нижней части корпуса. В результате достигается хорошее извлечение поглощаемого компонента.

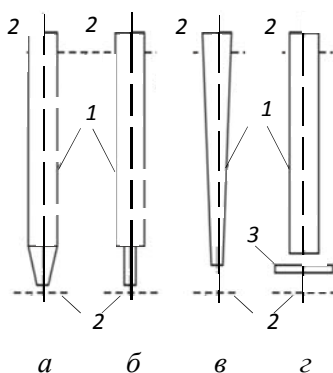


Рис. 18.1. Типы переточных трубок адсорбера:  
*a* – с коническим сужением; *б* – с цилиндрическим сужением;  
*в* – коническая; *г* – с подпорным диском;  
*1* – переточная трубка; *2* – тарелка; *3* – диск

## **Тема 19. ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ ГАЗОВОЗДУШНЫХ ВЫБРОСОВ**

19.1. Методы термической нейтрализации газовых выбросов.

19.2. Каталитическое обезвреживание газов.

19.3. Термическое обезвреживание газов.

19.4. Дезодорация и обеззараживание газозводушных выбросов.

### **19.1. Методы термической нейтрализации газовых выбросов**

*Методы термической нейтрализации (обезвреживание)* основаны на способности горючих токсичных компонентов, входящих в состав вентиляционных или технологических выбросов, сгорать с образованием менее токсичных веществ. Различают каталитическое дожигание, термическое окисление и прямое сжигание.

### **19.2. Каталитическое обезвреживание газов**

*Каталитическое дожигание* (термокатализ) используют для превращения токсичных компонентов, содержащихся в отходящих газах в нетоксичные или менее токсичные путем их контакта с катализатором.

*Достоинства метода:* кратковременность протекания процесса, компактность; небольшая металлоемкость; высокая производительность.

*Недостатки метода:* образование новых веществ, которые часто надо удалять из газа адсорбцией или абсорбцией; в качестве эффективных катализаторов приходится применять дорогостоящие вещества.

Каталитический метод основан на взаимодействии загрязняющих веществ с окислителем или восстановителем на поверхности твердых тел – катализаторов.

*Катализаторы* – конденсированные вещества, способные за счет активности поверхностных частиц ускорять процесс окисления того или иного загрязнителя при температурах ниже температуры воспламенения.

Катализатор представляет собой смесь нескольких веществ (*контактная масса*): каталитически активного вещества, активатора и носителя.

*Каталитически активное вещество* располагается в специальных реакторах в виде насадки из колец, шаров, пластин, свитых в спираль, из нихрома, никеля с нанесенным на поверхность этих элементов слоем благородных металлов микронной толщины и вступает в реакцию обменного действия.

*Активаторы* – вещества, которые повышают активность катализаторов.

*Носители* – основания, на которые наносится катализатор.

По способу взаимодействия газов с катализатором аппараты подразделяют на три группы:

1. *Каталитические реакторы с фильтрующим слоем катализатора.* К аппаратам с фильтрующим слоем относятся емкостные, трубчатые и полочные аппараты, принцип действия которых основан на фильтрации газа через слой неподвижного катализатора.

2. *Каталитические реакторы с пылевидным катализатором.* В аппаратах с пылевидным катализатором измельченный катализатор распыляют в рабочую зону с помощью специальных сопел. Этим достигается более полное использование реакционного объема. Реакция протекает в тот момент, когда частицы катализатора находятся в полете.

3. *Каталитические реакторы со взвешенным слоем катализатора.* Недостатком фильтрующего слоя является наличие зон, плохо омываемых газом в местах соприкосновения гранул катализатора. Достоинством таких аппаратов является хорошая теплопроводность фильтрующего слоя, возможность механизировать и интенсифицировать процесс загрузки и выгрузки катализатора.

### 19.3. Термическое обезвреживание газов

Процесс *термического обезвреживания* осуществляют непосредственной огневой обработкой газовых выбросов при температурах, превышающих температуру воспламенения горючих компонентов выбросов.

*Метод термического окисления (дожига)* заключается в том, что все органические вещества полностью окисляются кислородом воздуха при высокой температуре до нетоксичных соединений. В результате выделяются минеральные продукты, вода, а также теплота, которые требуют дальнейшей их утилизации.

Метод *прямого сжигания или высокотемпературного дожигания* заключается в том, что отходящие газы обеспечивают подвод значительной части энергии, необходимой для осуществления процесса.

Прямое сжигание может осуществляться на установках с открытым *факелом* (в открытой горелке, направленной вертикально вверх) или в *закрытых камерах (печи различных конструкций)*.

### 19.4. Дезодорация и обеззараживание газоздушных выбросов

*Дезодорация* газоздушных выбросов проводится для устранения запаха газовых потоков, содержащих примеси органических и неорганических веществ. В зависимости от воздействия на человека применяются различные методы дезодорации газов.

*Термический и каталитический методы* очистки основаны на процессах деструкции и окисления неприятно пахнущих веществ кислородом воздуха при повышенных температурах в газовой фазе или на поверхности специального катализатора.

*Методы адсорбции* основаны на поглощении неприятно пахнущих веществ твердыми сорбентами, химическими реагентами или специальными составами при обычных температурах.

*Метод биологической очистки* основан на улавливании и ассимиляции влажной массой или водной суспензией, содержащей микроорганизмы.

*Газофазная обработка* включает облучение газов ультрафиолетовыми лучами, введение в газ озона или специальных веществ, способных отражать, маскировать, блокировать восприятие неприятного запаха.

*Термическое и термокаталитическое обезвреживание неприятно пахнущих веществ.* Сущность метода заключается в разложении ингредиентов до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Необходимым условием очистки является достаточное содержание окислителя.

*Адсорбционно-окислительная дезодорация* газовоздушных выбросов (ГВВ) в некоторых случаях проводится на твердых поглотителях с помощью озона. В качестве адсорбентов применяются активированный уголь, цеолиты, силикагели.

*Биохимические методы газоочистки* основаны на способности микроорганизмов разрушать и преобразовывать различные соединения. Разложение веществ происходит под действием ферментов, вырабатываемых микроорганизмами под влиянием отдельных соединений или группы веществ, присутствующих в очищаемых газах.

*Биосорбционная дезодорация* – сочетание адсорбции одорантов различными сорбентами с последующим их биохимическим окислением микроорганизмами, образующим биопленку на поверхности сорбента. В качестве сорбентов используют торф, древесные опилки, шлам от очистных установок.

Одним из наиболее эффективных средств дезодорации и обеззараживания является озон. Метод озонирования имеет целый ряд преимуществ: высокая окислительная активность по отношению к спиртам, нефтепродуктам, фенолам и другим сложным соединениям; доступность сырья (кислород воздуха) для получения озона, технологическая гибкость и незначительный расход кислорода.



## **Тема 20. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ПЫЛЕГАЗОВЫХ ПОТОКОВ**

20.1. Преимущества предварительной подготовки пылегазовых потоков к очистке.

20.2. Акустическая обработка пылегазовых потоков.

20.3. Искусственная ионизация запыленного воздуха.

20.4. Методы охлаждения запыленных газов.

20.5. Охлаждение газа в поверхностных теплообменниках.

20.6. Охлаждение газа разбавлением атмосферным воздухом.

20.7. Охлаждение газа в мокрых контактных теплообменниках.

### **20.1. Преимущества предварительной подготовки пылегазовых потоков к очистке**

В каждом конкретном случае необходимо произвести подготовку подлежащих очистке пылегазовых потоков с таким расчетом, чтобы технологические параметры газов соответствовали оптимальным характеристикам газоочистных аппаратов. Подготовка пылегазовых потоков к очистке проводят следующими способами:

– укрупнением размеров частиц с помощью различных механизмов коагуляции;

– снижением концентрации взвешенных частиц посредством предварительной очистки газов в простых неэнергоёмких аппаратах;

– охлаждением запыленных газов;

– увлажнением запыленных газов в случае применения электрической или мокрой систем очистки;

– подогревом газов для исключения конденсации паров воды и кислот;

– введением в газовый поток специальных добавок.

## **20.2. Акустическая обработка пылегазовых потоков**

*Акустическая обработка* является одним из перспективных методов предварительной обработки пылегазовых потоков с целью укрупнения пылевых частиц.

В результате воздействия звуковых и ультразвуковых колебаний на пылегазовые потоки, содержащие взвешенные частицы, можно при определенных условиях добиться такого колебательного движения частиц, при котором значительно увеличивается столкновение частиц друг с другом, в результате чего они слипаются (коагулируют), образуя крупные частицы.

## **20.3. Искусственная ионизация запыленного воздуха**

В процессе *искусственной ионизации* воздуха пылевые частицы, взаимодействуя с ионами, получают электрический заряд. Частицы, имеющие противоположные по знаку заряды, сталкиваясь между собой, образуют более крупные частицы.

На основе анализа опытов по осаждению пыли с помощью искусственной ионизации воздуха сделан вывод: если число пылинок в воздухе до включения ионизатора принять за 100 %, то через 60 минут после включения установки число пылинок снижается до нуля, т. е. происходит абсолютная очистка воздуха от пыли, или на 80–90 %.

## **20.4. Методы охлаждения запыленных газов**

Существуют следующие методы охлаждения газа:

- охлаждение в поверхностных теплообменниках;
- смешение горячего газа с атмосферным воздухом;
- мокрые способы охлаждения, чаще всего водой.

## **20.5. Охлаждение газа в поверхностных теплообменниках**

*Теплообменными аппаратами* являются устройства, в которых происходит передача тепла от одного (горячего) теплоносителя к другому (холодному).

*Все теплообменные аппараты по способу передачи тепла могут быть разделены на поверхностные и контактные (смесительные).* В поверхностных теплообменниках передача теплоты происходит через разделяющую их твердую стенку из теплопроводного материала. В контактных теплообменных аппаратах передача тепла происходит при непосредственном контакте (смешении) двух теплоносителей: горячего и холодного.

## **20.6. Охлаждение газа разбавлением атмосферным воздухом**

При охлаждении газов за счет разбавления атмосферным воздухом происходит значительное увеличение их объемного расхода. Этот метод находит применение в тех случаях, когда увлажнение газов нежелательно, а также когда нужно доохладить газы после поверхностных теплообменников.

## **20.7. Охлаждение газа в мокрых контактных теплообменниках**

Применение воды в качестве охлаждающей среды позволяет добиться охлаждения газа до более низких температур, чем при охлаждении воздухом, так как вода по сравнению с воздухом обладает большей теплоемкостью, более высокими коэффициентами теплоотдачи и тепловосприятости. В системах газочистки газ большей частью охлаждают непосредственно путем его контакта с водой.

## Список литературы

1. Белов, С. В. Охрана окружающей среды / С. В. Белов. – М. : Высшая школа, 1991.
2. Владимиров, А. М. Охрана окружающей среды / А. М. Владимиров. – Л. : Гидрометеиздат, 1991.
3. Константинова, З. И. Защита воздушного бассейна от промышленных выбросов / З. И. Константинова. – М. : Стройиздат, 1981. – 104 с.
4. Родионов, А. И. Технологические процессы экологической безопасности (Основы энвайронменталистики) : учебник для студентов технических и технологических специальностей / А. И. Родионов, В. Н. Клушин, В. Г. Систер. – 3-е изд., перераб. и доп. – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2000. – 800 с.
5. Лейкин, И. Н. Рассеивание вентиляционных выбросов химических предприятий (проектирование и расчет) / И. Н. Лейкин. – М. : Химия, 1982. – 224 с., ил.
6. Ужов, В. П. Подготовка промышленных газов к очистке / В. П. Ужов, А. Ю. Вальдберг. – М. : Химия, 1975. – 216 с.
7. Оборудование, сооружения, основы проектирования химико-технологических процессов защиты биосферы от промышленных выбросов / А. И. Родионов [и др.]. – М. : Химия, 1985.
8. Экология и безопасность жизнедеятельности : учебное пособие для вузов / Д. А. Кривошеин [и др.] ; под ред. Л. А. Муравья. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2000. – 447 с.
9. Безопасность жизнедеятельности : учебник / под ред. Э. А. Арустамова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательский дом «Дашков и К<sup>о</sup>», 2000. – 678 с.
10. Безопасность жизнедеятельности : учебник для вузов / С. В. Белов [и др.] ; под общ. ред. С. В. Белова. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Высшая школа, 1999. – 448 с.
11. Ветошкин, А. Г. Процессы инженерной защиты окружающей среды (теоретические основы) : учебное пособие / А. Г. Ветошкин. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – 325 с.

12. Техника и технология защиты воздушной среды : учебное пособие для вузов / В. В. Юшин [и др.]. – М. : Высшая школа, 2005. – 391 с.

13. Инженерная экология и экологический менеджмент : учебник / М. В. Буторина [и др.] ; под ред. Н. И. Иванова, И. М. Фадына. – М. : Логос, 2004. – 520 с.

14. Голицын, А. Н. Промышленная экология и мониторинг загрязнения природной среды : учебник / А. Н. Голицын. – М. : Оникс, 2007. – 336 с.

15. Инжорин, М. Н. Дымовые трубы / М. Н. Инжорин ; под ред. М. Н. Инжорина. – М. : Теплотехник, 2004. – 496 с.

16. Швыдкий, В. С. Очистка газов / В. С. Швыдкий, М. Г. Ладыгичев. – М. : Теплоэнергетик, 2005. – 640 с.

Учебное издание

**МАЛЬКЕВИЧ** Наталья Геннадьевна  
**МОРЗАК** Галина Иосифовна

**ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОХРАНЫ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Курс лекций  
для студентов дневной и заочной форм обучения  
специальности 1-57 01 02 «Экологический менеджмент  
и аудит в промышленности»

В 4 частях

Часть 2

**ОХРАНА АТМОСФЕРЫ**

Редактор *Т. Н. Микулик*  
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 05.09.2014. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 3,14. Уч.-изд. л. 2,45. Тираж 70. Заказ 1229.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.